

Exercice 1 : réflexion totale

On considère un rayon lumineux incident sur un dioptre $n_1 \rightarrow n_2$.

- 1) Rappeler ce qu'est le phénomène de réflexion totale sur ce dioptre, et sous quelles conditions il se produit.
- 2) Déterminer l'angle d'incidence limite i_L au-dessus duquel il y a réflexion totale pour $n_1=1,3$ (eau) et $n_2=1,00$ (air).
- 3) On met de l'eau dans un récipient transparent avec un trou en bas par lequel l'eau peut s'écouler en un jet parabolique. On éclaire le trou par l'arrière avec un faisceau laser. Expliquer comment le jet d'eau pourra guider la lumière : c'est le principe des fontaines lumineuses.
- 4) Calculer i_L pour une fibre à saut d'indice avec $n_1=1,47$ et $n_2=1,45$. Comparer à la valeur pour un dioptre eau/air.

BTS 2007

II. La fibre optique (6 points)

Dans un premier modèle, on considère une fibre optique à saut d'indice dont le schéma est donné ci-dessous. Cette fibre est constituée d'un cœur de diamètre de $D = 100 \mu\text{m}$, d'indice $n_2 = 1,500$ et d'une gaine d'indice $n_1 = 1,470$. La fibre considérée est d'une bonne longueur $L = 8,00 \text{ km}$.

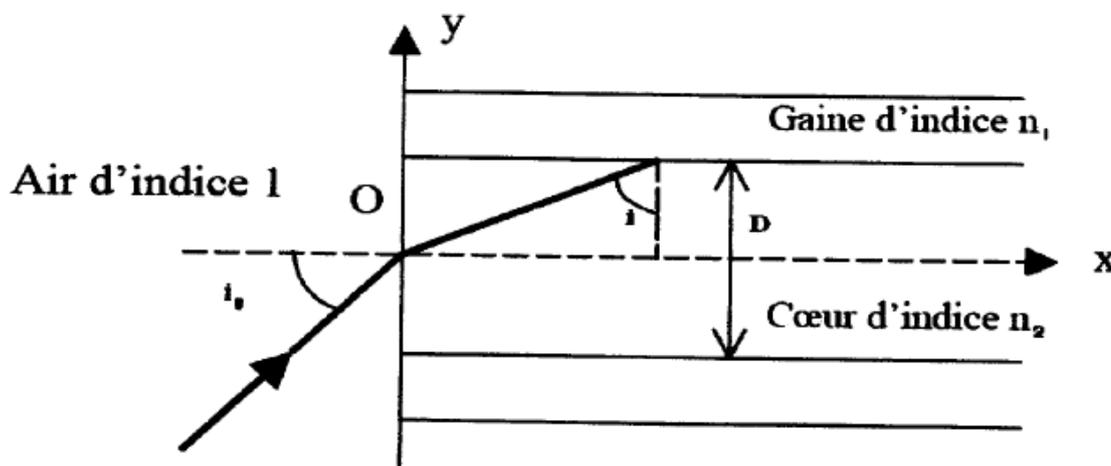


Schéma 3

1. L'angle d'acceptance θ_0 de la fibre correspond à l'angle limite d'entrée de la lumière dans la fibre, pour lequel il y a propagation dans le cœur.
 - 1.a. Établir l'expression de l'ouverture numérique O.N. = $\sin(\theta_0)$ de la fibre en fonction des indices n_1 et n_2 .
 - 1.b. Calculer la valeur de l'ouverture numérique puis celle de l'angle θ_0 .
2. Déterminer l'intervalle de temps $\Delta t_{s,i} = t - t'$ qui sépare l'arrivée au bout de la fibre du rayon ayant la durée de parcours maximale t et l'arrivée du rayon ayant la durée de parcours minimale t' .

3. On souhaite que la fibre véhicule, avec une déformation minimale et de façon indépendante, des impulsions lumineuses de durée $\tau = 10$ ns et séparées par un intervalle de $50 \mu\text{s}$. En particulier, l'étalement de l'impulsion doit être inférieur à 4 m en fin de fibre. Montrer que la fibre optique à saut d'indice ne convient pas dans ces conditions.

4. On considère un deuxième modèle de fibre : la fibre à gradient d'indice. Expliquer quelle est la différence entre les deux types de fibre et justifier le fait que la valeur du décalage temporel $\Delta t_{g,i}$ y soit alors beaucoup plus faible que dans le cas de la fibre à saut d'indice.

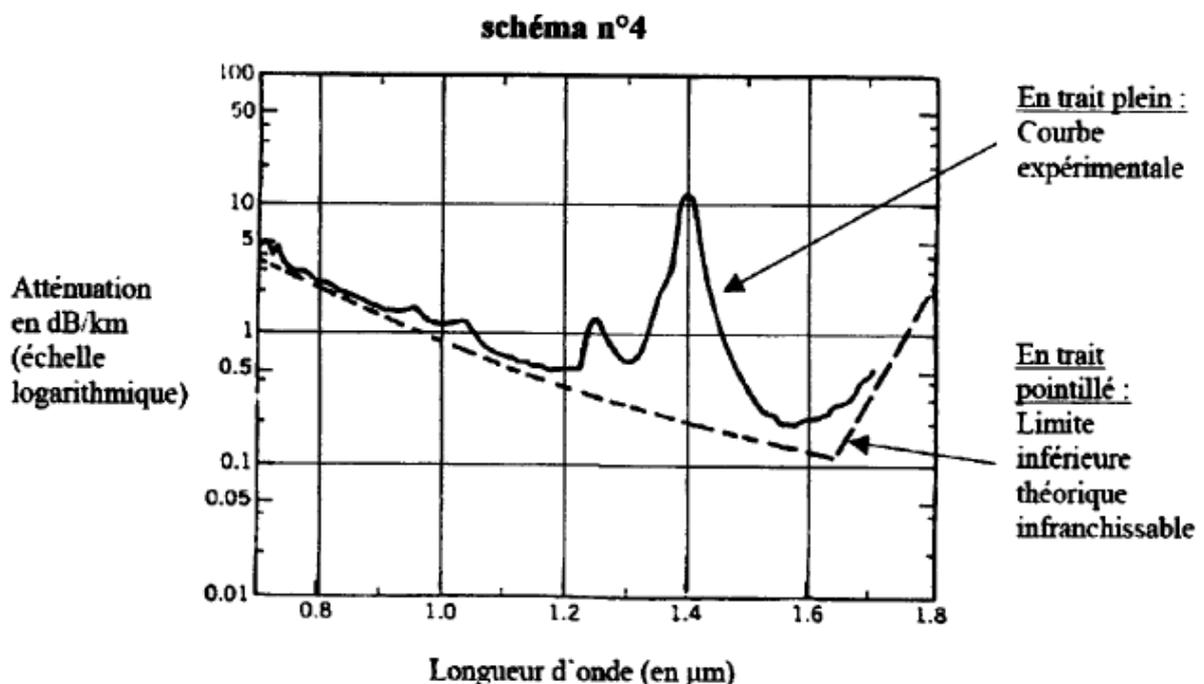
5. On peut montrer que, dans le cas de la fibre à gradient d'indice, le décalage temporel défini à la question 2 s'écrit :

$$\Delta t_{g,i} = \Delta t_{s,i} \frac{n_2 - n_1}{8 n_2}$$

n_2 désigne ici l'indice au centre de la fibre et n_1 l'indice à la frontière du cœur et de la gaine. Justifier que ce type de fibre convient pour l'application envisagée au II.3.

III. La rétro diffusion (6 points)

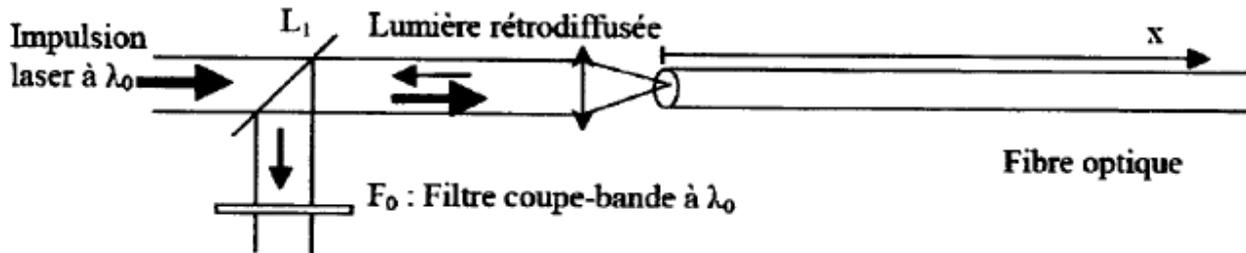
Une fibre optique absorbe toujours une partie de la lumière reçue ; la fraction non transmise dépend de la longueur d'onde λ_0 de la lumière injectée. La figure suivante représente l'atténuation linéique dans la fibre en décibels/km en fonction de la longueur d'onde dans le vide λ_0 de la lumière injectée.



1. La source lumineuse utilisée est un laser émettant à la longueur d'onde $\lambda_0 = 980$ nm. A quel domaine de radiations électromagnétiques appartient ce rayonnement ?
2. Donner une valeur approchée de l'atténuation linéique dans la fibre à la longueur d'onde λ_0 en vous aidant du schéma n°4.

- Quelle puissance de sortie obtient-on pour une fibre de longueur $L = 8,0 \text{ km}$ si la puissance lumineuse injectée à l'entrée est de 100 mW ?
- Pour la longueur d'onde λ_0 utilisée, l'atténuation provient essentiellement de la diffusion. La figure suivante (schéma n° 5) montre comment on capte la lumière rétro diffusée en utilisant une lame séparatrice L_1 placée devant la fibre.

Schéma n°5



La lumière rétro diffusée due à la diffusion Raman est alors noyée dans la lumière obtenue par diffusion Rayleigh et dans la lumière réfléchie par la face d'entrée de la fibre. Pour éliminer ces radiations, on place sur la voie de mesure un filtre interférentiel F_0 qui élimine la composante de longueur d'onde λ_0 . On modélise ce filtre par une lame mince d'épaisseur e et d'indice n . La lumière arrive sur le filtre sous une incidence normale.

Démontrer la relation existant entre l'indice n , l'épaisseur e et la longueur d'onde λ_0 , qui traduit l'élimination de la radiation de longueur d'onde λ_0 .

IV. Le thermomètre (4 points)

Le principe du thermomètre à effet Raman utilise le rapport R de l'intensité de la raie Raman de longueur d'onde λ_1 et de l'intensité de la raie Raman de longueur d'onde λ_2 . Ces raies ont été définies dans la partie I. L'intensité de la raie de longueur d'onde λ_1 est indépendante de la température contrairement à l'intensité de l'autre raie. En effet, l'intensité diffusée est proportionnelle à la population des niveaux et inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la longueur d'onde.

Ce rapport R s'écrit donc sous la forme :

$$R = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^4 \exp \left(\frac{\Delta E}{kT} \right)$$

où l'on prendra : $\lambda_1 = 1023 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 940 \text{ nm}$, $\Delta E = 0,055 \text{ eV}$.

- Calculer la valeur du rapport R pour les températures $T = 300 \text{ K}$ et $T' = 310 \text{ K}$.
- En déduire la valeur du taux de variation $\Delta R / \Delta T$ sur l'intervalle considéré.

3. On peut mesurer le rapport R avec une précision de 10^{-2} .
À quelle résolution de température cela correspond-il ?
4. En pratique, on effectue la mesure de R au moyen du dispositif suivant :

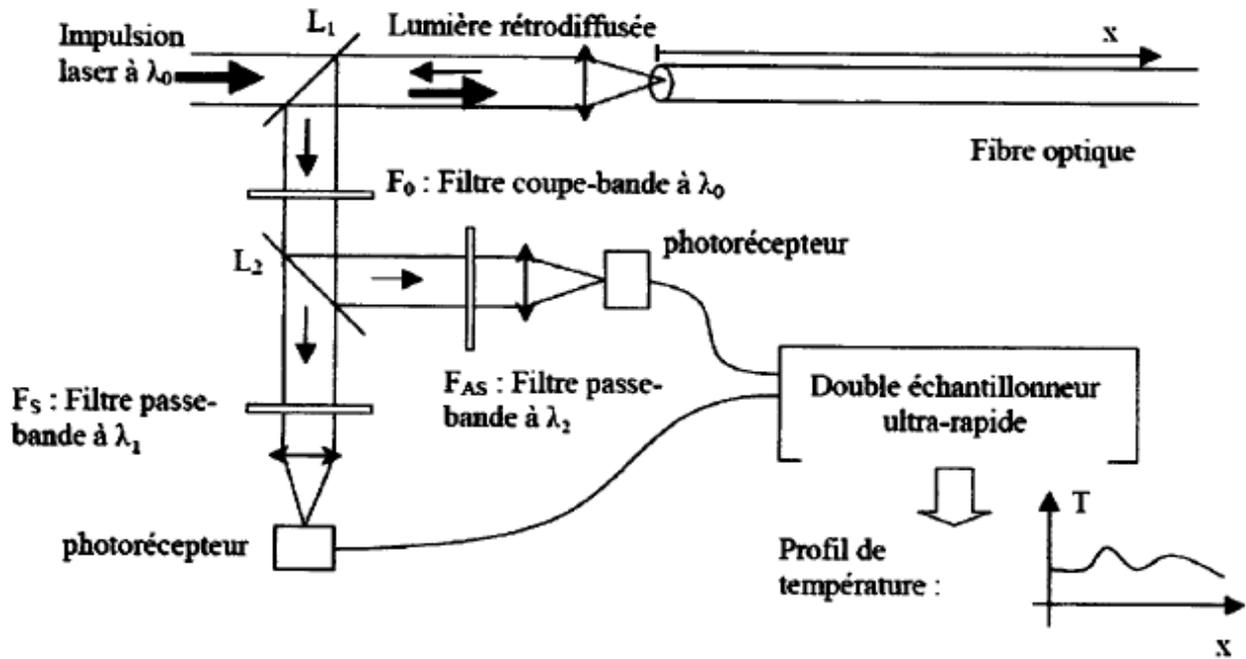


Schéma n°6

La mesure de R est faite régulièrement, à partir de l'instant zéro où la lumière pénètre dans la fibre et elle est répétée pendant une durée de l'ordre de 30 s. On obtient alors un profil donnant l'évolution de la température en fonction de la distance :

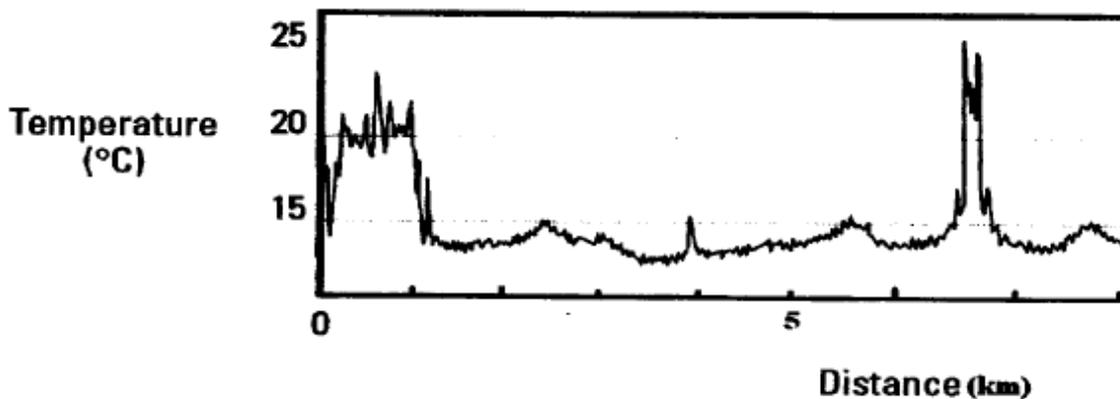


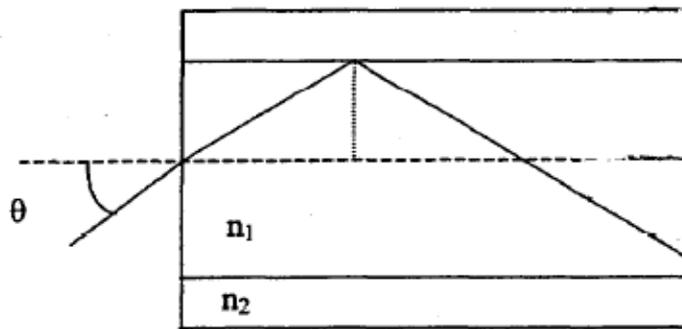
Schéma n°7

- 4.a. D'après ce graphe, quelle est la température mesurée à la distance de 6,7 km de l'entrée de la fibre ?
- 4.b. Quel est alors le temps mis par le signal pour effectuer un aller-retour jusqu'au point chaud ?

IV. Transmission par fibre optique (3,5 points)

La fibre optique est un moyen idéal pour transporter le rayonnement jusqu'à l'organe à traiter car elle est maniable, fine et fiable. La lumière de longueur d'onde de $1,064 \mu\text{m}$ du laser YAG-Nd peut être transmise par une fibre optique en silice, ce qui n'est pas le cas pour le laser à CO_2 . On suppose que la puissance sortant du laser YAG-Nd est intégralement injectée dans la fibre.

Les lasers médicaux utilisent des fibres multimodes à saut d'indice dont le cœur est en silice.



1. La fibre, placée dans l'air, est constituée d'un cœur d'indice $n_1 = 1,50$ et d'une gaine d'indice $n_2 = 1,48$.

Exprimer puis calculer numériquement l'angle d'acceptance θ_0 ainsi que l'ouverture numérique O.N. de la fibre.

2. Une rupture de la fibre peut intervenir lors de la transmission d'impulsions puissantes, nécessaires par exemple à la destruction des calculs rénaux par un effet dit électromécanique.

Le seuil de rupture des fibres en silice est de $4 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Des impulsions, de forme rectangulaire, d'énergie 40 mJ et de durée 10 ns sont nécessaires pour détruire le calcul rénal. On supposera que la densité surfacique de puissance est uniforme sur toute la face d'entrée de la fibre.

En prenant une marge de sécurité d'un facteur 4 sur le seuil de rupture de la fibre, calculer son diamètre minimal.

BTS 1999

7. Guidage par la fibre optique F.O.

Le faisceau focalisé par Obj. est compris dans un cône d'angle total au sommet $7,3^\circ$. Le diamètre de la tache de focalisation est $D = 10,6 \mu\text{m}$

Calculer l'ouverture numérique ON_{obj} du faisceau focalisé.

Quelles sont les caractéristiques (diamètre de cœur $\Phi_{\text{cœur}}$; ouverture numérique $\text{O.N}_{\text{fibre}}$) des fibres que l'on pourra utiliser avec une injection efficace et un bon guidage de la lumière incidente?

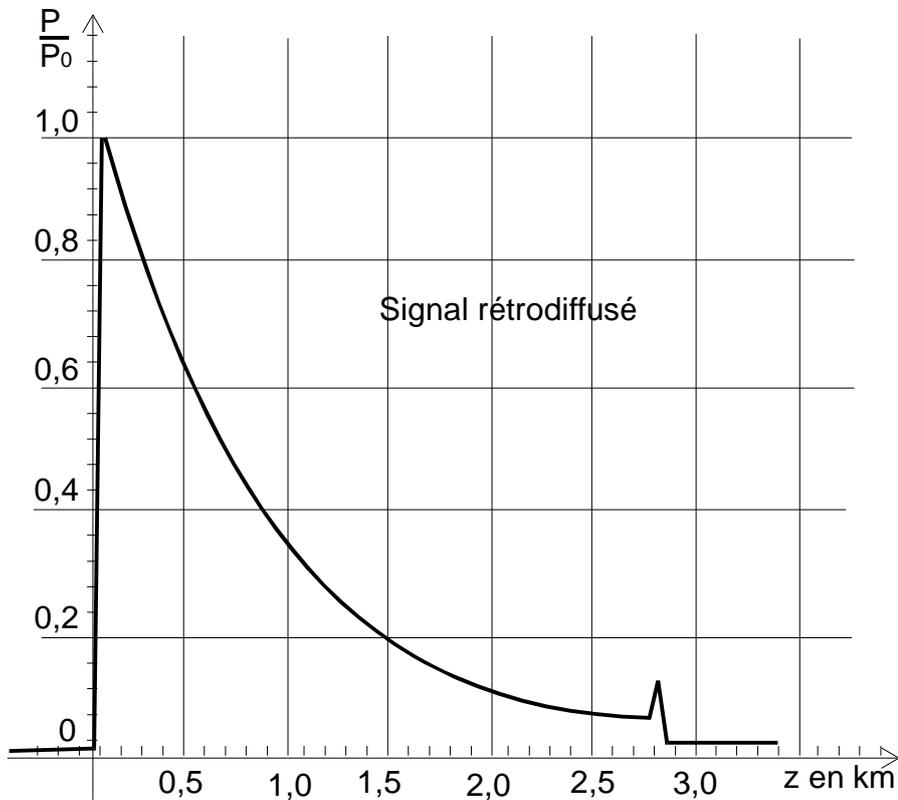
9. Etude du signal rétrodiffusé.

Le signal rétrodiffusé obéit à la loi :

$$\frac{P}{P_0} = e^{-2\alpha z}$$

où P_0 est la puissance rétrodiffusée à l'entrée de la fibre, α le coefficient d'atténuation et z la longueur de fibre parcourue par la lumière avant diffusion. On caractérise un échantillon de fibre. A partir du graphe $P/P_0 = f(z)$ (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

1. Que vaut $\frac{P}{P_0}$ pour $z = 2\text{km}$?
2. Calculer α (exprimé en km^{-1}).
3. Calculer l'atténuation linéique A_l en dB/km .



10. Bilan de transmission dans une liaison à fibre optique.

On a l'habitude d'exprimer les puissances dans une unité pratique appelée dBm. On rappelle qu'une puissance exprimée en dBm (P_{dBm}) est égale à 10 fois le logarithme décimal de cette puissance exprimée en mW.

A l'entrée d'une liaison à fibre, on injecte une puissance moyenne $P_{\text{entrée}} = 6,2 \text{ dBm}$.

La liaison est constituée de 5 fibres de 2,8 km de longueur mises bout à bout, ayant une atténuation linéique de 2,5 dB/km. Chaque connecteur entre 2 fibres produit une perte de 0,3 dB.

Calculer l'atténuation totale A de la liaison.

Quelle puissance moyenne P_{sortie} peut-on récupérer à la sortie ? (on l'exprimera en dBm et en mW).

Le signal de sortie est récupéré sur une photodiode de sensibilité 0,54 A/W. Quel courant moyen i traverse cette photodiode ?

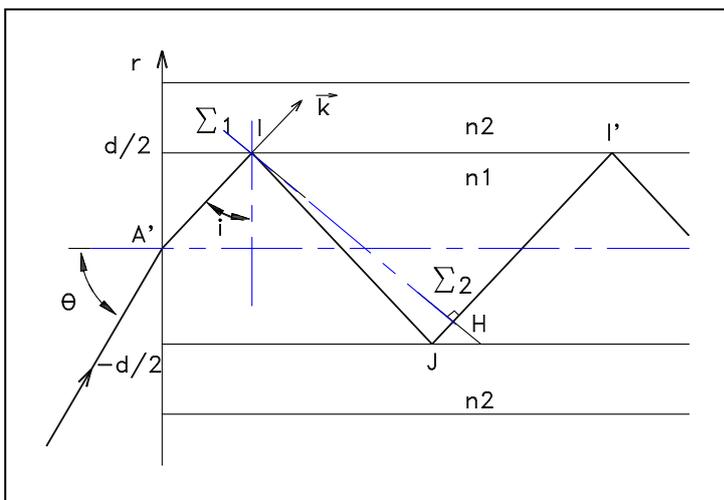
BTS 1997

3. ETUDE DE LA FIBRE MONOMODE.

3.1. En A' le faisceau est encore gaussien et la puissance reçue dans un cercle de rayon r autour de A' (centre du waist image) est donnée par:

$$P(r) = P_{\text{tot}} \left[1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0'^2}\right) \right] \text{ où } P_{\text{tot}} \text{ est la puissance}$$

totale incidente.



Exprimer littéralement puis calculer la perte en dB lors de l'injection, sachant que $2w'_0 = 1.25d$ où d est le diamètre du cœur.

Quelles sont, dans ce montage, les autres causes d'atténuation ?

3.2. Conditions de réflexion totale.

On considère le dioptre séparant le cœur et la gaine d'une fibre à saut d'indice. (voir cadre 3)
Rappeler la condition sur l'angle d'incidence i , d'un rayon arrivant sur ce dioptre, qui permet d'obtenir la réflexion totale.

On rappelle que l'angle maximum d'injection (ou angle d'acceptance) θ_{lim} s'écrit : $\sin(\theta_{lim}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = O.N.$

Montrer que l'on peut écrire : $\cos(i) \leq \frac{O.N.}{n_1}$ (1)

A.N. Calculer $\cos(i_{limite})$ si $n_1 = 1,540$ et $n_2 = 1,536$.

3.3. Condition de stationnarité. Modes.

On suppose, en première approximation, que la fibre se comporte comme une cavité Fabry-Pérot d'indice n_1 . Les miroirs (de coefficient de réflexion égal à 1) sont les interfaces cœur-gaine (fig. cadre 3). La réflexion se fait sans déphasage. On appelle H la projection orthogonale de I sur JI' .

Calculer la différence de marche $\delta_1 = (IJ) + (JH)$ entre les plans d'onde Σ_1 et Σ_2 qui accompagnent deux rayons successifs se propageant dans la même direction \vec{k} .

En déduire que, pour que les ondes interfèrent de manière constructive, la condition (2) doit être remplie:

$$\cos(i) = p \frac{\lambda}{2 \cdot n_1 \cdot d} \quad (p \text{ entier}) \quad (2).$$

A.N. : A partir des conditions (1) et (2), combien peut-on prévoir de modes si $d = 4 \mu\text{m}$ et $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$?

Exercice 2 : fibres multimodales à saut et à gradient d'indice

On veut comparer deux fibres de 5 km de long, de diamètres $62,5/125 \mu\text{m}$ (le premier chiffre est le diamètre du cœur, le second celui de la gaine), ayant un indice sur l'axe $n_1 = 1,465$ et un $\Delta = 6,0 \cdot 10^{-3}$

- F1 est à saut d'indice
- F2 est à gradient d'indice à profil parabolique : $n(r) = 1,465(1 - \Delta(r/a)^2)$
 - 1) Représenter le profil d'indice de F1 et F2.
 - 2) Calculer le délai modal $\tau_1 = n_1 L \Delta / c$ pour la fibre F1. Comparer sa valeur au délai modal théorique $\tau_2 = n_1 L \Delta^2 / (8c)$ de F2.

Exercice 3 : fibres monomodale et multimodale

La fréquence normalisée d'une fibre de rayon r , d'ouverture numérique ($ON = n_1 \sqrt{2\Delta}$), parcourue par une lumière de longueur d'onde λ dans le vide, est donnée par : $V = 2\pi r ON / \lambda$.

- Si $V < 2,405$ la fibre est monomode
- Si $V > 2,405$ le nombre N de modes pour une fibre à gradient d'indice d'exposant α est $N = V^2 \alpha (2(\alpha + 2))$ si V est assez grand.
 - 1) $N_1 = 1,48$ et $2r = 4 \mu\text{m}$. Pour quelles valeurs de ON et Δ la fibre est-elle monomode à 633 nm ? Quel est alors l'angle d'acceptance maximum ?
 - 2) $ON = 0,19$ et $2r = 50 \mu\text{m}$ avec un profil d'indice parabolique. Calculer N pour $\lambda = 850 \text{ nm}$.

Exercice 4 : guide d'onde plan

Un guide d'onde plan à saut d'indice est composé d'un milieu rectangulaire d'épaisseur $e=6\mu\text{m}$ et d'indice $n_1=1,50$ et de très grande extension dans les autres directions. Au-dessus et au-dessous de ce cœur se trouve une gaine d'indice $n_2=1,46$. Ce milieu est analogue à une fibre optique, mais les dioptries sont plans au lieu d'être cylindriques.

- 1) Quelle est la condition sur l'angle d'incidence α sur le dioptré cœur/gaine qui permette d'obtenir la réflexion totale ? Déterminer la valeur limite de α .
- 2) En déduire la valeur limite de l'angle d'acceptance θ_a dans l'air et l'ouverture numérique du guide.
- 3) On suppose que la réflexion sur les dioptries se fait sans déphasage. Calculer, en vous appuyant sur un schéma, la différence de marche δ entre deux rayons successifs se propageant dans des directions parallèles.
- 4) On a un mode de propagation lorsque les ondes interfèrent de manière constructive. Montrer que le nombre total N de modes est donné par : $N=\text{Ent}(2eON/\lambda)+1$.
- 5) Combien peut-on prévoir de modes si $\lambda=0,63\mu\text{m}$?
- 6) Calculer l'espace angulaire moyen (la différence d'inclinaison) entre deux modes consécutifs dans le guide.

Exercice 5 : lentille à gradient d'indice (GRIN)

Une lentille à gradient d'indice est un petit tube de longueur L , de diamètre d , faite dans le même matériau que le cœur d'une fibre optique à gradient d'indice de profil parabolique. L'indice varie en fonction de la distance r du point considéré à l'axe suivant la loi :

- (relation a) : $n(r)=n_0(1-Ar^2/2)$
- 1) Représenter l'allure de la courbe $n=f^{\circledast}$ si $n_0=1,608$, $\sqrt{A} = 0,339 \text{ mm}^{-1}$ et $d=1,8 \text{ mm}$.
 - 2) Justifier la validité des deux expressions suivantes le long de la trajectoire d'un rayon lumineux dans la lentille à gradient d'indice :
 - (relation b) : $n \cos\theta = \text{constante}$ (où θ est l'inclinaison de la trajectoire par rapport à l'axe)
 - (relation c) : $\tan\theta=dr/dz$
 - 3) Dériver par rapport à z les relations a et b. En déduire une relation entre $d\theta/dz$ et r .
 - 4) Dériver la relation c par rapport à z et l'introduire dans l'expression précédente. On donne $\tan'=1/\cos^2$.
 - 5) Montrer qu'en faisant des approximations justifiées on obtient :
 - (relation d) : $d^2r/dz^2 + Ar=0$
 - 6) Montrer que $r = C \sin(\sqrt{A}z + \varphi)$ est solution de l'équation d).
 - 7) Calculer le pitch Λ (période spatiale des sinusoides) avec les valeurs de la question 1).
 - 8) La longueur de la lentille $0,23 \text{ pitch}$ est donnée égale à $4,3 \text{ mm}$. Etes-vous d'accord avec cette valeur ?
 - 9) Justifier l'intérêt d'une telle lentille. Dans un premier temps, on considérera une lumière incidente focalisée au centre de la face d'entrée et on cherchera la forme du faisceau sortant d'une lentille de longueur $0,25 \text{ pitch}$. Dans un deuxième temps, on tiendra compte de la distance de travail de la lentille, qui fait qu'on focalise la lumière incidente un peu en avant de la face d'entrée.

Exercice 6 : diffusion Rayleigh

Une fibre a une atténuation linéique $A_l = 0,5 \text{ dB/km}$ à $\lambda = 1300 \text{ nm}$. On suppose que l'atténuation est due uniquement à la diffusion Rayleigh. Quelle est l'atténuation linéique à $\lambda = 850 \text{ nm}$?

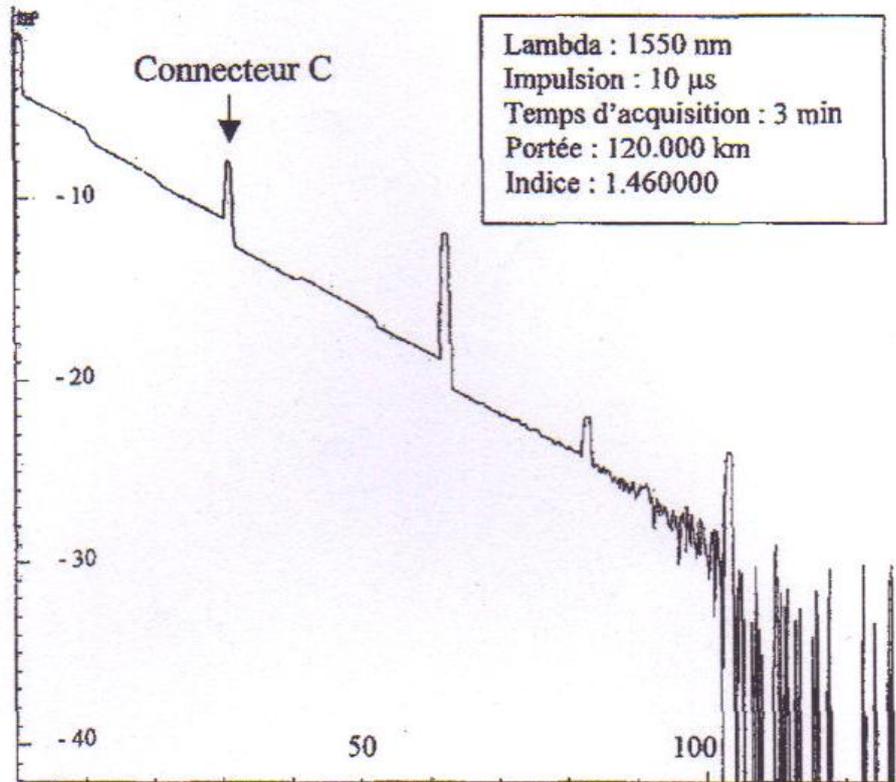
Exercice 7 : analyse de courbes de réflectométrie (extrait de F. Weil, « Optique Moderne »)

Dans toutes les tracés des courbes suivants, l'ordonnée est gradué en dB et l'abscisse en km.

Ces enregistrements permettent d'analyser l'état d'un réseau de fibres optiques.

1. Réseau de fibres optiques

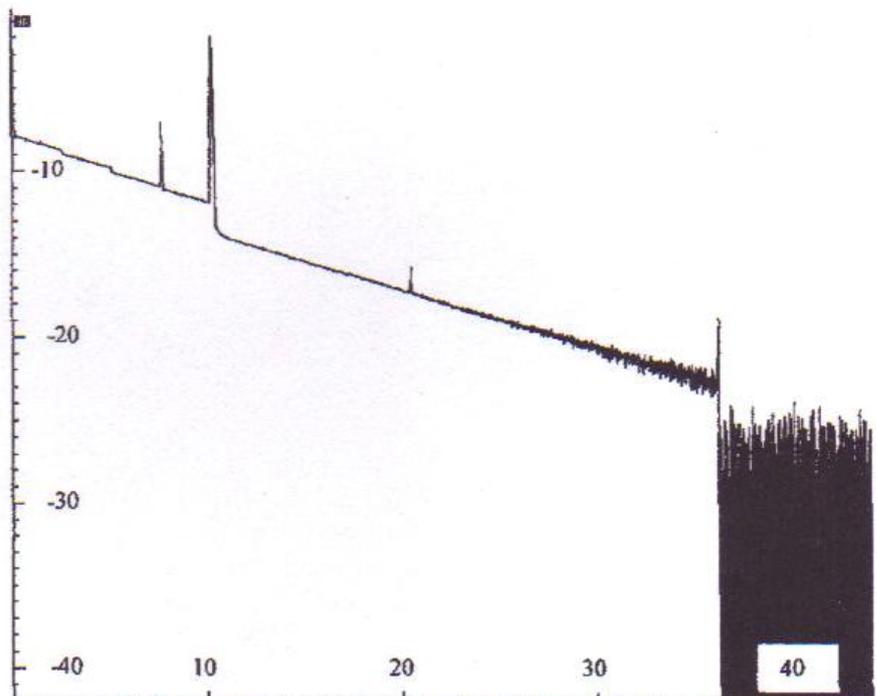
- Quelle est la longueur d'onde des impulsions ?
- Quelle est la largeur de l'impulsion (en durée et en distance parcourue) ?
- Quelle est la longueur totale du réseau ?
- Repérer l'emplacement des connecteurs et des épissures.
- Quelles sont les longueurs de chaque bobine de fibre utilisées ?
- Quelle est l'atténuation du connecteur C ?
- Où est le saut « positif » ?



2. Pic fantôme

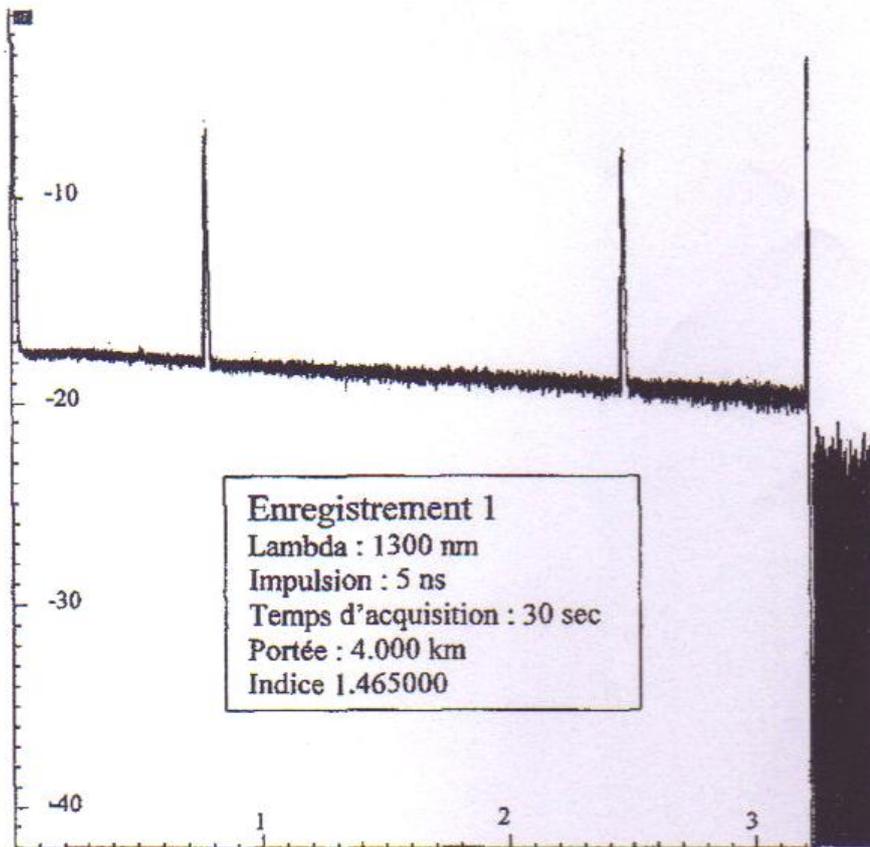
Un pic fantôme est enregistré sur cette courbe de réflectométrie.

- Où se situe-t-il ?
- Comment le reconnaître ?



3. Comparaison des conditions expérimentales

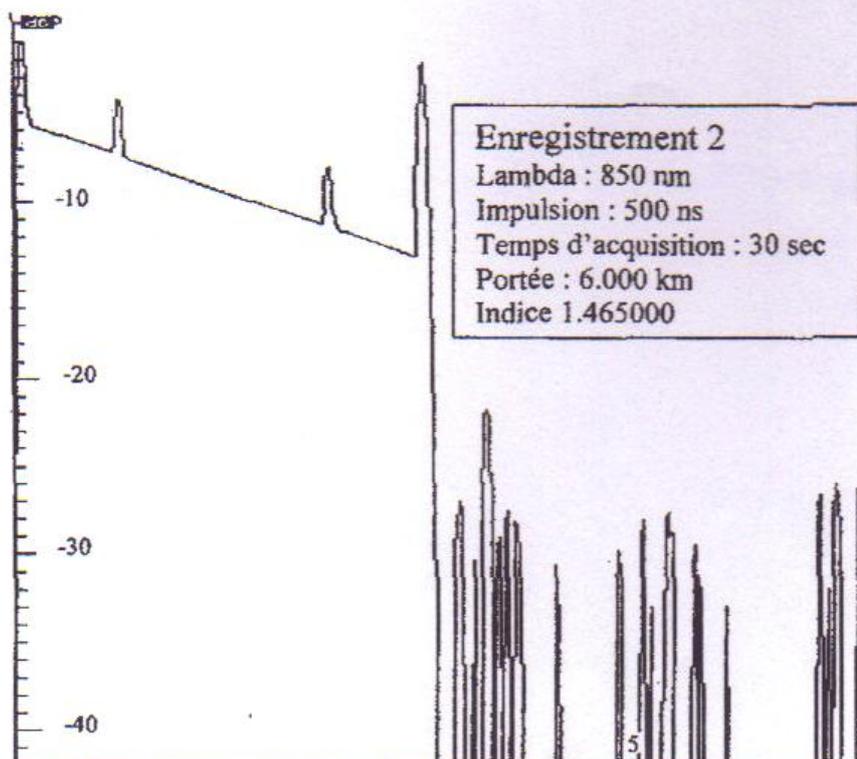
Les deux courbes suivantes ont été enregistrées sur le même site, le même jour, avec le même appareil. Il s'agit de comparer les conséquences des conditions expérimentales sur les courbes obtenues.



- Quelles différences de conditions expérimentales y a-t-il entre les enregistrements 1 et 2?
- Quelle est la longueur du réseau fibré ? Les portées sont-elles adaptées à l'étude de ce réseau ?

Dans chacune, vérifier que l'on retrouve :

- les mêmes positions des connecteurs,
- les mêmes longueurs de fibre.



- Déterminer l'atténuation linéique des fibres utilisées pour chacune. Expliquer les différences en tenant compte de la longueur d'onde.
- Comparer le bruit du signal dans chacune des courbes et conclure en tenant compte de la largeur de l'impulsion.