

## LA LUMIÈRE : UNE ONDE

### Document 1 : La 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.

*Extraits d'articles parus dans l'ouvrage « Physique et Physiciens » et dans des revues « Sciences et Vie ».*

① de toutes parts = dans toutes les directions

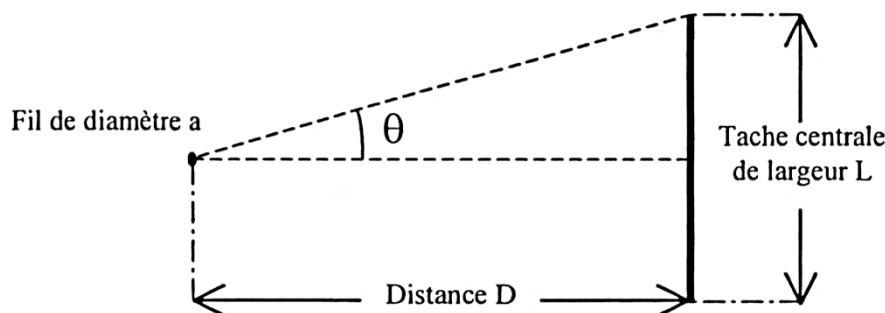
③ sans s'empêcher = sans se perturber

② de tout opposés = de sens opposés

④ ne saurait être = ne se fait pas

### Document 2 : Diffraction par un fil

On réalise une expérience de diffraction à l'aide d'un laser émettant une lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$ .



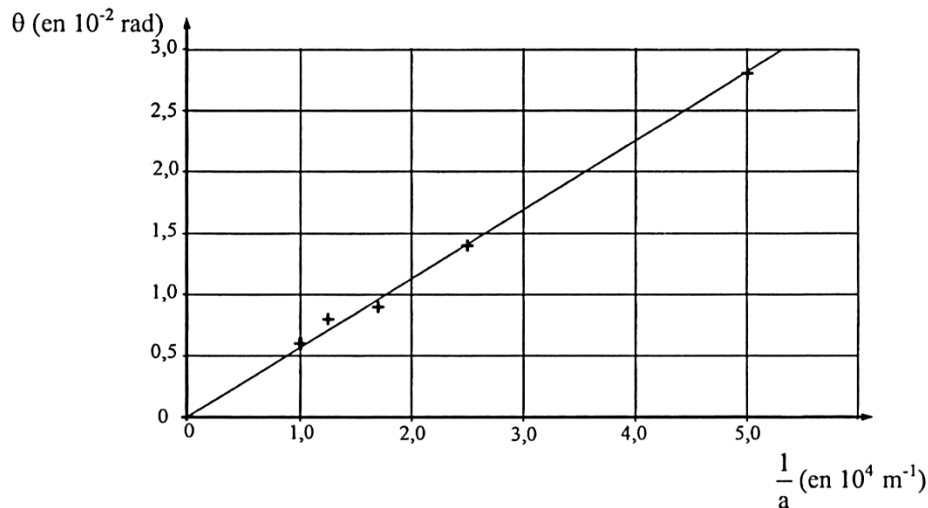
**Figure 1 – vue de dessus**

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  $D = 1,60$  m des fils. Pour chacun des fils, on mesure la largeur  $L$  de la tache centrale.

### Document 3 : Écart angulaire $\theta$

À partir des mesures et des données, il est possible de calculer l'écart angulaire  $\theta$  du faisceau diffracté.



**Figure 2**

## **PARTIE I. Texte concernant Huygens et Fresnel**

### **1. Texte concernant Huyghens**

**1.1.** Quelle erreur commet Huyghens en comparant la propagation de la lumière à celle des ondes mécaniques?

**1.2.** Citer deux propriétés générales des ondes que l'on peut retrouver dans le texte de Huyghens.

### **2. Texte concernant Fresnel**

**2.1.** Fresnel a utilisé les rayons solaires pour réaliser son expérience.

Une telle lumière est-elle monochromatique ou polychromatique?

**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.

## **PARTIE II. DIFFRACTION**

**1.** L'angle  $\theta$  étant petit,  $\theta$  étant exprimé en radian, on a la relation:  $\tan \theta \approx \theta$ .

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

**2.** Donner la relation liant  $\theta$ ,  $\lambda$  et  $a$ . Préciser les unités de  $\theta$ ,  $\lambda$  et  $a$ .

**3.** On trace la courbe  $\theta = f(1/a)$ . Celle-ci est donnée sur la figure 2 ci-dessus :

Montrer que la courbe obtenue est en accord avec l'expression de  $\theta$  donnée à la question 2. précédente

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

**5.** En utilisant la figure 2, préciser parmi les valeurs de longueurs d'onde proposées ci-dessous, quelle est celle de la lumière utilisée.

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

**6.** Si l'on envisageait de réaliser la même étude expérimentale en utilisant une lumière blanche, on observerait des franges irisées.

En utilisant la réponse donnée à la question 2. précédente, justifier succinctement l'aspect « irisé » de la figure observée.

## **PARTIE III. DISPERSION**

Un prisme est un milieu dispersif : convenablement éclairé, il décompose la lumière du faisceau qu'il reçoit.

1. Quelle caractéristique d'une onde lumineuse monochromatique est invariante quel que soit le milieu transparent traversé ?
2. Donner la définition de l'indice de réfraction  $n$  d'un milieu homogène transparent, pour une radiation de fréquence donnée.
3. Rappeler la définition d'un milieu dispersif.  
Pour un tel milieu, l'indice de réfraction dépend-il de la fréquence de la radiation monochromatique qui le traverse?
4. À la traversée d'un prisme, lorsqu'une lumière monochromatique de fréquence donnée passe de l'air (d'indice  $n_a = 1$ ) à du verre (d'indice  $n_v > 1$ ), les angles d'incidence ( $i_1$ ) et de réfraction ( $i_2$ ), sont liés par la relation de Descartes-Snell:  $\sin(i_1) = n_v \sin(i_2)$   
Expliquer succinctement, sans calcul, la phrase « Un prisme est un milieu dispersif : convenablement éclairé, il décompose la lumière du faisceau qu'il reçoit ».

<b>PRÉVISION DES SÉISMES PAR GRAVIMÉTRIE (10 POINTS)</b>
--

La prévision des séismes demeure un défi majeur posé aux géophysiciens. Une nouvelle voie de recherche utilisant la gravimétrie pourrait prédire les tremblements de terre à moyen terme (2 – 3 ans). En effet des études scientifiques ont mis en évidence une variation anormale du champ de pesanteur local précédant le déclenchement d'un séisme. Ainsi, il est nécessaire d'avoir à disposition un instrument qui permette une mesure suffisamment précise de la valeur  $g$  du champ de pesanteur local ; c'est le rôle du gravimètre dont le fonctionnement est étudié ci-après.

### 1. Mesure de $g$ et prévision des séismes

Des chercheurs ont réalisé des mesures répétées de  $g$  dans différentes régions de la Chine entre 1998 et 2005 à l'aide de gravimètres. Ils ont constaté une variation sensible de  $g$  avant le déclenchement d'un séisme dans une de ces régions.

Le Gal est une unité d'accélération :  $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm.s}^{-2}$ . Son nom provient du célèbre physicien italien Galilée. Les mesures sont rassemblées dans le tableau suivant :

Lieu du séisme (province)	magnitude	date du séisme	Variation de gravité $\Delta g$ (en $\mu\text{Gal}$ )
Kunlun (Xinjiang)	8,1	14 Nov. 2001	130
Côte Est de Taïwan	7,5	31 Mars 2002	80
Wangqing (Jilin)	7,2	29 Juin 2002	60
Jashi (Xinjiang)	6,8	24 Fév. 2003	60
Frontière entre Chine et Russie	7,9	28 Sep. 2003	60
Gaizhe (Tibet)	6,9	9 Jan. 2008	80
Yutian (Xinjiang)	7,3	21 Mars 2008	90
Wenchuan (Sichuan)	8,0	12 Mai 2008	130

**Figure 1. Tableau présentant les séismes d'envergure (magnitude supérieure à 6,8) ayant eu lieu en Chine entre 2001 et 2008 et les variations de gravité observées entre 1998 et 2005**

1.1. Citer un domaine de recherche dans lequel s'est illustré Galilée.

1.2. D'après vos connaissances, donner une estimation de la valeur de  $g$  en  $\text{m.s}^{-2}$ .

1.3. Donner la variation de gravité en  $\text{m.s}^{-2}$  précédant le séisme survenu à Wangqing en 2002.

1.4. Sachant que l'incertitude sur les mesures de  $g$  par cette méthode est de  $1 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-2}$ , en déduire le nombre de chiffres significatifs sur  $g$ .

## 2. Principe de fonctionnement d'un gravimètre

Un gravimètre est un appareil permettant de déterminer la valeur  $g$  du champ de pesanteur. Une des méthodes consiste à mesurer l'accélération d'un corps qui chute en l'absence de tout frottement. Pour cela on lâche un objet et on mesure le temps qu'il met pour parcourir une certaine distance.

Dans le dispositif étudié, un miroir tombant de masse  $m$ , enfermé dans une chambre à vide, est lâché sans vitesse initiale, à la position  $z = 0$  (voir **figure 2**). Un faisceau laser est envoyé sur une lame semi-réfléchissante qui le sépare en deux au point A (voir **figure 2**). Une partie de ce faisceau la traverse et atteint directement le détecteur (trajet S-A-D). L'autre partie est réfléchiée vers le miroir tombant puis poursuit son trajet jusqu'à atteindre à son tour le détecteur (trajet S-A-B-A-C-A-D). Les deux parties du faisceau interfèrent au niveau du détecteur.

Le laser utilisé a une longueur d'onde dans l'air connue avec une grande précision :  $\lambda = 632,991357 \text{ nm}$ .

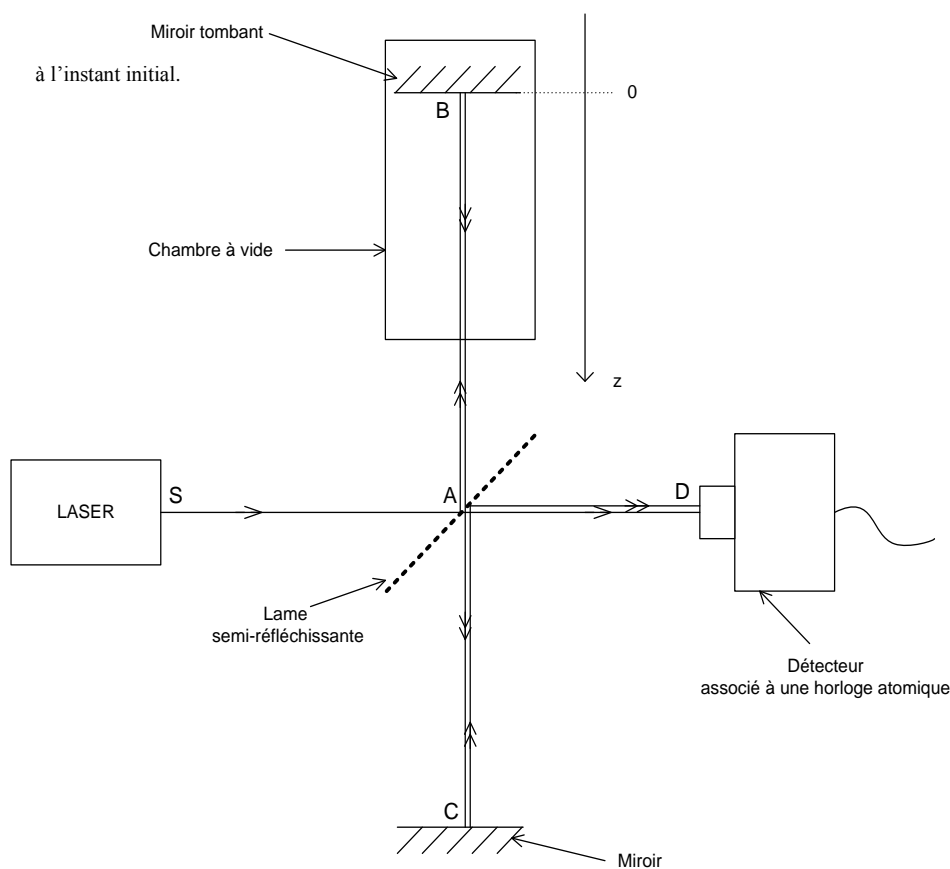


Figure 2. Principe de fonctionnement du gravimètre

2.1. Quel est l'intérêt de la chambre à vide dans ce dispositif ?

2.2. On appelle  $z$  la position verticale du miroir tombant. Montrer que son mouvement est décrit par l'équation horaire  $z(t) = \frac{1}{2}gt^2$ .

2.3. Quelles sont les deux grandeurs physiques qu'il faudrait mesurer pour accéder à la valeur  $g$  du champ de pesanteur local ?

### 3. Mesure de $g$ à l'aide du gravimètre

Afin de mesurer avec une certaine précision la valeur de  $g$ , on utilise une méthode interférométrique. Au cours de la chute du miroir, le détecteur enregistre l'évolution temporelle de l'intensité lumineuse  $I$  due aux interférences entre les deux faisceaux reçus au point D (voir **figure 3**).

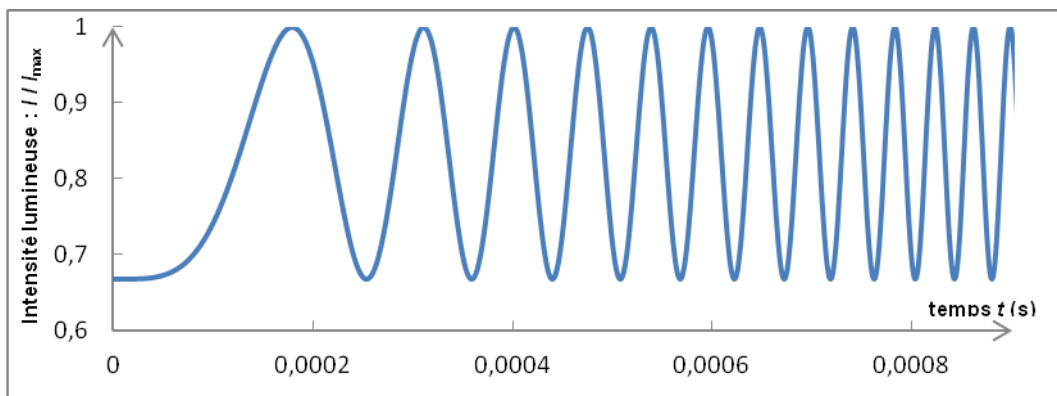


Figure 3. Évolution temporelle de l'intensité lumineuse  $I$  rapportée à l'intensité maximale  $I_{\max}$ .

3.1. À quoi est dû le phénomène d'interférences ?

3.2. Que peut-on dire de l'intensité reçue par le détecteur lorsque les deux faisceaux interfèrent de manière destructive ? Et de manière constructive ?

3.3. Soit  $\Delta t = t_2 - t_1$  où  $t_2$  et  $t_1$  représentent respectivement les durées des trajets lumineux S-A-B-A-C-A-D et S-A-D. Choisir parmi les propositions suivantes, l'expression de  $\Delta t$  lorsque les deux faisceaux interfèrent en D de manière destructive.

- a.  $kT$       b.  $k\frac{T}{2}$       c.  $(2k + 1)\frac{T}{2}$       d.  $(2k + 1)T$

avec  $k$  entier, et  $T$  la période de l'onde émise par le laser.

3.4. Dans la suite, on admettra que la distance  $\Delta z$  parcourue par le miroir tombant pendant l'intervalle de temps séparant 2 interférences destructives consécutives vaut  $\frac{\lambda}{2}$  ou  $\lambda$  désigne la longueur d'onde du laser.

3.4.1. Compléter le texte à trous suivant qui justifie la phrase qui précède, en indiquant sur la copie l'expression correspondant à chaque numéro.

La durée  $t_1$  du trajet S-A-D est constante. Pour une variation de hauteur du miroir tombant de  $\Delta z$ , la durée  $t_2$  du trajet S-A-B-A-C-A-D varie de ... (1) ... à cause de l'aller-retour A-B-A du rayon lumineux. Entre deux interférences destructives consécutives,  $\Delta t = t_2 - t_1$  varie de ... (2) ... On en déduit donc que  $\Delta z = \dots$  (3) ...

**3.4.2.** Le miroir parcourt au cours de sa chute une distance  $d = 20$  cm. Choisir parmi les propositions suivantes la valeur estimée du nombre d'interférences destructives détectées. Justifier la réponse par un calcul.

- a.  $6 \times 10^5$                       b.  $6 \times 10^{-6}$                       c.  $6 \times 10^7$

**3.5.** Pourquoi les interférences destructives sont-elles de plus en plus rapprochées dans le temps (voir **figure 3**) ?

**3.6.** On appelle  $t_n$  la date de détection de la  $n^{\text{ième}}$  interférence destructive, mesurée avec une grande précision grâce à une horloge atomique. En exploitant les résultats expérimentaux de la **figure 4** et l'équation horaire du mouvement du miroir, déterminer la valeur de  $g$  avec la meilleure précision possible.

$n^{\text{ième}}$ interférence destructive	$t_n$ (en s)
• 0	• 0
• 1	• $2,54033314 \times 10^{-4}$
• 2	• $3,59257358 \times 10^{-4}$
• 3	• $4,39998607 \times 10^{-4}$
• 1000	• $8,033238750 \times 10^{-3}$
• 10000	• $2,5403331438 \times 10^{-2}$

• **Figure 4. Tableau des dates de détection de quelques interférences destructives**

#### 4. Etude du capteur

Le détecteur est équipé d'une photodiode. Les **figures 5.a, 5.b** et **6** donnent quelques caractéristiques des photodiodes InGaAs G8931-04 et Si S10341-02.

**4.1.** Quel type de conversion effectue la photodiode ?

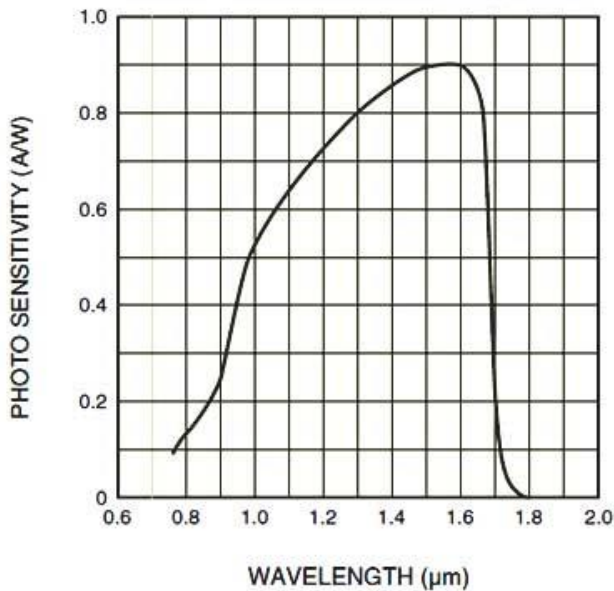
**4.2.** À quel domaine spectral appartient la radiation du laser utilisé ?

**4.3.** En comparant les réponses spectrales de ces deux composants (voir **figures 5.a** et **5.b**), quelle est la photodiode utilisée dans le gravimètre ? Justifier la réponse.

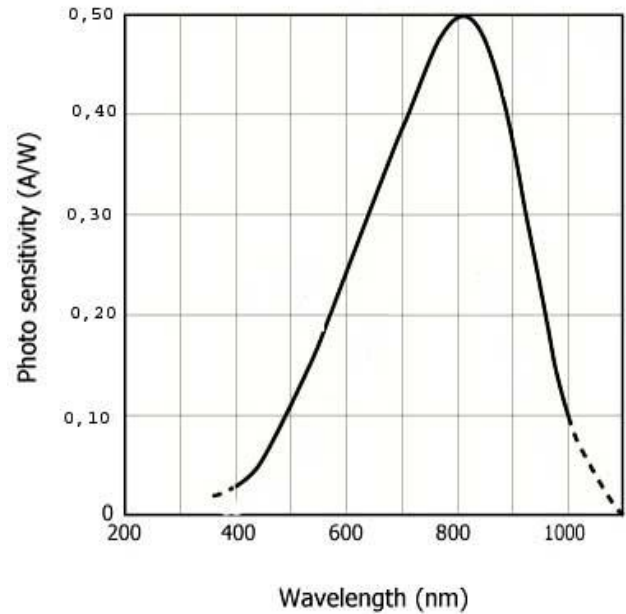
**4.4.** Le capteur détecte les dix mille premières interférences destructives en 25 ms (voir **figure 4**). Estimer la durée moyenne entre deux interférences destructives consécutives.

**4.5.** On définit le temps de réponse d'un capteur comme le temps minimal qu'il met pour suivre l'évolution temporelle de la grandeur mesurée. Le temps de réponse est environ égal à l'inverse de la fréquence de coupure. À l'aide de ses caractéristiques, données en **figure 6**, en déduire si la photodiode choisie est adaptée à ce type de mesures.

*D'après site internet constructeur Hamamatsu*



**Figure 5.a. Réponse spectrale de la photodiode InGaAs G8931-04**



**Figure 5.b. Réponse spectrale de la photodiode Si S10341-02**

Package	Plastic
Package Feature	Surface mount type
Active Area	dia.0,2 mm
Spectral Response Range	400 to 1000 nm
Peak Wavelength	800 nm
Photo Sensitivity at peak	0,5 A/W
Breakdown Voltage	150 V
Temperature Coefficient of VBR	0,65 V/deg. C
Dark Current Max.	0,5 nA
Cut-off Frequency	1000 MHz
Terminal Capacitance	1 pF
Gain	100

**Figure 6. Caractéristiques techniques de la photodiode choisie**