

TP 26 : Lignes de transmissions d'un signal lumineux Fibres optiques

Capacités exigibles :

- Définir l'indice optique d'un milieu.
- Appliquer les lois de la réflexion et de la réfraction d'un faisceau lumineux.
- Présenter le phénomène de réflexion totale.
- Décrire les différents types de fibres optiques.
- Définir l'ouverture numérique et la vitesse de groupe pour une fibre optique.
- Exploiter les caractéristiques d'une fibre optique : bande passante, atténuation linéique.

Capacités expérimentales :

- Utilisation d'une simulation pour déterminer des angles
- Utilisation du logiciel Regressi afin de réaliser une modélisation

Consignes : à lire attentivement afin de ne pas perdre du temps inutilement

Vous devez rédiger l'ensemble de vos réponses en utilisant un stylo bleu ou noir. Vous devez indiquer le nom de votre binôme sur votre copie. Une copie par étudiant est demandée.

Il faut tirer un trait horizontal sur votre copie à chaque appel.

Lorsque vous arrivez à un appel, vous devez m'envoyer par mail une photo (lisible) ou un scan de votre feuille correspondant à l'appel (un envoi par binôme suffit : mettre en destinataire votre binôme). Un effort est attendu côté présentation de votre copie et rédaction du plan : si votre copie est illisible, vous aurez à tout rééditer.

Une fois un appel réalisé, si vous avez des **réponses fausses**, vous perdez les points et **je ne vous informe pas de vos fautes** afin de vous pousser à **poser des questions avant l'envoi**, grâce à la classe virtuelle.

Une fois les 3 heures terminées, vous devez scanner intégralement toutes vos feuilles **numérotées** et rendre un seul fichier PDF dont le nom sera au format suivant : « TP26_NOM_PRENOM.pdf ». Une copie par étudiant est attendue dans les 10 minutes qui suivent la fin de la séance.

Présentation du problème :

On étudie ici la transmission d'une onde électromagnétique plane (transverse) progressive harmonique de fréquence f (nommée onde incidente) appartenant au domaine visible, au sein d'une fibre optique. Dans ce TP, dans un premier temps, on cherche à comprendre les conditions à respecter pour que la lumière reste « piégée » dans la fibre. Puis, on étudie en détails les caractéristiques d'une fibre multimode à saut d'indice.

I. Vidéo introductive :

Télécharger puis visionner la vidéo nommée « TP26_video_introductive.mp4 ». Répondre ensuite aux questions suivantes.

L'air est considéré comme un milieu transparent homogène et isotrope (MTHI).

1. Comment se propage le faisceau lumineux (issu du LASER) dans un MTHI ?

Dans l'expérience de la fontaine lumineuse :

2. Quelle est l'interface étudiée ici : air/eau ou eau/air ?
3. Quel est le milieu contenant l'onde lumineuse incidente ?
4. Quel est le milieu contenant l'onde lumineuse réfléchi ?
5. Décrire en une phrase, l'aspect étonnant, contre-intuitif de cette expérience.

APPEL 1 : envoi à réaliser.

Pour comprendre le phénomène de « réflexion totale » présent dans les fibres multimodes, il faut étudier les phénomènes qui se produisent lorsque la lumière passe d'un milieu THI d'indice n_1 à un autre milieu THI d'indice n_2 .

II. Mesures autour des lois de Snell-Descartes :

A. Étude des milieux de propagation :

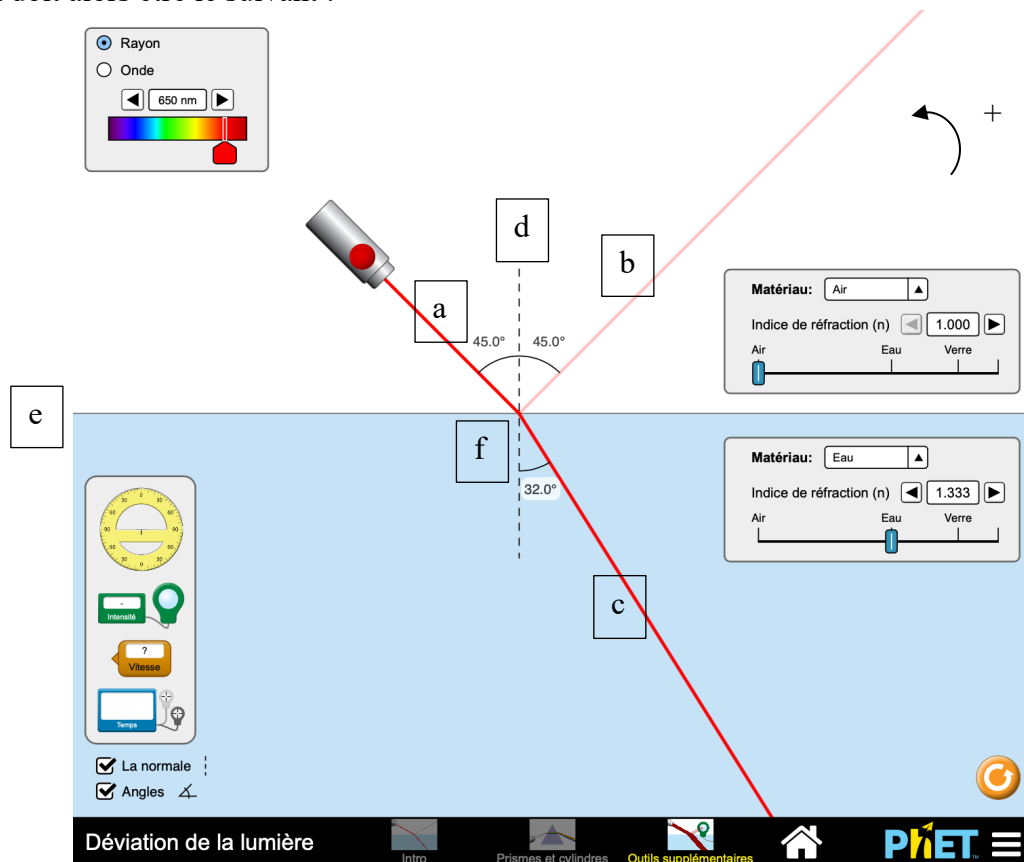
Ouvrir la simulation suivante :

https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_fr.html

Cliquer alors sur « Outils supplémentaires ».

Régler la simulation afin que le faisceau lumineux arrive sur la surface de séparation, en passant du milieu 1 (air) au milieu 2 (eau). Cocher ensuite la case « Angles » en bas à gauche de votre simulation puis allumer la source LASER à l'aide du bouton rouge.

Votre écran doit alors être le suivant :



6. A l'aide de la *partie VI.C du chapitre 12*, indiquer la légende pour chaque lettre présente sur la capture d'écran précédente.
7. A l'aide de la *partie VI.C du chapitre 12*, indiquer la valeur de l'angle d'incidence i_1 , la valeur de l'angle de réflexion nommé r et celle de l'angle de réfraction nommé i_2 . **On veillera au signe des angles.**
8. A l'aide de la *partie VI.B du chapitre 12* et de la simulation, calculer la célérité v des ondes électromagnétiques pour $\lambda = 650 \text{ nm}$, dans l'eau.
9. A l'aide de la *partie VI.B du chapitre 12* et de la simulation, calculer la célérité v des ondes électromagnétiques pour $\lambda = 380 \text{ nm}$, dans l'eau.
10. L'eau est-il un milieu dispersif ? Justifier votre réponse.
11. L'air est-il un milieu dispersif ? Justifier votre réponse.

APPEL 2 : envoi à réaliser.

B. Mesures :

Replacer le LASER sur la longueur d'onde $\lambda = 650 \text{ nm}$. Faire varier sa position et observer comment varie chacun des angles.

Télécharger et installer le logiciel nommé Regressi à l'adresse suivante :

<http://regressi.fr/WordPress/download/>

Ouvrir Regressi, puis FICHER/NOUVEAU/CLAVIER. Entrer 3 variables expérimentales, correspondant aux 3 angles :

- Symbole : i_1 Unité : $^\circ$
- Symbole : i_2 Unité : $^\circ$
- Symbole : r Unité : $^\circ$

Cliquer sur « OK ». Un tableau contenant une seule ligne apparaît.

Placer le LASER pour que l'angle d'incidence soit $i_1 = 0^\circ$. Relever et saisir sur Regressi, la valeur de l'angle de réflexion r et celle de l'angle de réfraction i_2 .

Faire varier ensuite la valeur de l'angle d'incidence i_1 de 5° en 5° , entre 0° et 85° : mesurer et saisir les valeurs de l'angle de réflexion r et l'angle de réfraction i_2 pour chaque valeur de i_1 . **On veillera au signe des angles. On prendra soin d'enregistrer au fur et à mesure, le travail effectué sur Regressi.**

Partage d'écran à réaliser.

C. Loi de la réflexion :

On souhaite vérifier que nos mesures sont cohérentes par rapport à la deuxième loi de Snell-Descartes, présente dans la *partie VI.C du chapitre 12*.

Document 01 : équation de droite

On trace y en fonction de x .

Si $y = f(x)$ est une fonction linéaire $y = a \times x$ alors la courbe obtenue est une droite passant par l'origine.
 a : coefficient directeur de la droite

Si $y = f(x)$ est une fonction affine $y = a \times x + b$ la courbe obtenue est une droite ne passant pas par l'origine.

a : coefficient directeur de la droite

b : ordonnée à l'origine de la droite

12. Écrire sur votre copie la deuxième loi de Snell-Descartes. D'après cette deuxième loi, si on trace i_1 en fonction de r , quel type de droite va-t-on obtenir : une droite passant par l'origine ou une droite ne passant pas par l'origine ? On s'aidera du document 01.

13. Quelle est la valeur théorique du coefficient directeur de cette droite (noté a_{th}) ?

Sur Regressi, tracer i_1 en fonction de r grâce au menu Graphe/Coordonnées : décocher LIGNE et cocher CROIX.

Modéliser la courbe obtenue grâce au menu Modèle/Modèles : choisir le modèle pertinent (voir question 12). Puis, cliquer sur « Ajuster ».

Partage d'écran à réaliser.

Réaliser une capture d'écran du graphe obtenu et de sa modélisation, que vous joindrez dans votre copie finale.

14. Relever la valeur déterminée par Regressi, du coefficient directeur (noté a_{sim}).
15. Conclure en justifiant à l'aide d'un écart-relatif. Justifier en une phrase, la valeur de votre écart relatif.

APPEL 3 : envoi à réaliser.

D. Loi de la réfraction :

16. A l'aide de votre simulation, relever la valeur de l'indice de réfraction de l'air n_1 et la valeur de l'indice de réfraction de l'eau n_2 .
17. Sur Regressi, tracer la courbe représentant i_1 en fonction de i_2 : obtient-on une droite ?

Réaliser une capture d'écran du graphe obtenu, que vous joindrez dans votre copie finale.

18. Est-ce une fonction linéaire, une fonction affine ou un autre type de fonction qui lie les grandeurs i_1 et i_2 ?

On souhaite vérifier que nos mesures sont cohérentes par rapport à la troisième loi de Snell-Descartes présente dans la *partie VI.C du chapitre 12*.

19. Écrire sur votre copie la troisième loi de Snell-Descartes.
20. Exprimer $\sin i_1$ en fonction de n_1 , n_2 et $\sin i_2$
21. D'après cette troisième loi, si on trace $\sin i_1$ en fonction de $\sin i_2$, quel type de droite va-t-on obtenir : une droite passant par l'origine ou une droite ne passant par l'origine ? On s'aidera du document 01.
22. Quelle est l'**expression** littérale théorique du coefficient directeur de cette droite (noté a_{th}) ?
23. En déduire la **valeur** théorique du coefficient directeur de cette droite (noté a_{th}).

APPEL 4 : envoi à réaliser.

Sur Regressi, créer deux grandeurs à l'aide de l'icône « Y+ » et cocher « grandeurs calculée » (ou « fonction » selon votre version de Regressi) :

- Symbole : SIN1 et SIN1= sin(i1)
- Symbole : SIN2 et SIN2= sin(i2)

Puis tracer $\sin i_1$ en fonction de $\sin i_2$ grâce au menu Graphe/Coordonnées : décocher LIGNE et cocher POINT.

Modéliser par une fonction pertinente la courbe obtenue grâce au menu Modélisation/Modèles. Puis, cliquer sur « Ajuster ».

Partage d'écran à réaliser.

24. Relever la valeur du coefficient directeur déterminée par Regressi (noté a_{sim}).
25. A l'aide d'un écart relatif, conclure. Justifier en une phrase, la valeur de votre écart relatif.

APPEL 5 : envoi à réaliser.

III. Phénomène de réflexion totale :

26. D'après les conditions énoncées dans le *chapitre 12 partie VI.D*, est-il possible d'observer le phénomène de réflexion totale lorsque le faisceau passe de l'air à l'eau ? Justifier votre réponse.

Paramétrer la simulation à votre disposition, afin de pouvoir observer ce phénomène de réflexion totale, avec l'air et l'eau.

Partage d'écran à réaliser.

Faire varier la valeur de l'angle d'incidence i_1 entre 0° et 85° : mesurer l'angle d'incidence limite i_{lim} , correspondant à la disparition du faisceau réfracté.

27. Noter la valeur de $i_{lim,sim}$.

28. « Si $i_1 < i_{lim,sim}$, il y a réflexion totale : le faisceau incident est intégralement réfléchi et le faisceau réfracté n'existe plus ». Cette affirmation est-elle juste ? Si non, corrigez-la.

29. A l'aide de la *partie VI.D du chapitre 12*, déterminer la valeur de l'angle d'incidence limite théorique $i_{lim,theorique}$.

30. Conclure à l'aide d'un écart relatif.

APPEL 6 : envoi à réaliser.

IV. Étude d'une fibre optique à saut d'indice :

A. Approximation de l'optique géométrique :

On étudie la fibre optique à saut d'indice dont un extrait de la fiche technique est donné en annexe.

31. Relever la valeur du diamètre du cœur de la fibre, noté a , en précisant son unité.

On utilise cette fibre optique avec une onde électromagnétique de longueur d'onde $\lambda = 1300 \text{ nm}$ dans le cœur de la fibre.

32. A l'aide de la *partie V.B du chapitre 12*, vérifier si l'approximation de l'optique géométrique est valable pour l'étude de cette fibre. Peut-on utiliser le modèle du rayon lumineux ici ?

B. Ouverture numérique de la fibre optique :

Simulation d'une fibre :

À l'aide de la simulation nommée « TP26_ouverture_numerique.swf » (à télécharger puis à ouvrir avec le site <https://ruffle.rs/demo/>), régler l'indice du cœur de la fibre sur $n_1 = 1,7$ et l'indice de la gaine sur $n_2 = 1,5$.

33. Déterminer à l'aide de la simulation, la valeur maximale de l'angle α permettant d'obtenir une réflexion totale à l'interface cœur/gaine. Calculer ensuite l'ouverture numérique de la fibre à l'aide de la formule suivante $ON = \sin(\alpha)$. Votre calculatrice doit être en degré.

34. A l'aide de la formule en fin de *partie VII.A du chapitre 12*, déterminer la valeur de l'ouverture numérique ON de cette fibre « simulée ».

35. Comparer les deux résultats obtenus pour l'ouverture numérique ON et conclure.

Étude de la fibre réelle :

On étudie la fibre optique à saut d'indice dont un extrait de la fiche technique est donné en annexe.

On utilise cette fibre optique avec une onde électromagnétique de longueur d'onde $\lambda = 1300 \text{ nm}$ dans le cœur de la fibre.

36. Relever l'indice du cœur noté n_1 ainsi que l'ouverture numérique, notée ON , de la fibre.

37. A l'aide de la formule en fin de *partie VII.A du chapitre 12*, en déduire la valeur de l'indice de la gaine de la fibre, noté n_2 .

APPEL 7 : envoi à réaliser.

C. Dispersion chromatique :

On donne la célérité des ondes EM dans le vide : $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

La source d'ondes électromagnétiques à l'extrémité de la fibre optique réelle, émet un signal « impulsion » dont le spectre contient deux raies de longueurs d'ondes respectives $\lambda_1 = 850 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 1300 \text{ nm}$

38. A l'aide de la *partie VI.B du chapitre 12*, déterminer la valeur des célérités v_{850} et v_{1300} des ondes électromagnétiques **dans le cœur de la fibre**, correspondant à chacune des raies. On respectera le nombre de chiffres significatifs.
39. A l'aide de la *partie VI.B du chapitre 12*, répondre à la question suivante : le cœur de la fibre est-il un milieu dispersif ? Justifier votre réponse.

Un technicien tire $L = 50,0 \text{ m}$ de cette fibre : les deux impulsions sont émises au même instant en début de ligne.

40. Déterminer la durée Δt séparant la réception en bout de ligne des deux raies, en supposant que la distance parcourue par chacune d'entre elle est $L = 50,0 \text{ m}$.
41. Y-a-t-il déformation du signal entre l'entrée et la sortie ?

Le signal d'entrée (en début de fibre) est composé maintenant d'impulsions lumineuses émises périodiquement à la fréquence f .

42. Afin d'éviter la superposition des impulsions en sortie de ligne, la fréquence des impulsions doit-elle être « grande » ou « faible » ?
43. En déduire la fréquence maximale f_{max} de la source d'ondes EM, qui permet de distinguer deux pulsations en bout de ligne.
44. Qualifier alors la nature du filtrage réalisé par la fibre optique.
45. En déduire la largeur de la bande passante $\Delta f_{chromatique}$ de cette fibre, due à la dispersion chromatique.
46. Pour $\lambda_2 = 1300 \text{ nm}$, à l'aide de la *partie IV.F du chapitre 12* et de la fiche technique, en utilisant le produit « bande passante-longueur », déterminer la valeur de sa bande passante « réelle » Δf_{1300} , sachant que $L = 50,0 \text{ m}$. Faire de même pour $\lambda_1 = 850 \text{ nm}$ (calculer Δf_{850})
47. Conclure en répondant à cette question : est-il pertinent d'utiliser une source d'ondes EM contenant deux raies dans une fibre optique ? Justifier votre réponse.

APPEL 8 : envoi à réaliser.

D. Dispersion modale :

La source d'ondes électromagnétiques à l'extrémité de la fibre optique réelle, émet un signal dont le spectre contient **une seule raie** de longueur d'onde $\lambda_1 = 850 \text{ nm}$. On rappelle que $L = 50,0 \text{ m}$.

On cherche à comprendre ici quel est le phénomène qui limite en haute fréquence, la transmission du signal dans la fibre optique.

Lire la *partie VII.C du chapitre 12* sur la dispersion modale, puis répondre aux questions suivantes :

48. Déterminer la valeur de t_{min} , la plus petite durée de parcours de la lumière, dans le cœur de la fibre.
49. Déterminer la valeur de t_{max} , la plus grande durée de parcours de la lumière, dans le cœur de la fibre. On admettra que la plus grande longueur du trajet est $L' = \frac{L}{\cos \alpha}$
50. En déduire la dispersion modale Δt de cette fibre, correspondant à la différence entre la plus grande durée et la plus petite durée de parcours de la lumière, dans le cœur de la fibre.

Le produit « longueur-bande passante », en $\text{Hz} \cdot \text{km}$, de cette fibre est donnée par la formule suivante :

$$\Delta f \times L = \frac{17,6}{\Delta t}$$

51. Déterminer la valeur théorique du produit « longueur-bande passante » de cette fibre en $\text{MHz} \cdot \text{km}$

52. Le comparer à celui indiqué par le constructeur et conclure.

APPEL 9 : envoi à réaliser.

E. Atténuation linéique de la fibre :

La source d'ondes électromagnétiques à l'extrémité de la fibre optique réelle, émet un signal dont le spectre contient **une seule raie** de longueur d'onde $\lambda_2 = 1300 \text{ nm}$. On rappelle que $L = 50,0 \text{ m}$.

Lire la *partie VII.E du chapitre 12 sur l'atténuation linéique*, puis répondre aux questions suivantes :

53. A l'aide de la fiche technique, déterminer la valeur de l'atténuation linéique maximale en dB/km (notée A_l) puis calculer la valeur de l'atténuation A en dB pour la longueur L .
54. En déduire la valeur de la puissance lumineuse à la sortie de la fibre optique P_s si en entrée, la puissance est $P_e = 1,00 \text{ mW}$.
55. Pour cette distance de câble, le technicien a-t-il bien fait d'utiliser la longueur d'onde $\lambda_2 = 1300 \text{ nm}$ plutôt que $\lambda_1 = 850 \text{ nm}$? Justifier votre réponse.

APPEL 10 : envoi à réaliser.