

## TD 5 Communications Optiques

### Pertes de couplage et Bilan de liaison optique

#### Rappels: PERTES DE COUPLAGE FIBRE-SOURCE OU FIBRE-DETECTEUR

Considérons une source émettrice de A, placée à l'extrémité d'une fibre optique multimode de rayon a et d'ouverture numérique ON (d'angle d'acceptance  $\theta_a$ ), conformément à la figure 1. La source est distante de la fibre d'une distance d.

#### 1. Pertes de Fresnel

Soit le facteur de réflexion :

$$\text{coeff de réflexion} \rightarrow R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1)$$

La perte de Fresnel est donnée par : *puissance transmise à la fibre*  
*Rapport de Transmission*

$$p_R = 10 \log \frac{P_{trans}}{P_{inc}} = 10 \log T = 10 \log (1 - R). \quad (2)$$

$$T = 1 - R$$

$$T + R = 1$$

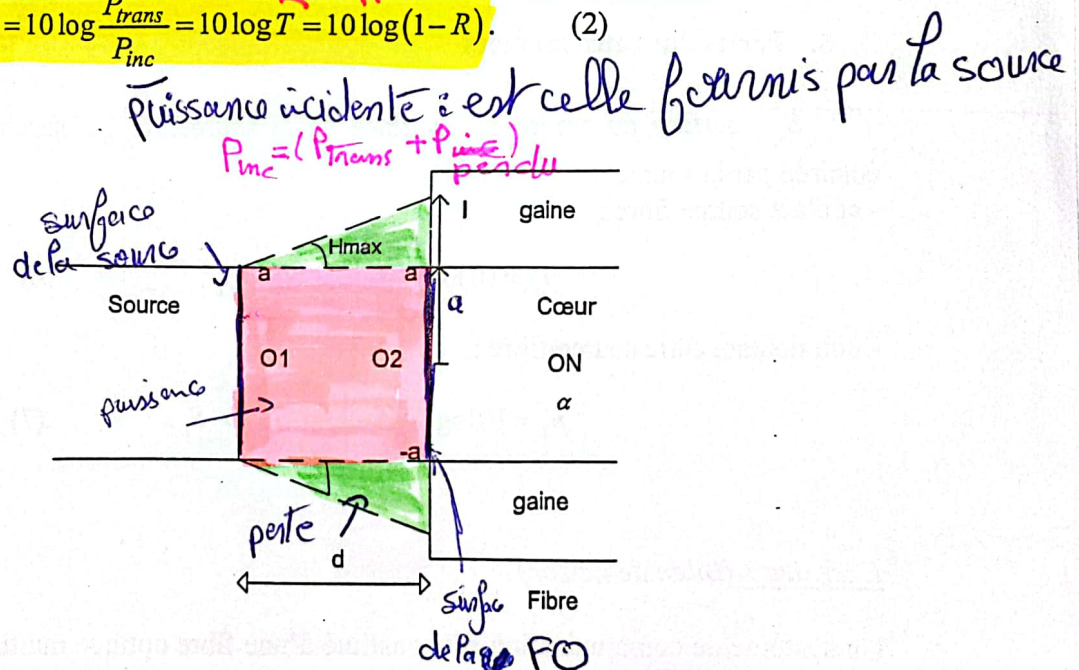


Figure 1. Couplage source-fibre.

## 2. Pertes dues au diagramme de rayonnement/ON de la fibre

On caractérise les sources par l'intensité lumineuse  $I(\theta)$ , avec :

$$I(\theta) = I(0) \cdot \cos^m(\theta) \quad (3)$$

$m$  : caractérise la directivité de la source.

$m=1$  : source lambertienne (rayonnement isotrope) : DEL.

$m=10$  à  $20$  : source laser directive.

$P_{\text{coup}} = P_0 \cdot ON^2 \cdot \frac{m+1}{2}$  : est la puissance couplée à la fibre multimode.

La perte due au couplage fibre-source est :

$$P_{\text{coup}} = 10 \log(ON^2) + 10 \log\left(\frac{m+1}{2}\right) \quad (4)$$

On note que l'efficacité du couplage fibre monomode-source est :

$$\eta_c = \frac{ON^2}{n_0^2} = \sin^2(\theta_a) \cdot I_{\text{max}}$$

$$(5) \rightarrow \eta_c(\text{dB}) = 10 \log(ON^2) = 20 \log(ON)$$

avec  $n_0 = 1$  : l'indice optique de l'air,  $\theta_a$  est l'angle d'acceptance à l'entrée de la fibre. Par exemple :

- Pour  $ON = 0,30$ ,  $\Rightarrow \eta_c = 9\% = -10,5 \text{ dB}$ .
- Pour  $ON = 0,15$ ,  $\Rightarrow \eta_c = 2,2\% = -16,5 \text{ dB}$ .

## 3. Pertes dues aux surfaces

$S_c$  : surface du cœur,  $S_s$  : surface de la source,  $S_{f,e}$  : surface d'entrée de la fibre éclairée par la source.  
- contact source/fibre :

$$p_s = 10 \log\left(\frac{S_s}{S_c}\right), \text{ si } S_s < S_c. \quad (6)$$

- non contact entre source/fibre :

$$p_s = 10 \log\left(\frac{S_c}{S_{f,e}}\right), \text{ si } S_{f,e} > S_c. \quad (7)$$

### Exercice 1 (Bilan de liaison)

Un système de communication est constitué d'une fibre optique multimode dont l'atténuation est  $A = 0,5 \text{ dB/km}$ . La puissance à l'entrée est  $P_e = 10 \text{ mW}$  et la longueur de la fibre est de  $L = 10 \text{ km}$ .

- Calculer la puissance de sortie  $P_s$  en  $\text{mW}$ .
- Quelle longueur  $L$  de la fibre peut-on utiliser si le récepteur est capable de mesurer une puissance minimum de  $20 \mu\text{W}$ .
- On suppose maintenant que le support de transmission est constitué de  $N$  fibres optiques précédents de longueur totale  $L = 10 \text{ km}$ . La première fibre est connectée à l'émetteur avec



une perte de connexion de  $p_c = 1 \text{ dB}$ . La dernière fibre est connectée à un récepteur avec le même type de connecteur. Entre deux fibres, il y a une épissure de fusion  $p_e = 0,2 \text{ dB}$ .

- a- Exprimer le bilan des pertes  $B$  de la liaison fibrée en fonction de  $p_c$ ,  $p_e$ ,  $N$ ,  $L$  et  $A$ .  
b- En déduire la valeur de  $N$  si  $B = 10 \text{ dB}$ .

### Exercice 2 (Bilan de liaison)

Une liaison optique expérimentale est constituée d'un laser à  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ , d'une fibre monomode, d'un amplificateur optique, d'un second tronçon de fibre puis d'un récepteur.

Chaque composant est muni d'une fibre amorce. L'amplificateur est réglé pour fournir un gain de 3 dB dehors pertes des connecteurs.

Chaque connexion fibre à fibre par connecteur occasionne une perte de 0,25 dB.

Le détecteur (puce nue) peut détecter une puissance de  $1 \mu\text{W}$  pour satisfaire le taux d'erreur souhaité au débit de la liaison.

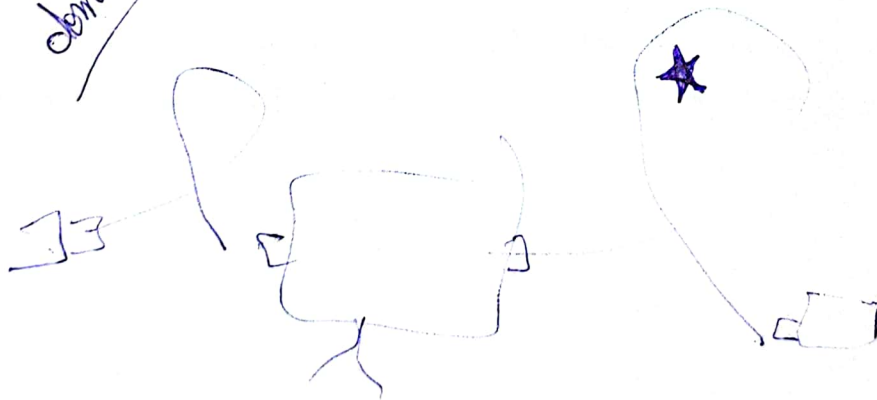
Le taux de recouvrement des surfaces utiles du détecteur (l'indice optique de la couche active de la photodiode est  $n_r = 3,5$ ) avec la fibre amorce (sans compter les réflexions de Fresnel) est de 80%. (Couplage entre la fibre et le détecteur).

Le laser fournit une puissance de 1 dBm en sortie de fibre amorce.

La fibre optique possède une atténuation de  $0,2 \text{ dB/km}$  à la longueur d'onde de travail.

Quelle est la longueur maximale de fibre que l'on peut installer pour que l'atténuation ne soit pas rédhibitoire ?

*dominante*



*SS*

**TD 6 : Réseaux optiques & Haut Débits****Exercice 1**

On considère un multiplexeur téléphonique **MIC** à 30 voies : trame **E1** comporte 32 canaux numérotés de 0 à 31 et de 8 bits chacun; canal 0 et canal 16 servent à la signalisation et le verrouillage

- 1- Quel type de multiplexage est employé ? Quelle est la fréquence d'échantillonnage minimale d'une trame **E1** (norme européenne de **PDH**) ?
- 2- Quelle doit être alors la durée de transmission d'une trame ?
- 3- Donner le débit de chaque intervalle de temps (canal) et le débit total pour le multiplex **E1**.
- 4- Donner le nombre de voies téléphoniques, le débit de chaque intervalle de temps (canal) et le débit total pour les multiplex **T1** (norme américaine de **PDH**)
- 5- Quels supports physiques sont utilisés avec **PDH** ? Quels sont les intérêts de **PDH** ?
- 6- Quels sont les intérêts de **SONET/SDH** (qu'est ce qu'il apporte par rapport à **PDH**) ?
- 7- Quel support physique est utilisé avec **SONET/SDH** ? Combien de temps dure l'émission d'une trame **SONET/SDH** ? Ce temps dépend-il du débit de la ligne physique ?



## Exercice 2

On souhaite analyser le comportement d'un multiplexeur **SDH**. Ce multiplexeur, fonctionnant au niveau **STM-4**, est chargé de gérer le trafic en provenance de **N** terminaux équipés d'interfaces de ligne **E1**. *2048 bit/s*

- 1- Donner les octets de gestion ou de supervision et les octets de charge utile de la trame **STM-4**
- 2- Montrer que ce multiplexeur **SDH** est une extension de celui de **SONET** en donnant la trame **STS** correspondante à celle de **STM-4**.
- 3- Calculer le débit en ligne de cette trame.
- 4- En déduire la capacité de la charge utile exprimée en **bit/s**.
- 5- Sachant que ces terminaux **E1** occupent **72%** de la charge utile, quel est le nombre de terminaux qu'il est possible de multiplexer ?
- 6- On a observé la transmission du flux **STM-4** pendant **96 heures** et nous avons constaté **56 erreurs**. Calculer le taux d'erreur binaire.

## Exercice 3

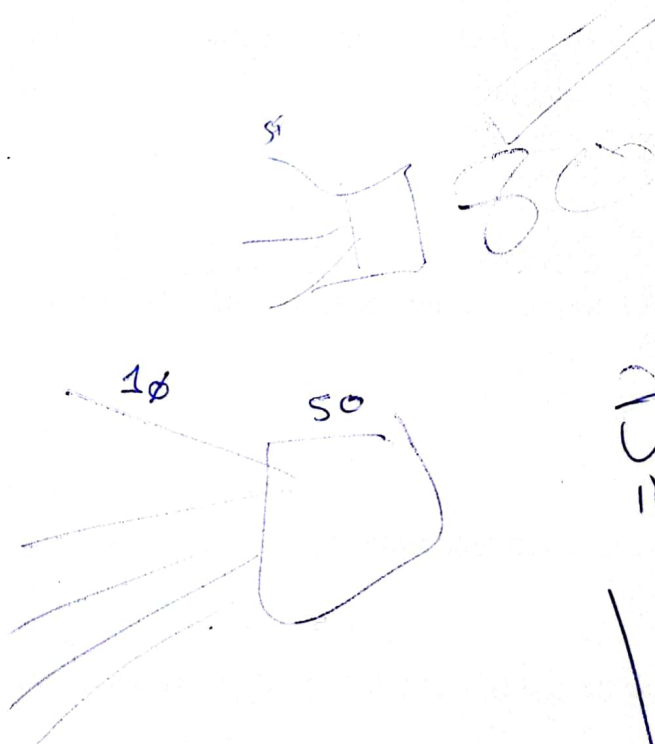
Les techniques de transmission appelées **SONET** et **SDH** transportent de façon synchrone une trame toutes les **125 μs**. Cette trame contient neuf tranches, qui, à leur tour, contiennent de supervision et de données.

- 1- Quelle est la capacité de transmission globale de **STS-1** ?
- 2- Quelle est la capacité de transmission globale de **STM-1** ?
- 3- Quelle est la capacité de transport efficace, c'est-à-dire disponible pour l'utilisateur pour **SONET** et pour **SDH** ?
- 4- Ces interfaces **SONET** et **SDH** multiplexent de nombreux utilisateurs, qui doivent venir mettre leurs paquets dans la trame. Si l'on suppose que tous les clients ont des

paquets d'un seul octet au total et qu'ils n'aient pas le droit que d'en mettre un seul par trame, quel est le débit par utilisateur ? En déduire le nombre de voies téléphoniques que peut transporter un canal SONET et celui de SDH.

- 5- Les versions de base présentées ici sont appelées STS-1 et STM-1. Il existe des multiples de ces versions de base, pour lesquels il suffit de multiplier la longueur de la trame par n pour avoir la version STS-n et STM-n. Aujourd'hui, STS-9, STS-12 et STM-3, STM-4 sont implantés. Quels sont les débits de ces interfaces ? Combien de lignes téléphoniques peut-on y faire passer ?
- 6- On s'en sert pour faire transiter des paquets IP. Si l'on suppose que la longueur moyenne des paquets IP soit de 80 octets, quelle devrait être la puissance d'un routeur Internet qui recevrait trois liaisons STS-18 ou STM-12 ?
- 7- Que peut-on conclure d'après ces deux techniques de transmission synchrones ?

→ pas le Rx Haut débit



100  
60 mba x 4 +

$$C_{\text{max}}(I,8) = \frac{K \cdot 9}{\frac{C_{\text{max}}}{I,8}}$$





ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE GABES  
DEPARTEMENT G.C.R

TD N° 7

Matière : Communications Optiques

Classe : GCR2

Enseignant: M. Chokri BACCOUCH

Exercice 1 (Bilan de liaison)

On désire transmettre 32 voies téléphoniques de 64 kbits/s au moyen d'une fibre optique sur une distance de 10 km. Pour réaliser la liaison, on se propose d'utiliser une fibre optique multimode à saut d'indice possédant les caractéristiques suivantes :

Indice de cœur :  $n_1 = 1,47$  ;  $ON = 0,15$  ; atténuation  $A = 5 \text{ dB/km}$ .

1) En tenant compte uniquement de la dispersion intermodale  $\Delta\tau$ , le choix de la fibre optique est-il réaliste ?

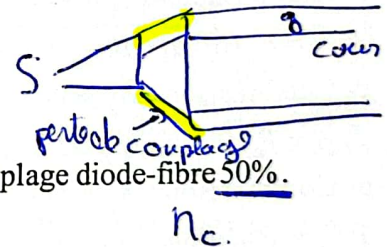
Pour les composants d'extrémité, on a les choix suivant

• Sources d'émission

$S_1$  : Diode électroluminescente émettant une puissance totale de 1 mW. La DEL étant placée dans l'air ( $n_0 = 1$ ) face à l'extrémité de la fibre optique. L'efficacité de couplage  $\eta_c$  est donnée par :

$$\eta_c = (ON)^2$$

$S_2$  : Diode laser, puissance totale 5 mW, rendement de couplage diode-fibre 50%.



• Récepteurs

$D_1$  : Photodiode PIN, sensibilité 0,5 A/W.

$D_2$  : Photodiode à avalanche, sensibilité 50 A/W.

Afin d'assurer le taux d'erreur spécifié, la puissance minimale du signal au détecteur est  $P_{\min} = 10 \text{ nW}$  dans le deux cas.

2) Calculer l'atténuation totale due au couplage et aux pertes par absorption pour les deux sources.

3) En prenant une marge de sécurité  $M = 3 \text{ dB}$ , quelles sont les combinaisons utilisables.

Solution

1) La dispersion intermodale est :  $\Delta\tau = \frac{Ln_1\Delta}{c} = \frac{L.ON^2}{2n_1c}$ .



$$\Delta\tau = \frac{10^4 \cdot 0,15^2}{2 \cdot 1,47 \cdot 3 \cdot 10^8} \cdot \text{Soit : } \Delta\tau = 0,255 \mu s.$$

La durée d'un bit est donnée par :  $T_b = \frac{1}{R} = \frac{1}{32 \cdot 64 \cdot 10^3} = 0,488 \mu s$ ; avec :  
 $R = 32.64 \text{ kbits/s} = 2,048 \text{ Mb/s}$  est le débit binaire. *debit binaire*

Afin d'éviter toute interférence entre deux symboles binaires successifs, l'élargissement temporel  $\Delta\tau$  d'une impulsion à travers la fibre doit satisfaire la condition :  $\Delta\tau \leq T_b$ ; ce qui est le cas de notre fibre. Le choix de cette fibre est donc justifié.

2) Soit  $B_1$  et  $B_2$  l'atténuation totale due au couplage et aux pertes par absorption respectivement pour les sources  $S_1$  et  $S_2$ . On a alors :

$$S_1 \rightarrow B_1 = AL + |10 \log(\eta_c)| = AL + |10 \log(ON^2)| = 5 \cdot 10 - 10 \log(0,15^2).$$

$$\text{Soit : } B_1 = 66,48 \text{ dB.} \quad \text{Atténuation linéaire}$$

$$S_2 \rightarrow B_2 = AL + |10 \log(\eta_c)| = 5 \cdot 10 - 10 \log(0,5). \text{ Soit : } B_2 = 53 \text{ dB.}$$

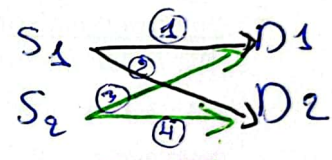
3) Calculons le bilan de liaison ( $P_r$  puissance reçue par la photodiode) pour les 4 combinaisons possibles :

a- Combinaison :  $S_1 + FO + D_1$ ; on a  
 $P_{r11} = P_{e1}(\text{dBm}) - B_1 - 3 = 0 - 66,48 - 3 = -69,48 \text{ dBm.}$

b- Combinaison :  $S_1 + FO + D_2$ ; on a  
 $P_{r12} = P_{e1}(\text{dBm}) - B_1 - 3 = 0 - 66,48 - 3 = -69,48 \text{ dBm.}$

c- Combinaison :  $S_2 + FO + D_1$ ; on a  
 $P_{r21} = P_{e2}(\text{dBm}) - B_2 - 3 = 10 \log(5) - 53 - 3 = -49 \text{ dBm.}$

d- Combinaison :  $S_2 + FO + D_2$ ; on a  
 $P_{r22} = P_{e2}(\text{dBm}) - B_2 - 3 = 10 \log(5) - 53 - 3 = -49 \text{ dBm.}$



*2 comb  
 liaisons possibles  
 à condition de  
 Presus  $\geq P_{\min}$*

Or la puissance minimale du signal détectable est :

$$P_{\min} = 10 \text{ nW} = 10 \log(10^{-5}) = -50 \text{ dBm.} \quad \text{car milli}$$

Les combinaisons réalisables sont telles que :  $P_r \geq P_{\min}$ ; c'est-à-dire les combinaisons c et d :

$S_2 + FO + D_2$  (ou  $D_1$ ). *(c et d)*

## EXERCICE 2

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 Péro couplant une puissance moyenne de  $6 \text{ mW}$  dans la fibre avec une largeur spectrale égale à  $5 \text{ nm}$ . La diode laser de type Fabry Péro possède un pourcentage de couplage dans la fibre égal à  $50\%$ .

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

Il y a un connecteur de perte égale à  $1 \text{ dB}$  entre les différents composants de la liaison optique. Le coupleur 1×4 présente une perte de l'ordre de  $3 \text{ dB}$ . On suppose que les coupleurs 1×4 en



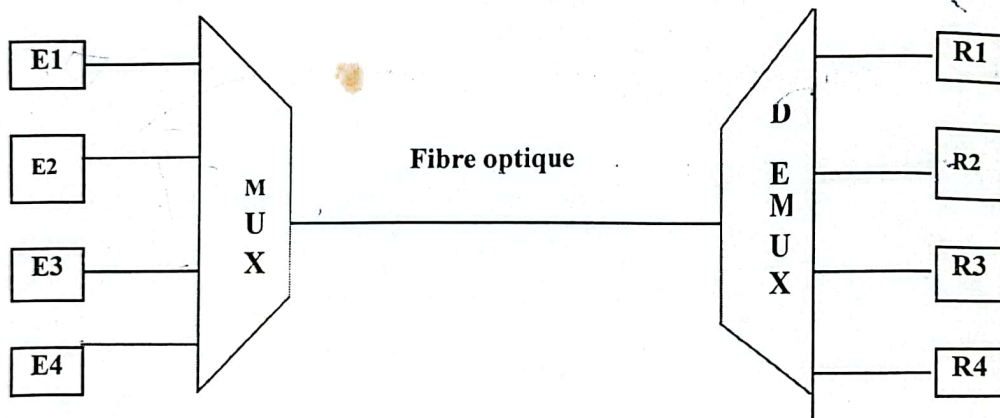
cascade sont reliés à travers une fibre optique monomode G.652. Le dernier coupleur 1×4 de la liaison est relié à l'unité optique du réseau(ONU) à travers une fibre optique monomode G.652.

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. = *Longueur L*
- 7) En déduire le débit binaire de la liaison du système.

### EXERCICE 3

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  $\text{TEB}=10^{-9}$ .

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.