

## Exercice I – Nature de la lumière

Le texte ci-dessous retrace succinctement l'évolution de quelques idées à propos de la nature de la lumière.

HUYGHENS (1629-1695) donne à la lumière un caractère ondulatoire par analogie à la propagation des ondes à la surface de l'eau et à la propagation du son. Pour Huyghens, le caractère ondulatoire de la lumière est fondé sur les faits suivants :

- « le son ne se propage pas dans une enceinte vide d'air tandis que la lumière se propage dans cette même enceinte. La lumière consiste dans un mouvement de la matière qui se trouve entre nous et le corps lumineux, matière qu'il nomme éther ».
- « la lumière s'étend de toutes parts<sup>1</sup> et, quand elle vient de différents endroits, même de tout opposés<sup>2</sup>, les ondes lumineuses se traversent l'une l'autre sans s'empêcher<sup>3</sup> ».
- « la propagation de la lumière depuis un objet lumineux ne saurait être<sup>4</sup> par le transport d'une matière, qui depuis cet objet s'en vient jusqu'à nous ainsi qu'une balle ou une flèche traverse l'air ».

FRESNEL (1788-1827) s'attaque au problème des ombres et de la propagation rectiligne de la lumière. Avec des moyens rudimentaires, il découvre et il exploite le phénomène de diffraction. Il perce un petit trou dans une plaque de cuivre. Grâce à une lentille constituée par une goutte de miel déposée sur le trou, il concentre les rayons solaires sur un fil de fer.

### 1. Analyse du texte historique

#### 1.1. Texte concernant HUYGHENS

1.1.1. Quelle erreur commet HUYGHENS en comparant la propagation de la lumière à celle des ondes mécaniques ?

1.1.2. Citer deux propriétés générales des ondes que l'on peut retrouver dans le texte de HUYGHENS.

#### 1.2. Texte concernant FRESNEL

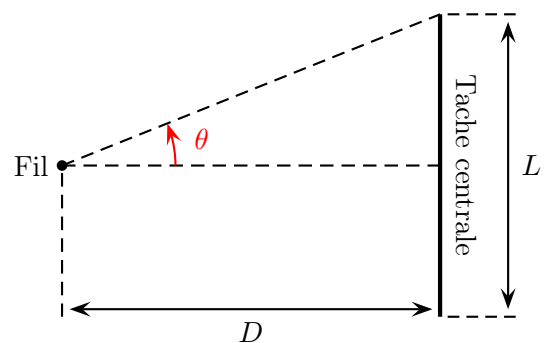
1.2.1. FRESNEL a utilisé les rayons solaires pour réaliser son expérience. Une telle lumière est-elle monochromatique ou polychromatique ?

1.2.2. FRESNEL exploite le phénomène de diffraction de la lumière par un fil de fer. Le diamètre du fil a-t-il une importance pour observer le phénomène de diffraction ? Si oui, indiquer quel doit être l'ordre de grandeur de ce diamètre.

### 2. Diffraction

On réalise une expérience de diffraction à l'aide d'un laser émettant une lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$ . À quelques centimètres du laser, on place successivement des fils verticaux de diamètres connus. On désigne par  $a$  le diamètre d'un fil.

La figure de diffraction obtenue est observée sur un écran blanc situé à une distance  $D = 2,0$  m des fils. Pour chacun des fils, on mesure la largeur  $L$  de la tache centrale. À partir de ces mesures et des données, il est possible de calculer l'écart angulaire  $\theta$  du faisceau diffracté.

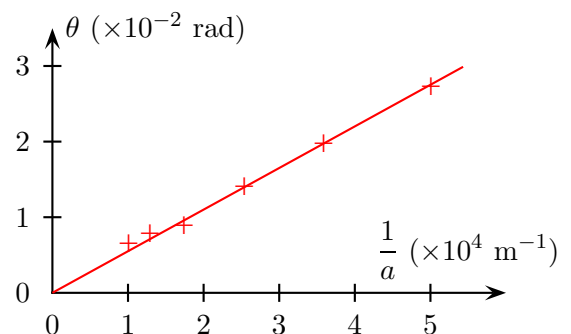


2.1. L'angle  $\theta$  étant petit,  $\theta$  étant exprimé en radian, on a la relation :  $\tan \theta \simeq \theta$ .

Donner la relation entre  $L$  et  $D$  qui a permis de calculer  $\theta$  pour chacun des fils.

2.2. Donner la relation liant  $\theta$ ,  $\lambda$  et  $a$ . Préciser les unités de ces trois grandeurs.

2.3. On trace la courbe  $\theta = f(1/a)$  :



Montrer que la courbe obtenue est en accord avec l'expression de  $\theta$  donnée à la question 2.2.

2.4. Comment, à partir de la courbe précédente, pourrait-on déterminer la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière monochromatique utilisée ?

1. de toutes parts = dans toutes les directions  
2. de tout opposés = de sens opposés  
3. sans s'empêcher = sans se perturber  
4. ne saurait être = ne se fait pas

2.5. En utilisant la courbe ci-dessus, préciser parmi les valeurs de longueurs d'onde proposées ci-dessous, quelle est celle de la lumière utilisée :

560 cm ; 560 mm ; 560  $\mu\text{m}$  ; 560 nm

2.6. Si l'on envisageait de réaliser la même étude expérimentale en utilisant une lumière blanche, qu'on observerait-on ? Justifier.

### 3. Changement de milieu de propagation

Le faisceau laser utilisé dans l'expérience précédente peut traverser le vide, l'eau et le verre, milieux tous transparents. On rappelle que sa longueur d'onde dans l'air, considéré comme équivalent au vide, notée  $\lambda$ , a été trouvée à la question 2.5.

Indiquez les principes ou les formules littérales, et menez les éventuelles applications numériques né-

cessaires, pour recopier et compléter le tableau ci-dessous.

	vide	eau	verre
$\lambda$ (...)			
$n$		1,33	
$v$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$3,00 \times 10^8$		$2,00 \times 10^8$
$\nu$ (Hz)			
Couleur			

## Exercice II – Le spectromètre à prisme

### 1. Caractéristiques d'une onde lumineuse

1.1. Une lampe à vapeur de sodium émet dans le vide une radiation intense de longueur d'onde  $\lambda$  égale à 589 nm. Déterminez la fréquence de cette radiation dans le vide.

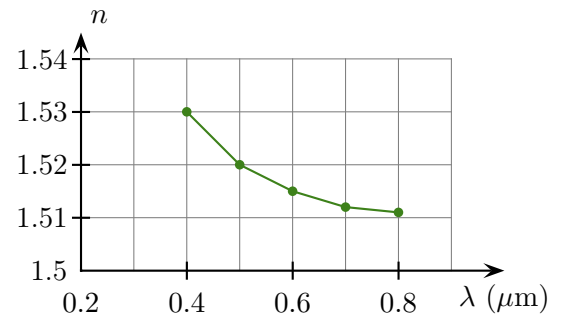
1.2. La radiation émise par la lampe à vapeur de sodium traverse un milieu transparent d'indice  $n = 1,492$ . Justifiez le fait que la fréquence est inchangée et que la longueur d'onde est maintenant égale à 395 nm.

### 2. Analyse d'une lumière complexe

Un spectromètre à prisme utilise les propriétés dispersives d'un prisme en verre. Lorsqu'une lumière polychromatique est dirigée vers l'une des faces du prisme, chaque radiation est déviée d'un angle qui dépend de l'indice et donc de la longueur d'onde dans le vide  $\lambda$ .

Ci-contre est représentée la variation de l'indice d'un verre en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .

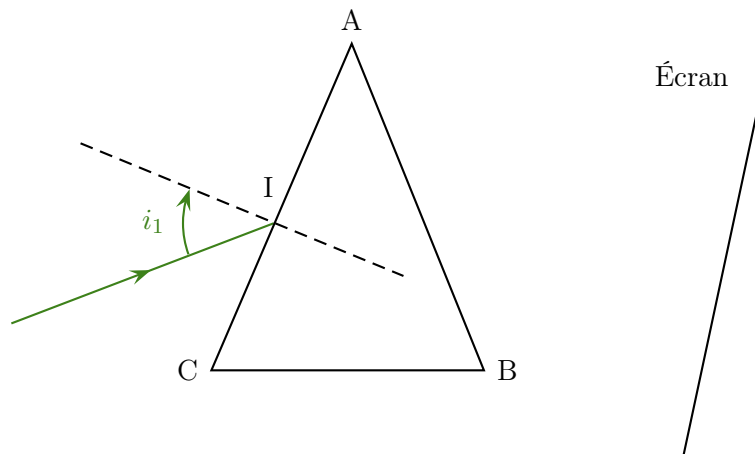
2.1. À quelles couleurs sont associées les longueurs d'onde correspondant aux limites du domaine visible ?



2.2. À l'aide du graphique, déterminer les indices du prisme en verre dans ces longueurs d'onde limites.

2.3. On place sur le trajet de la lumière un filtre qui ne laisse passer que la radiation de longueur d'onde 589 nm d'une lampe à vapeur de sodium, et on l'envoie en I vers la face AB du prisme, réalisé avec le verre précédent, sous une incidence  $i_1 = 45^\circ$ . Déterminer l'angle de réfraction  $i_2$  dans le prisme pour cette radiation.

2.4. Tracer approximativement le rayon réfracté à l'intérieur du prisme (figure ci-dessous à reproduire). Compléter approximativement la marche du rayon lumineux, avec une nouvelle réfraction à la sortie sur la face AC du prisme, et noter l'angle de déviation  $D$ .



## Exercice I – Nature de la lumière

### 1. Analyse du texte historique

#### 1.1. Texte concernant HUYGENS

**1.1.1.** HUYGENS se trompe quant au milieu de propagation de la lumière, qu'il nomme *éther* ; on sait depuis que la lumière est une onde électromagnétique qui n'a pas besoin d'un milieu matériel pour se propager.

**1.1.2.** Dans la phrase « les ondes lumineuses se traversent l'une l'autre sans s'empêcher », HUYGENS illustre le fait que deux ondes peuvent se croiser sans s'influencer — repenser aux expériences avec les ondes sur une corde.

Dans la phrase « la propagation [...] ne saurait être par le transport de matière », HUYGENS indique qu'une onde correspond à la propagation d'une perturbation, sans déplacement net ni transport de matière.

#### 1.2. Texte concernant FRESNEL

**1.2.1.** La lumière solaire est polychromatique, car elle contient un grand nombre de radiations de longueurs d'ondes différentes.

**1.2.2.** Le diamètre du fil est le paramètre important dans cette expérience de diffraction. Si on note  $a$  ce diamètre, il doit être du même ordre de grandeur (ou mieux, plus petit) que la longueur d'onde  $\lambda$  :

$$a \sim \lambda$$

### 2. Diffraction

**2.1.** Dans le triangle rectangle du schéma, on a :

$$\tan \theta = \frac{L}{D}$$

Avec  $\theta$  petit & exprimé en radians (rad), il vient :

$$\theta \simeq \frac{L}{2D}$$

**2.2.** La relation liant le demi-diamètre apparent  $\theta$  de la tache centrale de diffraction, vue depuis le fil, est :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

$\theta$  est en radians (symbole rad),  $\lambda$  et  $a$  en mètres (symbole m).

**2.3.** La courbe  $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$  admet une droite d'interpolation moyenne, passant par l'origine, donc prouve la relation de proportionnalité entre  $\theta$  et  $\frac{1}{a}$  :

$$\theta = p \times \frac{1}{a}$$

où  $p$  est une constante de proportionnalité qui correspond à la pente de la droite d'interpolation moyenne.

L'identité avec la formule de la question précédente est effective.

**2.4.** En identifiant les deux équations précédentes, on constate que la pente  $p$  de la droite d'interpolation moyenne correspond à la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière monochromatique utilisée.

**2.5.** Effectuons une détermination de la pente  $p$ , en trouvant les coordonnées du point extrême de la droite :

$$\begin{cases} \theta = 3,0 \times 10^{-2} \text{ rad} \\ \frac{1}{a} = 5,4 \times 10^4 \text{ m}^{-1} \end{cases}$$

$$\Rightarrow p = \frac{\Delta\theta}{\Delta\frac{1}{a}} = \frac{3,0 \times 10^{-2}}{5,4 \times 10^4} = 5,6 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Donc la bonne valeur est 560 nm. Insistons sur le fait qu'en divisant des radians par des  $\text{m}^{-1}$ , on obtient uniquement des mètres, le radian étant une unité d'angle.

**2.6.** En lumière blanche, on obtient des irisations colorées.

La formule précédente indique une dépendance de l'ouverture angulaire de la première extinction avec la longueur d'onde. Si on travaille en lumière polychromatique, chaque radiation de longueur d'onde particulière va créer une tache centrale de diamètre différent, elle-même entourée de la première frange sombre, repérée par l'angle  $\theta$ .

L'extinction de certaines radiations permet d'avoir superposition des autres couleurs au point considéré, d'où un résultat coloré. On parle alors de franges irisées, de part et d'autre du centre de la figure de diffraction.

### 3. Changements de milieu de propagation

Par commodité on note  $\lambda_0 = 560 \text{ nm}$  la longueur d'onde dans le vide ; dans un milieu d'indice  $n$ , la longueur d'onde vaut :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Donc la longueur d'onde dans l'eau vaut (deuxième ligne, troisième colonne) :

$$\lambda = \frac{560}{1,33} = 421 \text{ nm}$$

Le vide a par définition un indice  $n = 1$  (troisième ligne, deuxième colonne). Le verre a un indice qui vaut :

$$n = \frac{c}{v} = \frac{3,00 \times 10^8}{2,00 \times 10^8} = 1,50$$

Donc la longueur d'onde dans le verre vaut (deuxième ligne, quatrième colonne) :

$$\lambda = \frac{560}{1,50} = 373 \text{ nm}$$

La célérité de la lumière dans l'eau est donnée par :

$$n = \frac{c}{v} \Leftrightarrow v = \frac{c}{n},$$

donc (quatrième ligne, troisième colonne) :

$$v = \frac{3,00 \times 10^8}{1,33} = 2,25 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Reste la ligne des fréquences  $\nu$ . La fréquence est liée à la longueur d'onde par les relations :

$$\lambda_0 = cT = \frac{c}{\nu} \quad \text{et} \quad \lambda = vT = \frac{v}{\nu}$$

Ces deux relations sont équivalentes, la fréquence étant une caractéristique de l'onde, indépendante du

milieu dans lequel elle se propage. Par exemple, dans le vide :

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} \Leftrightarrow n = \frac{c}{\lambda_0}$$

Application numérique (toute la cinquième ligne) :

$$\nu = \frac{3,00 \times 10^{-8}}{560 \times 10^{-9}} = 5,36 \times 10^{-14} \text{ Hz}$$

La couleur est aussi une caractéristique de l'onde, indépendante du milieu.  $\lambda_0 = 560 \text{ nm}$  correspond à l'orange (toute la sixième ligne).

	vide	eau	verre
$\lambda$ (nm)	560	421	373
$n$	1	1,33	1,50
$v$ (m.s <sup>-1</sup> )	$3,00 \times 10^8$	$2,25 \times 10^8$	$2,00 \times 10^8$
$\nu$ (Hz)	$5,36 \times 10^{-14}$		
Couleur	Vert ou jaune		

## Exercice II – Le spectromètre à prisme

### 1. Caractéristiques d'une onde lumineuse

#### 1.1. Fréquence de la radiation dans le vide :

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8}{589 \times 10^{-9}} = 5,09 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

1.2. La fréquence est une caractéristique de l'onde lumineuse, elle est inchangée quelque soit le milieu. Quant à la longueur d'onde  $\lambda_m$  dans le milieu, elle dépend de la célérité  $v$  de l'onde, et donc de l'indice  $n$  :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{et} \quad \lambda_m = \frac{v}{f} \Rightarrow \frac{\lambda}{\lambda_m} = \frac{c}{v} = n$$

$$\Rightarrow \lambda_m = \frac{\lambda}{n} = \frac{589}{1,492} = 395 \text{ nm}$$

### 2. Analyse d'une lumière complexe

2.1. Dans le vide ou dans l'air (d'indice  $n_{\text{air}} \simeq 1$ ), à la longueur d'onde de  $0,4 \mu\text{m}$  correspond le violet, et à  $0,8 \mu\text{m}$  correspond le rouge.

2.2. Simple lecture graphique :

$$n_{\text{violet}} = 1,530 \quad \text{et} \quad n_{\text{rouge}} = 1,511$$

### 2.3. Loi de Snell-Descartes pour la réfraction :

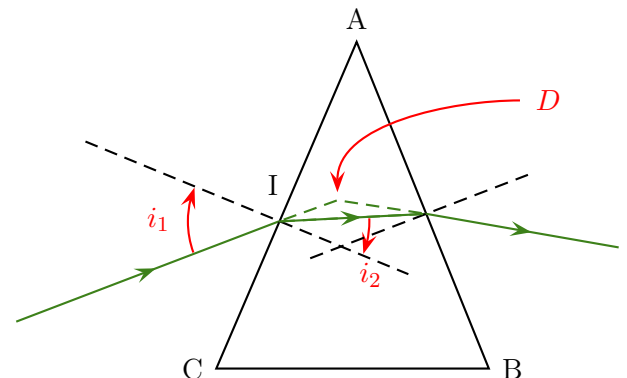
$$n_{\text{air}} \sin i_1 = n \sin i_2 \Leftrightarrow \sin i_2 = \frac{n_{\text{air}} \sin i_1}{n}$$

Application numérique :

$$\sin i_1 = \frac{1,00 \times \sin 45^\circ}{1,492} = 0,474$$

On prends l'arcsinus :  $i_1 = 28,3^\circ$ .

2.4. Tracé approximatif du rayon dans le prisme, et mise en évidence de l'angle de déviation  $D$  du faisceau lumineux :



**Exercice I – Lumière**

.../18

- HUYGENS : pas de milieu matériel
- FRESNEL : principe de superposition
- FRESNEL : pas de propagation de matière
- Polychromatique
- Oui,  $a \sim \lambda$
- $\theta \simeq L/2D$ , démontrée
- $\theta = \lambda/a$
- $\theta$  en radians,  $\lambda$  et  $a$  en mètres
- Droite = proportionnalité  $\theta$  et  $1/a$ , en accord
- $\lambda$  = pente de la droite précédente
- Détermination graphique 560 nm + précision
- Franges irisées
- $\lambda = \lambda_0/n$  ou équivalent
- $\lambda_0 = c/\nu$  ou équivalent
- Toutes applications numériques montrées
- 4 cases “vide” du tableau OK
- 4 cases “eau” du tableau OK
- 4 cases “verre” du tableau OK

**Exercice II – Spectromètre**

.../12

- $f = c/\lambda$
- $f = 5,09 \times 10^{14}$  Hz
- Fréquence indépendante du milieu
- $\lambda = \lambda_0/n$  démontrée
- $\lambda = 395$  nm, calcul mené
- Violet pour 400 nm, rouge pour 800 nm
- $n_{\text{violet}} = 1,530$  et  $n_{\text{rouge}} = 1,511$
- $n_{\text{air}} \sin i_1 = n \sin i_2$
- $\sin i_2 = 0,474$  et  $i_1 = 28,3^\circ$
- Entrée : rayon qui s’approche de la normale
- Sortie : rayon qui s’éloigne de la normale
- Angle de déviation  $D$

Total

.../30

Note

.../20

**Exercice I – Lumière**

.../18

- HUYGENS : pas de milieu matériel
- FRESNEL : principe de superposition
- FRESNEL : pas de propagation de matière
- Polychromatique
- Oui,  $a \sim \lambda$
- $\theta \simeq L/2D$ , démontrée
- $\theta = \lambda/a$
- $\theta$  en radians,  $\lambda$  et  $a$  en mètres
- Droite = proportionnalité  $\theta$  et  $1/a$ , en accord
- $\lambda$  = pente de la droite précédente
- Détermination graphique 560 nm + précision
- Franges irisées
- $\lambda = \lambda_0/n$  ou équivalent
- $\lambda_0 = c/\nu$  ou équivalent
- Toutes applications numériques montrées
- 4 cases “vide” du tableau OK
- 4 cases “eau” du tableau OK
- 4 cases “verre” du tableau OK

**Exercice II – Spectromètre**

.../12

- $f = c/\lambda$
- $f = 5,09 \times 10^{14}$  Hz
- Fréquence indépendante du milieu
- $\lambda = \lambda_0/n$  démontrée
- $\lambda = 395$  nm, calcul mené
- Violet pour 400 nm, rouge pour 800 nm
- $n_{\text{violet}} = 1,530$  et  $n_{\text{rouge}} = 1,511$
- $n_{\text{air}} \sin i_1 = n \sin i_2$
- $\sin i_2 = 0,474$  et  $i_1 = 28,3^\circ$
- Entrée : rayon qui s’approche de la normale
- Sortie : rayon qui s’éloigne de la normale
- Angle de déviation  $D$

Total

.../30

Note

.../20