Avant d'aborder le chapitre

LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité — 1re Enseignement scientifique

- L'intensité sonore exprime la puissance par unité de surface transportée par l'onde sonore :

$$I = \frac{P}{S}$$

intensité sonore I ($W \cdot m^{-2}$) ; P : puissance sonore délivrée par la source (W) ; S : surface (m^2)

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

L : niveau sonore (dB) ; I : intensité sonore ($W \cdot m^{-2}$) ; I_0 : intensité sonore du seuil d'audibilité : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$

- La célérité d'une onde rend compte de la distance parcourue par l'onde par unité de temps.

$$c = \frac{d}{\Delta t}$$

c : célérité de l'onde ($m \cdot s^{-1}$) ; d : distance parcourue par la perturbation (m) ; Δt : *Retard* ou durée pour parcourir par la distance d (s)

- La **période T** d'un phénomène périodique est la plus petite durée au bout de laquelle le phénomène se reproduit identique à lui-même.

- La **fréquence f** est le nombre de fois que se répète le phénomène périodique par seconde.

$$f = \frac{1}{T}$$

f : fréquence de l'onde (Hz) ; T : période (s)

- La **longueur d'onde λ** est la plus petite distance séparant deux points vibrant en phase. C'est aussi la distance parcourue par l'onde en une période T.

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

c : célérité de l'onde ($m \cdot s^{-1}$) ; λ : longueur d'onde (m) ; T : période (s)

1 Niveau d'intensité sonore

L'intensité sonore I et le niveau d'intensité sonore L

L'intensité sonore correspond à l'énergie transportée par l'onde sonore par unité de temps et de surface. Elle s'exprime en watt par mètre carré ($W \cdot m^{-2}$).

La valeur minimale audible, appelée seuil d'audibilité, vaut $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$. La valeur maximale, appelée seuil de douleur, vaut $1\ W \cdot m^{-2}$.

L'étendue de l'intensité sonore étant considérable, on préfère utiliser une échelle logarithmique, qui représente mieux la perception visuelle de l'oreille humaine, en introduisant le niveau d'intensité sonore (FIG. 1). Il est noté L, comme level qui signifie niveau en anglais, et est exprimé en décibel (dB) :

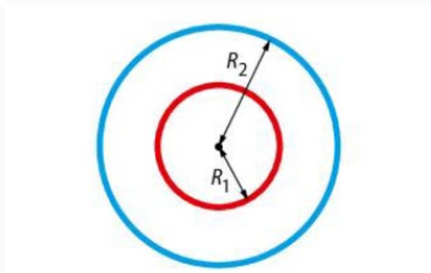
$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

- L : niveau d'intensité sonore (dB)
- I : intensité sonore ($W \cdot m^{-2}$)
- I_0 : intensité sonore de référence ($W \cdot m^{-2}$)

FIG. 1 Échelle de niveau d'intensité sonore.

Atténuation

Plus la distance entre la source et le récepteur augmente plus le niveau d'intensité sonore diminue : on parle **d'atténuation géométrique** (FIG. 2). D'autre part, on parle **d'atténuation par absorption** lorsqu'un matériau est interposé entre la source et le récepteur, ce qui amoindrit l'intensité sonore.



Prenons un milieu homogène illimité et une source rayonnante dans toutes les directions. L'énergie émise est conservée, mais se répartit sur des sphères de plus en plus grandes.

FIG. 2 Atténuation géométrique : répartition de la même puissance sur deux sphères de rayons différents.

2 Diffraction d'une onde

Conditions d'observation

Lorsqu'une onde mécanique plane rencontre une ouverture, dont la taille est inférieure ou égale à sa longueur d'onde, il se produit un phénomène de **diffraction**. L'onde se transforme en onde circulaire, ce qui crée une vibration qui se propage dans une région plus vaste que l'ouverture seule (FIG. 3).

Ce phénomène se produit aussi lorsqu'un faisceau laser rencontre une fente suffisamment fine. Après l'ouverture, au lieu de rester confiner à la dimension de l'ouverture, le faisceau s'éparpille : on obtient plusieurs tâches lumineuses alternant la lumière et l'obscurité (FIG. 4). Ce phénomène, commun aux ondes mécaniques et lumineuses, décrit la lumière comme une onde.

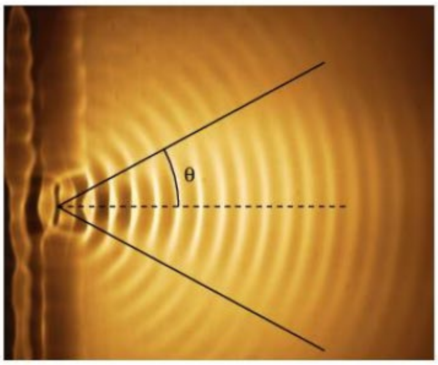


FIG. 3 Diffraction d'une onde mécanique plane sur l'eau.

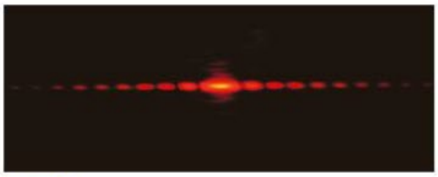


FIG. 4 Diffraction de la lumière d'un laser.

Caractéristiques de la diffraction

Le phénomène de **diffraction** (FIG. 5) dépend de la dimension de l'ouverture a et de la longueur d'onde λ. Il est d'autant plus marqué que a est voisin ou inférieur à λ.

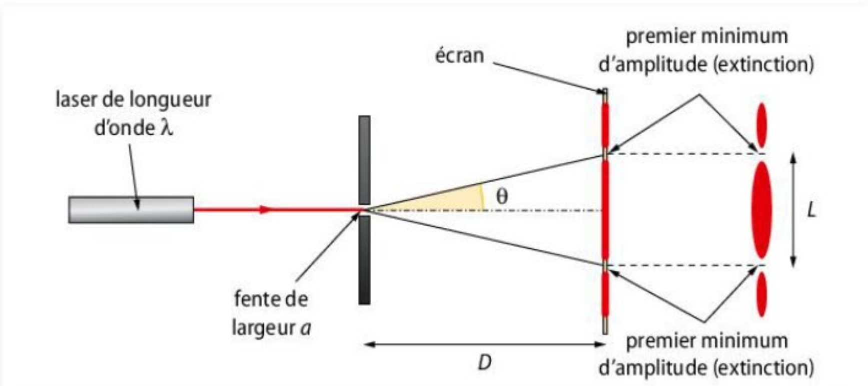


FIG. 5 Diffraction de la lumière d'un laser par une ouverture de dimension a.

Angle caractéristique de la diffraction θ

On exprime l'**angle caractéristique de la diffraction** θ comme le demi-angle délimitant les premiers minima d'amplitude (FIG. 5). Il s'exprime en radian (rad).

L'**angle caractéristique** vérifie la relation :

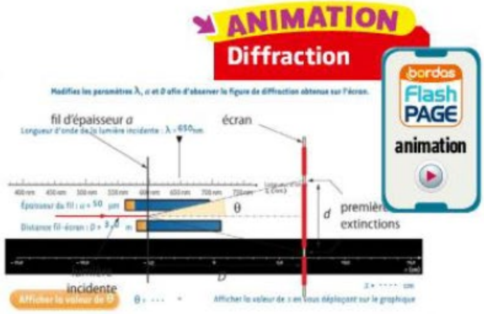
$$\underbrace{\theta}_{\text{angle caractéristique de diffraction (rad)}} = \frac{\overbrace{\lambda}^{\text{longueur d'onde (m)}}}{\underbrace{a}_{\text{taille de l'ouverture (m)}}}$$

EXEMPLE

Pour trouver le diamètre d'une ouverture, il suffit de mesurer la tâche centrale L avec une règle, la distance fente-écran D, et lire sur le laser la longueur d'onde λ. On utilise l'approximation des petits angles :

$$\tan\theta \approx \theta = \frac{L}{2D} = \frac{\lambda}{a}$$

On isole a, ce qui donne $a = \dfrac{2\lambda \cdot D}{L}$.



3 Interférences de deux ondes

Conditions d'observation

Lorsque deux ondes mécaniques, de même longueur d'onde, se rencontrent, elles se superposent géométriquement : on constate par endroit qu'elles se renforcent en s'additionnant, et par ailleurs, elles s'annulent (FIG. 6A) : c'est le phénomène d'**interférences**.

Cela se produit aussi lorsque deux faisceaux de lumière issus d'une même source se superposent : on obtient sur un écran une alternance de zones brillantes et de zones sombres (FIG. 6B). Cela a beaucoup surpris les physiciens du XIXe siècle : lumière + lumière = obscurité !

Là encore, ce phénomène observé pour la lumière et pour les ondes mécaniques, confirme les propriétés ondulatoires de la lumière.

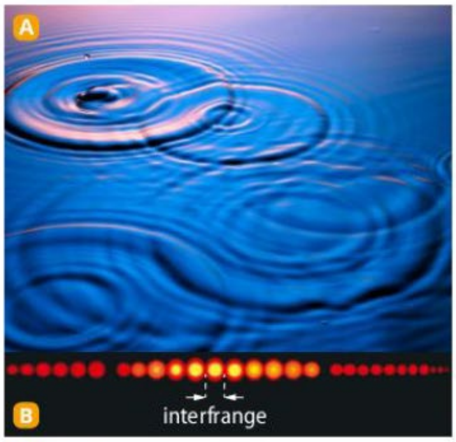


FIG. 6 A interférences entre des ondes mécaniques à la surface de l'eau.
B Interférences en lumière monochromatique

Pour être observées, il faut que les deux ondes respectent des **conditions d'interférences** :
– avoir la même longueur d'onde ou *fréquence*
– être synchrones (ou cohérentes), c'est-à-dire avoir un déphasage de l'une par rapport à l'autre constant.

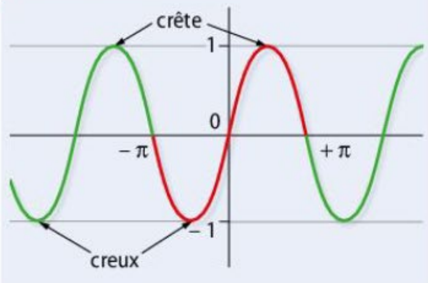
Interférences constructives et destructives

Une onde monochromatique peut être modélisée par une succession de creux et de crêtes, sous la forme d'une fonction sinusoïdale. La superposition de deux ondes de même longueur d'onde donne deux cas extrêmes.

– Si les creux et les crêtes coïncident, les deux ondes sont exactement décalées d'un multiple de la longueur d'onde λ : on dit que les **deux ondes sont en phase**. Lors de la superposition, les amplitudes des deux ondes s'ajoutent et l'onde résultante est renforcée : on parle d'**interférences constructives**.
– Si les creux d'une des ondes coïncident avec les crêtes de la seconde, les deux ondes sont précisément décalées d'un multiple de la demi-longueur d'onde $\frac{\lambda}{2}$, on dit que **les ondes sont en opposition de phase**. Lors de la superposition, les amplitudes des deux ondes s'annulent, on parle d'**interférences destructives** (FIG. 7).

UN PONT VERS LES MATHS

La fonction sinus est une courbe qui alterne crête et creux.



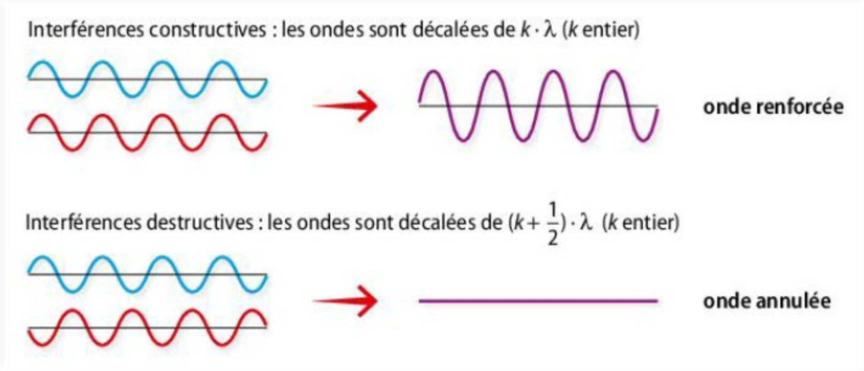


FIG. 7 Conditions d'interférences constructives ou destructives.

EXEMPLE

Le phénomène d'interférences est utilisé dans les casques à réduction de bruit : un micro interne détecte les ondes sonores ambiantes et crée un signal en opposition de phase de nature à annihiler le bruit ambiant.

Interférences de deux ondes lumineuses

Dans l'expérience des trous d'Young (FIG. 8)., un faisceau laser de longueur d'onde λ, éclaire deux trous distants d'un écart e. Ils se comportent ainsi comme deux sources synchrones, notées S_1 et S_2 (FIG. 9).

La superposition en un point M de l'écran des deux ondes sinusoïdales dépend de la **différence de chemin optique**, notée δ, due au déplacement supplémentaire de la deuxième onde par rapport à la première :

$\delta = S_2M - S_1M = S_2S_1'$. Par relation trigonométrique dans l'approximation des petits angles, on peut écrire, dans le triangle IOM, $\tan\alpha \approx \alpha = \dfrac{x}{D}$

Mais aussi dans le triangle $S_1S_2S_1'$: $\sin\alpha \approx \alpha = \dfrac{\delta}{e}$

FIG. 8 Thomas Young (1773-1829) est un illustre physicien, mathématicien et médecin.

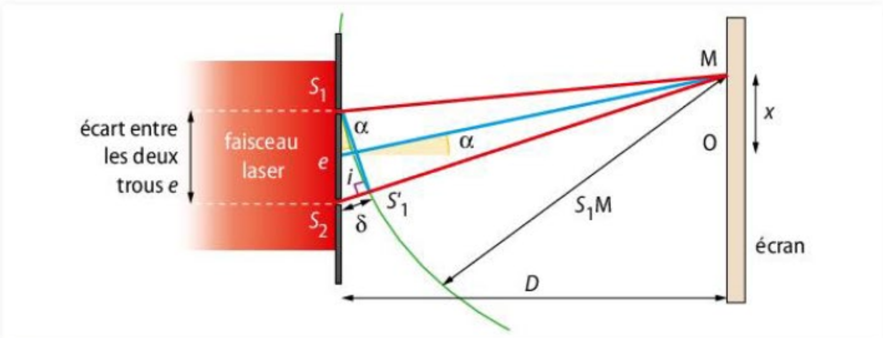


FIG. 9 Expérience des trous d'Young.

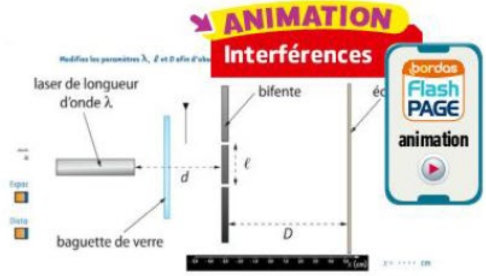
En égalisant les deux relations : $\alpha = \dfrac{x}{D} = \dfrac{\delta}{e}$, on obtient l'expression de la différence de chemin optique en fonction de l'abscisse x du point M :

$$\delta = \frac{e \cdot x}{D}$$

La plus petite valeur de x séparant deux points où des interférences constructives vont être observées s'appelle l'**interfrange**, noté i (FIG. 6B). Elle s'obtient pour $\delta = \lambda$, la distance entre ces deux interférences constructives consécutives : $\lambda = \dfrac{e \cdot i}{D}$, ce qui permet d'obtenir l'expression de l'interfrange i :

$$\boxed{i = \frac{\lambda \cdot D}{e}}$$

- longueur d'onde (m) → λ
- distance entre les deux fentes et l'écran (m) → D
- interfrange (m) → i
- écart entre les deux fentes (m) → e



4 Effet Doppler

Définition

Lorsqu'un train klaxonne en passant dans une gare à vitesse importante : le son perçu est plus aigu quand il s'approche, et plus grave lorsqu'il s'éloigne.

L'effet Doppler est une variation de fréquence de l'onde perçue par un observateur, si la source est en mouvement par rapport à l'observateur. Le **décalage Doppler** est d'autant plus marqué que la vitesse de la source par rapport à l'observateur est grande.

Décalage Doppler

Considérons une source qui se rapproche à une vitesse v, faible devant la célérité c des ondes. À $t = 0$ s, elle émet une onde, de fréquence $f_e = \frac{1}{T_e}$ et de longueur d'onde λ_e (FIG. 10).

Pendant une durée égale à une période T_e, l'onde se déplace d'une longueur d'onde λ_e. Elle sera entendue à l'instant $t_1 = \frac{D}{c}$.

Pendant ce temps, la source avance d'une distance $d = v \times T_e$, et émet une deuxième onde à $t_2 = T_e$. L'onde n'a plus qu'à parcourir la distance $D - d$. On appelle t_3 l'instant où l'onde est reçue par l'observateur : $t_3 = T_e + \frac{D-d}{c}$.

Ainsi, le récepteur a reçu la première onde à l'instant t_1 et la deuxième onde à l'instant t_3.

La période de l'onde reçue est donc : $T_R = t_3 - t_1 = T_e + \frac{D-d}{c} - t_1 = T_e - \frac{d}{c}$

$$T_R = T_e - \frac{v \cdot T_e}{c} = T_e\left(1 - \frac{v}{c}\right) = T_e\left(\frac{c-v}{c}\right).$$

En prenant l'inverse pour obtenir la fréquence reçue $f_R = \frac{1}{T_R}$:

$f_R = f_e\left(\frac{c}{c-v}\right)$. On retrouve bien une fréquence perçue f_R plus grande que celle émise f_e, ce qui correspond à un son perçu plus aigu.

Bien entendu, si la source s'éloigne de l'observateur, il y a juste à permuter le signe $-v$ en $+v$:

$f_R = f_e\left(\frac{c}{c+v}\right)$. On retrouve bien une fréquence perçue $f_R < f_e$.

Le décalage Doppler Δf s'obtient en faisant la différence $\Delta f = f_R - f_e$:

$$\Delta f = f_R - f_e = f_e\left(\frac{c}{c-v} - 1\right) = f_e\left(\frac{v}{c-v}\right).$$

Si la vitesse v de la source est très faible devant la célérité c des ondes, alors $c - v \approx c$, le décalage Doppler s'écrit :

$$\Delta f = f_R - f_e = \frac{f_e \cdot v}{c}$$

- décalage Doppler (Hz) : Δf
- fréquence de l'onde perçue par l'observateur (Hz) : f_R
- fréquence de l'onde émise par émetteur au repos (Hz) : f_e
- fréquence de la source au repos (Hz) : f_e
- vitesse de l'émetteur par rapport à l'observateur ($m \cdot s^{-1}$) : v
- vitesse de l'onde ($m \cdot s^{-1}$) : c

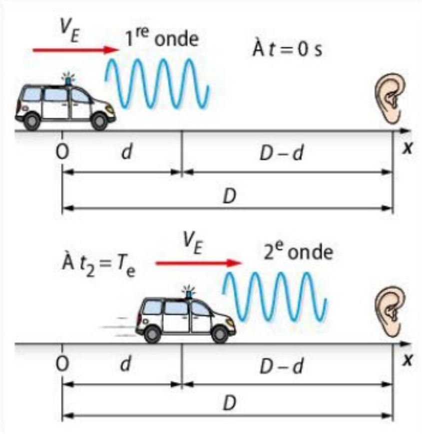
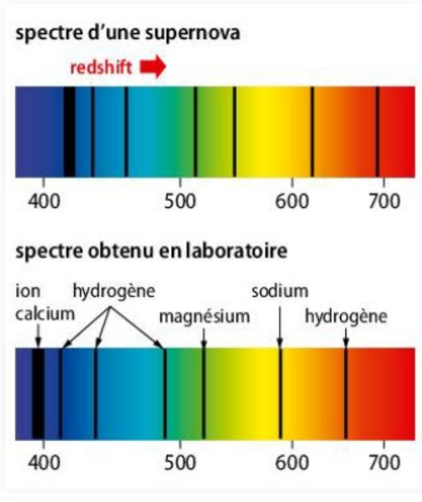


FIG. 10 A $t = 0$ s, émission de la 1re onde B à $t_2 = T_e$, émission de la 2e onde.



En astronomie, l'analyse du spectre de la lumière émise par une étoile permet de déceler le décalage en longueur d'onde par rapport au spectre de l'élément obtenu en laboratoire. Comme la longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{f}$ est inverse de la fréquence, si l'étoile s'éloigne de la Terre, les longueurs d'onde sont supérieures à celles obtenues en laboratoire, on parle de décalage vers le rouge ou encore *redshift*.

FIG. 11 Phénomène du *redshift*.

FICHE MÉMO PRÉPA BAC

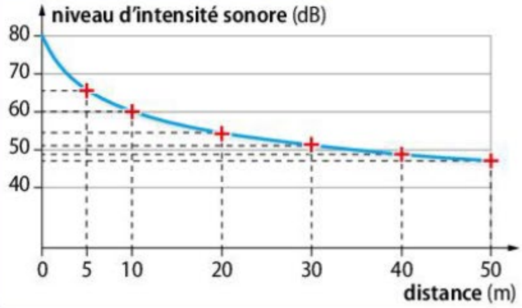
Le vocabulaire à retenir
Les relations à connaître

1 Niveau d'intensité sonore

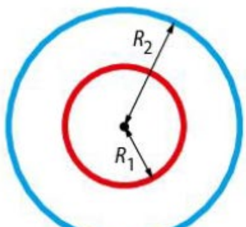
niveau d'intensité sonore (**dB**) → $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ ← intensité sonore ($\mathbf{W \cdot m^{-2}}$) ; intensité sonore de référence ($\mathbf{W \cdot m^{-2}}$)

$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$

Atténuation géométrique



Prenons un milieu homogène illimité et une source rayonnante dans toutes les directions. L'énergie émise est conservée, mais se répartit sur des sphères de plus en plus grandes.

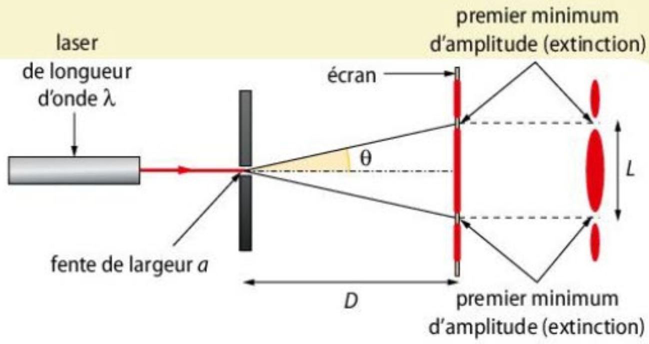


L'atténuation par absorption dépend du milieu de propagation ou du milieu absorbant, et aussi de la fréquence.

2 Diffraction d'une onde

angle caractéristique de diffraction (**rad**) → $\theta = \frac{\lambda}{a}$ ← longueur d'onde (**m**) ; taille de l'ouverture (**m**)

En optique la **diffraction** vient limiter le pouvoir séparateur de la lunette astronomique.



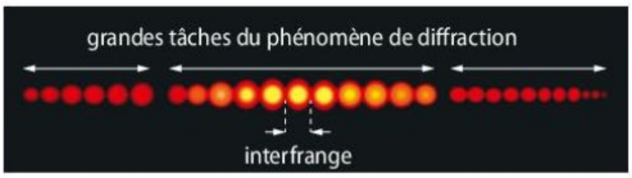
3 Interférences de deux ondes

Interférences constructives : les ondes sont décalées de $k \cdot \lambda$ (k entier)

onde renforcée

Interférences destructives : les ondes sont décalées de $(k + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ (k entier)

onde annulée



différence de marche (**m**) → $\delta = \frac{e \cdot x}{D}$ ← distance entre les deux sources (**m**) ; abscisse de l'écran où se superposent les deux ondes (**m**) ; distance fentes écran (**m**)

interfrange (**m**) → $i = \frac{\lambda \cdot D}{e}$ ← longueur d'onde (**m**) ; distance fentes écran (**m**) ; distance entre les deux sources (**m**)

4 Effet Doppler

décalage Doppler (**Hz**) → $\Delta f = f_R - f_e = \frac{f_e \cdot v}{c}$

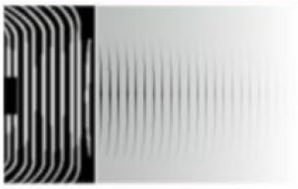
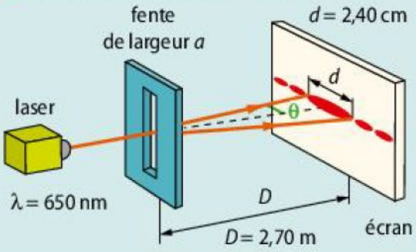
- vitesse de l'émetteur par rapport à l'observateur ($\mathbf{m \cdot s^{-1}}$) : v
- vitesse de l'onde ($\mathbf{m \cdot s^{-1}}$) : c
- fréquence de l'onde perçue par l'observateur (**Hz**) : f_R
- fréquence de l'onde émise par émetteur au repos (**Hz**) : f_e

QCM

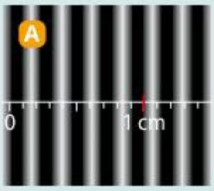
1 Niveau d'intensité sonore

	A	B	C
1 Le niveau d'intensité sonore correspondant à une intensité $I = 5{,}9 \times 10^{-7}\ W \cdot m^{-2}$ vaut :	59 dB	132 dB	58 dB
2 L'intensité sonore associée au niveau d'intensité sonore 104 dB est :	$2{,}5 \times 10^{-2}\ W \cdot m^{-2}$	$2{,}5 \times 10^{10}\ W \cdot m^{-2}$	$10^{-12} \times 10^{-\frac{104}{10}}\ W \cdot m^{-2}$

2 Diffraction d'une onde

	A	B	C
3 Identifier les photographies où le phénomène de diffraction se manifeste.			
4 La fente a une largeur de : 	$a = 1{,}46 \times 10^{-6}$ m	$a = 146\ \mu m$	$a = 2{,}88 \times 10^{-9}$ m

3 Interférences de deux ondes

	A	B	C
5 Dans cette situation, la somme des deux ondes donne : 	une zone sombre.	une zone éclairée.	une zone peu éclairée.
6 La longueur d'onde vaut : 	2,25 mm	2,0 mm	2,75 mm

4 Effet Doppler

	A	B	C
7 Un émetteur ultrasonore de fréquence $f = 40{,}0$ kHz, s'éloigne à la vitesse de $20{,}0\ m \cdot s^{-1}$. La célérité du son vaut $340\ m \cdot s^{-1}$. La fréquence perçue vaut :	2,47 kHz	42,4 kHz	37,6 kHz

DONNÉES

- seuil d'audibilité à 1 000 Hz : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}$ W · m^{-2}.
- célérité du son : c_{air} 340 m · s^{-1} ;

$c_{lumière} = 3{,}0 \times 10^8$ m · s^{-1}.

8 Plus on est nombreux…

1. a. Un groupe de musiciens joue de la guitare : le niveau d'intensité sonore est de 75 dB. Avec quel appareil doit-on effectuer cette mesure ?

b. Sachant qu'une guitare a un niveau sonore de 65 dB, combien y a-t-il de guitares identiques dans ce groupe ?

2. Un percussionniste les accompagne et frappe un triangle, de niveau sonore 50 dB. Quelle est l'intensité sonore totale ? Commenter.

3 Calculer un niveau d'intensité sonore

| Effectuer des calculs.

Calculer le niveau d'intensité sonore correspondant à chacune des intensités sonores suivantes.

1. $1{,}2 \times 10^{-7}$ W · m^{-2} **2.** $7{,}3 \times 10^{-5}$ W · m^{-2}

3. $2{,}3 \times 10^{-3}$ W · m^{-2}

Données

- $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.
- $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}$ W · m^{-2}.

4 Relier L et I

| Mobiliser ses connaissances.

1. Sans calcul, relier chaque niveau d'intensité sonore à l'intensité sonore correspondante.

$3{,}2 \times 10^{-4}$ W · m^{-2} •	• 48 dB
$6{,}3 \times 10^{-8}$ W · m^{-2} •	• 85 dB
$6{,}5 \times 10^{-3}$ W · m^{-2} •	• 98 dB

2. Par le calcul, retrouver L pour $I = 3{,}2 \times 10^{-4}$ W · m^{-2}.

Données

- $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.
- $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}$ W · m^{-2}.

10 Santé au travail

D'après le Code du travail, les ouvriers d'une entreprise ne doivent pas être soumis à des niveaux d'intensités sonores supérieures à 87 dB. Un ouvrier travaille sur une machine de niveau sonore 83 dB. Il est entouré de deux machines voisines émettant un niveau sonore d'intensité 82 dB chacune.

1. Calculer les intensités sonores associées aux machines.

2. a. Sachant que les intensités sonores s'ajoutent, calculer le niveau d'intensité sonore total reçu par l'ouvrier.

b. L'entreprise satisfait-elle au Code du travail ?

7 Exploiter une atténuation

| Rédiger une explication.

Casque antibruit
$A = 33$ dB
DELTAPLUS®

Bouchons d'oreilles
$A = 26$ dB

- Quel sera le niveau d'intensité sonore ressenti par un utilisateur de chacun de ces dispositifs si le niveau d'intensité sonore ambiant est 95 dB ?

12 Identifier une expression (1)

| Faire preuve d'esprit critique.

Un émetteur d'ondes sonores s'éloigne d'un récepteur avec une vitesse de valeur $v < v_{son}$. On note f_E la fréquence des ondes émises et f_R la fréquence des ondes reçues.

1. Rappeler l'unité et le signe du décalage Doppler $\Delta f = f_R - f_E$ dans le cas où l'émetteur et le récepteur s'éloignent l'un de l'autre.

2. Parmi les relations suivantes, identifier celle qui donne le décalage Doppler en expliquant pourquoi les trois autres sont incorrectes.

(a) $\Delta f = -f_E \times \frac{v}{v_{son} + v}$ (b) $\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{son} - v}$

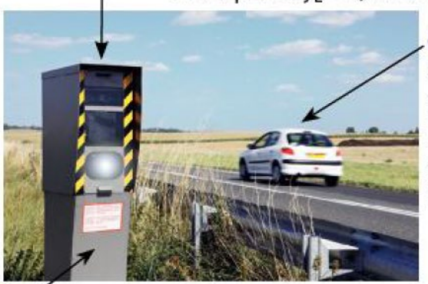
(c) $\Delta f = \frac{v - v_{son}}{f_E}$ (d) $\Delta f = \frac{f_E}{f_R}(v - v_{son})$

14 Calculer une valeur de vitesse

| Effectuer des calculs.

A Fonctionnement d'un radar

(1) Le radar a émis une onde de fréquence $f_E = 3{,}40 \times 10^{10}$ Hz.



(2) Après réflexion sur le véhicule, l'onde est revenue vers le radar.

(3) Le radar a mesuré la fréquence f_R de l'onde réfléchie et a exploité le décalage Doppler $\Delta f = f_R - f_E$ pour déterminer la valeur de la vitesse du véhicule.

Lors du passage d'une voiture, le radar a mesuré un décalage Doppler $\Delta f = 6{,}451 \times 10^3$ Hz. Pour ce radar, le décalage Doppler est :

$$\Delta f = \frac{2v \times \cos\alpha}{c} \times f_E$$

Dans cette expression, α est l'angle entre la direction de déplacement du véhicule et l'axe de visée du radar.

- Calculer la valeur de la vitesse du véhicule.

Données

- Célérité de la lumière : $c = 3{,}00 \times 10^8$ m · s^{-1}.
- $\alpha = 20°$.

15 Calculer un décalage Doppler

| Utiliser un modèle pour prévoir.

Une voiture passe en klaxonnant. Le son produit a une fréquence $f_E = 435$ Hz. Elle s'éloigne d'un piéton avec une vitesse de valeur $v = 80\ km \cdot h^{-1}$.

Dans une telle situation, la valeur absolue du décalage Doppler est donnée par :

$$\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{son} - v}$$

- Calculer le décalage Doppler perçu par le piéton.

Donnée

Célérité du son : $v_{son} = 345\ m \cdot s^{-1}$.

20 Le bourdon

Le bourdon ne se sert pas uniquement de ses ailes pour voler : elles servent aussi à ventiler son nid pour le refroidir. Il peut actionner ses ailes jusqu'à 200 battements par seconde.

1. Si l'insecte se rapproche d'un observateur à la vitesse de $7\ m \cdot s^{-1}$, quelle sera la fréquence du son perçue par un observateur immobile ?

2. Si un autre bourdon vole à la même vitesse à côté de lui, quelle fréquence perçoit-il ?

19 Connaître les critères de réussite

Au son de la corne de brume

| Effectuer des calculs.

Les cornes de brume sont utilisées dans le domaine maritime pour signaler un obstacle ou un danger.

Elles peuvent produire un son dont le niveau d'intensité sonore peut atteindre 115 dB.

1. Déterminer l'intensité sonore maximale du son émis par une corne de brume.

2. À 50 m de la corne de brume, l'intensité sonore est égale à $1{,}0 \times 10^{-4}\ W \cdot m^{-2}$.

a. Déterminer le niveau d'intensité sonore correspondant.

b. En déduire l'atténuation géométrique du signal.

Donnée

Intensité sonore de référence : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$.

21 Enceinte Bluetooth

| Effectuer des calculs.

Une enceinte Bluetooth a une puissance sonore de 0,12 W. On fait l'hypothèse que la puissance sonore émise se répartit de manière homogène sur une demi-sphère de rayon r centrée sur l'enceinte Bluetooth.

1. Déterminer l'intensité sonore I du son perçu par une personne située à 1,0 m de l'enceinte.

2. Déterminer le niveau d'intensité sonore L correspondant.

3. Déterminer le niveau d'intensité sonore L' pour une personne située à 2,0 m de l'enceinte.

Données

- Intensité sonore pour une puissance sonore P répartie sur une surface S : $I = \frac{P}{S}$.
- Surface d'une sphère de rayon r : $S = 4 \times \pi \times r^2$.
- Intensité sonore de référence : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$.

24 Détermination par effet Doppler de la vitesse d'éloignement d'un émetteur

| Effectuer des calculs ; interpréter des résultats.

L'effet Doppler permet de mesurer la valeur de la vitesse d'un émetteur E s'éloignant d'un observateur immobile R.

On se propose de relier :

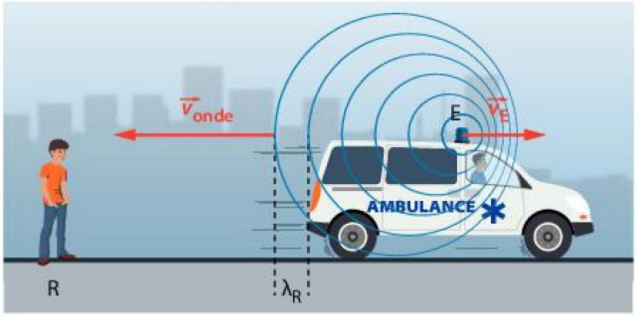
– la fréquence f_E d'émission des signaux par E ;

– la fréquence f_R de réception des signaux par R ;

– la valeur v_{onde} de la célérité de l'onde émise par E ;

– la valeur v_E de la vitesse de l'émetteur.

Les valeurs des vitesses sont mesurées dans un référentiel terrestre et $v_E < v_{onde}$.



1. À l'instant initial $t_1 = 0$ s, E est à la distance d de R et émet une onde sonore se propageant à la célérité v_{onde}. Exprimer littéralement la date t_2 au bout de laquelle ce signal est reçu par R.

2. a. Déterminer l'expression de la distance d_E parcourue par l'émetteur pendant une durée égale à une période T_E du signal émis.

b. À la date $t_3 = T_E$, quelle est la distance qui sépare E et R ?

c. À la date $t_3 = T_E$, l'émetteur émet de nouveau un signal. À quelle date t_4 le récepteur R reçoit-il ce signal ?

3. Quelle est la durée, notée T_R, séparant la réception par R de deux signaux consécutifs ? Que représente cette durée T_R ?

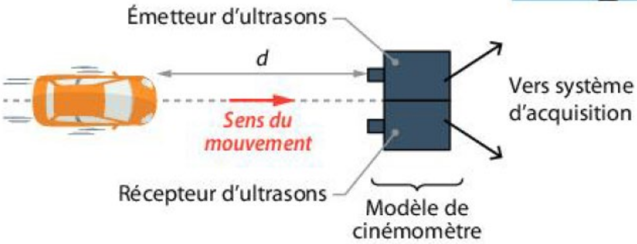
4. a. Exprimer la relation entre les fréquences f_R et f_E, la célérité v_{onde} du signal et la valeur v_E de la vitesse de E.

b. Quelle est l'expression littérale de la valeur de la vitesse v_E de l'émetteur ?

26 Contrôle de vitesse

Exploiter des graphiques et schémas ; effectuer des calculs.

Un radar pédagogique contrôle par effet Doppler la valeur de la vitesse instantanée des véhicules automobiles. Un élève cherche à modéliser le principe de la mesure. Son expérience est représentée ci-dessous.



1. a. Donner le principe de fonctionnement de ce dispositif.

b. On note f_E la fréquence de l'onde émise et f_R celle de l'onde reçue par le récepteur. Lors d'un tel mouvement, f_E est-elle supérieure ou inférieure à f_R ?

2. On réalise l'acquisition informatisée des signaux émis et reçus. Le logiciel permet de repérer les fréquences de chacun des signaux. Déterminer f_E et f_R.

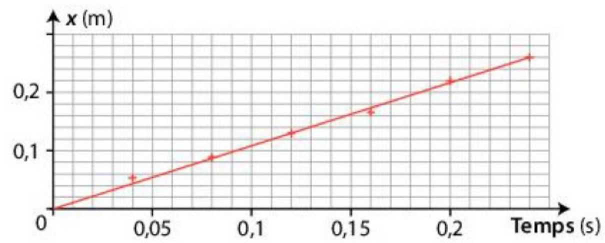
3. Déterminer, parmi les relations ci-dessous, celle qui donne la valeur de la vitesse v de la voiture, mesurée par rapport au sol et inférieure à celle de l'onde notée v_S.

a $f_R = f_E \times \left(2v + \dfrac{v}{v_S}\right)$ b $f_R = v \times \left(f_E - \dfrac{2v}{v_S}\right)$

c $f_R = f_E \times \left(1 - \dfrac{2v}{v_S}\right)$ d $f_R = f_E \times \left(\dfrac{2v}{v_S} + 1\right)$

4. La célérité des ondes ultrasonores v_S est égale à $340\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Calculer la valeur de la vitesse v de la voiture.

5. Le déplacement de la voiture a été filmé, puis on a représenté l'évolution de sa position x en fonction du temps.



a. En déduire la valeur $v_{\text{vidéo}}$ de la vitesse de la voiture.

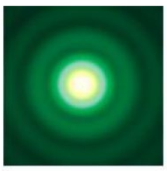
b. Conclure en comparant les valeurs v et $v_{\text{vidéo}}$.

13 Diffraction par un trou éclairé par un laser vert

Un trou d'ouverture $a = 200\ \mu\text{m}$ est éclairé par le faisceau d'un laser vert de longueur d'onde λ (comme sur le montage de l'exercice 12, avec la distance $D = 1{,}7$ m).

1. Qu'observerait-on sur l'écran si la lumière se propageait rectilignement ?

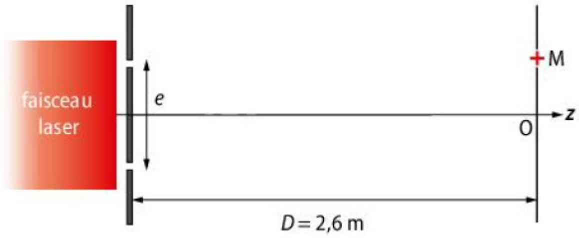
2. En fait, on observe une figure de diffraction comme celle-ci (à taille réelle).



a. En se plaçant dans l'approximation des petits angles, où $\tan\theta \approx \theta$, établir la relation liant θ, a, λ, L et D.

b. En mesurant directement sur la photo le diamètre de la tâche centrale, déterminer la longueur d'onde λ du laser vert.

18 Différence de chemin optique



Un laser rouge, de longueur d'onde $\lambda = 633$ nm, éclaire deux petits trous espacés d'un écartement e. On se place au point M.

1. a. Définir la différence de chemin optique δ. Reproduire le schéma et la représenter dessus.

b. Le point O, au centre de l'écran, est-il sur une frange sombre ou brillante ?

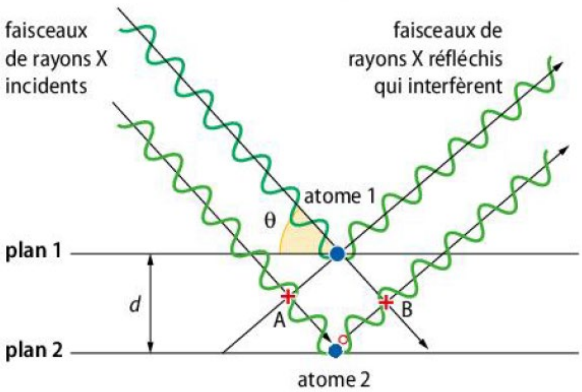
2. On établit que la différence de chemin optique s'écrit : $\delta = \dfrac{e \times x}{D}$, x étant l'abscisse du point M. Rappeler à quelle condition on observe le premier maximum d'amplitude, autre que pour $x = 0$.

3. Ce premier maximum d'amplitude définit la valeur de l'interfrange i, on a alors : $x = i$. Exprimer littéralement l'interfrange i en fonction de λ, e et D.

4. En déduire l'écartement e entre les deux trous pour un interfrange de 3,4 mm mesuré sur l'écran.

29 Interférences et rayons X

Les rayons X sont utilisés pour explorer la matière, par exemple pour évaluer la distance d entre deux plans 1 et 2 voisins d'atomes dans un cristal. Lorsqu'on envoie un faisceau de rayons X de longueur d'onde λ sur un cristal, ils sont réfléchis par les atomes qui constituent le cristal. Les ondes réfléchies par les atomes interfèrent. On peut représenter de façon très simplifiée cette situation par le schéma suivant :



Données : *la différence de chemin optique entre deux ondes incidentes qui se réfléchissent sur deux plans successifs est donnée par la relation : $\delta = 2\,d \cdot \sin\theta$, où d est la distance entre deux atomes voisins et θ l'angle entre le rayon et le plan ; $\theta = 11{,}5°$ et $\lambda = 145$ pm.*

1. a. En exploitant le schéma précédent, évaluer la différence de chemin optique.

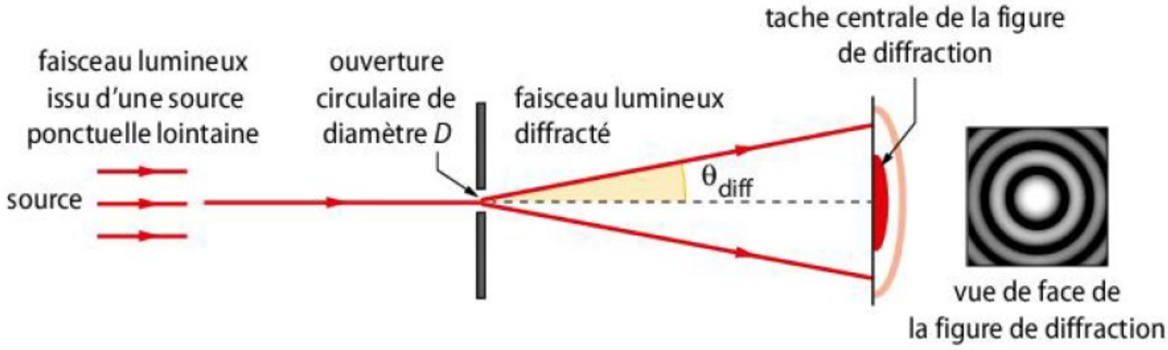
2. Préciser à quelles conditions les rayons X, qui interfèrent après réflexion, donnent des interférences destructives ou constructives.

3. Déterminer la valeur de d dans le cristal dans le cas où l'on obtient des interférences constructives pour une différence de chemin optique minimale.

21 Diffraction et astronomie

La première planète extrasolaire, dont on a pu faire une image par observation directe dans le proche infrarouge, s'appelle 2M1207b. Elle orbite à une distance estimée à 55 unités astronomiques (ua) autour de l'étoile 2M1207a, située à 230 années lumières (al) de la Terre.

Actuellement, l'observation de détails avec un télescope terrestre est principalement limitée par le phénomène de diffraction lié à la valeur de l'ouverture circulaire D du télescope. Dans le cas d'une ouverture circulaire, on admet que l'angle caractéristique de diffraction θ_{diff} (exprimé en radian) vérifie la relation $\theta_{diff} = 1{,}22\dfrac{\lambda}{D}$, où λ est la longueur d'onde du faisceau incident et D le diamètre de l'ouverture.



***Données :** unité astronomique : 1 ua = $1{,}496 \times 10^{11}$ m ; année-lumière : 1 al = $9{,}461 \times 10^{15}$ m ; intervalle de longueur d'onde du proche infrarouge [700 nm ; 1 000 nm].*

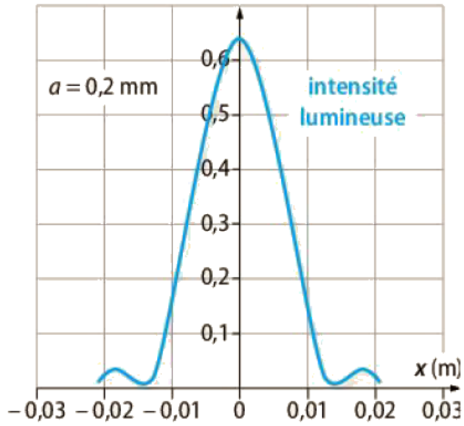
1. **Citer** une propriété de la lumière qui explique le phénomène de diffraction.
2. **Représenter** par un schéma, sans souci d'échelle, l'angle α sous lequel on voit le couple étoile-planète depuis la Terre. Calculer cet angle.
3. Un télescope permet de distinguer deux objets à condition que l'écart angulaire α entre ces deux objets soit supérieur ou égal à l'angle caractéristique de diffraction.

En 2024 Extra Large Telescope aura un de diamètre 39 m. **Estimer** s'il permettra d'observer l'exoplanète sans être gêné par le phénomène de diffraction.

22 Diffraction dans un télescope

Lorsqu'on observe une étoile à travers un télescope, l'image apparaît sous la forme d'une tache, dont la dimension est liée aux défauts de l'instrument, tels que la diffraction par l'ouverture limitée. On réalise le montage de diffraction dans lequel un laser correspond à l'étoile et le miroir du télescope est modélisé par une ouverture circulaire de diamètre a produisant un phénomène de diffraction.

1. Décrire le phénomène de diffraction.
2. Quel caractère de la lumière est mis en évidence ici ?
3. À partir des résultats expérimentaux, déterminer la valeur du diamètre d_{Airy} de la tache centrale de diffraction observée pour cette ouverture.



37 Quelle longueur d'onde ?

MESURES ET INCERTITUDES — 30 min

COM Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

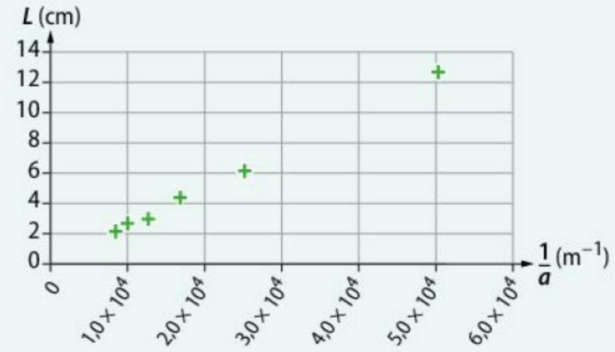
Un granulomètre est un appareil de mesure de précision qui permet de déterminer le diamètre d'un petit grain.

DOC 1 Le granulomètre

Pour vérifier la valeur de la longueur d'onde λ d'une diode laser utilisée dans un appareil de granulométrie, on intercale des fentes de différentes largeurs sur le trajet du faisceau laser. Sur un écran placé à une distance $D = 2{,}00$ m des fentes, on observe une figure de diffraction. L représente la largeur de la tâche centrale et θ_0 l'angle caractéristique de diffraction exprimé en radian. Expérimentalement, on mesure la largeur de la tache centrale L pour des fentes calibrées de différentes largeurs a. On porte les valeurs obtenues sur le graphique ci-contre.

Le fabriquant de l'appareil indique que deux diodes laser de longueurs d'onde 632 nm et 810 nm sont utilisées dans cet instrument de mesure.

DOC 2 Évolution de la tâche centrale de diffraction



DOC 3 Incertitude-type sur la longueur d'onde

L'incertitude-type sur la longueur d'onde λ, notée $u(\lambda)$, peut être déterminée à partir de la relation suivante :

$$u(\lambda) = \lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(k)}{k}\right)^2}$$

L'incertitude-type sur la valeur du coefficient directeur est donnée par le tableur grapheur, soit $u(k) = 1{,}2 \times 10^{-7}$ USI.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Donner la relation qui lie λ, θ_0 et a.
On fait l'hypothèse que l'angle θ_0 est petit. Dans ce cas, on peut écrire $\tan\theta_0 \approx \theta_0$ avec θ_0 en radian.

2. À l'aide du **doc. 2**, démontrer que la largeur de la tâche centrale est donnée par l'expression : $L = k.\frac{1}{a}$, avec $k = 2\lambda.D$

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Déterminer la longueur d'onde λ de la diode laser utilisée en utilisant les documents fournis. Exprimer le résultat avec son incertitude-type