Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès
Département G.C.R

Chokri BACCOUCH
GCR2

TD 4 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 θ_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 :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \qquad (1)$$

La perte de Fresnel est donnée par :

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

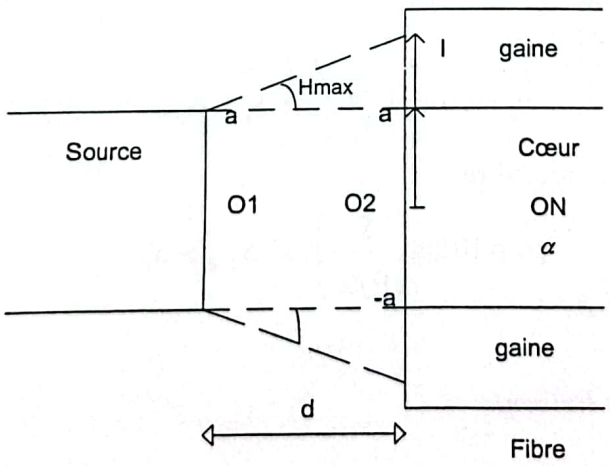


Figure 1. *Couplage source-fibre.*

CamScanner

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

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

$$I(\theta) = I(0).\cos^m(\theta) \qquad (3)$$

m : caractérise la directivité de la source.
$m = 1$: source lambertienne (rayonnement isotrope) : DEL.
$m = 10$ à 20 : source laser directive.

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

La perte due au couplage fibre-source est :

$$p_{coup} = 10\log\left(ON^2\right) + 10\log\left(\frac{m+1}{2}\right). \qquad (4)$$

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

$$\eta_c = \frac{ON^2}{n_0^2} = \sin^2(\theta_a), \qquad (5)$$

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

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

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 :

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

- non contact entre source/fibre :

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

Exercice 1 *(Bilan de liaison)*

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

1) Calculer la puissance de sortie P_s en mW.

2) Quelle longueur L de la fibre peut-on utiliser si le récepteur est capable de mesurer une puissance minimum de $20\ \mu W$.

3) On suppose maintenant que le support de transmission est constitué de N fibres optiques précédents de longueur totale $L = 10\ km$. La première fibre est connectée à l'émetteur avec

CamScanner

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

a- Exprimer le bilan des pertes B de la liaison fibrée en fonction de p_e, p_e, N, L et A.

b- En déduire la valeur de N si $B = 10\ dB$.

Exercice 2 *(Bilan de liaison)*

Une liaison optique expérimentale est constituée d'un laser à $\lambda = 1{,}55\ \mu m$, 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 µW 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 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 ?

$5\ W \longrightarrow 10\log(x)$ dBW

$X = 5\ mW \longrightarrow 10\log(x)$ dB_m

$10\ dB - 1\ dB_m = 30$

$1\ dB_m = 1\ dB + 30$

$v = \frac{2\pi}{\omega}(\omega)$

TD4

1)

$$A = \frac{10}{L} \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right)$$

$$\log\left(\frac{P_e}{P_s}\right) = \frac{L \cdot A}{10}$$

$$P_s = P_e \, 10^{-\frac{LA}{10}}$$

AN $P_s = 10 \cdot 10^{-3} \, 10^{-0,15}$

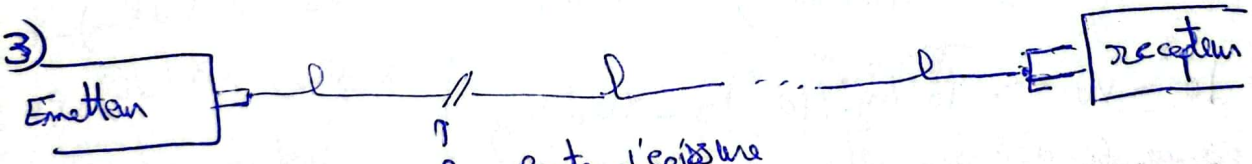
$P_s = 3,162 \text{ mW}$

2) $L = \frac{10}{A} \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right)$

AN : $L = \frac{10}{0,15} \log\left(\frac{10}{20} \frac{10^{-3}}{10^{-6}}\right)$

$L = 53,98 \text{ km}$

3)



P_e = Perte d'épissure
= 0,2 dB

N fibre

a) $B = 2 \times P_e + (N-1) \times P_e + A \cdot L$

perte totale

b) on a $B = 10 \text{ dB}$

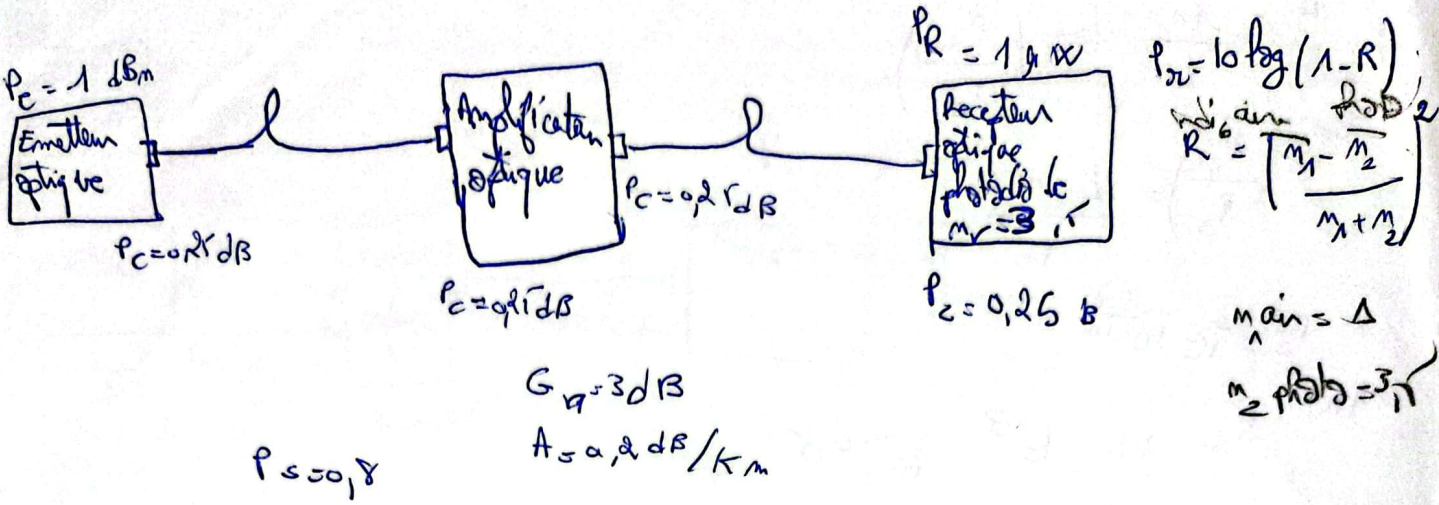
$$(N-1) P_e = B - 2 \times P_c - A \times L$$

$$N = \frac{B - 2 \times P_c - A \times L}{P_e} + 1$$

$$N = \frac{10 - 2 \times 1 - 0,5 \times 10}{0,2} + 1 = 16 \text{ fibres}$$

Exercice 2:

Bilan de liaison



Rq. L'étude de Bilan de liaison sert à déterminer la puissance de réception au niveau de recepteur optique, cette puissance est egal à la puissance emise par le emetteur optique qu'on ajoutant le gain d'amplification d'amplificateur et retranche tous les pertes

$$P_{Recue} = P_e + G_a - 4P_c - P_s - P_a - AL$$

$P_{Recue} = 1\,\mu W = 10^{-6} W \longrightarrow 10 \log(10^{-6}) = -60$ dB

$= 10^{-3}$ mW $\longrightarrow 10 \log(10^{-3}) = -30$ dBm

$\left.\begin{array}{l} X\ dB = X\ (dBm) - 30 \\ X\ (dBm) = X\ (dB) + 30 \end{array}\right\}$

$G_a = 3$ dB $\quad P_R = -60$ dB

$P_c = 0,25 \quad P_s = 0,8 \longrightarrow 10 \log(0,8) = -0,97$ dB

$P_r = 10 \log(1-R) = 10 \log\left(1 - \left(\frac{1-3,5}{4,5}\right)^2\right) = -1,6$ dB

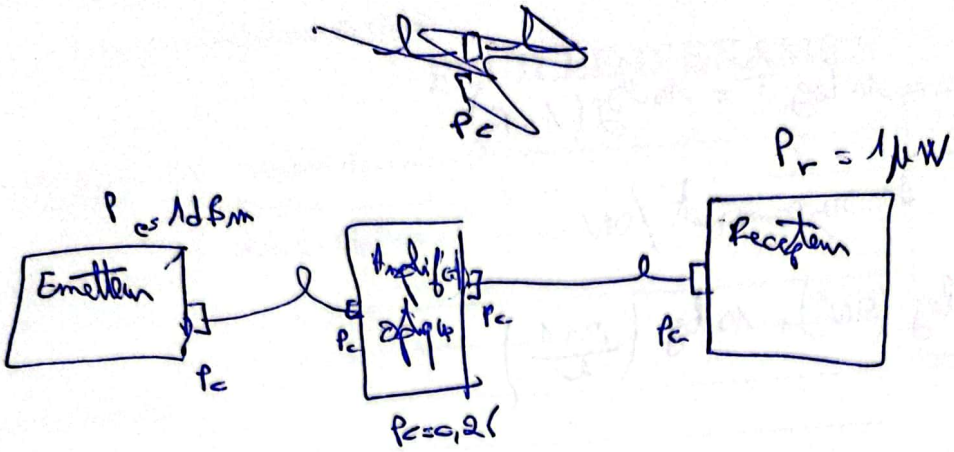
$P_e = 1$ dBm $- 30$

$= -29$ dB

$$L = \frac{P_s + G_a - 4P_c - P_s - P_r - P_R}{A} = \frac{-29 + 3 - (4 \times 0,25) + 0,97 + 1,6 + 60}{0,2}$$

$L = 177,85$ Km.

Exercice 2 :



$G = 3\,dB$

$A = 0{,}2\ dB/Km$

$P = 0{,}2$

$$P_r = 10 \log(1 \cdot R) \qquad R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$$

$n_1 = n_{air} = 1$

$n_2 = 3{,}5$

- L'étude de bilan de liaison sert à déterminer la puissance de reception au niveau de recepteur optique, cette puissance est egal à la puissance emise par l'emetteur optique qu'on ajout le gain d'amplification d'amplificateur et retranche tous les pertes.

$$P_r = P_e + G + 4 \cdot P_c - P_s - P_a - A \cdot L$$

$P_r = 1\,\mu W = 10^{-6}\ W \longrightarrow 10 \log(10^{-6}) = \ dB$

$= 10^{-3}\ mW \longrightarrow 10 \log(10^{-3}) = dB_m$

$x\,dB = x\,dB_m - 30$

$dB = dB_m + 30$

Perte de Fresnel :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$$

$$P_R = 10 \log \frac{P_{trans}}{P_{inc}} = 10 \log T = 10 \log (1 - R)$$

Pertes au diagramme de rayonnement / ON

$$P_{coup} = 10 \log (ON^2) + 10 \log \left(\frac{n+1}{2}\right)$$

Pertes en surfaces :

Contact source / fibre $P_s = 10 \log \left(\frac{S_s}{S_c}\right)$ $S_s < S_c$

non contact entre src / fibre

$$P_s = 10 \log \left(\frac{S_c}{S_{f.c}}\right) \quad S_{f.c} > S_c$$

EX 1 : bilan de liaison :

(1) =

$$A = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_e}{P_s}\right)$$

$$\log \left(\frac{P_e}{P_s}\right) = \frac{L \cdot A}{10}$$

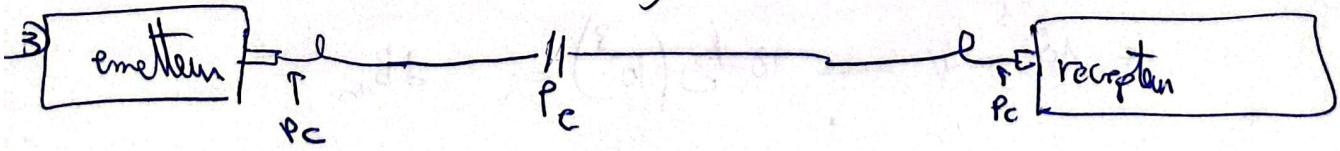
$$\frac{P_e}{P_s} = 10^{\frac{L \cdot A}{10}}$$

$$P_s = \frac{P_e}{10^{\frac{L \cdot A}{10}}}$$

(2)

$$L = \frac{10}{A} \log \left(\frac{P_e}{P_s}\right)$$

(3)



$$B = 2 \cdot P_c + (N-1) P_c + A \cdot L$$

TD 4

- perte de Fresnel

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

$$P_R = 10 \log T = 10 \log (1 - R) = 10 \log \left(1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \right)$$

Ex 1

$$P_s = P_e - \sum \text{perte}$$

$$A = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_e}{P_s} \right)$$

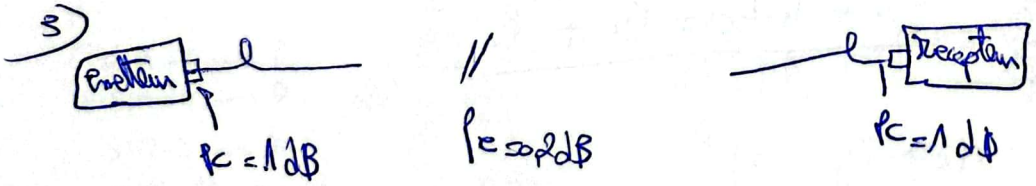
$$\frac{L \cdot A}{10} = \log \left(\frac{P_e}{P_s} \right)$$

$$P_e \cdot 10^{-\frac{LA}{10}}$$

a) $$L = \frac{10}{A} \log \left(\frac{P_e}{P_s} \right)$$

$$= \frac{10}{0,5} \log \left(\frac{10 \cdot 10^{-3}}{20\, 10^{-6}} \right)$$

3)



$$B = 2 \times P_c + (N-1) P_c + A \cdot L$$

b) $$W = \frac{10\,dB - A.L - 2P_c}{P_e} + 1$$

Exercice 1:

$$P_{Reçue} = P_e + G_a - 4 P_c - P_s' - P_a - A L$$

$1\mu W = 10^{-6} W \longrightarrow 10 \log(10^{-6}) = -60 dB$

$1 mW = 10^{-3} W \longrightarrow 10 \log(10^{-3}) = -30 dB_m$

$x dB = x dB_m - 30$

$x dB_m = x dB + 30$



$P_R = P_e + G_a - 4P_C - P_R - P_a - AL$

$G_a = 3 dB$

$P_C = 0,2 [dB]$

$P_r = 1 \mu W \longrightarrow 10^{-6} W \longrightarrow 10 \log(10^{-6}) = -60 dB$

$P_s = 0,8 \longrightarrow 10 \log(0,8) = \quad dB$

$P_r = 10 \log(1 - R) = 10 \log\left(1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2\right)$

$= 10 \log\left(1 - \left(\frac{1 - 3,1}{1 + 3,1}\right)^2\right) dB$

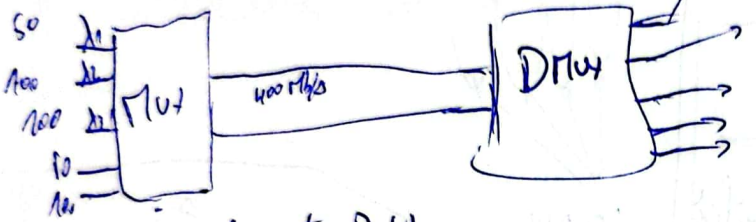
$P_e = 1 dB_m = 1 - 30 dB$

$P_R = \frac{P_R - P_e - G_a + 4P_C + P_R + P_a}{A}$

Rx
- Asynchrone → PDH → MIC (Américain) / T (européen)
- Synchrone → SONET (Américain) / SDH (européen)
- optique

SDH — SONET
STM-1 — STS-1
STM-4 — STS-3
STM-16 — STS-9
STM-64 — STS-12
STM-256 — STS-48

- Multiplexage
  - fréquentielle
  - temporelle
  - WDM (longueur d'onde)



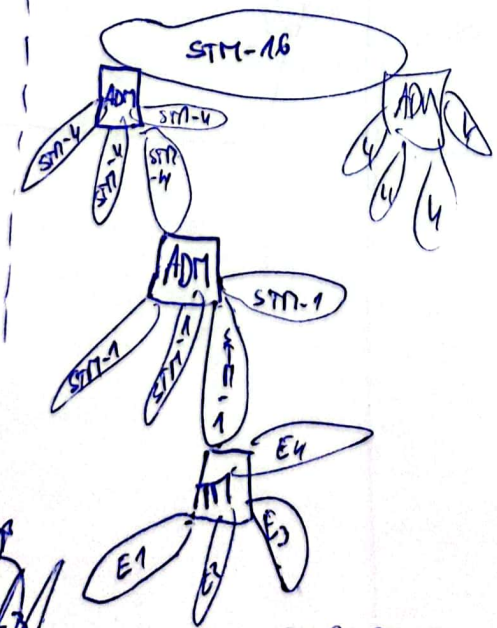
Augmenter Débit

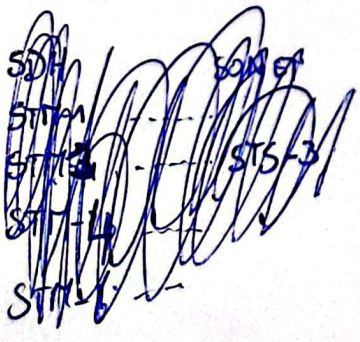
Question de cours ± PDH ± SONET ± SDH

SDH

Architecture

STM-1 → D
STM-4 → D
STM-3 → D
STM-1² → D





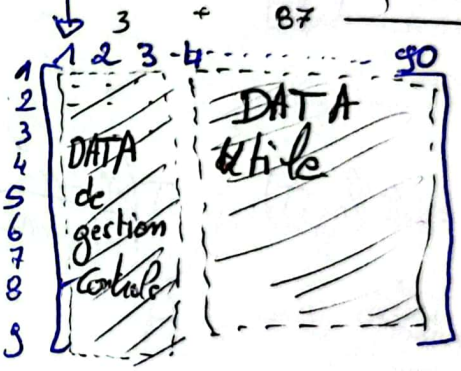
Norme Européen — 32 canaux
Norme Américain — 24 canaux

STM-1 = 3 × STS-1 + 1
STM-N = N × 3 × STS-1
STM-1

Matrice de Transmission

STS-1

SONET est une extension du SDH



D Q T

$D_{utile} = \frac{Q_{utile}}{T} = \frac{(87 \times 9) \times 8}{125} = \dots$

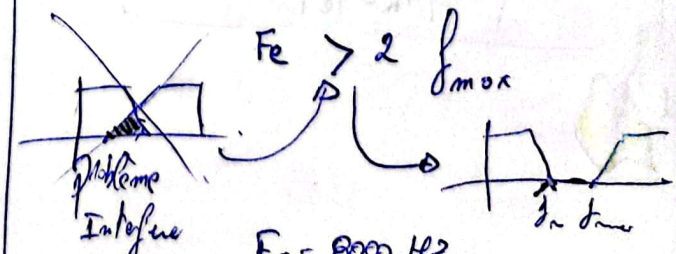
$f_{max} \leq 6800$

T = 125 µs

[300 – 3400]

onde sonore : Condition Shonon

$Fe > 2 f_{max}$

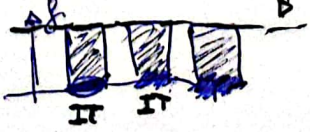


$Fe = 8000\ Hz$

$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{8000} = 125\ \mu s$

8000 Hz

TDMA →



D_{IT}

Bilan Optique

voir 1 perte

$P_R = P_e - \Sigma Pertes$

Question
L ?

$P_R = P_e - A.L - 2P_c - P_f$

$P_R - P_e + 2P_c + P_F = -L$
$-A$

Σ Pertes

- P_c → pertes connecteurs
- P_s → Pertes épissures
- Atténuation linéique A dB/km
- etc. ?

$P_F = 10 \log(T) = T\left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)$ Avec fibre

P_F → Perte Fresnel

! budget optique

$|P_R - P_e|$

Métrique Transmission

$D_g = D_{Lab} + D_{gestion}$

$D_g = N_{b\ Canaux} \times D_{Canal}$!

Canaux

Canal

Débit binaire = Nb d'erreur / ($D_g \times D_{année}$)

!

TD 4 : Optique

Rappel :

T : rapport de transmission

$$T = \frac{\text{Puissance transmise}}{\text{Puissance envoyée}}$$

Source isotope : elle permet d'émettre le même rayonnement (même intensité) dans toutes les directions de la même façon.

Ex 1 :

$$AL = \frac{P_e}{P_s} \Rightarrow P_s = P_e \times A \times L$$

$$\left(10 \log \frac{P_e}{P_s}\right) L = \frac{P_e}{P_s} \; 0{,}5 \; dB/km$$

$$P_R = 10 \log\left(\frac{P_{trans}}{P_{incidente}}\right) \text{ : Perte Fresnel}$$

$$A = \frac{10}{L} \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right)$$

↳ atténuation.

$$\boxed{T = 1 - R}$$

rapport de Transmission — facteur de Réflexion

Ex 1

1) $A = 0{,}5 \; dB/km$

$P_e = 10 \; mW$

$L = 10 \; km$

$$A\left(\frac{dB}{km}\right) = \frac{10}{L} \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right)$$

$$\frac{AL}{10} = \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{P_e}{P_s} = 10^{\frac{AL}{10}} = 10^{0{,}5}$$

$$\Rightarrow P_s = \frac{P_e}{10^{0{,}5}} = \frac{10 \; mW}{\sqrt{10}}$$

$$= 3{,}16 \; mW$$

2/ $P_s = 20 \; \mu W = 20 \cdot 10^{-3} \; mW$

L ? $\quad A = 0{,}5 \; dB/km = \frac{10}{L} \log \frac{P_e}{P_s}$

$$\Rightarrow A = \frac{10}{L} \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right)$$

$$\Rightarrow L = \frac{10}{A} \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right)$$

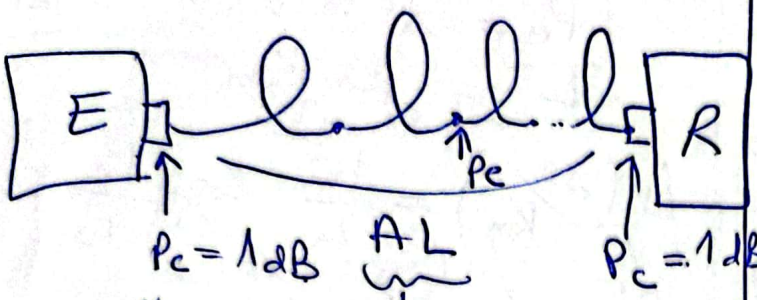
$$= \frac{10}{0{,}5} \log\left(\frac{10}{20 \cdot 10^{-3}}\right)$$

$$= 53{,}979 \; km$$

$$\simeq 54 \; km$$

3) B : perte totale.

(a) $B(dB) = 2p_c + AL + (N-1)p_e$



$P_{d(E)} = P_{c(R)}$ en équipement

atténuation linéique.

N : nb fibres installé

(b) pour $B(dB) = 10\,dB$ → N ?

$2p_c + AL + (N-1)p_e = 10$

$\Rightarrow N = \frac{10 - 2\times1 - 0{,}5\times10}{0{,}2} + 1$

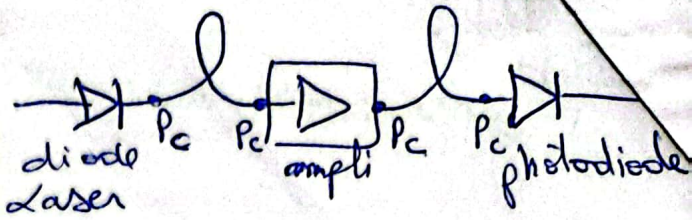
$= 16$ fibres

$$N = \frac{B - 2p_c - AL}{p_e} + 1$$

Rappel air : $R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 = \left(\frac{n_r - 1}{n_r + 1}\right)^2$

$\Rightarrow p_R = 10\log(1-R)$

Exercice 2 :



$P_E = 1\,dBm = 1\,dB/1\,mW$

$P = 10\,W \rightarrow P_{(dB)} = 10\log(10) = 10$

$P = 10\,mW = 10\cdot10^{-3}\,W$

$= -20\,dB$

$\Rightarrow P = 10^{-1}\,mW = 10\,dBm$

$P(dB) \xrightarrow{-30} P(dBm)$

$P_s = 10\log(80\%) = -0{,}96\,dB$

Bilan total = Σ Pertes

Σ Pertes = $\underbrace{AL}_{\text{atténuation linéique}} + \underbrace{4\cdot p_c}_{\text{perte des connecteurs}} + p_s + p_R$

$P_{reçue} = P_{emise} - \Sigma Pertes + Gain$

$=$

$$L = \frac{P_{emise} + G + P_{reçu} - (4p_c + p_s + p_R)}{A}$$

AN : $L = 44{,}2$

$p_R = 10\log(1-R) = -1{,}6\,dB$

TD:4

Ecole

Ex2

1) Pour que la fibre soit monomode, il faut que

$a \leq \frac{2,405\,\lambda}{2\pi ON}$: fibre monomode

$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_1^2}$

$= \frac{ON^2}{2 n_1^2}$

$\Rightarrow$ ~~$ON = \sqrt{2 n_1^2} = n_1$~~

$ON^2 = \Delta 2 n_1^2$

$\Rightarrow ON = n_1 \sqrt{2\Delta}$

$a \leq \frac{2,405 \times 1,2 \cdot 10^{-6}}{2\pi \times 1,47 \times \sqrt{2 \times 7,2 \cdot 10^{-3}}}$

$a \leq 2,6 \cdot 10^{-6}$

$\Rightarrow a \leq 2,6\ \mu m$

2) la fréquence normalisée est : $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot ON$

avec $ON = n_1 \sqrt{2\Delta}$: ouverture numérique

$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \times \left(n_1 \sqrt{2\Delta} \right)$

$\Rightarrow V = \frac{2\pi \times 2,6 \cdot 10^{-6} \times 1,47 \times \sqrt{2 \times 7,2 \cdot 10^{-3}}}{1,2 \cdot 10^{-6}}$

$= 2,4$

Le nombre de Modes :

$\Pi = \frac{V^2}{2} = 2,88 \simeq 3$

Dans la fibre, on a 3 modes (3 rayons) qui se propagent successivement.

Ex3

Partie I :

$D_m = \frac{1}{C} \cdot \frac{n_1}{n_2} (n_1 - n_2)$

dispersion modale ;

1) fibre à saut d'indice :

$\Delta T_m = \frac{L}{C} n_1 \Delta$

lorsque $(n_1 \simeq n_2) \Rightarrow \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_1^2}$

$\Delta \simeq \frac{(n_1 - n_2)(n_1 + n_2)}{2 n_1^2}$

$\simeq \frac{n_1 - n_2}{n_1} \simeq \frac{n_1 - n_2}{n_2}$

d'où $\Delta T_m = \frac{L}{C} \frac{n_1}{n_2} (n_1 - n_2)$

$\Rightarrow \Delta T = D_m \times L$

CamScanner

Migration vers
les réseaux Optiques

$$L = \frac{P_{émise} + Gain - \left(P_{reçue} + 4P_C + P_R + P_S\right)}{A}$$

$A \leftarrow$ atténuation (dB/km)

$P_{reçue} = 1\,\mu W = 10^{-6}\,W$

$P_{reçue}(dB) = 10\log(10^{-6}) = -60\,dB = -60+30\,dB$

$= -30\,dB_m$

$$L = \frac{-29+3-\left(-60 + 4\times 0{,}25 + 1{,}6 + 0{,}96\right)}{0{,}2}$$

$\simeq 152\,km$

* indépendance des opérateurs
— unifier les Sys Ame / Europ mais
— insasets ou perlenet de data
sas procedé d'un max ou demx

TD 4

Exercice 3

Partie 1 :

1) ON ?

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$n_1^2 = ON^2 + n_2^2$$

$$\Rightarrow n_1 = \sqrt{ON^2 + n_2^2}$$

$$\Delta T_m = \frac{L}{C} \frac{\sqrt{ON^2+n_2^2}}{n_2} \left(\sqrt{ON^2+n_2^2} - n_2\right)$$

$$= \frac{L}{C}\left[\frac{ON^2+n_2^2}{n_2} - \sqrt{ON^2+n_2^2}\right]$$

2/ $\Delta T_1 = \frac{L}{C}\left[\frac{ON^2+n_2^2}{n_2} - \sqrt{ON^2+n_2^2}\right]$

$$= \frac{10.10^3}{3.10^8}\left[\frac{(0,21)^2+(1,469)^2}{0,169} - \sqrt{(0,21)^2+(1,469)^2}\right]$$

$$= 7,14.10^{-8}\ s$$

$$= 71,4.10^{-9}\ s$$

$$\Delta T_2 = \frac{L}{C}\left[\frac{(0,42)^2+n_2^2}{n_2} - \sqrt{(0,42)^2+n_2^2}\right]$$

$$= 2,04.10^{-6}\ s$$

$$= 2,04\ \mu s$$

3/ $\Delta T_c = D_{ch} \times \Delta\lambda \times L$

$$= 36 \times 24 \times 10$$

$$= 8640\ ps$$

Le débit :

$$D_1 = \frac{1}{\Delta T_{tot}}$$

$$\Delta T_{tot} = \sqrt{(\Delta T_1)^2 + (\Delta T_{ch})^2}$$

$$= \sqrt{(71,4.10^{-9})^2 + (8640.10^{-12})^2}$$

$$= 7,1.10^{-9}\ s$$

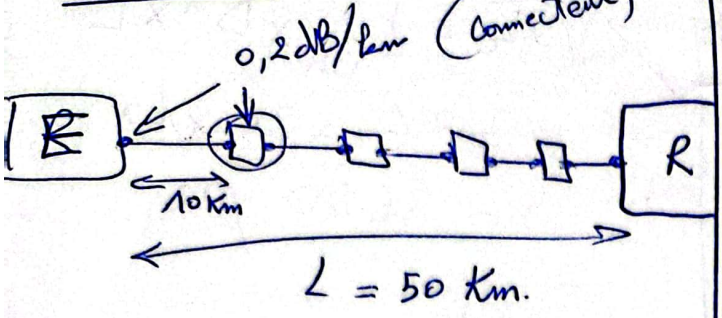
$$= 7,1\ ns$$

$$D_1 = \frac{1}{\Delta T_{tot}} = \frac{1}{7,1.10^{-9}}$$

$$= 0,14.10^9\ bit/s$$

$$= 0,14\ GB/s$$

Partie II :



1/ $P_{ptot} = (0,5 \times 50) + (0,2 \times 4) + (0,46 \times 50)$

$= 26,7$ dB

$P_{reçue} = P_{émise} - P_{pertot} - 3\,dB$

$P_{émise} = 10^{-3}\,W$

$\Rightarrow P_{émise} = 10\log(10^{-3})$

$= -30$ dB

5/ $P_{reçue} = -30 - 26,7 - 3$

$= -59,7$ dB

$= -59,7 + 30\ dB_m$

$= -29,7\ dB_m$.

6/ $I_{ph} = P_{reçue} \times S_\lambda + i_0$ → courant d'obscurité

$= 10^{\frac{-59,7}{10}} \times 0,8 + 10.10^{-9}$

$= 8,57.10^{-7} + 10^{-8}$

$\Rightarrow I_{ph} = 8,67.10^{-7}\,A$

$= 867,2\ nA$

L'emetteur diode Laser lors de son utilisation dans cette liaison optique rend capable la photodiode PIN de fournir un courant photogénérée à la réception de 867,2 nA

$D_\lambda = \frac{1}{\Delta T_{tot}} \simeq \frac{1}{\Delta T_m}$

$= \frac{1}{D_m \times L}$

$=$

$dB_m = dB + 30$