

Université de Sousse  
Ecole Supérieure des Sciences et Technologie  
De Hammam Sousse



# **Annales des exercices et examens**

## **Transmission optique**

Proposé par DR. Hichem Mrabet  
Maitre-assistant en télécommunications

Juillet 2015

### Le TD 1 contient les notions suivantes :

- Indice de réfraction d'un milieu,
- Loi de Snell-Descartes,
- Ouverture numérique d'une fibre optique,
- Principe de réflexion totale,
- Calcul du temps de transmission dans une fibre optique à saut d'indice.

### Le TD 2 comprend les notions suivantes :

- Caractéristique d'une fibre optique multimode à gradient d'indice,
- Déterminer le régime d'une fibre optique en utilisant la fréquence normalisée (réduite),
- Calcul du nombre de mode qui se propage dans une fibre optique,
- Calcul de la puissance optique à la sortie de la fibre optique.

### Le TD 3 inclut les notions suivantes :

- Calcul de l'élargissement temporel dû à la dispersion chromatique,
- Calcul de l'élargissement temporel dû à la dispersion intermodale,
- Calcul de la bande passante d'une fibre optique,
- Caractérisation des émetteurs (Laser DFB, Laser Fabry-Pérot) et des récepteurs optiques (PIN).

### Le TD 4 introduit les notions suivantes :

- Calcul de bilan d'une liaison optique,
- Calcul de la portée d'une liaison optique,
- Calcul du débit binaire d'une liaison optique,
- Calcul de la bande passante kilométrique d'une fibre optique.

### EXERCICE 1

Le tableau ci-contre donne les longueurs d'onde, dans le vide, de deux radiations monochromatiques et les indices correspondants pour deux types de verre différents.

Couleur	$\lambda_0$ (nm)	$n$ (crown)	$n$ (flint)
rouge	656,3	1,504	1,612
bleu	486,1	1,521	1,671

- 1) Calculer les fréquences de ces ondes lumineuses. Dépendent-elles de l'indice du milieu ? On prendra  $C = 2,998.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .
- 2) Calculer les célérités et les longueurs d'onde de la radiation rouge dans les deux verres.
- 3) a) Un rayon de lumière blanche arrive sur un dioptre plan air-verre, sous l'incidence  $i = 60^\circ$ . L'indice de l'air est pris égal à 1. Rappeler les lois de Descartes relatives à la réfraction de la lumière.  
b) Calculer l'angle que fait le rayon bleu avec le rayon rouge pour un verre crown, puis pour un verre flint. Faire une figure.  
c) Quel est le verre le plus dispersif ?

### EXERCICE 2

Un rayon lumineux se propage en ligne droite dans un milieu d'indice  $n_1 = 1,33$ .

Ce rayon pénètre, à travers une surface de séparation plane, dans un deuxième milieu d'indice  $n_2 = 1,5$ . L'angle d'incidence est  $i_1 = 30^\circ$ .

1-Calculer l'angle réfracté  $i_2$  et faire un schéma.

2- Calculer l'angle minimum de réflexion totale lorsque le rayon se propage du milieu 2 vers le milieu 1 (faire un schéma).

### EXERCICE 3

a) Démontrer l'expression de l'ouverture numérique d'une fibre à saut d'indice, d'indice de cœur ( $n_c$ ) et d'indice de gaine ( $n_g$ ) en utilisant la loi de Descartes en deux points de la fibre :

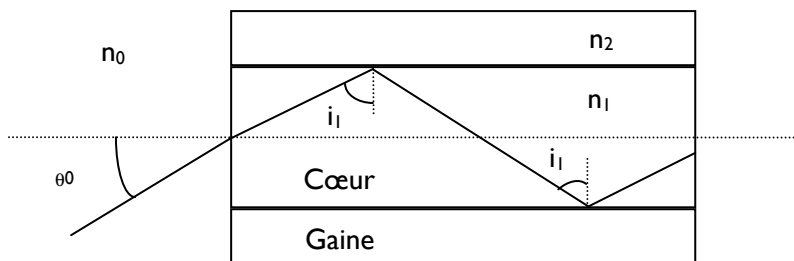
$$O.N = \sin \theta_0 = (n_c^2 - n_g^2)^{1/2}$$

b) Calculer l'ouverture numérique de cette fibre dont le cœur a pour indice  $n_c = 1,5$  et la gaine  $n_g = 1,4$ .

c) Un rayon qui frappe la face d'entrée d'une telle fibre avec un angle d'incidence de  $40^\circ$  : est ce que c'est un rayon guidé dans la fibre ou un rayon réfracté ?

### EXERCICE 4

La propagation d'un rayon lumineux à l'aide d'une fibre optique à saut d'indice peut être schématisée par la figure ci-dessous :



On donne :  $n_0 = 1,2$  Longueur de la fibre :  $L = 2 \text{ km}$ ,  $n_1 = 1,85$  et  $n_2 = 1,5$ .

1. Calculer l'angle minimal  $i_{1R}$  qui permet la réflexion totale du rayon dans la fibre.
2. Calculer l'angle maximal  $\theta_{0MAX}$  qui autorise la propagation du signal dans la fibre.
3. Pour le mode de propagation en ligne droite sans réflexions, calculer le temps de transmission d'une information dans cette fibre ( $t_1$ ).

### EXERCICE 1

Une fibre multimode à gradient d'indice a un cœur dont l'indice possède un profil parabolique :

$$\left\{ \begin{array}{l} n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2} \text{ pour } r < a \\ n(r) = n_2 \text{ pour } r \geq a \end{array} \right.$$

- $n_1$  est la valeur de l'indice sur l'axe de révolution de la fibre, ( $r = 0$ ) ;
- $n(r)$  est la valeur de l'indice à la distance  $r$  de l'axe ;
- $n_2 = n(a)$  est la valeur constante de l'indice de la gaine ;
- $a$  est le rayon du cœur ;
- $\Delta$  est la différence relative d'indice.

On donne :

$$\Delta = 10^{-2}$$

$$n_1 = 1,445$$

$$2a = 62,5 \mu\text{m}$$

Pour une telle fibre, on définit l'O.N locale :  $ON(r) = \sqrt{n(r)^2 - n_2^2}$

pour chaque valeur de  $(r)$ , distance par rapport à l'axe du point d'impact du rayon incident sur l'interface air-cœur.

1. Exprimer  $ON(r)$  en fonction de  $r$ ,  $n_1$ ,  $\Delta$  et  $a$ .
2. Calculer l'ouverture numérique maximale  $ON_{\max}$ .
3. En utilisant la formule d'approximation :  $(1 + \varepsilon)^n \cong (1 + n\varepsilon)$  si  $\varepsilon$  est très petit. Exprimer  $ON(r)$  en fonction de  $ON_{\max}$ ,  $r$  et  $a$ .
4. En déduire la valeur maximale de l'angle d'acceptance  $\theta_{\max}$ .
5. Que vaut l'angle d'acceptance pour des rayons entrants à  $r = a/2$  de l'axe de la fibre ?

### EXERCICE 2

Une fibre à saut d'indice possède les caractéristiques suivantes : indice du cœur :  $n_1 = 1,5$  ; indice de la gaine :  $n_2 = 1,495$  et le diamètre du cœur :  $2a = 9 \mu\text{m}$ .

1. Calculer l'angle maximal d'admission  $\theta_{0\max}$ , ou angle d'acceptance de la fibre, dans le cas où le milieu externe est l'air.
2. Donner l'expression de l'angle maximal d'admission  $\theta_{0\max}$ , ou angle d'acceptance de la fibre, dans le cas où le milieu externe est un liquide d'indice  $n$ . (on donnera l'expression en fonction de  $n$ ).
3. Est-ce que le milieu externe influe sur l'ouverture Numérique ? Expliquer.
4. Calculer la fréquence normalisée de cette fibre dans le cas de la question (1) aux longueurs d'onde de  $1,3 \mu\text{m}$  et de  $1,55 \mu\text{m}$ .
5. Donner la limite des domaines monomodes et multimodes pour les deux longueurs d'onde en fonction de l'indice  $n$  du milieu extérieur, (cas de la question 2.).

### EXERCICE 3

On se donne une fibre optique (dans l'air), d'un cœur  $a = 5 \mu\text{m}$ , d'indice de cœur  $n_1 = 1,5$  et d'indice de gaine  $n_2 = 1,4$ . Une étude sur cette fibre a donné une fréquence réduite (normalisée)  $V = 10,91$ .

1. Donner le régime de la fibre optique.
2. Calculer la longueur d'onde d'injection.

3. Quel est le nombre de modes qui se propagent dans la fibre optique.

#### EXERCICE 4

Les caractéristiques d'une fibre optique multimode à gradient d'indice sont :

-Bande passante : **500MHz.km**

-Affaiblissement : **5 dB / km**

-La longueur de la fibre est **L = 500m**.

1- On désire transporter une information numérique provenant du codage d'un signal analogique. Calculer la fréquence maximale du signal analogique si on veut récupérer toute l'information après transmission.

2- La fibre transporte maintenant un signal analogique d'une puissance de **250mW** à l'entrée de la fibre. Calculer la puissance du signal optique en sortie du dispositif.

### **EXERCICE 1**

Une liaison optique de longueur 6 km utilisant une fibre multimode à saut d'indice ayant un indice de réfraction du cœur égal à 1,5.

1. Démontrer que la dispersion intermodale due à la différence de retard entre le mode le plus lent et le mode le plus rapide à la sortie de la fibre est égale à  $\Delta\tau_{im} = \frac{Ln_1}{c} \left( \frac{n_1-n_2}{n_2} \right)$
2. Calculer  $\Delta\tau_{im}$  lorsque  $\frac{n_1-n_2}{n_2} = 1\%$
3. Quel est le débit binaire maximum qui peut être obtenue sans erreurs importantes sur le lien en supposant qu'il y a seulement la dispersion intermodale;
4. Calculer le produit de la largeur de bande de longueur correspondant à (3).

### **EXERCICE 2**

Une fibre multimode à gradient d'indice présente un élargissement d'impulsion totale de 0,1  $\mu$ s sur une distance de 15 km. On demande d'estimer:

- (a) La bande passante maximale possible sur le lien en supposant qu'il n'y a aucune interférence entre symboles;
- (b) La dispersion d'impulsions par unité de longueur;
- (c) Le produit de la largeur de bande fois longueur de la fibre.

### **EXERCICE 3**

Une diode laser à cavité de Fabry Pérot est caractérisée par une longueur d'onde centrale égale à 1300nm, un indice du matériau égal à  $n=3.5$  et une longueur  $L=0.5$ mm.

On demande l'espace entre les modes longitudinaux ainsi que leur nombre total sachant que la largeur spectrale de la diode laser est égale à 5nm.

### **EXERCICE 4**

Une photodiode a une sensibilité de 0,65A/W à 0,9 $\mu$ m lorsqu'elle est polarisée en inverse par une tension de 20V. Calculer le courant électrique fourni par la diode si sa surface reçoit un flux énergétique de 5 $\mu$ W. Quel est son rendement quantique?

### **EXERCICE 5**

On considère une liaison optique constituée d'un laser DFB caractérisé par un indice égal à  $n=3.5$  et une largeur spectrale égale à  $\Delta\lambda=0.1$ nm, d'une fibre monomode de longueur 20km caractérisée par un coefficient d'atténuation égale à  $\alpha=0.3$ db/km et une photodiode de type PIN de sensibilité  $S=0,65$ A/W.

1. Calculer la longueur d'onde d'émission de la source laser sachant que le pas du réseau de diffraction est égal à 0,221 $\mu$ m.
2. En déduire l'élargissement temporel des impulsions du à la dispersion chromatique sachant que le coefficient de la dispersion chromatique de la fibre est égal à  $D_c=3.5$ ps/(nm $\times$ km) à 1,3 $\mu$ m et égal à  $D_c=17$ ps/(nm $\times$ km) à 1,55 $\mu$ m.
3. Calculer l'atténuation totale de la fibre monomode employée.
4. Calculer le rendement quantique de la photodiode sachant que la constante de Planck  $h=6.6\times 10^{-34}$ m<sup>2</sup>kg/s, la charge de l'électron  $q=1,6\times 10^{-19}$ C et la vitesse de la lumière dans le vide  $C=3.10^8$ m/s.

## EXERCICE 1

Un opérateur de télécommunication veut connecter 64 abonnés sur un réseau optique passif(PON) en utilisant des coupleurs 1×4 en cascade.

L'émetteur est une diode laser de type Fabry Pérot couplant une puissance moyenne de 6mW dans la fibre avec une largeur spectrale égale à 5nm. La diode laser de type Fabry Pérot possède un pourcentage de couplage dans la fibre égal à 50%.

La fibre optique monomode G.652 employée est de dispersion chromatique  $D=3.5\text{ps}/(\text{km.nm})$  à  $1.3\mu\text{m}$  et possède une atténuation linéique égale à 2.5dB/km.

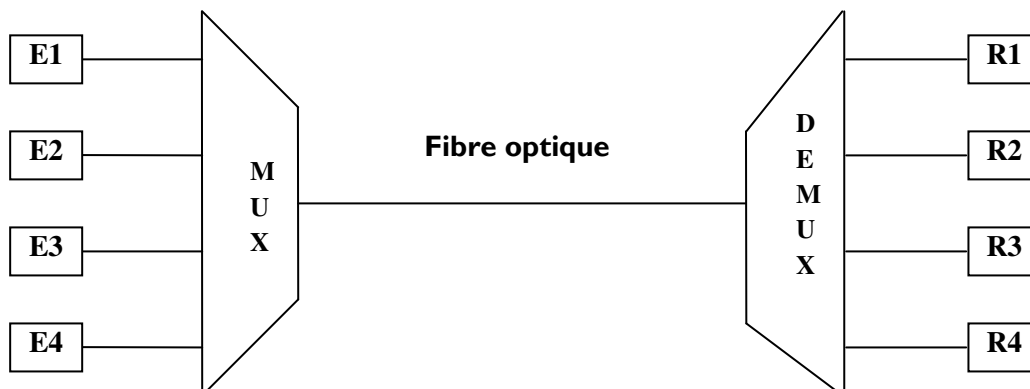
Il y a un connecteur de perte égale à 1dB entre les différents composants de la liaison optique. Le coupleur 1×4 présente une perte de l'ordre de 3dB. On suppose que les coupleurs 1×4 en cascade sont reliés à travers une fibre optique monomode G.652. Le dernier coupleur 1×4 de la liaison est relié à l'unité optique du réseau(ONU) à travers une fibre optique monomode G.652.

Le récepteur est une photodiode PIN caractérisée par une sensibilité égale à 0.5A/W et un niveau minimum de détection égal à -64dBm.

- 1) Donner un schéma de l'ensemble de la liaison du système.
- 2) Quel est le nombre total de coupleurs 1×4 nécessaires pour cette liaison ?
- 3) Quel est le nombre total de connecteurs nécessaires pour cette liaison ?
- 4) Calculer la puissance moyenne couplée dans la fibre en dBm.
- 5) Etablir le bilan de liaison du système sachant qu'on ajoute une marge égale à 6dB.
- 6) Calculer la portée de la liaison du système.
- 7) En déduire le débit binaire de la liaison du système.

## EXERCICE 2

Soit le système WDM optique formé par 4 émetteurs, un multiplexeur (MUX), une fibre optique monomode, un démultiplexeur (DEMUX) et 4 récepteurs représenté par le schéma suivant :



Sachant qu'il y a un connecteur entre l'émetteur et le multiplexeur, entre le multiplexeur et la fibre optique, entre la fibre optique et le démultiplexeur et entre le démultiplexeur et le récepteur. Le connecteur introduit une perte de 0.5dB.

L'émetteur est une diode laser qui fournit une puissance moyenne  $P_e=20\text{mW}$  et possède une largeur spectrale égale à 0.1nm.

Le multiplexeur et le démultiplexeur introduisent chacun une perte égale à 3 dB.

Le récepteur est une photodiode PIN de puissance moyenne de réception égale à -64 dBm pour un taux d'erreur TEB= $10^{-9}$ .

1. Quelle est l'utilité de multiplexeur (MUX) et de démultiplexeur (DEMUX) dans le système WDM optique.
2. Etablir le bilan de liaison sachant qu'on ajoute une marge de 4 dB.
3. Donner la portée de cette liaison sachant que la fibre utilisée possède un coefficient d'atténuation linéique  $\alpha = 0.5 \text{ dB/km}$ .
4. Calculer l'élargissement temporel des impulsions et en déduire le débit binaire de la liaison optique sachant que la fibre optique possède un coefficient de dispersion chromatique  $D=17\text{ps}/(\text{km.nm})$  à  $1.5\mu\text{m}$ .
5. Quelle solution proposez-vous pour atteindre une portée égale à 300km avec le même taux d'erreur binaire? Donner le nouveau schéma de la liaison optique.

### **EXERCICE 3**

On transmet un signal numérique à 155Mbit/s, sur une fibre optique multimode 62.5/125 ( $\alpha = 0.9\text{dB/km}$ ) aux spécifications de l'UIT (Union Internationale des Télécommunications).

La longueur d'onde est de  $1.3\mu\text{m}$  et on utilise :

- une DEL couplant  $50\mu\text{W}$  crête dans la fibre optique ;
- des connecteurs de perte unitaire 0.5dB ;
- un récepteur de puissance équivalente de  $3\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

1. Calculer la puissance moyenne d'émission et de réception.
2. Etablir le bilan de liaison et calculer la distance qu'il est possible de couvrir pour une probabilité d'erreur de  $10^{-9}$  avec une marge de 3dB.
3. Préciser si cette distance est limitée par l'atténuation ou par la dispersion.

### **EXERCICE 4**

1. Quelle puissance optique moyenne faut-il pour recevoir un signal à 622 Mbit/s en code NRZ, avec une probabilité d'erreur de  $10^{-10}$ , et un récepteur dont la PEB (Puissance Equivalente de Bruit) est de  $5\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  ?
2. Quelle distance peut-on parcourir sur une fibre monomode standard à  $1.3\mu\text{m}$  ( $\alpha = 0.42\text{dB/km}$ ) avec à la source une diode laser de puissance crête 1mW, en prenant une marge de 3dB ? On utilise des connecteurs de 0.2dB d'atténuation entre le laser et la fibre et la fibre et le récepteur optique d'autre part.
3. Risque-t-on d'être limité par la dispersion chromatique.

**N.B** : On donne les valeurs numériques qui lient le facteur Q et la probabilité d'erreur ( $P_E$ ).

<b>Q</b>	5	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.4
<b>P<sub>E</sub></b>	$3.10^{-7}$	$10^{-7}$	$3.10^{-8}$	$10^{-8}$	$3.10^{-9}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$



**N.B : La clarté des réponses sera prise en considération.**

### **EXERCICE 1**

1. Démontrer l'expression de l'ouverture numérique d'une fibre d'indice de cœur  $n_{\text{cœur}}$  et d'indice de gaine  $n_{\text{gaine}}$ .
2. Calculer l'ouverture numérique d'une fibre dont le cœur a pour indice 1.5 et la gaine 1.4.
3. Un rayon qui frappe la face d'entrée d'une telle fibre avec un angle d'incidence de  $40^\circ$  peut-il être guidé dans la fibre? Que devient-il ?
4. Démontrer l'expression de l'ouverture numérique d'une fibre à saut d'indice en fonction de l'indice de cœur et de la différence relative d'indice  $\Delta$ .
5. Quelle est l'ouverture numérique d'une fibre ayant pour différence relative d'indice  $\Delta$  de 1% et un cœur d'indice  $n_{\text{cœur}}=1.45$ .

### **EXERCICE 2**

1. Compléter le tableau suivant :

Interface optique d'émission	Longueur d'onde d'émission( $\lambda$ )	Largeur spectrale ( $\Delta\lambda$ )	Applications
LED			
Laser Fabry-Pérot			
Laser DFB			
VCSEL			

2. Une photodiode PIN a une sensibilité de  $0,65\text{A/W}$  à  $0,9\mu\text{m}$  lorsqu'elle est polarisée en inverse par une tension de 20V.
  - a) Calculer le courant fourni par la diode si sa surface reçoit un flux énergétique de  $5\mu\text{W}$  (puissance optique).
  - b) Quel est son rendement quantique?

**N.B :** On donne les constantes suivantes :

La constante de Planck est  $h=6,62\times 10^{-34}\text{J.s}$  et la charge de l'électron  $q=1,6\times 10^{-19}\text{C}$ .

### **EXERCICE 3**

On se donne une fibre optique (dans l'air), d'un cœur  $a=5\mu\text{m}$ , d'indice de cœur  $n_1=1,5$  et d'indice de gaine  $n_2=1,4$ . Une étude sur cette fibre a donné une fréquence réduite (normalisée)  $V=10,91$ .

1. Donner le régime de la fibre optique.
2. Calculer la longueur d'onde d'injection.
3. Quel est le nombre de modes qui se propagent dans la fibre optique.

**Bon travail**

### **EXERCICE 1**

1. Quel est le phénomène de dispersion qui caractérise les fibres optiques multimodes. Quel type de fibre multimode qui minimise cette dispersion ? Justifier la réponse.
2. Donner le schéma de liaison d'un système optique multiplexé en longueur d'onde(WDM).
3. Donner la relation qui relie la puissance moyenne de réception  $P_{mr}$  et le Q factor. Expliquer la signification de tous les termes.

### **EXERCICE 2**

On considère une liaison optique constituée d'un laser DFB caractérisé par un indice égal à  $n=3.5$  et une largeur spectrale égale à  $\Delta\lambda=0.1nm$ , d'une fibre monomode de longueur 20km caractérisée par un coefficient d'atténuation égale à  $\alpha=0.3db/km$  et une photodiode de type PIN de sensibilité  $S=0,65A/W$ .

1. Calculer la longueur d'onde d'émission de la source laser sachant que le pas du réseau de diffraction est égal à  $0,221\mu m$ .
2. En déduire l'élargissement temporel des impulsions du à la dispersion chromatique sachant que le coefficient de la dispersion chromatique de la fibre est égal à  $D=3.5ps/(nm \times km)$  à  $1,3\mu m$  et égal à  $D=17ps/(nm \times km)$  à  $1,55\mu m$ .
3. Calculer l'atténuation totale de la fibre monomode employée.

### **EXERCICE 3**

On considère un réseau optique passif(PON) composé de 64 abonnés en utilisant des coupleurs  $1 \times 4$  en cascade.

L'émetteur est une diode laser de type Fabry Pérot couplant une puissance crête de 6mW dans la fibre avec une largeur spectrale égale à 5nm. La diode laser de type Fabry Pérot possède un pourcentage de couplage dans la fibre égal à 50%.

La fibre optique monomode G.652 employée est de dispersion chromatique  $D=3.5ps/(km.nm)$  à  $1.3\mu m$  et possède une atténuation linéique égale à 2.5dB/km.

Il y a un connecteur de perte égale à 1dB entre les différents composants de la liaison optique. Le coupleur  $1 \times 4$  présente une perte de l'ordre de 3dB. On suppose que les coupleurs  $1 \times 4$  en cascade sont reliés à travers une fibre optique monomode G.652. Le dernier coupleur  $1 \times 4$  de la liaison est relié à l'unité optique du réseau(ONU) à travers une fibre optique monomode G.652.

Le récepteur est une photodiode PIN caractérisée par une sensibilité égale à 0.5A/W et un niveau minimum de détection égal à -64dBm.

- 1) Donner un schéma de l'ensemble de la liaison du système PON.
- 2) Quel est le nombre total de coupleurs  $1 \times 4$  nécessaires pour cette liaison ?
- 3) Quel est le nombre total de connecteurs nécessaires pour cette liaison ?
- 4) Calculer l'espacement entre les modes longitudinaux(raies) ainsi que leur nombre total de la diode laser Fabry Pérot sachant qu'il est caractérisé par une longueur d'onde centrale égale à  $1.3\mu m$ , un indice de matériau :  $n=3.5$  (on fera  $n=N$ , indice de groupe) et une longueur  $L=0.5mm$ .
- 5) Calculer la puissance moyenne couplée dans la fibre en dBm.
- 6) Etablir le bilan de liaison du système PON sachant qu'on ajoute une marge égale à 6dB.
- 7) Calculer la portée de la liaison du système PON.
- 8) En déduire la bande passante de la liaison du système PON.

**Bon travail**

### **EXERCICE 1** (8 points)

1. Donner le schéma qui contient les éléments d'un système sur fibre optique. Expliquer le rôle de chaque élément.
2. Citer les quatre familles de liaison optique utilisées dans les réseaux LANs et MANs (émetteurs optique, type de fibre et longueur d'onde d'émission)
3. Quelles sont les applications de la fibre optique monomode standard?
4. Pourquoi dans la transmission optique, il y a trois fenêtres de transmission? citer les longueurs d'onde utilisées pour chaque fenêtre.
5. Enumérer les étapes de fabrication d'une fibre optique.

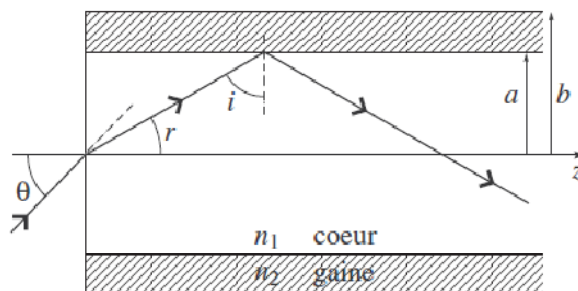
### **EXERCICE 2** (6points)

On veut utiliser à  $1.55\mu\text{m}$  une fibre optique qui doit être monomode à partir de  $1.2\mu\text{m}$  et ayant les caractéristiques suivantes :  $n_1=1.47$  : indice du cœur et  $\Delta = 2.7 \cdot 10^{-3}$  : différence relative d'indice.

1. Calculer le rayon du cœur de la fibre.
2. Calculer la fréquence normalisée de cette fibre.
3. En déduire le nombre de modes qui se propagent dans cette fibre.

### **EXERCICE 3** (6points)

On considère une fibre optique à saut d'indice, formée d'un cœur cylindrique d'axe (Oz), de rayon  $a$ , d'indice uniforme  $n_1$ , entouré d'une gaine d'axe (Oz), de rayon extérieur  $b$ , et d'indice  $n_2 < n_1$ . Le milieu extérieur est l'air. Un rayon pénètre dans la fibre avec une incidence (voir figure ci-contre).



- 1) Montrer que le rayon lumineux est guidé dans le cœur (c'est-à-dire qu'il n'en sort pas) si l'angle  $i$  est supérieur à une valeur critique  $i_c$ , que l'on exprimera en fonction de  $n_1$  et  $n_2$ . Calculer  $i_c$ , pour  $n_1 = 1,456$  (silice) et  $n_2 = 1,410$  (silicone).
- 2) Exprimer, en fonction de  $n_1$  et  $n_2$ , l'angle limite  $\theta_0$  d'incidence du rayon sur la face d'entrée de la fibre optique, correspondant à une propagation possible dans la fibre.
- 3) On définit l'ouverture numérique d'une fibre par la grandeur  $O.N. = n_0 \cdot \sin \theta_0$ , où  $n_0 = 1$ , ici (air). Calculer l'ouverture numérique de la fibre en silice/silicone.
- 4) La fibre optique est maintenant coudée. Expliquer en utilisant un schéma pourquoi une partie des rayons guidés dans la tranche rectiligne ne le sont plus dans la partie coudée.

**Bon travail**

### **EXERCICE 1** (6 points)

On transmet un signal numérique à 155Mbit/s, sur une fibre optique multimode 62.5/125 ( $\alpha = 0.9\text{dB/km}$ ) aux spécifications de l'UIT (Union Internationale des Télécommunications).

La longueur d'onde est de  $1.3\mu\text{m}$  et on utilise :

- une DEL couplant  $50\mu\text{W}$  crête dans la fibre optique ;
- des connecteurs de perte unitaire  $0.5\text{dB}$  ;
- un récepteur de puissance équivalente de  $3\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

1. Calculer la puissance moyenne d'émission et de réception.
2. Etablir le bilan de liaison et calculer la distance qu'il est possible de couvrir pour une probabilité d'erreur de  $10^{-9}$  avec une marge de  $3\text{dB}$ .
3. Préciser si cette distance est limitée par l'atténuation ou par la dispersion.

### **EXERCICE 2** (6points)

- Compléter le tableau suivant :

Fenêtre	Première	Deuxième	Troisième
Emetteur			
Type de fibre			
Récepteur			
Application			

- Donner le schéma d'une liaison de diffusion vidéo GPON (Gigabit Passive Optical Network). Expliquer l'utilité de chaque composant optique.

### **EXERCICE 3** (8points)

Un signal numérique utilisé à 50Mbit/s (code bloc 4B5B) pour la liaison descendante et à 10Mbit/s (Code de Manchester) pour la liaison montante doit être transmit à travers 4km entre un terminal et le réseau. Pour ce faire, les composants suivants sont utilisés:

- Fibres optiques 62.5/125;
- LED à  $1.3\mu\text{m}$  couplant une puissance crête  $50\mu\text{W}$  dans la fibre optique;
- LED à  $0.85\mu\text{m}$  couplant une puissance crête  $40\mu\text{W}$  dans la fibre optique;
- Connecteurs avec perte de  $0.5\text{dB}$  l'unité;
- Photodiode de Silicium(Si) avec une PEB de  $4\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  et une probabilité d'erreur  $10^{-9}$  ;
- Photodiode de Germanium(GaInAs) avec une PEB de  $3\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$  et une probabilité d'erreur  $10^{-9}$ ;
- Multiplexeurs en longueurs séparant les deux fenêtres, avec perte de  $0.5\text{dB}$  à la longueur d'onde d'émission.

1. Avec l'aide de bilan de liaison, comparer la solution utilisant une seule fibre optique et la solution utilisant une fibre par direction sachant qu'on prévoit une marge de  $3\text{dB}$ . Dans chaque cas, spécifier les composants utilisés et proposer un schéma de la liaison.
2. Vérifier que la liaison n'est pas limitée par la dispersion (en précisant quelle est la dispersion dominante) sachant que les diodes LED possèdent une largeur spectrale de  $50\text{nm}$  et la dispersion chromatique de la fibre est approximativement  $100\text{ps/km/nm}$  à  $0.85\mu\text{m}$ .
3. A votre avis quelle est la meilleure solution? Pourquoi?

**EXERCICE 1** (6points)

- a) Expliquer par un schéma la propagation d'un rayon incident dans les cas suivants :
1. Fibre optique multimode à saut d'indice,
  2. Fibre optique multimode à gradient d'indice,
  3. Fibre optique monomode à saut d'indice.
- b) Expliquer la technique de modulation d'une transmission numérique sur fibre optique.

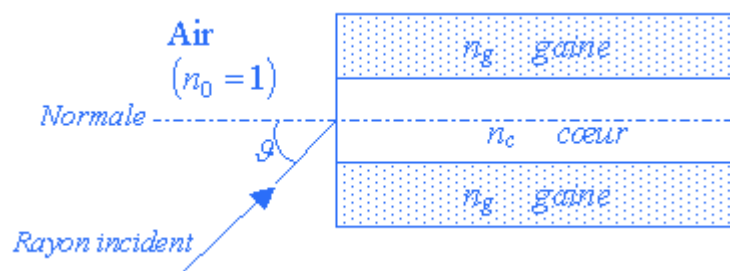
**EXERCICE 2** (6 points)

Compléter le tableau de familles de liaisons optiques suivant :

Famille	Réseaux locaux	Réseaux locaux Haut débit	Réseaux Métropolitains	Réseaux Etendus
Longueur d'onde d'émission				
Emetteur optique				
Type de fibre				

**EXERCICE 3** (8points)

Une fibre à saut d'indice plongée dans l'air  $n_0 = 1$  est formée d'une gaine d'indice  $n_g$  entourant un cœur d'indice  $n_c$ .



- 1) Tracer la trajectoire d'un rayon incident ayant un angle d'incidence de  $30^\circ$  si l'indice de cœur vaut 1.45 et l'indice de gaine vaut 1.44 ?
- 2) Quelle relation doivent vérifier  $n_g$ ,  $n_c$  et  $i$  pour qu'un rayon entrant dans la fibre avec un angle d'incidence  $\theta$  se propage dans le cœur de la fibre ?
- 3) On définit l'ouverture numérique de la fibre par :  $O.N = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$ 
  - a) Calculer l'indice de gaine sachant que :  $n_c = 1,5$  et que  $O.N = n_c \cdot 10^{-1}$  ?
  - b) Déterminer dans ce cas la valeur maximale de l'angle d'incidence  $\theta$  pour qu'il y ait transmission du rayon ?

**Bon travail**

### EXERCICE 1 (8 points)

1. Compléter le tableau des émetteurs optiques suivant :

Emetteur	DEL	VCSEL	Fabry-Pérot	DFB
Puissance couplée				
Spectre				
Utilisations				

2. Donner le principe de fonctionnement d'un réseau de Bragg, ainsi que les domaines d'applications de ce composant optique.

### EXERCICE 2 (12points)

Pour réaliser une liaison de 12km par fibres optiques entre ordinateurs avec un débit minimum exigé de 2 Mbits/s et un taux d'erreur admis de  $10^{-8}$ , vous disposez du choix des composants suivants:

#### Fibres optiques:

- fibre à saut d'indice(FSI): diamètre de cœur 200mm, bande passante 100MHz pour 100m, atténuation 5dB/km, livrée par rouleaux de 1 km.
- fibre à gradient d'indice(FGI): diamètre de cœur 50mm, bande passante 100MHz pour 1km, atténuation 3dB/km, livrée par rouleaux de 1 km.

#### Emetteurs:

- LED: puissance moyenne d'émission 1mW, bande passante 60MHz, perte de couplage -17 dB.
- LASER: puissance moyenne d'émission 10mW, bande passante 600MHz, perte de couplage -3dB.

#### Détecteurs:

- Photodiode PIN: sensibilité 0.5 A/W, bande passante 1GHz. Niveau minimum de détection à 2 Mbits/s avec taux d'erreur  $10^{-8}$ : -52 dBm.
- Photodiode PPPN: sensibilité 50 A/W, bande passante 1GHz. Niveau minimum de détection à 2 Mbits/s avec taux d'erreur  $10^{-8}$ : -64 dBm.

#### Connectique:

- Connecteur à l'émetteur: pertes de 1 dB.
- Connecteur au récepteur: pertes de 1 dB.
- Epissure par soudage: pertes de 0.3dB.

On désire comparer les deux solutions suivantes :

**Première solution** : LASER+FGI+PIN.

**Deuxième solution** : LED+FGI+PPPN.

1. Donner un schéma de liaison optique pour les deux solutions.
2. Établir le bilan de liaison pour chaque solution sachant qu'on ajoute une marge de 2dB.
3. Comparer les deux solutions en termes d'atténuation disponible.

# **Bibliographie**

- Faouzi Bahloul, Cours fibres optiques. 2007
- Pierre Lecoy, Télécoms sur fibres optiques, Edition Hermes. 2008
- John M. Senior, Optical Fiber Communications Principles and Practice, Third Edition. 2009
- G.P Agrawal, Fiber optic communication systems, Wiley Edition. 2010
- Hichem Mrabet, Cours système d'accès optique.  
[https://www.academia.edu/8218545/support\\_de\\_cours\\_et\\_T.D.\\_syst%C3%A8me\\_dacc%C3%A8s\\_optique](https://www.academia.edu/8218545/support_de_cours_et_T.D._syst%C3%A8me_dacc%C3%A8s_optique), lset'com. 2011
- Y. Jaouen, Systèmes de communications optiques.