

**Expérience n°11 – Éléments d'optique**

Domaine: Optique, ondes électromagnétiques

Lien avec le cours de Physique Générale:

Cette expérience est liée aux chapitres suivants du cours de Physique Générale:

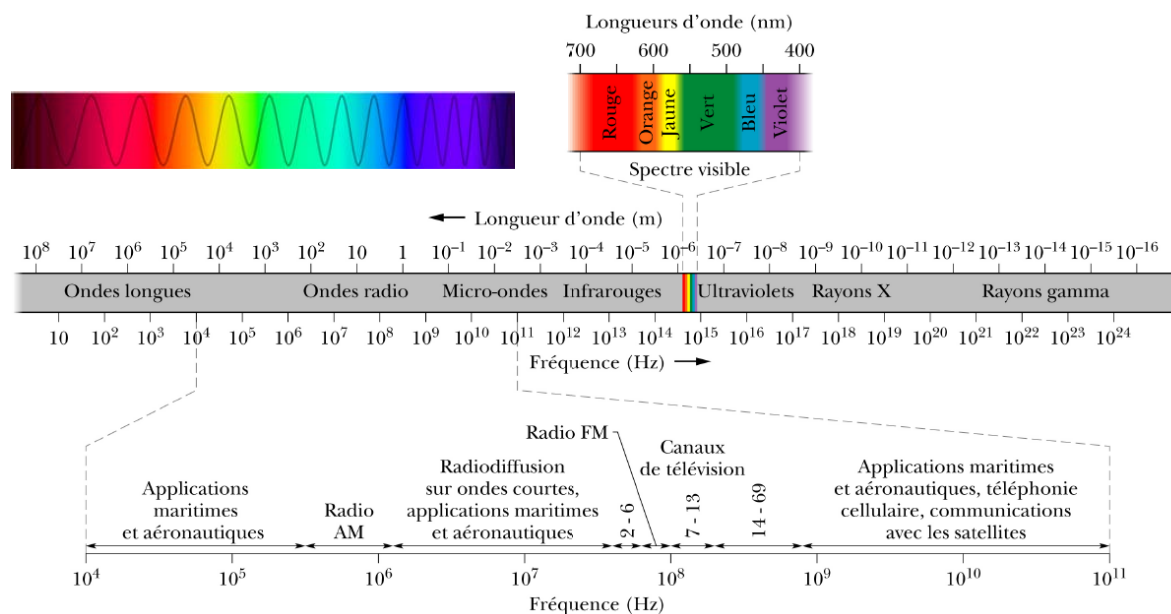
- Physique I, Chapitre 13: Les ondes électromagnétiques : la lumière
- Physique II, Chapitre 9: Les ondes électromagnétiques : la lumière. Réflexion, Réfraction
- Physique II, Chapitre 11-12: Interférences et diffraction. Instruments d'optique et les lasers

**Objectif général de l'expérience**

L'objectif de cette expérience est de mettre en évidence des lois et propriétés optiques couramment utilisées, puis de les mettre en œuvre dans des exemples d'applications pratiques. Pendant l'expérience, il est demandé dans un premier temps de **vérifier expérimentalement la loi de la réfraction et le phénomène de réflexion totale**. Puis deux exemples d'application du phénomène de réflexion totale seront mis en place expérimentalement : le guidage de la lumière dans un jet d'eau et le guidage dans des fibres optiques.

**1 Introduction générale****1.1) Spectre électromagnétique, lumière visible**

La lumière visible correspond aux radiations électromagnétiques dont la longueur d'onde dans le vide est comprise entre 400 nm et 800 nm environ ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10 \text{ \AA}$ ). La Figure 1 schématise le spectre des ondes électromagnétiques. Les yeux, détecteurs des ondes dont la fréquence  $\nu$  est comprise entre  $4.3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  (env. 700 nm) et  $7.7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  (env. 400 nm), sont sensibles à une variation de la fréquence optique dans cette gamme. Cette sensibilité se manifeste par les couleurs (Figure 1).



**Figure 1:** Spectre des ondes électromagnétiques et différents domaines d'application (extrait du cours de Physique Générale PhyG I-13). La lumière visible correspond à des longueurs d'onde situées entre 400 nm (violet) et 700 nm (rouge).

La génération et la propagation de ces ondes sont déterminées par les équations de Maxwell. Dans le vide, la solution de ces équations correspond à des ondes planes transversales dont la vitesse de phase (à laquelle on se réfère comme la **vitesse de la lumière**) vaut

$$c_0 \approx 3.10^8 \text{ m/s.} \quad (\text{Eq. 1})$$

Dans des matériaux isolants (par exemple du verre ou du plexiglas), la vitesse de propagation de la lumière est plus faible et devient

$$c = c_0/n, \quad (\text{Eq. 2})$$

$n$  étant l'**indice de réfraction** du matériau considéré, qui varie selon la longueur d'onde considérée. Lorsqu'elle passe dans un tel milieu d'indice de réfraction  $n$ , une onde de fréquence  $\nu$  (fréquence temporelle) et de longueur d'onde  $\lambda_0$  (fréquence spatiale, l'indice zéro représentant la longueur d'onde dans le vide) conserve sa fréquence  $\nu$ , mais change de longueur d'onde  $\lambda$ , qui devient :

$$\lambda = \lambda_0/n. \quad (\text{Eq. 3})$$

Le Tableau 1 donne des exemples d'indice de réfraction de quelques matériaux (solides, liquides et gazeux) couramment utilisés.

Gaz (1 bar)		Liquide (20°C)		Solide (20°C)	
	$n$		$n$		$n$
Air	1.000293	Eau	1.333	Diamant	2.419
Hélium	1.000036	Benzène	1.501	Verre (Flint)	1.575
CO <sub>2</sub>	1.000450	Ethanol	1.361	Silicium	3.420

**Tableau 1** : Indice de réfraction de quelques matériaux, mesuré à une longueur d'onde de 532 nm.

Pour cette expérience, vous aurez à votre disposition une boîte contenant des éléments optiques (lentilles, prismes, miroirs, blocs de verre rectangulaire et semi-circulaire, polariseurs linéaires et filtres), une planche à plaque tournante graduée et une source lumineuse (laser) produisant un faisceau collimaté (parallèle). Ces instruments vous serviront à mettre en évidence plusieurs lois et propriétés optiques qui dérivent des solutions des équations de Maxwell.

## 2 Réflexion et réfraction

### 2.1) Éléments de théorie, lois de la réflexion et de la réfraction

Les phénomènes de **réflexion** et **réfraction** se produisent à l'**interface entre deux milieux d'indice  $n$  différent**. Un rayon lumineux incident se propageant dans un milieu (i) d'indice de réfraction  $n_i$  et arrivant sur un milieu (t) d'indice  $n_t$  selon un angle d'incidence  $\theta_i$  est en partie réfléchi selon un angle de réflexion  $\theta_r$ , et en partie transmis dans le milieu (t) selon un angle de réfraction  $\theta_t$  (voir Figure 2). Généralement, une partie du faisceau est absorbée par le milieu (t): on a donc une perte de luminosité (de puissance) pendant la propagation. Lorsque l'interface entre les deux milieux n'est pas plane, **les angles sont définis par rapport à la normale à l'interface au point d'incidence**.

Les lois de la réflexion et de la réfraction que l'on cherche à mettre en évidence sont :

#### 2.1.1 Les rayons incidents, réfléchis et réfractés sont dans un même plan

Les rayons incidents, réfléchis et réfractés se trouvent dans le **plan d'incidence** (voir Figure 2a).

#### 2.1.2 Loi de la réflexion

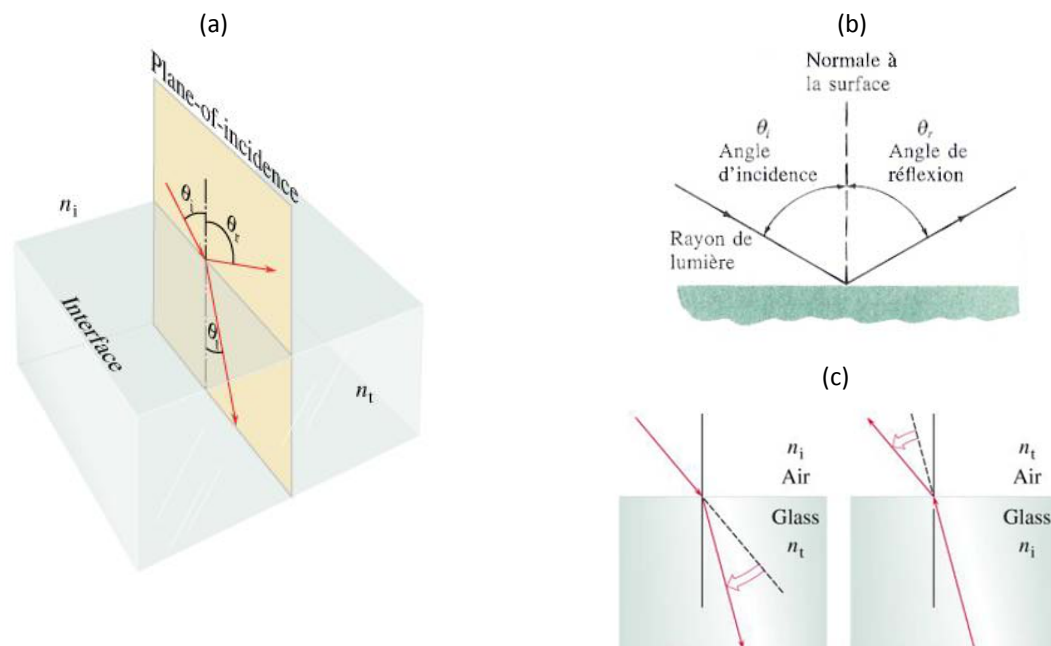
La loi de la réflexion illustrée sur la Figure 2b indique que **les angles d'incidence et de réflexion sont égaux**:

$$\theta_r = \theta_i \quad (\text{Eq. 4})$$

#### 2.1.3 Loi de Snell-Descartes (réfraction)

Les **angles d'incidence et de réfraction** sont liés par la **loi de Snell-Descartes** illustrée sur la Figure 2c :

$$n_i \sin(\theta_i) = n_t \sin(\theta_t) \quad (\text{Eq. 5})$$



**Figure 2:** Illustration des lois de la réflexion et réfraction sur une surface. (a) Première loi de la réflexion-réfraction et plan d'incidence ; (b) Loi de la réflexion ; (c) Réfraction sur une interface air-verre, illustration de la loi de Snell-Descartes (Extrait du cours de Physique Générale PhyG II-9).

## 2.2) Mesures

### 2.2.1 Attention : sécurité laser !

Le rayon lumineux utilisé dans cette expérience est obtenu à partir d'un pointeur laser vert. Il est important de prendre certaines précautions avant de commencer cette expérience :

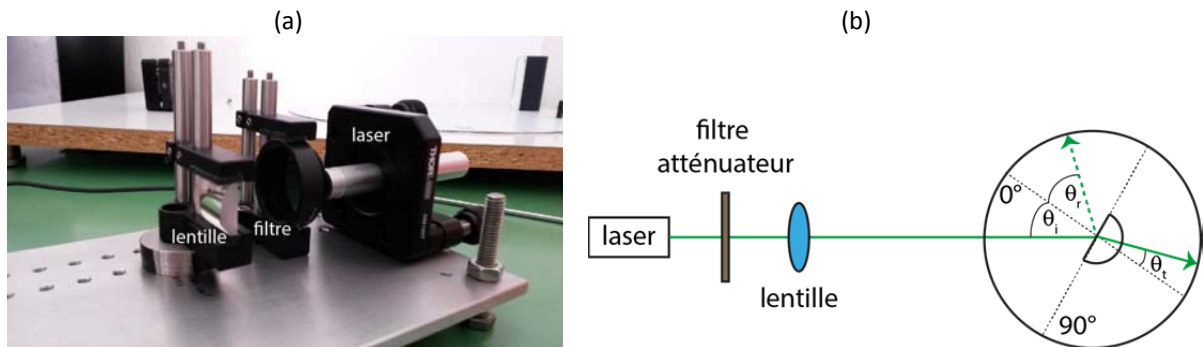


- Enlever toute montre, bijou, etc... avant de commencer cette expérience afin d'éviter des réflexions parasites sur de tels éléments.
- Ne **JAMAIS** s'asseoir à la même hauteur que le faisceau laser ! En particulier, ne jamais avoir les yeux à hauteur du faisceau !
- Toujours être conscient de la direction de propagation du faisceau laser : des collègues travaillent sur le même banc !
- **NE JAMAIS ENLEVER OU PLACER D'ÉLÉMENTS OPTIQUES DANS LE FAISCEAU LASER !** Eteindre d'abord le laser (interrupteur sur OFF), placer ou enlever les éléments d'optique à étudier, puis rallumer le laser.

### 2.2.2 Etude de la loi de la réfraction (loi de Snell-Descartes) avec un bloc semi-circulaire

- Le montage du laser à utiliser avant la plaque semi-circulaire devrait ressembler à la photo en Figure 3a. Si l'un des éléments n'est pas sur la plaque en aluminium, vissez-le à l'endroit indiqué. En absence de la lentille cylindrique, vérifiez que le faisceau laser est bien horizontal en utilisant le point cible dans le coin en bas à gauche de l'écran qui sera utilisé ultérieurement avec les fibres optiques. Ajustez si nécessaire le support du laser pour rendre le faisceau horizontal.
- Placer le bloc semi-circulaire **dans le bon sens**. Justifier l'utilisation de cette géométrie pour vérifier cette loi. Constaté que les rayons incidents et réfléchis sont dans le même plan (Figure 2a).
- A partir de la position  $\theta_i = 0$ , relever  $\sim 10$  valeurs différentes de  $\theta_i$  et  $\theta_t$  et estimer l'erreur faite sur une mesure d'angle dans cette expérience. Reporter graphiquement  $\sin(\theta_i)$  en fonction de  $\sin(\theta_t)$  avec les barres d'erreur correspondantes sur la feuille Excel prévue à cet effet. La valeur de  $n_a$  (air) est donnée dans le Tableau 1.

- d) A partir de la pente du graphique et de l'erreur sur cette pente, en déduire la valeur de l'indice  $n_b$  du bloc semi-circulaire (avec l'incertitude correspondante).

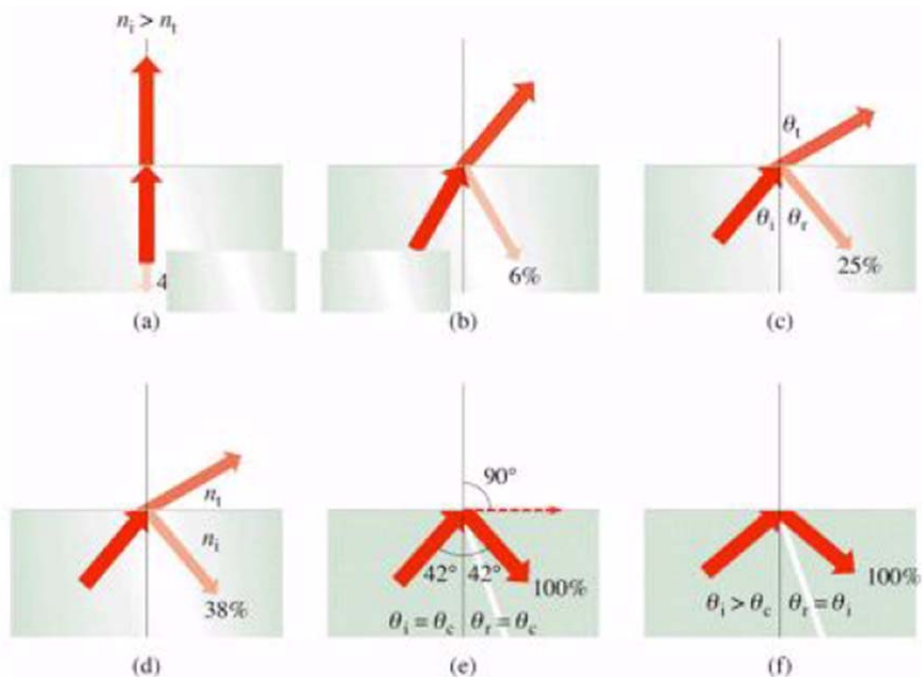


**Figure 3:** Etude expérimentale de la loi de la réfraction (loi de Snell-Descartes). (a) Photographie du dispositif laser avec le filtre atténuateur et la lentille cylindrique. (b) Schéma de principe de l'expérience.

### 2.2.3 Etude d'un cas particulier : Réflexion totale

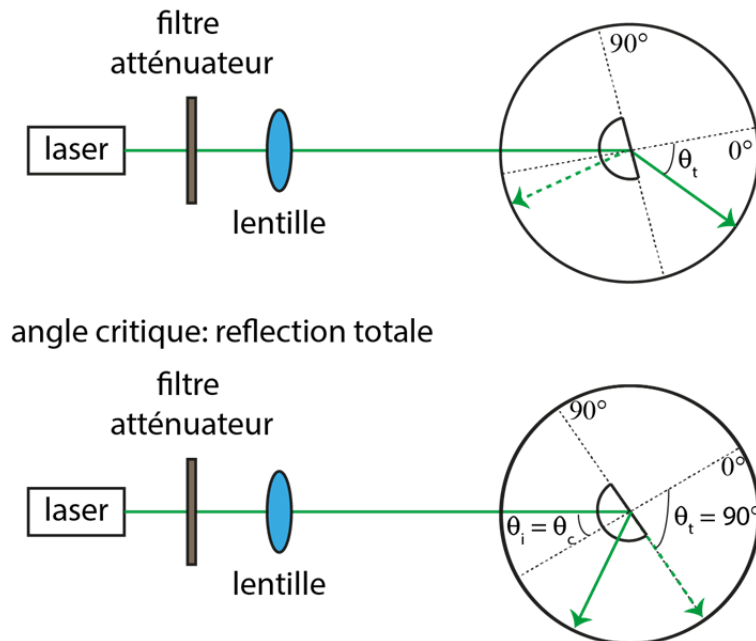
La **réflexion totale** est un phénomène qui est le résultat d'un cas particulier des lois précédentes et qui a des applications importantes en optique. En effet, le guidage de la lumière dans les fibres optiques (voir partie 3.2) trouve son origine dans ce phénomène. Dans la loi de Snell-Descartes (Eq. 5), nous remarquons que:

- Lorsque l'indice de réfraction du premier milieu est plus petit que celui du deuxième milieu ( $n_i < n_t$ ), l'angle réfracté est **plus petit que l'angle d'incidence** ( $\theta_t < \theta_i$ ). Ceci veut dire que pour tout angle d'incidence possible  $\theta_i$  (compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ ), il existe un rayon réfracté.
- Dans la situation inverse, lorsque l'indice de réfraction du premier milieu est plus grand que celui du deuxième milieu ( $n_i > n_t$ ), l'angle réfracté est **plus grand que l'angle d'incidence** ( $\theta_t > \theta_i$ ). Ceci veut dire qu'il y a un angle d'incidence limite (ou angle d'incidence critique)  $\theta_c$  au-delà duquel il n'y a plus de rayon réfracté. Au-delà de cet angle, la totalité de la lumière est réfléchiée à l'interface. On appelle ce phénomène **la réflexion totale**. Il est illustré sur la Figure 4.



**Figure 4:** Réflexion totale sur une interface entre deux milieux tels que  $n_i > n_t$  (Extrait du cours de Physique Générale PhYG II-9).

- a) Placer le bloc semi-circulaire dans le sens opposé de l'expérience précédente. Observer et comprendre la différence par rapport au cas précédent, **justifier l'utilisation de cette géométrie** pour l'étude de ce cas.



**Figure 5:** Schéma expérimental pour l'étude de la réflexion totale. (a) Angle d'incidence inférieur à l'angle critique ; (b) angle d'incidence égal à l'angle critique.

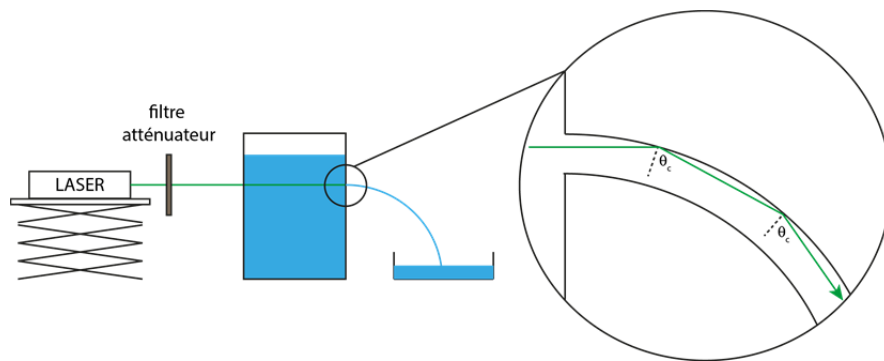
- b) Constaté qu'à l'approche d'un certain angle d'incidence particulier  $\theta_i$ , l'angle réfracté  $\theta_t$  approche  $90^\circ$  et on observe une réflexion totale dans le plexiglas. On appelle cet angle d'incidence **l'angle critique  $\theta_c$** .
- c) Mesurer cet angle critique  $\theta_c$ . En déduire l'indice de réfraction  $n_b$  du matériau à partir de la loi de Snell-Descartes et évaluer l'incertitude sur cette mesure ( $\Delta n_b$ ) en utilisant la feuille Excel prévue à cet effet. Comparer l'indice obtenu à celui trouvé précédemment (§2.2.2).

### 3 Applications de la réflexion totale

#### 3.1) Guidage de la lumière dans l'eau

Le schéma du montage à réaliser est présenté dans la Figure 6.

- Connaissant la condition de réflexion totale, calculer l'angle d'incidence critique dans une interface air/eau (voir Tableau 1 pour l'indice de réfraction de l'eau).
- Remplir d'eau (robinet dans la salle de TP B9) le bac prévu à cet effet. Prenez garde à ce que les vis soient bien serrées pour éviter des fuites. Testez le jet d'eau, et assurez-vous que le bac de collection d'eau soit placé correctement.
- Eteignez le laser (position OFF).
- Placez le pointeur laser approximativement à la hauteur du jet d'eau.
- Allumer le laser en faisant attention aux réflexions parasites – toujours garder le filtre atténuateur devant le laser et veillez aux instructions de sécurité laser ci-dessus.
- Enlever la vis servant de bouchon au bac rempli d'eau et laisser l'eau couler dans le bac de collection prévu à cet effet.
- Faire des petits ajustements de la monture qui supporte le laser jusqu'à observer un faisceau brillant en sortie du jet d'eau : vous avez à ce moment-là obtenu la réflexion totale dans le jet d'eau.



**Figure 6:** Schéma expérimental à mettre en place pour l'étude de la réflexion totale dans un jet d'eau.

### 3.2) Fibre optique

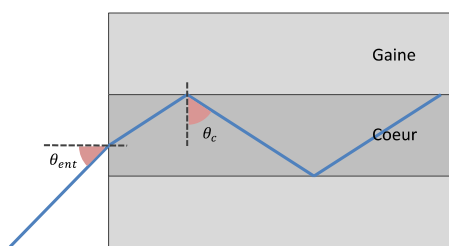
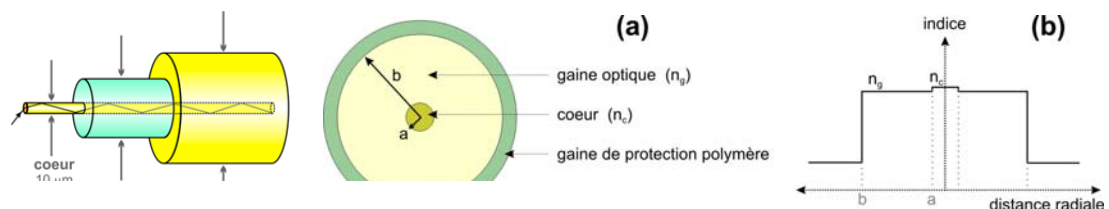
Une des applications les plus importantes du phénomène de réflexion totale est le **guidage dans les fibres optiques à saut d'indice** (voir Figure 7). Les fibres optiques permettent de transmettre de la lumière sur de longues distances : elles sont donc couramment utilisées pour transmettre des données (sous forme de lumière) dans les réseaux de télécommunication à longues distances. Les applications les plus courantes sont la téléphonie, internet et la télévision par câble. Le principal avantage de l'utilisation de fibres optiques pour la transmission de données est leur grande capacité de transmission comparé aux anciens systèmes de transmissions électriques : par exemple, une seule fibre optique peut transmettre des centaines de lignes téléphoniques simultanément.

Le but de cette partie du TP est de se familiariser avec les fibres optiques et de comprendre les principes de base de leur fonctionnement.

Dans une fibre optique, la lumière est guidée dans la région centrale appelée le cœur de la fibre (indice de réfraction à la longueur d'onde de  $1.55 \mu\text{m}$  typiquement utilisée en télécommunications :  $n_c = 1.4475$ ), qui est entouré non pas d'air, mais d'une gaine d'indice de réfraction légèrement plus faible que le cœur (typiquement  $n_g = 1.444$ ).

#### 3.2.1 Calcul des conditions de guidage

- Calculer l'angle critique  $\theta_c$  de réflexion totale dans le cœur (interface cœur-gaine) pour le cas spécifique de la fibre décrite ci-dessus.
- En utilisant la loi de réfraction (Eq. 5) à l'interface air-cœur à l'entrée de la fibre (voir schéma sur la Figure 7c), en déduire l'angle maximum d'entrée  $\theta_{\text{ent}}$  des rayons qui pourront être guidés dans une telle fibre par réflexion totale interne.
- En déduire l'**ouverture numérique ON** de cette fibre, défini par  $ON = n \cdot \sin(\theta_{\text{ent}})$ . Dans le cas où l'extrémité de la fibre est dans l'air, la relation devient  $ON = \sin(\theta_{\text{ent}})$ .



**re 7 :** a) Schéma d'une fibre optique typiquement utilisée en télécommunications ; b) profil d'indice de réfraction dans une fibre optique ([http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre\\_optique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique)); c) schéma pour le calcul de l'angle d'entrée maximum toléré dans une fibre.

L'ouverture numérique est une grandeur caractéristique des fibres optiques qui donne une indication de **l'angle maximum des rayons en entrée de fibre qui seront guidés par réflexion totale** dans la fibre, ainsi que de la **divergence du faisceau de sortie** de la fibre. Les faisceaux lumineux qui entrent dans la fibre avec des angles supérieurs à cet angle ne sont que partiellement réfléchis à chaque réflexion aux interfaces cœur-gaine. La lumière souffre alors de pertes importantes de puissance à chaque réflexion et est atténuée après quelques réflexions. Cette lumière n'est donc pas guidée dans la fibre.

Il est possible de démontrer grâce à la condition de réflexion totale que l'ouverture numérique d'une fibre optique classique (fibre à saut d'indice) telle que celles utilisées dans ce TP ne dépend que de la différence d'indice entre le cœur et la gaine ( $n_{\text{cœur}} - n_{\text{gaine}}$ ) selon l'expression :

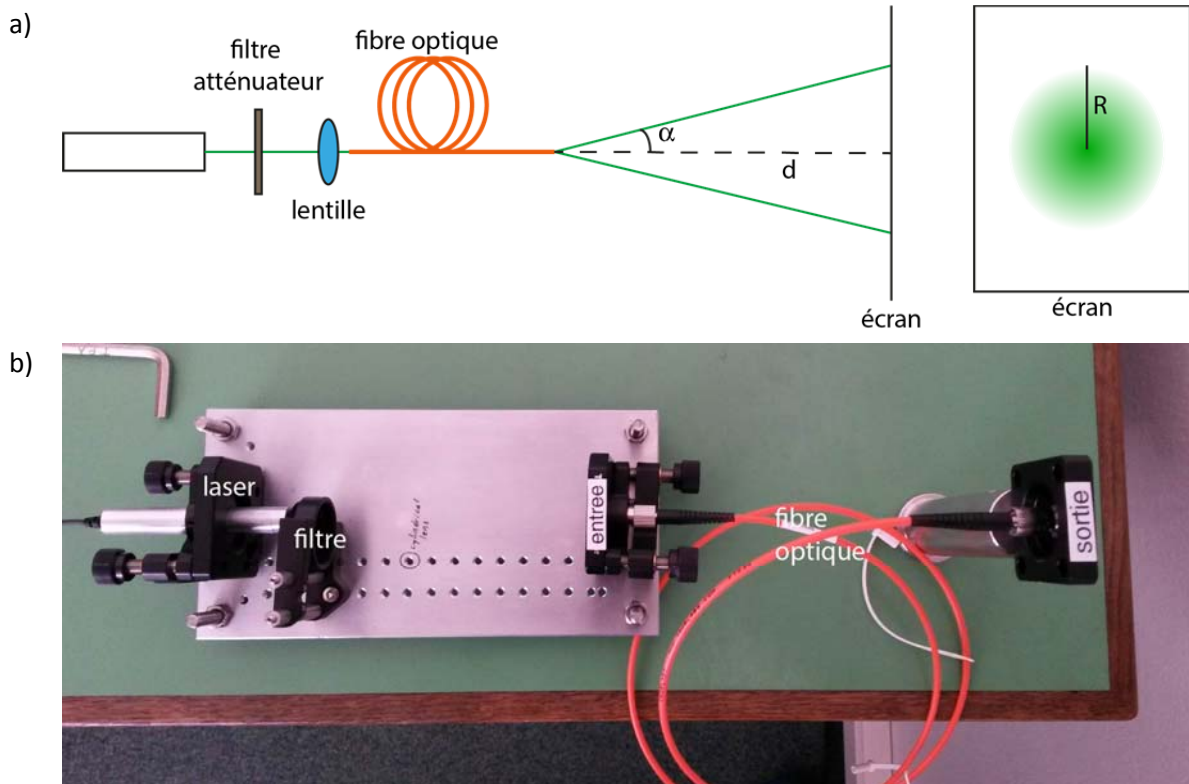
$$ON = \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2} \quad (\text{Eq. 6})$$

### 3.2.2 Réalisation expérimentale

Dans cette expérience plusieurs fibres optiques (numérotées de 1 à 4) seront évaluées et testées afin de déterminer leur ouverture numérique.

#### a) Couplage dans une fibre optique

Le montage expérimental pour injecter de la lumière dans une fibre optique ("couplage" de la lumière laser dans une fibre optique) est schématisé sur la Figure 8 a. Dans cette expérience, il est demandé de tester 4 fibres optiques numérotées de 1 à 4. Commencer par la fibre optique N°1.



**Figure 8** : Schéma expérimental pour la mesure du couplage dans et hors d'une fibre optique. (a) Schéma de principe ; (b) photographie du dispositif expérimental.

Le couplage dans les fibres optiques est une tâche relativement délicate à cause de la très petite dimension du cœur, qui est d'environ  $10 \mu\text{m}$  de diamètre pour les fibres utilisées pour les télécommunications optiques à  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  (vous commencerez cependant avec des fibres de cœur plus grand). Dans cette expérience, n'hésitez pas à demander l'aide des assistants pour votre premier essai.



- Eteindre le laser (bouton position OFF). **TOUJOURS éteindre le laser avant de faire des opérations dans le faisceau, par exemple pour changer de fibre.**
- Enlever le filtre atténuateur pour la première partie de l'alignement.
- Placer une extrémité de la fibre optique dans la monture contenant la lentille (marquée "fibre entrée"). La fibre peut facilement être vissée en faisant attention à aligner l'encoche correspondante sur le connecteur.
- Visser la monture sur la plaque en aluminium prévue à cet effet.
- Placer l'autre extrémité de la fibre dans la monture prévue à cet effet (marqué "fibre sortie"), en face de l'écran gradué. Le montage finale est présenté dans la Figure 8 b.
- Allumer le laser (bouton position ON).

**! ATTENTION ! Le faisceau laser n'est pas atténué et de la lumière peut déjà apparaître en sortie de fibre ! Assurez-vous que la fibre est bien fixée des deux côtés et que leur direction n'est pas dangereuse pour vous ou vos collègues travaillant sur la même table ! Ne jamais diriger la sortie de la fibre vers les yeux.**

- Assurez-vous que le faisceau est correctement centré sur la lentille.
- Observer attentivement l'écran à la sortie de la fibre. Si vous n'observez pas directement un faisceau vert intense, placez la sortie de fibre près de l'écran, et essayez de faire de petits ajustements des montures supportant le laser et la lentille jusqu'à observer un faisceau brillant en sortie de fibre.
- Eteindre le laser et replacer le filtre atténuateur.
- Pour changer de fibre optique, éteindre le laser, enlever la fibre et ne pas oublier de couvrir les connecteurs avec les capuchons de protection prévus à cet effet.

#### b) Estimation de l'ouverture numérique

- Mesurez précisément la distance  $d$  entre la sortie de la fibre et l'écran, et évaluer l'incertitude  $\Delta d$  sur cette mesure.
- Mesurez à l'aide de l'écran gradué le rayon  $R$  de la tache lumineuse, et estimer l'incertitude de mesure  $\Delta R$ .
- Calculer l'angle de divergence  $\alpha$ , et son incertitude  $\Delta\alpha$ , puis estimer l'ouverture numérique ( $ON$ ) de la fibre. Donner le résultat avec l'incertitude correspondante.
- Comparer les valeurs obtenues pour les différentes fibres aux valeurs données par le fabricant (marquées en noir sur les fibres).

#### c) Qualité du faisceau

Quelle différence observez-vous dans le faisceau de sortie des différentes fibres? Discutez avec votre assistant la source de ces différences.

## 4 Autres éléments

Le matériel à disposition permet aussi d'observer, entre autres:

- le foyer  $F$  de lentilles convergentes et divergentes
- le foyer  $F$  et le centre  $C$  de miroirs concaves et convexes
- la dispersion de la lumière blanche par un prisme (utiliser pour cela la lampe halogène)
- l'angle de réflexion interne totale d'un prisme
- le guidage dans un élément courbé en plastique
- les images par combinaison de miroirs, lentilles, prismes, etc.

Faites au minimum 5 observations avec le matériel à disposition et essayez de faire le lien avec des situations de la vie réelle!



# Travaux Pratiques de Physique

## Expérience N°11 : Eléments d'optique

Incertitude sur la mesure d'un angle:

$\Delta\theta$  [°] =

### 2.2.2) Loi de Snell-Descartes (réfraction)

$\theta_i$ [°]									
$\sin \theta_i$									
$\Delta(\sin \theta_i)$									

$\theta_t$ [°]									
$\sin \theta_t$									
$\Delta(\sin \theta_t)$									

Représentation graphique :  $\sin \theta_i = f(\sin \theta_t)$

insérer graphique ici

Indice du bloc:

$n_b =$    $\pm$

# Travaux Pratiques de Physique

## Expérience N°11 : Eléments d'optique

### 2.2.3) Réflexion totale

**Bloc semi-circulaire**

$$\theta_c = \text{ } \pm \text{ } [^\circ]$$

$$n_b = \text{ } \pm \text{ }$$

### 3.1) Guidage dans l'eau

$$\theta_c = \text{ } [^\circ]$$

#### 3.2.1) Fibre optique (calculs)

$$\theta_c = \text{ } [^\circ]$$

Angle maximum d'entrée dans une fibre optique

$$\theta_{ent} = \text{ } [^\circ]$$

#### 3.2.1) Fibre optique (réalisation expérimentale)

**Fibre 1**

$$d = \text{ } \pm \text{ } [cm]$$

$$R = \text{ } \pm \text{ } [cm]$$

$$\theta_{ent} = \text{ } \pm \text{ } [^\circ]$$

$$ON_{exp} = \text{ } \pm \text{ }$$

$$ON_{th} = \text{ }$$

**Fibre 2**

$$d = \text{ } \pm \text{ } [cm]$$

$$R = \text{ } \pm \text{ } [cm]$$

$$\theta_{ent} = \text{ } \pm \text{ } [^\circ]$$

$$ON_{exp} = \text{ } \pm \text{ }$$

$$ON_{th} = \text{ }$$

**Fibre 3**

$$d = \text{ } \pm \text{ } [cm]$$

$$R = \text{ } \pm \text{ } [cm]$$

$$\theta_{ent} = \text{ } \pm \text{ } [^\circ]$$

$$ON_{exp} = \text{ } \pm \text{ }$$

$$ON_{th} = \text{ }$$

**Fibre 4**

$$d = \text{ } \pm \text{ } [cm]$$

$$R = \text{ } \pm \text{ } [cm]$$

$$\theta_{ent} = \text{ } \pm \text{ } [^\circ]$$

$$ON_{exp} = \text{ } \pm \text{ }$$

$$ON_{th} = \text{ }$$

### 4) Autres éléments

Faire des schémas des observations et mesures réalisées !