

Chapitre 5

Optique géométrique

L'optique géométrique est le domaine de la physique qui décrit le comportement de la lumière lorsqu'elle rencontre un milieu différent. On peut ainsi appliquer les phénomènes de la réflexion et de la réfraction à plusieurs situations.

5.1 Nature de la lumière

De quoi est faite la lumière ? C'est une question qui est longtemps demeurée sans réponse. Avec le temps, on s'est rendu compte que selon comment on la manipule, la lumière se comporte parfois comme une onde, parfois comme une particule.

Par exemple, lorsqu'on éclaire certains métaux, des électrons sont émis et un courant électrique est créé : c'est *l'effet photoélectrique*, qui s'explique en supposant que la lumière est faite de petites particules de lumière, les **photons**.

Photon

Autre exemple : lorsqu'on essaie de faire passer de la lumière à travers une fente très étroite, on obtient ce qu'on appelle un *patron de diffraction*, c'est-à-dire que la lumière est diffusée dans toutes les directions. Cela s'explique en supposant que la lumière est en fait une onde.

Finalement, on ne peut que conclure que la lumière n'est pas seulement onde ou particule, mais plutôt quelque chose qui comporte toutes ces propriétés. On peut comparer cela à un cylindre posé debout sur une table. Vu de haut, on pourrait croire que c'est un cercle. Vu de côté, on pourrait croire que c'est un rectangle. L'objet qu'on regarde n'est ni un cercle ni un cylindre, mais plutôt un objet plus complexe qui porte ces deux propriétés à la fois.

Dans ce cours, on traitera la lumière comme une onde car cela explique bien les phénomènes qu'on étudiera.

5.2 Spectre électromagnétique

Une onde est simplement une déformation qui se propage. La lumière est une onde de type *électromagnétique*, c'est-à-dire que c'est une combinaison de champ électrique et de champ magnétique qui se propage (on aura l'occasion d'aborder les ondes de type *mécanique* dans un autre chapitre). Toutes les ondes, quelle que soit leur nature, partagent certaines propriétés qui permettent de les caractériser. La propriété la plus utile en optique géométrique est la longueur d'onde.

Onde
électromagnétique
Onde mécanique

5.2.1 Longueur d'onde

Une onde typique a une forme sinusoïdale et elle est périodique, c'est-à-dire qu'elle se répète après un certain intervalle de temps et de distance parcourue.

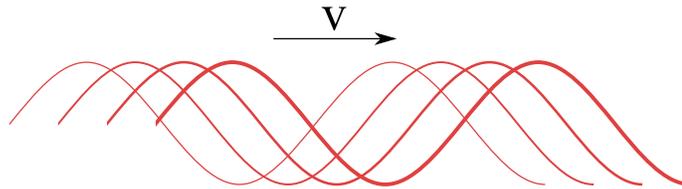


FIGURE 5.1 – Une onde se déplaçant vers la droite et représentée à plusieurs instants successifs.

On définit la longueur d'onde comme étant la distance entre deux points identiques de l'onde. En pratique on utilise des points facilement identifiables sur l'onde, par exemple la distance entre deux pics ou entre deux creux.

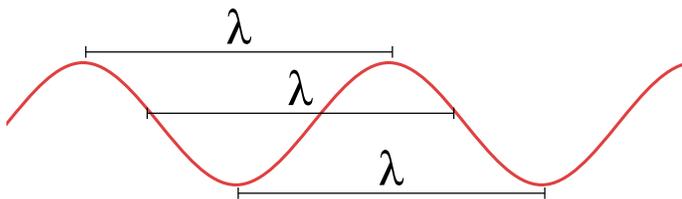


FIGURE 5.2 – Longueur d'onde mesurée à plusieurs endroits.

Dans le langage courant, le terme «lumière» sert à parler de la lumière visible. Cependant, en physique, ce terme décrit toutes les ondes électromagnétiques (incluant la lumière visible) et c'est la longueur d'onde qui permet de savoir à quel type de lumière on a affaire. L'ensemble des longueurs d'onde forme ce qu'on appelle le **spectre électromagnétique**.

Spectre
électromagnétique

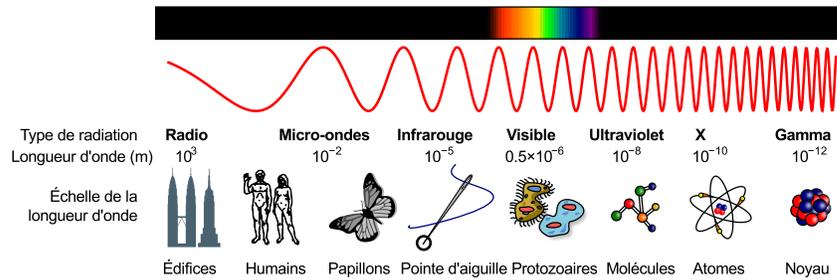


FIGURE 5.3 – Spectre électromagnétique.

L'importance de la longueur d'onde se manifeste lorsqu'on veut utiliser de la lumière pour analyser des structures. En généralisant, la lumière n'interagit fortement qu'avec des structures qui ont des dimensions proches de sa longueur d'onde. Enfin, plus la longueur d'onde est petite, plus la lumière transporte d'énergie.

Lumière visible

La lumière que nos yeux peuvent percevoir est la lumière visible. Sa longueur d'onde varie entre 400 et 700 nm. Quand on regarde les couleurs du spectre dans la lumière visible, on y aperçoit les couleurs qu'on peut voir dans un arc-en-ciel. Le bleu-violet a la plus petite longueur d'onde (~ 400 nm) et le rouge a la plus grande longueur d'onde (~ 700 nm).

Rayonnement UV

Le rayonnement ultra-violet («plus que violet») a une longueur d'onde entre 10 et 400 nm. On utilise ces rayons entre autres pour la stérilisation de l'eau et des aliments car il ont la propriété de tuer les bactéries. Les rayons UV peuvent être dangereux si on y est exposés à long terme ou à forte dose, en provoquant des mutations cellulaires pouvant entraîner certains cancers de la peau. Les rayons UV sont arrêtés notamment par le verre et la couche d'ozone de l'atmosphère.

Rayonnement infrarouge

Le rayonnement infrarouge («moins que rouge») a une plage de longueur d'onde s'étendant de 700 nm à 1 mm environ. Un corps porté à une température proche des températures ambiantes ($\sim 30^\circ\text{C}$) émet beaucoup d'IR, ce qui permet de le détecter dans l'obscurité, là où il n'y a pas beaucoup de lumière visible. Le rayonnement infrarouge est souvent associé à la chaleur, pour la raison que la plupart des molécules courantes se mettent à vibrer lorsqu'elles reçoivent ce type de rayonne-

ment. Cette augmentation de vibrations augmente la température du corps contenant ces molécules.

Micro-ondes

Les micro-ondes sont des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde varie entre 1 mm et 15 cm approximativement. On peut produire facilement les micro-ondes à l'aide d'un appareil nommé klystron. Les micro-ondes servent bien sûr à chauffer ce qui contient de l'eau (les molécules d'eau ont une fréquence de vibration qui correspond à des longueurs d'onde de 12,2 cm), mais aussi aux communications sans-fil (cellulaires, internet).

Ondes radios

Les ondes radio ont d'assez grandes longueurs d'onde, allant de 15 cm jusqu'à 2 km. Elles sont utilisées pour la transmission et la réception d'informations (radio, télévision, astronomie). Leur grande longueur d'onde leur permet de contourner relativement facilement les obstacles. De plus, elles sont techniquement plus faciles à produire que les longueurs d'onde plus courtes.

Rayons X

Les rayons X sont proches des UV et on les classe habituellement entre 0,01 nm et 0,1 nm. Comme leur longueur d'onde est très petite, ils sont idéaux pour étudier les petites structures comme les réseaux cristallins. En pratique, on produit les rayons X en bombardant une cible massive avec des électrons, ce qui produit simultanément des rayons X couvrant un éventail de longueurs d'onde.

5.2.2 Rayonnement de corps noir

Lorsqu'on porte un corps à une certaine température, il émet un rayonnement particulier. En effet, de la lumière d'une multitude de longueurs d'onde est émise en même temps. Cependant, toutes les longueurs d'onde ne sont pas émises avec la même intensité. L'intensité avec laquelle chaque longueur d'onde est émise dépend justement de la température du corps en question.

On voit que plus la température est élevée, plus le maximum d'émission a une petite longueur d'onde. C'est normal, puisqu'une plus grande température implique une plus grande énergie et par conséquent une plus petite longueur d'onde.

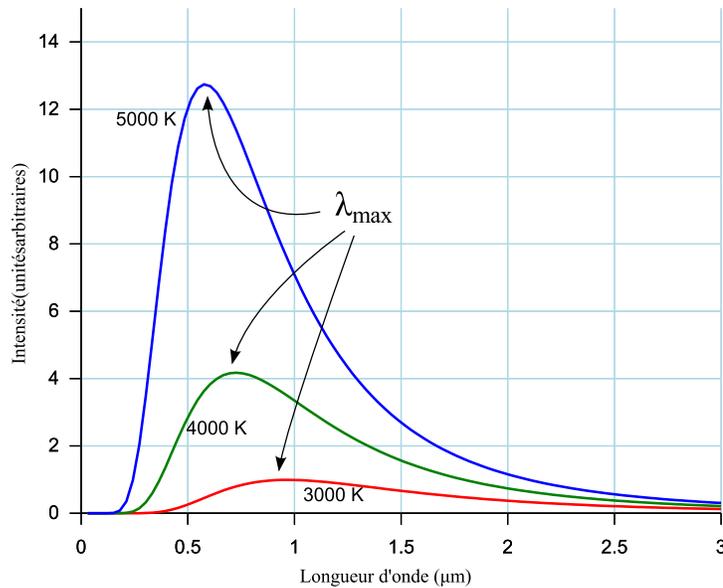


FIGURE 5.4 – Intensité de chaque longueur d’onde pour des corps portés à 3000K, 4000K et 5000K. La longueur d’onde la plus émise (λ_{max}) est également indiquée.

LOI DE WIEN

La longueur d’onde qui est émise avec la plus grande intensité pour un corps possédant une température T (en Kelvin) est donnée par

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{T} \quad (5.1)$$

5.3 Réflexion

5.3.1 Rayon lumineux

La représentation de la lumière sous la forme d’une onde présente plusieurs avantages mais elle n’est pas tout-à-fait appropriée pour l’optique géométrique. On peut représenter une onde par ce qu’on appelle des **fronts d’onde**. Sur un schéma, les fronts d’onde représentent les endroits identiques d’une onde périodique. Par exemple, pour représenter une onde lumineuse, on peut tracer une ligne verticale vis-à-vis chaque maximum de l’onde.

Front d’onde

Cependant, quand de la lumière se propage, on a plutôt affaire à une multitude d’ondes lumineuses superposées. Pour éviter toute confusion, on utilise la notion de rayon lumineux. On trace un rayon lumineux de façon perpendiculaire aux fronts d’ondes. Comme toutes

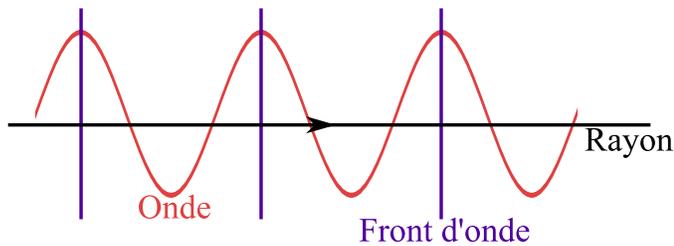


FIGURE 5.5 – Lien entre l'onde, les fronts d'onde et le rayon lumineux.

les ondes se propagent dans la même direction, le rayon représente la direction de propagation de l'ensemble des ondes.

5.3.2 Loi de la réflexion

La lumière se propage en ligne droite, à moins qu'elle ne rencontre un obstacle. Dans le cas d'un obstacle opaque la lumière incidente sera réfléchi selon la **loi de la réflexion** :

Loi de la réflexion

LOI DE LA RÉFLEXION

L'angle de réflexion d'un rayon lumineux est égal à l'angle d'incidence du rayon.

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (5.2)$$

où les angles θ_1 et θ_2 sont mesurés à partir de la normale à la surface.

La **normale** d'une surface est une droite imaginaire perpendiculaire à la surface. Il est à noter que cette loi est valide pour toutes les ondes réfléchies, qu'il s'agisse de lumière ou de son.

Normale

Lorsqu'une surface est très lisse, des rayons incidents parallèles entre eux auront tous le même angle d'incidence θ_1 puisque les normales sont toutes parallèles entre elles. Par conséquent, tous les rayons réfléchis auront le même angle de réflexion θ_2 et seront par conséquent aussi parallèles entre eux. On nomme ce type de réflexion la **réflexion spéculaire**. On retrouve ce type de réflexion dans les miroirs, par exemple.

Par contre, si la surface qui reçoit des rayons lumineux est rugueuse, on parlera plutôt de **réflexion diffuse**, car la lumière réfléchi est diffusée dans toutes les directions. Cela est dû au fait que chaque rayon frappe la surface irrégulière avec un angle différent. La loi de la réflexion est toujours respectée, mais la normale est différente pour chaque rayon.

La réflexion diffuse est ce qui permet de percevoir notre environnement. En effet, elle permet à la lumière d'être réfléchi dans la direction de nos yeux peu importe la position de la source lumineuse. Par

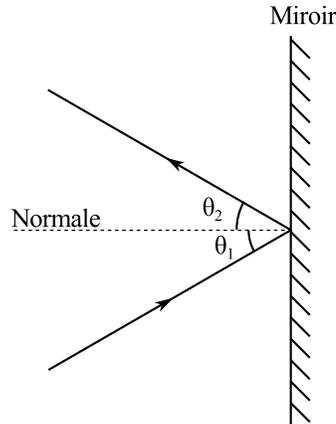


FIGURE 5.6 – Réflexion spéculaire.

exemple, si les phares d'une voiture éclairent vers l'avant par temps sec, une partie de la lumière est réfléchi vers l'arrière ce qui permet au conducteur de voir la route. Par temps mouillée, l'eau sur la route forme une surface lisse et la lumière est surtout réfléchi vers l'avant, ce qui rend la route beaucoup moins visible.

Exemple 5.1. *Deux miroirs plans sont disposés de façon perpendiculaire. Un rayon lumineux frappe le miroir du bas avec un angle de 75° . Quelle est l'orientation du rayon lumineux après avoir subi deux réflexions ?*

Solution

On commence par tracer le rayon incident sur le miroir du bas. Comme il n'y a pas d'indication contraire, l'angle θ_1 du rayon incident est noté par rapport à la normale. Selon la loi de la réflexion, on a $\theta_2 = \theta_1 = 75^\circ$. Le rayon poursuit sa course vers le second miroir. Pour déterminer l'angle d'incidence, on utilise le triangle rectangle formé par les deux miroirs et on obtient $\theta_3 = 90 - \theta_2 = 15^\circ$. Finalement, la loi de la réflexion nous donne $\theta_4 = \theta_3 = 15^\circ$ pour le dernier rayon réfléchi.

On remarque que le rayon incident et le rayon réfléchi sont parallèles. C'est une propriété de cet arrangement de miroirs (qu'on appelle *cataphote*) de réfléchir tout rayon incident dans la direction d'où il vient. Ce principe est utilisé dans les réflecteurs des bicyclettes et les panneaux routiers, entre autres.

5.4 Réfraction

Lorsque la lumière rencontre un obstacle transparent, c'est-à-dire qui peut laisser passer la lumière, la lumière subit entre autres choses

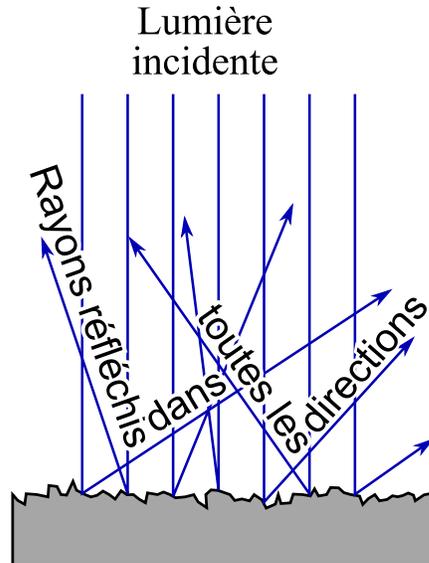


FIGURE 5.7 – Réflexion diffuse par une surface irrégulière.

un changement d'orientation. Ce phénomène s'appelle la **réfraction**. On note qu'une partie de la lumière est *transmise* dans le milieu alors qu'une autre partie est *réfléchie*.

Réfraction

5.4.1 Indice de réfraction

Quand la lumière change de milieu, sa vitesse change car elle ne peut plus se propager sans rencontrer d'obstacles. Ce changement de vitesse est caractérisé par l'indice de réfraction n . En général, le rapport des indices de réfraction correspond au rapport inverse des vitesses de l'onde dans chacun des milieux qu'elle traverse. Pour toutes les ondes, on a :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Pour de la lumière, on sait que sa vitesse dans le vide (et approximativement dans l'air) est constante et a une valeur de $c = 3 \times 10^8$ m/s. Cette vitesse ne pouvant être dépassée, on fixe l'indice de réfraction du vide à $n = 1$. L'équation précédente donne donc, pour de la lumière :

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

La longueur d'onde de la lumière change aussi, car allant moins vite, l'onde se trouve «compressée» :

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

où λ_n est la longueur d'onde dans un milieu d'indice n et λ_0 est la longueur d'onde dans le vide.

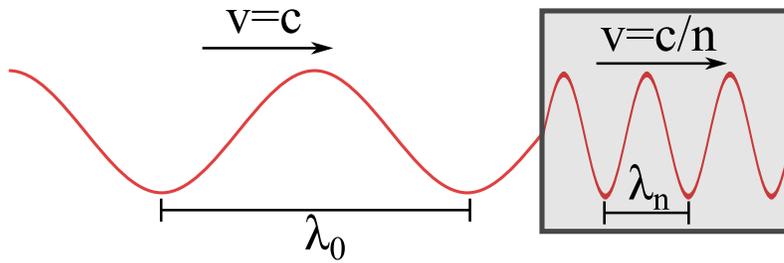


FIGURE 5.8 – Changement de longueur d’onde et de vitesse lors d’un changement de milieu.

Pour des raisons qui dépassent le cadre de ce cours, un changement de vitesse pour une onde implique également un changement de direction. Ce changement est décrit par la **loi de la réfraction** :

Loi de la réfraction :

LOI DE LA RÉFRACTION

L’angle de réfraction d’un rayon lumineux lors d’un changement de milieu dépend de l’angle d’incidence du rayon et de l’indice de réfraction de chacun des milieux.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (5.3)$$

où les angles θ_1 et θ_2 sont mesurés à partir des normales aux surfaces.

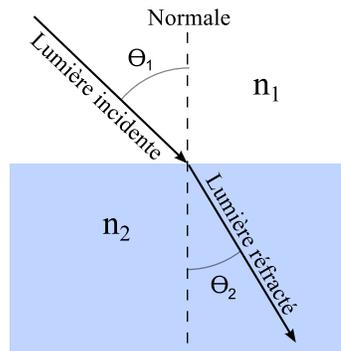


FIGURE 5.9 – Changement d’orientation d’un rayon lumineux lors d’un changement de milieu.

Exemple 5.2. Un rayon lumineux de longueur d’onde $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$ entre avec un angle $\theta_1 = 30^\circ$ dans une lame de verre à faces parallèles d’épaisseur $e = 1 \text{ mm}$. Le verre de la lame a un indice de réfraction $n = 1,5$.

a) Quelle est la longueur d’onde du rayon dans la lame de verre ?

- b) Quel est l'angle de sortie du rayon final ?
 c) Quel est le déplacement latéral du rayon à sa sortie de la lame ?

Solution

- a) On connaît l'indice de réfraction du verre, donc on a

$$\lambda_{\text{verre}} = \frac{\lambda_0}{n_{\text{verre}}} = \frac{600 \text{ nm}}{1,5} = 400 \text{ nm}$$

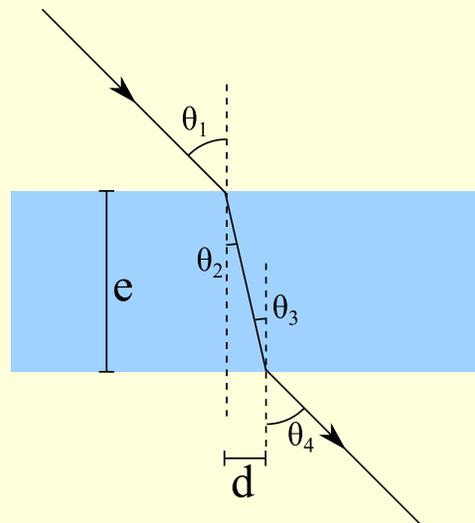
- b) On commence par tracer la normale à la première surface. Selon le schéma, on a $\theta_1 = 30^\circ$. Selon la loi de la réfraction,

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$1 \cdot \sin 30^\circ = 1,5 \cdot \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_2 = \frac{1 \cdot \sin 30^\circ}{1,5} = 0,3\bar{3}$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} 0,3\bar{3} = 19,47^\circ$$



L'angle θ_3 est obtenu en remarquant que θ_2 et θ_3 sont des angles alternes-internes (les faces de la lames sont parallèles) et ont donc la même valeur. Par la loi de la réfraction,

$$n_2 \sin \theta_3 = n_1 \sin \theta_4$$

$$1,5 \cdot 19,47^\circ = 1 \cdot \sin \cdot \theta_4$$

$$\theta_4 = \sin^{-1} \left(\frac{1,5 \cdot \sin 19,47^\circ}{1} \right) = 30^\circ$$

On remarque que l'angle final θ_4 est égal à l'angle d'incidence θ_1 . C'est une propriété qu'ont les lames à face parallèles de faire sortir la lumière dans la même direction qu'à l'entrée, mais décalée latéralement.

- c) On voit un triangle rectangle formé des côté e (épaisseur de la lame) et d (déplacement latéral). Par trigonométrie,

$$\tan \theta_2 = \frac{d}{e}$$

$$d = e \tan \theta_2 = 1 \text{ mm} \cdot \tan (19,47^\circ) = 0,354 \text{ mm}$$

5.4.2 Réflexion totale interne

Commençons avec un exemple :

Exemple 5.3. *Un plongeur sous l'eau ($n_{\text{eau}} = 1,33$) envoie un rayon lumineux vers la surface avec $\theta_1 = 60^\circ$. Avec quel angle le rayon sort-il ?*

Solution

On utilise la loi de la réfraction pour déterminer l'angle à la sortie :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$1,33 \cdot \sin 60^\circ = 1 \cdot \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_2 = \frac{1,33 \cdot \sin 60^\circ}{1}$$

$$\theta_2 = ???$$

Le calcul de l'angle θ_2 donne une erreur, il n'y a pas de solution à ce problème.

Pourquoi n'y a-t-il pas de solution à l'exemple précédent ? Regardons ce qui se passe au fur et à mesure que l'angle d'incidence augmente.

Pour un certain angle précis, le rayon réfracté sort à 90° . Pour un angle plus grand, le rayon serait réfracté sous la surface, ce qui est impossible. Il se produit donc plutôt une réflexion. C'est ce qu'on appelle une **réflexion totale interne**, car la lumière est entièrement réfléchie.

L'angle auquel le rayon réfracté sort à précisément 90° s'appelle l'**angle critique** θ_c . Il est à noter qu'une réflexion totale interne ne

Réflexion totale
interne

Angle critique

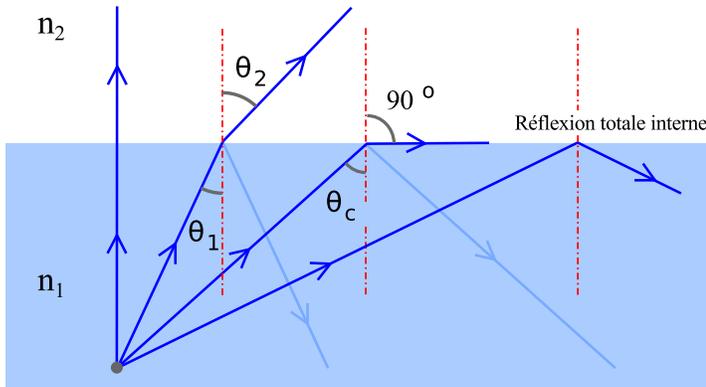


FIGURE 5.10 – Lorsque l’angle de réfraction atteint 90° , il se produit une réflexion totale interne.

peut survenir que lorsque le rayon passe vers un milieu d’indice de réfraction plus petit que celui d’où il provient.

La plupart des miroirs sont fait d’un mince couche métallique réfléchissante qui réfléchit la lumière. Les meilleurs miroirs de ce type arrivent à réfléchir environ 95% de la lumière incidente, alors que 5% sont transmis et donc non réfléchis. Par contre, la réflexion totale interne permet d’obtenir des miroirs sans perte car *toute* la lumière incidente est réfléchi. On utilise ce phénomène pour des instruments optiques de qualité comme des jumelles ou des appareils photo.

Une autre application de la réflexion totale interne est la fibre optique. La fibre optique permet de transporter de l’information sous forme de rayons lumineux sur de grandes distances pratiquement sans perte. La fibre est construite de telle façon que chaque fois que le rayon lumineux touche la paroi, il subit une réflexion totale interne et poursuit sa route vers l’avant.

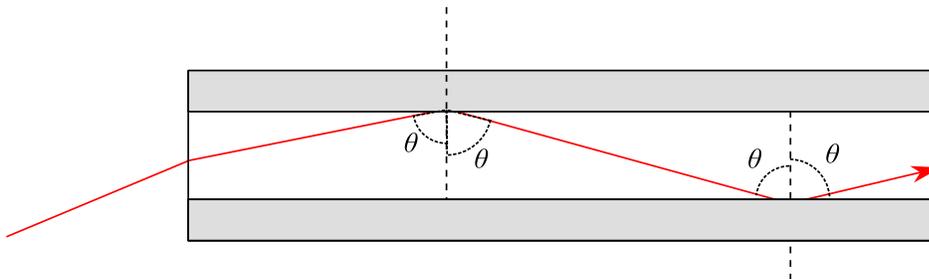
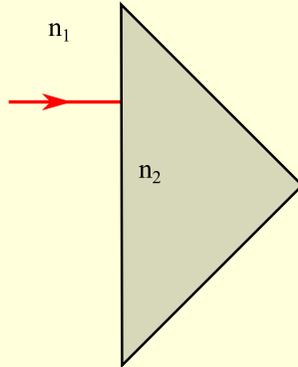


FIGURE 5.11 – Réflexions totales internes à l’intérieur d’une fibre optique. La construction de la fibre fait en sorte que $\theta > \theta_c$ en tout temps.

La fibre optique continue de fonctionner même si elle est courbée, en autant que la courbure ne soit pas trop grande.

Exemple 5.4. On envoie un rayon lumineux sur un prisme tel que celui représenté sur le schéma.

- Quel est l'indice de réfraction minimal que doit avoir le prisme pour que le rayon incident subisse 2 réflexions totales internes ?
- Si on plonge le prisme dans l'eau, quel devrait être l'indice de réfraction pour observer le même phénomène qu'en a) ?



Solution

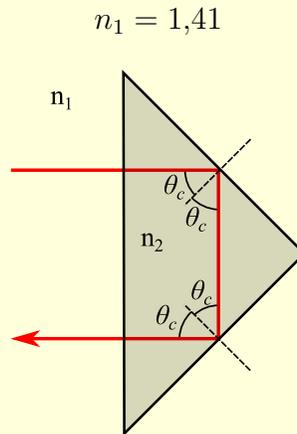
- On commence par calculer la direction du rayon lumineux lorsqu'il entre dans le prisme la première fois. Comme il est perpendiculaire à la surface, il fait un angle de 0° avec la normale. Un simple calcul montre que l'angle du rayon après son entrée dans le prisme est de 0° . Dans tous les cas, un rayon perpendiculaire à la surface n'est pas dévié lorsqu'il effectue son changement de milieu.

Ensuite, on regarde à quelle condition le rayon subira une réflexion totale interne. Si le rayon sortait du prisme, il s'éloignerait de la normale car il passerait vers un milieu d'indice plus petit. Plus l'indice de réfraction du prisme est petit, plus l'angle avec la normale est grand à la sortie pour l'angle d'incidence $\theta_c = 45^\circ$. Si on continue d'augmenter l'indice du prisme, à un certain moment l'angle sera de 90° . C'est cet indice qu'on cherche. Par la loi de la réfraction :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 \sin 45^\circ = 1 \cdot \sin 90^\circ$$

$$n_1 = \frac{1 \cdot \sin 90^\circ}{\sin 45^\circ}$$



Si le prisme a un indice de réfraction d'au moins 1,41, il y aura une réflexion totale interne. Le même raisonnement tient pour la deuxième face rencontrée dans le prisme puisque par géométrie l'angle d'incidence est aussi de 45° . Un prisme de verre d'indice $n = 1,5$ serait donc tout à fait approprié ici.

- b) On utilise le même raisonnement, sauf que l'indice du deuxième milieu est $n_2 = 1,33$. On a donc

$$n_1 = \frac{1,33 \cdot \sin 90^\circ}{\sin 45^\circ}$$

$$n_1 = 1,88$$

Il faudrait que le prisme ait un indice d'au moins 1,81. Un prisme en zircon ($n = 1,92$), du diamant artificiel, suffirait à la tâche.

5.4.3 Dispersion

La **dispersion** est la séparation de la lumière en les différentes longueurs d'onde qui la composent. Pour faire la dispersion de la lumière, on peut tout simplement faire subir une réfraction à la lumière.

Pour expliquer l'effet de dispersion, il faut savoir que l'indice de réfraction d'un milieu *dépend de la longueur d'onde* de la lumière. Ainsi, pour un même matériau, l'indice de réfraction pour le rouge est plus petit que l'indice de réfraction pour le bleu. Cela signifie que le bleu est plus affecté que le rouge par un changement de milieu, donc il est plus dévié.

Plusieurs dispositifs peuvent servir à faire de la dispersion : prismes (voir exemple 5.4), lames à face parallèles (voir exemple 5.2), réseaux de dispersion (autre chapitre), ... Dans tous les cas, la lumière est dispersée car les différentes longueurs d'onde ne sont pas affectées également par la réfraction.

Dispersion

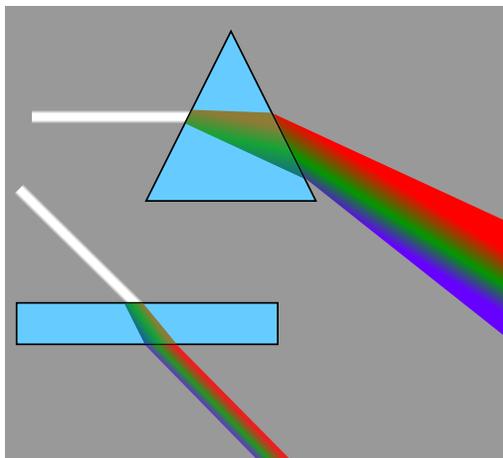


FIGURE 5.12 – Dispersion de la lumière blanche par un prisme triangulaire et par une lame à faces parallèles.

Dans le cas des prismes, on parle souvent de son angle de déviation δ . Cet angle mesure simplement de combien le rayon incident a été dévié après avoir traversé le prisme. On calcule cet angle à l'aide la loi de la réflexion et de géométrie.

Exemple 5.5. *Trouver l'angle de déviation δ pour un prisme triangulaire qui a un angle au sommet de $\phi = 30^\circ$ si le rayon incident fait $\theta_1 = 38^\circ$ avec la normale et que le prisme a un indice de réfraction de $n = 1,5$. Voir la figure 5.13 pour les angles utilisés.*

Solution

On commence par trouver l'angle de réfraction θ_2 :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_2 = \frac{1 \cdot \sin 38^\circ}{1,5}$$

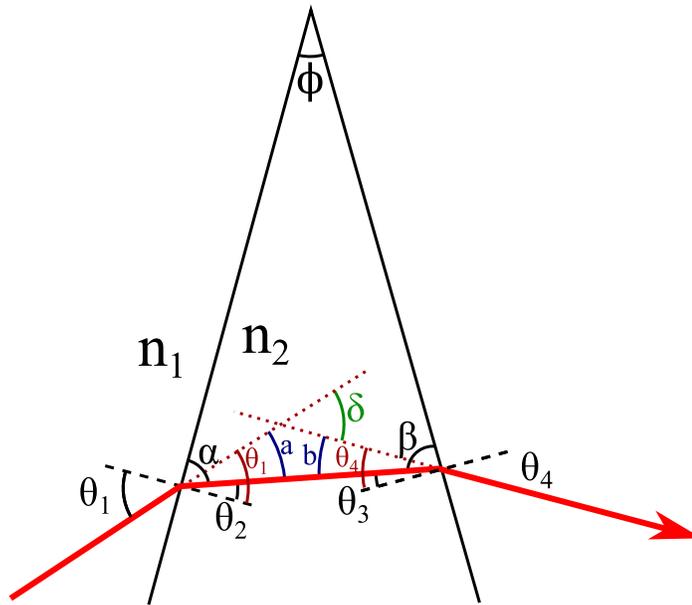
$$\theta_2 = 24,23^\circ$$

Il faut maintenant trouver θ_3 par géométrie. On remarque que $\alpha + \beta + \phi = 180^\circ$, où $\alpha = 90^\circ - \theta_2$ et $\beta = 90^\circ - \theta_3$. On obtient donc

$$\alpha = 65,77^\circ$$

$$\beta = 84,23^\circ$$

$$\theta_3 = 5,77^\circ$$

FIGURE 5.13 – Angles servant à calculer la déviation δ faite par un prisme.

À partir de là, on utilise à nouveau la loi de la réflexion pour obtenir θ_4 :

$$n_2 \sin \theta_3 = n_1 \sin \theta_4$$

$$\theta_4 = 8,67^\circ$$

L'angle δ s'obtient en additionnant l'abaissement subi par le rayon à chaque réfraction. Sur le schéma, on voit que $\delta = a + b$. L'angle a nous dit de combien est descendu le rayon à la première réfraction. En prolongeant le rayon initial, on voit que $a = \theta_1 - \theta_2 = 13,77^\circ$. De la même façon, $b = \theta_4 - \theta_3 = 2,9^\circ$. On obtient finalement $\delta = a + b = 16,67^\circ$.

Exercices

Ex 5.1. Quelles sont les deux comportements que la lumière peut adopter ?

Ex 5.2. Nommez les différentes parties du spectre électromagnétique et classez-les en ordre croissant de longueur d'onde.

Ex 5.3. On porte un bloc d'acier à une température de 1200°C . Quelle longueur d'onde est émise avec la plus grande intensité ? À quelle partie du spectre électromagnétique cette longueur d'onde appartient-elle ?

Ex 5.4. Deux miroirs sont placés en coin de telle façon qu'il y ait un angle de 60° entre les deux. Un rayon lumineux arrive sur un des miroir avec un angle d'incidence de 45° . Avec quel angle le rayon est-il réfléchi sur le 2^e miroir ?

Ex 5.5. L'indice de réfraction du diamant est égal à 2,42. Quelle est la vitesse de la lumière dans le diamant ?

Ex 5.6. Un rayon lumineux entre dans l'eau d'un lac ($n = 1,33$) avec un angle d'incidence de 40° . Trouvez l'angle de réfraction.

Ex 5.7. Une lampe tenue par un plongeur sous l'eau ($n = 1,33$) envoie un rayon lumineux vers la surface d'un lac avec un angle d'incidence de 40° . Trouvez l'angle de réfraction.

Ex 5.8. Trouvez l'angle critique pour un rayon passant...

- du verre crown ($n = 1,52$) vers l'air
- du verre crown ($n = 1,52$) vers l'eau ($n = 1,33$)

Ex 5.9. Pourquoi de la lumière blanche qui traverse perpendiculairement une vitre n'est-elle pas dispersée ?

Ex 5.10. Une lame de verre à face parallèle d'épaisseur $e = 2$ mm est éclairé par de la lumière blanche avec un angle d'incidence de 50° . Les indices de réfraction pour le bleu et le rouge sont respectivement $n_{bleu} = 1,54$ et $n_{rouge} = 1,51$.

- Trouvez la déviation subie par la lumière bleue.
- Trouvez la déviation subie par la lumière rouge.
- Trouvez la largeur du faisceau à la sortie.

Ex 5.11. On dirige un faisceau jaune avec un angle d'incidence $\theta_1 = 30^{\circ}$ sur un prisme qui a un angle de 40° à son sommet. Si l'indice de réfraction de ce prisme pour la lumière jaune est $n_{jaune} = 1,6$, quelle est la déviation totale subie par le rayon après son passage dans le prisme ? (voir l'exemple 5.5 à la page 97)

RÉPONSES

5.1 Onde et particule

5.2 Voir section 5.2.1 à la page 85

5.3 $1,967 \mu\text{m}$ ou 1967 nm (infrarouge)

5.4 15° par rapport à la normale

5.5 $1,24 \times 10^8 \text{ m/s}$

5.6 29°

5.7 59°

5.8 a) 41° , b) 61°

5.9 Parce que l'angle d'incidence étant de 0° , l'angle de réfraction sera aussi de 0° , et ce peu importe la longueur d'onde.

5.10 a) $d_{\text{bleu}} = 1,1468 \text{ mm}$, b) $d_{\text{rouge}} = 1,177 \text{ mm}$, c) $0,03 \text{ mm}$

5.11 $\delta_{\text{jaune}} = 26,4^\circ$

Chapitre 6

Optique physique

L'optique physique est le domaine de la physique qui décrit le comportement de la lumière lorsqu'elle rencontre un obstacle de taille comparable à sa longueur d'onde. Tous les phénomènes décrits dans ce chapitre sont des conséquences de la nature ondulatoire de la lumière. On peut ainsi expliquer les phénomènes de l'interférence et de la diffraction qui sont utilisés dans une multitude d'applications.

6.1 Ondes sinusoïdales progressive

Pour comprendre comment les ondes interagissent, il faut d'abord connaître ce qui les caractérise. Une onde est une déformation ou une variation qui se propage. Par exemple, une corde tendue que l'on agite transmettra des déformations le long de sa longueur. Pour de la lumière, c'est plutôt l'intensité des champs électrique et magnétique qui varient.

Cependant, peu importe le type d'onde, on peut toujours identifier certaines caractéristiques qui ont toujours les mêmes conséquences. On parlera ici des ondes sinusoïdales progressives car ce sont elles qu'on rencontre le plus souvent, en particulier pour la lumière.

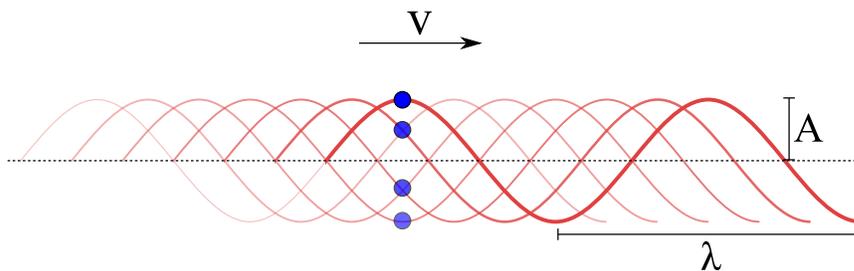


FIGURE 6.1 – Caractéristiques d'une onde sinusoïdale progressive. Le point bleu suit la hauteur de l'onde lors de son passage. Il lui faut un temps égal à une période T pour faire un aller-retour.

Les éléments suivant permettent de caractériser cette onde :

Amplitude (A) Variation maximale de l'onde, mesurée du zéro de variation jusqu'au sommet. L'amplitude correspond donc à la moitié de la variation verticale entre un pic et un creux. Les unités de l'amplitude dépendent du type d'onde ; l'amplitude d'une onde sur une corde se mesure en m, l'amplitude d'une onde sonore peut se mesurer en W/m^2 .

Longueur d'onde (λ) Distance que parcourt l'onde avant de retrouver un état de variation identique. Cela correspond à la distance horizontale entre 2 éléments identiques de l'onde (entre 2 pics, entre 2 creux, ...). La longueur d'onde peut varier quand l'onde change de milieu.

Période (T) Temps que prend un point donné du milieu pour faire un cycle complet. Pour une onde sur une corde, c'est le temps que prend la corde pour revenir au même endroit après que l'onde ait avancé d'une distance égale à une longueur d'onde. La période se mesure en secondes.

Fréquence (f) Nombre d'oscillations par seconde pour un point donné du milieu. La fréquence se mesure en Hz (équivalent de s^{-1}). La fréquence d'une onde reste la même, peu importe les changements de milieu qu'elle peut subir.

PÉRIODE ET FRÉQUENCE

La période et la fréquence sont reliées par la relation inverse

$$f = \frac{1}{T} \quad (6.1)$$

Vitesse (v) Vitesse à laquelle l'onde se propage. Elle se mesure en m/s et peut varier si l'onde change de milieu.

VITESSE

La vitesse v d'une onde est reliée à sa fréquence f et à sa longueur d'onde λ par la relation

$$v = \lambda f \quad (6.2)$$

Exemple 6.1. Une onde radio dans le vide a une longueur d'onde de 1 km.

a) Quelle est sa vitesse ?

- b) Quelle est sa fréquence ?
 c) Quelle est sa période ?

Solution

- a) Comme il s'agit d'une onde lumineuse dans le vide, sa vitesse est nécessairement $v = 3 \times 10^8$ m/s.
 b) On obtient la fréquence à partir de la vitesse et de la longueur d'onde :

$$v = \lambda f$$

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{1000}$$

$$f = 300000 \text{ Hz} = 300 \text{ kHz}$$

Cela signifie que l'onde fait 300000 oscillations à chaque seconde.

- c) La période est l'inverse de la fréquence :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{300 \times 10^3} = 3,33 \times 10^{-6} = 3,33 \mu\text{s}$$

On en conclut qu'il faut $3,33 \mu\text{s}$ à cette onde pour compléter un cycle complet.

6.2 Superposition d'ondes

Quand deux ondes se superposent, on assiste au phénomène appelé **interférence**. En fait, les ondes elles-mêmes n'interagissent pas, c'est le milieu qui subit l'effet du passage de chacune des ondes. Pour connaître la forme de l'onde résultante, il suffit d'additionner les amplitudes de chacune des ondes pour chaque point du milieu. Il est à noter que l'amplitude peut être positive (vers le haut) ou négative (vers le bas).

Interférence constructive

Par exemple, voici de quoi aurait l'air une corde élastique transportant deux impulsions identiques dans des directions opposées. Comme les ondes sont identiques, il en résulte une déformation deux fois plus grande lorsque les impulsions sont superposées.

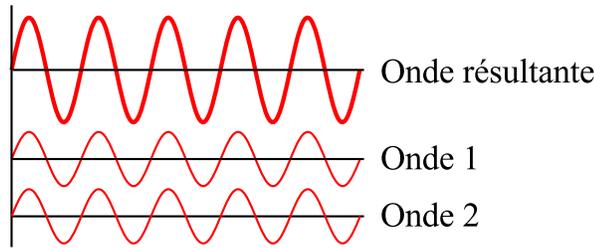


FIGURE 6.2 – Interférence constructive entre 2 ondes. Au moment illustré, les maximums et les minimums correspondent exactement.

Interférence destructive

À l'inverse, voici de quoi aurait l'air la même corde élastique transportant cette fois deux impulsions de forme identique mais opposées l'une à l'autre. Comme les ondes sont identiques, il en résulte une déformation nulle de la corde lorsque les impulsions sont superposées. Les ondes ne sont pas disparues, c'est simplement que l'effet total des impulsions sur la corde donne momentanément une déformation nulle. À preuve, l'énergie transportée par les ondes n'est pas disparue puisque même si la corde a une déformation nulle, elle est néanmoins en mouvement.

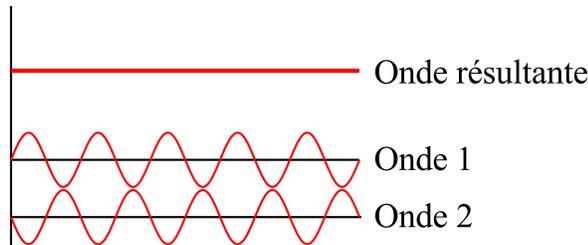


FIGURE 6.3 – Interférence destructive entre 2 ondes. Au moment illustré, les maximums et les minimums sont exactement en opposition.

6.3 Interférence et diffraction

On étudiera dans cette section l'interférence appliquée à des situations simples mais réelles. De plus, on verra comment le phénomène appelé diffraction vient modifier les phénomènes d'interférence.

6.3.1 Interférence

Dans le cas le plus simple, on dispose de deux sources d'ondes. Les phénomènes décrits dans cette section s'appliquent à tous les types d'ondes (son, lumières, ...).

Conditions d'interférence

Si on se place devant les sources S_1 et S_2 (disons au point C), on reçoit de la lumière provenant des 2 sources. Quelle intensité sera reçue au point C ? Cela dépendra à quoi ressemble chaque onde au point C . Si au point C chaque onde est rendue à un maximum, alors l'interférence créera un maximum à ce moment. Un peu plus tard, les deux ondes seront en même temps à leur minimum au point C . Au final, cela aurait comme effet qu'au point C , l'onde résultante oscillerait avec une très grande amplitude et l'intensité perçue serait très grande. C'est un point d'interférence constructive permanente.

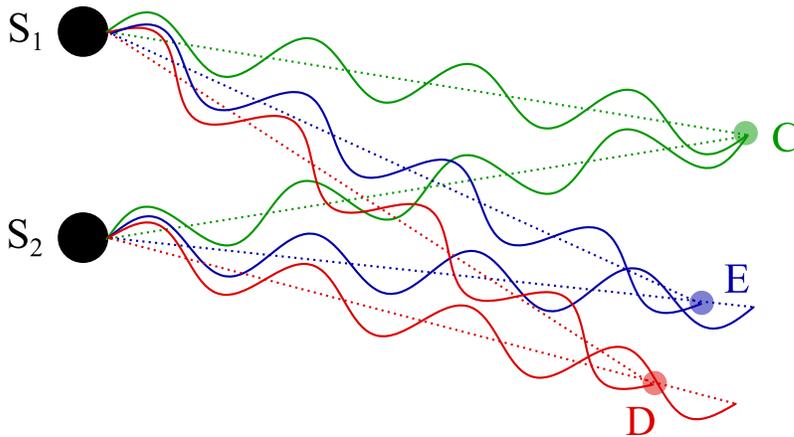


FIGURE 6.4 – Interférence pour différents points devant 2 sources d'ondes. Le point de rencontre de chaque onde est donné par les lignes pointillées.

Au contraire, on a aussi des points comme D , où les ondes sont *déphasées* d'un demi-cycle quand elles y arrivent. Lorsqu'une des ondes est au maximum, l'autre est au minimum. Un peu plus tard, c'est l'inverse. Au final, une des ondes est toujours l'inverse de l'autre et il n'y a aucune oscillation au point D , ce qui signifie que l'intensité perçue sera nulle en tout temps. C'est un point d'interférence destructive permanente.

Cependant, pour la plupart des points, comme E , l'interférence est partiellement constructive, partiellement destructive selon le moment. Au final, on observe une onde qui oscille avec une amplitude non nulle mais plus petite que l'amplitude de l'interférence constructive d'un point comme C . On observe une intensité intermédiaire en tout temps à cet endroit.

Différence de marche

Comment déterminer si un point ressemble à D , C ou E ? Comme la longueur d'onde est fixe, la différence de cycle entre les deux ondes

dépendra de la différence entre la distance qu'elles ont parcourue avant d'arriver au point en question. Cette différence de distance s'appelle la **différence de marche** δ .

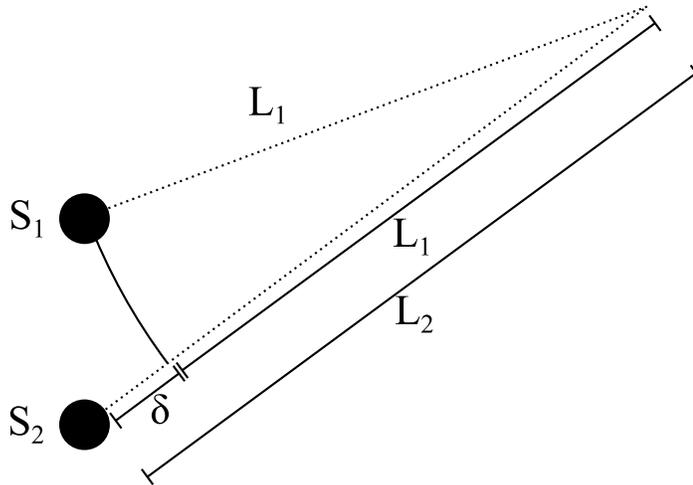


FIGURE 6.5 – Interférence destructive entre 2 ondes. Au moment illustré, les maximums et les minimums sont exactement en opposition.

Si δ est un multiple exact d'une longueur d'onde ($\delta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$), alors chaque onde arrivera au point au même moment de leur cycle. Cela signifie qu'on aura un point tel que C , un point d'interférence constructive en tout temps.

D'un autre côté, si δ est un multiple demi-entier impair d'une longueur d'onde ($\delta = \frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots$), alors chaque onde arrivera au point à des moments parfaitement opposés de leur cycle. Cela signifie qu'on aura un point tel que D , un point d'interférence destructive en tout temps.

EFFET DE LA DIFFÉRENCE DE MARCHE

On a de l'interférence constructive si à un point P situé devant deux sources ponctuelles, la différence de marche est égale à

$$\delta = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (6.3)$$

On a de l'interférence destructive si à un point P situé devant deux sources ponctuelles, la différence de marche est égale à

$$\delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (6.4)$$

Exemple 6.2. Deux haut-parleurs identiques, séparés de $d = 3$ m, émettent en phase une onde sonore de 660 Hz. On se place à 4 m directement devant un des haut-parleurs. Si la vitesse du son est de 330 m/s,

- Quelle est la différence de marche entre les deux ondes à l'endroit où on est placé ?
- Est-ce que cela correspond à de l'interférence constructive, destructive ou à un cas intermédiaire ?

Solution

- On sait qu'on se trouve à $L_1 = 4$ m d'un haut-parleur. Par géométrie, on obtient à quelle distance L_2 on se trouve de l'autre haut-parleur :

$$\begin{aligned} L_2^2 &= d^2 + L_1^2 \\ L_2 &= \sqrt{d^2 + L_1^2} \\ L_2 &= \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ m} \end{aligned}$$

La différence de marche δ étant simplement la différence de distance parcourue par chacune des ondes, on a

$$\delta = |L_2 - L_1| = |5 - 4| = 1 \text{ m}$$

- On sait qu'on a un maximum d'interférence si $\delta = m\lambda$, où m est un entier. On doit connaître λ pour vérifier la condition :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{330}{660} = 0,5 \text{ m}$$

À partir de là, on cherche

$$m = \frac{\delta}{\lambda}$$

Si m est un entier, alors on a un maximum d'interférence. Vérifions :

$$m = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{1}{0,5} = 2$$

Comme m est entier, cela signifie que les deux ondes se combinent pour faire à cet endroit de l'interférence complètement constructive. On entend donc un son qui semble amplifié.

On peut vérifier qu'il ne s'agit pas d'interférence destructive. Si c'était le cas, il faudrait que

$$\delta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$$

et que m soit entier. Vérifions :

$$m + \frac{1}{2} = \frac{\delta}{\lambda}$$

$$m = \frac{\delta}{\lambda} - \frac{1}{2}$$

$$m = \frac{1}{0,5} - \frac{1}{2} = 1,5$$

On voit qu'à cet endroit, on n'a pas d'interférence purement destructive car m n'est pas entier.

6.3.2 Diffraction

La **diffraction** est un phénomène qui a lieu lorsqu'une onde rencontre un obstacle. Si l'obstacle est de dimension comparable à la longueur d'onde, alors l'onde subira une déviation. Si l'obstacle est une fente qui permet le passage de l'onde, alors l'onde qui subit de la diffraction ira en s'évasant plutôt qu'en ligne droite. Si l'obstacle est plutôt quelque chose qui bloque le passage de l'onde, alors la diffraction fera en sorte que l'onde contourne l'obstacle pour se reformer plus loin.

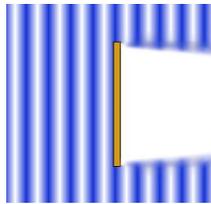


FIGURE 6.6 – Effet de la diffraction lorsqu'une onde rencontre un obstacle. On remarque que l'onde a tendance à se reformer après l'obstacle.

La diffraction est ce qui permet aux ondes sonores ($\lambda \approx 1$ cm) d'être par exemple déviée en frappant un coin de mur. On peut ainsi entendre ce qui se passe même si on n'est pas en droite ligne avec la source sonore. Toujours pour des sources sonores, on observe aussi de la diffraction dans les haut-parleurs. S'il n'y a en avant pas, le son sortirait droit devant seulement et on n'entendrait rien à moins d'être parfaitement placé.

Pour la lumière, la diffraction s'observe un peu plus difficilement car la longueur d'onde est beaucoup plus petite. Il est tout de même possible, à l'aide de minces fentes, d'observer la diffraction de la lumière.

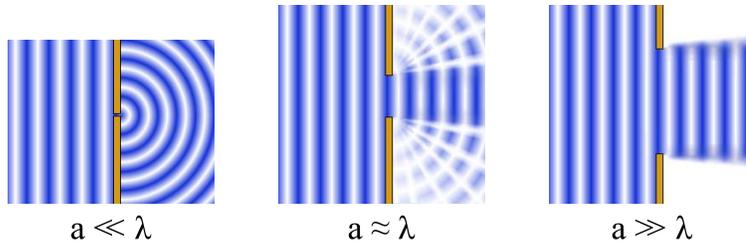


FIGURE 6.7 – Lien entre la largeur de la fente a et la longueur d'onde λ .

On remarque que le facteur déterminant pour l'importance de la diffraction est le rapport entre la longueur d'onde (λ) et la taille de l'ouverture (a). Si $\lambda \gg a$, alors la lumière transmise part dans toutes les directions uniformément. Si $\lambda \approx a$, alors la lumière transmise est visiblement divergente. Enfin, si $\lambda \ll a$, alors la lumière est si faiblement déviée qu'il est très difficile de le remarquer.

6.3.3 Expérience de Young (interférence par 2 fentes étroites)

Pour la lumière, le principe d'interférence s'applique tout aussi bien. Cependant, la fréquence des ondes lumineuse étant très élevée (souvent de l'ordre du GHz ou plus), l'oeil ne peut pas percevoir directement les variations dans l'onde. Pour simplifier, l'oeil détecte l'amplitude moyenne de l'onde et l'interprète comme l'intensité lumineuse. La fréquence d'une onde lui donne sa couleur perçue, son amplitude lui donne son intensité.

L'expérience de Young consiste à créer 2 sources ponctuelles de même longueur d'onde et en phase à tout moment. Cela signifie qu'en tout temps, les ondes provenant de chacune des source seront rendues au même moment dans leur cycle. En particulier, lorsqu'une des source émettra un maximum, l'autre émettra en même temps un maximum.

Pour ce faire, on utilise en pratique un laser, qui est une source cohérente (toutes les ondes du rayon sont en phase). On projette ce rayon sur 2 fentes très étroites, donc la diffraction transforme chaque fente en source ponctuelle, chacune en phase avec l'autre.

Patron d'interférence

Où cela nous mène-t-il dans l'expérience des deux fentes ? On cherche à savoir comment l'intensité lumineuse se répartirait sur un écran placé

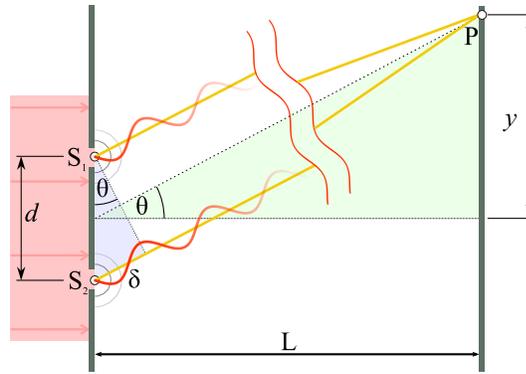


FIGURE 6.8 – Angles et mesure dans l'expérience de Young (comme l'écran est loin, le parcours de l'onde a été abrégé).

devant les fentes. Si on suppose que l'écran est loin des fentes, alors les rayons provenant des fentes sont pratiquement parallèles.

On voit alors sur la figure 6.8 que la différence de marche est égale à $\delta \approx \sin\theta$, où θ est l'orientation du point P sur l'écran mesurée à partir du centre des fentes. D'un autre côté, le point P se trouve à une distance $y = L \tan\theta$. Toujours en supposant que l'écran est loin, on a une approximation qui nous dit que $\sin\theta \approx \theta \approx \tan\theta$.

En combinant tout cela, on obtient les endroits sur l'écran où on observe les maximums lumineux (interférence constructive) et les minimums lumineux (sans lumière, interférence destructive) :

POSITION DES MAXIMUMS ET MINIMUM (EXPÉRIENCE DE YOUNG)

Les maximums d'interférence sur un écran s'observent aux positions

$$y_{(max)} = \frac{m\lambda L}{d} \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (6.5)$$

Les minimums d'interférence sur un écran s'observent aux positions

$$y_{(min)} = \frac{(m + \frac{1}{2}) \lambda L}{d} \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (6.6)$$

L'alternance des taches sombres et lumineuse s'appelle un **patron d'interférence**. L'indice m s'appelle l'**ordre** de la tache en question. On remarque qu'exactement vis-à-vis le centre des fentes, on observe un maximum d'interférence. Cela est normal puisque les rayons issus de chacune des fentes ont parcouru la même distance. Cette tache lumineuse correspond à l'ordre 0. On remarque aussi que les taches lumineuses et sombres sont réparties uniformément.

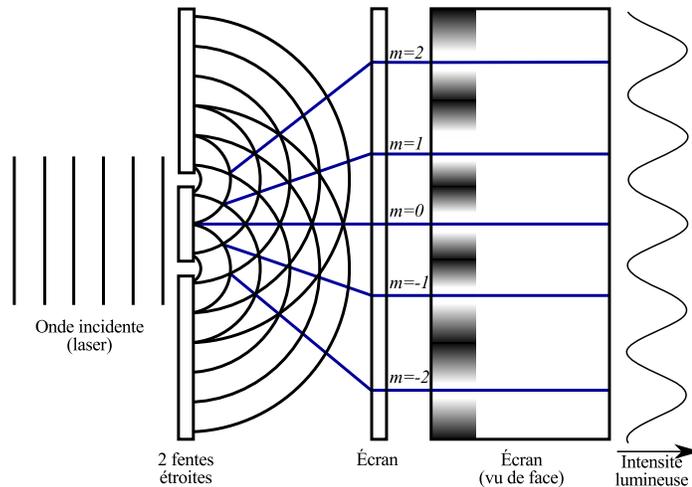


FIGURE 6.9 – Patron d'interférence observé dans l'expérience de Young.

Les équations 6.5 et 6.6 nous renseignent sur la *position* des taches sombres et lumineuses, mais pas sur l'intensité observée. On mesure l'intensité lumineuse en W/m^2 , ce qui signifie qu'on mesure combien d'énergie arrive à chaque seconde sur une surface.

INTENSITÉ LUMINEUSE (EXPÉRIENCE DE YOUNG)

L'intensité I observée de la lumière sur un écran illuminé par 2 fentes minces est donnée par

$$I = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{180dy}{\lambda L} \right) \quad (6.7)$$

où I_0 est l'intensité d'une seule des fentes, mesurée en bloquant l'autre.

Exemple 6.3. Deux fentes très étroites sont séparées d'une distance $d = 0,05 \text{ mm}$ et éclairées par un faisceau lumineux d'une longueur d'onde $\lambda = 700 \text{ nm}$. Lorsqu'on bloque une des fentes, on mesure une intensité de $2 \text{ W}/\text{m}^2$ sur un écran placé à $L = 5 \text{ m}$ des fentes.

- Trouver la position des 3 premiers maximums d'interférence par rapport au centre de l'écran.
- Trouver la position des 3 premiers minimums d'interférence par rapport au centre de l'écran.
- Quelle sont les intensités lumineuses mesurées à 2 cm , $3,5 \text{ cm}$ et 7 cm du centre de l'écran ?

Solution

- a) Les maximums d'interférence pour ce montage sont aux positions suivantes :

$$y_{(max)} = \frac{m\lambda L}{d}$$

Le premier maximum ($m = 1$) se trouve à

$$y_{1(max)} = \frac{1 \cdot 700 \times 10^{-9} \cdot 5}{0,05 \times 10^{-3}} = 0,07 \text{ m} = 7 \text{ cm}$$

Le deuxième maximum ($m = 2$) se trouve à

$$y_{2(max)} = \frac{2 \cdot 700 \times 10^{-9} \cdot 5}{0,05 \times 10^{-3}} = 0,14 \text{ m} = 14 \text{ cm}$$

On pouvait s'attendre à ce résultat car les maximums sont répartis à intervalles réguliers. Sans réutiliser l'équation, on peut déduire que

$$y_{3(max)} = 3 \cdot y_{1(max)} = 21 \text{ cm}$$

- b) Les minimums d'interférence pour ce montage sont aux positions suivantes :

$$y_{(min)} = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda L}{d}$$

Le premier minimum ($m = 1$) se trouve à

$$y_{1(min)} = \frac{\left(1 + \frac{1}{2}\right) \cdot 700 \times 10^{-9} \cdot 5}{0,05 \times 10^{-3}} = 0,035 \text{ m} = 3,5 \text{ cm}$$

On pouvait s'y attendre puisque les minimums sont centrés par rapport aux maximums. Les autres minimums sont espacés de 7 cm entre eux, tout comme les maximums. Donc, le deuxième minimum se trouve à

$$y_{2(min)} = y_{1(min)} + 7 \text{ cm} = 10,5 \text{ cm}$$

Pareillement pour le troisième minimum :

$$y_{3(min)} = y_{2(min)} + 7 \text{ cm} = 17,5 \text{ cm}$$

c) Pour trouver l'intensité mesurée, on utilise l'équation 6.7. En $y = 2$ cm, on a

$$I = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{180dy}{\lambda L} \right)$$

$$I = 4 \cdot 2 \cos^2 \left(\frac{180 \cdot 0,05 \times 10^{-3} \cdot 0,02}{700 \times 10^{-9} \cdot 5} \right) = 3,11 \text{ W/m}^2$$

En $y = 3,5$ cm, on a un minimum d'interférence, on s'attend donc à une intensité lumineuse de 0 W/m^2 . Vérifions :

$$I = 4 \cdot 2 \cos^2 \left(\frac{180 \cdot 0,05 \times 10^{-3} \cdot 0,035}{700 \times 10^{-9} \cdot 5} \right) = 0 \text{ W/m}^2$$

En $y = 7$ cm, on a un maximum d'interférence, on s'attend donc à la plus grande intensité possible, $4I_0 = 8 \text{ W/m}^2$. Vérifions :

$$I = 4 \cdot 2 \cos^2 \left(\frac{180 \cdot 0,05 \times 10^{-3} \cdot 0,07}{700 \times 10^{-9} \cdot 5} \right) = 8 \text{ W/m}^2$$

6.3.4 Fentes multiples étroites

Cette section aborde le cas où on a plus de 2 fentes étroites traversées par de la lumière cohérente. Comme auparavant, d représente la distance entre chacune des fentes et c'est une valeur constante (les fentes sont réparties uniformément).

Encore une fois, on parle ici de fentes très étroites par rapport à la longueur d'onde, donc chacune des fentes agit comme une source ponctuelle.

2 fentes (rappel)

Pour rappel, la position y (mesurée à partir du centre) des maximums d'interférence sur un écran situé à une distance L est donnée par

$$y = \frac{m\lambda L}{d}$$

N fentes

Lorsqu'on ajoute des fentes, la position des maximums restent identique et on les appelle les *maximums principaux*. Cependant, ces derniers deviennent plus intenses et plus étroit. De plus, d'autres petits maximums apparaissent : on les appelle les *maximums secondaires*. Ces maximums secondaires ne sont pas très intenses et sont difficiles à voir.

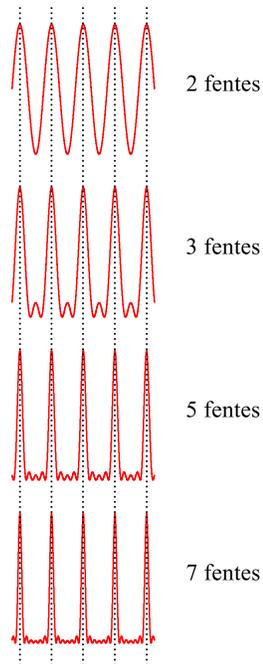


FIGURE 6.10 – Exemples de patrons d’interférence pour différents nombre de fentes. À noter que les maximums principaux restent toujours aux mêmes positions.

À chaque fois qu’on ajoute une fente, les effet d’interférence viennent augmenter l’intensité des maximums principaux et ajouter un maximum secondaire. C’est d’ailleurs un truc pour savoir combien de fentes ont été utilisée pour créer un patron d’interférence :

NOMBRE DE FENTES

Le nombre de fentes utilisées pour produire un patron d’interférence correspond au nombre de maximums secondaires + 2.

Réseaux

À la limite, lorsque le nombre de fente devient très important, les maximums principaux sont très étroits et brillants et il y a une multitude de maximums secondaire très faibles en intensité. Cela fait en sorte que la lumière est très bien séparée et qu’elle forme des taches brillantes et nettes. Rappelons que la position de ces taches brillantes est toujours donnée par la même équation pour y .

Les réseaux ont plusieurs utilités. Ils servent en particulier à faire la **dispersion** de la lumière en spectroscopie, c’est-à-dire qu’il arrivent à séparer les différentes longueurs d’onde. Cela est possible car la déviation y de la lumière dépend de la longueur d’onde. Plus λ est grand,

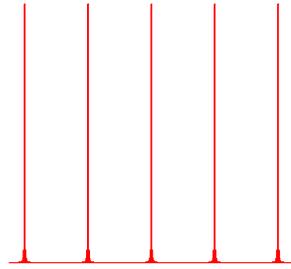


FIGURE 6.11 – Exemple de patron d'interférence pour un réseau.

plus la lumière est déviée. Ainsi, la lumière rouge sera plus déviée que la lumière bleue.

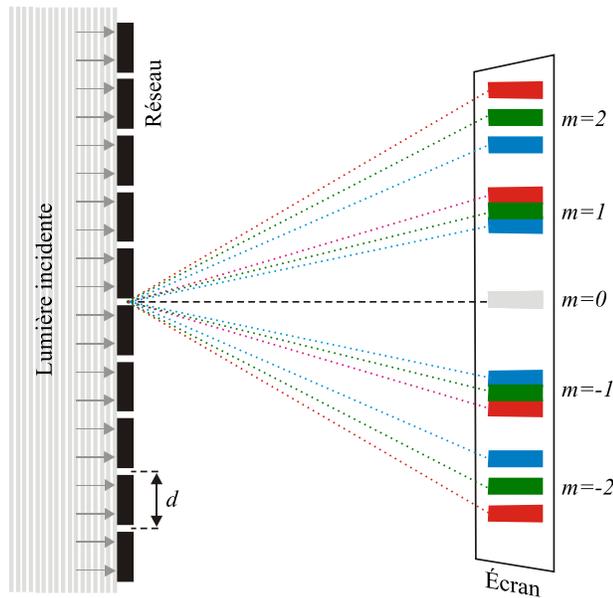


FIGURE 6.12 – Dispersion de la lumière par un réseau.

L'avantage d'utiliser des réseaux par rapport aux prismes pour faire la dispersion de la lumière est qu'il est beaucoup plus facile de concevoir des réseaux ayant les propriétés voulues. En effet, la dispersion faite par un prisme dépend seulement de son indice de réfraction pour chaque longueur d'onde. Si on veut changer la façon dont la dispersion se fait, il faut changer de matériau et ce n'est pas toujours possible d'en trouver un convenable. Par contre, pour un réseau, on n'a qu'à modifier la distance entre chacune des fentes pour changer les angles de dispersion.

Comme il y a beaucoup de fentes dans un réseau, il est plus simple d'utiliser la notion de **pas du réseau**, qui indique la densité des fentes. On donne souvent le pas du réseau p en traits/ mm. Pour obtenir la

distance d entre les fentes, on n'a qu'à inverser la valeur du pas. On obtient donc

PAS D'UN RÉSEAU

La distance inter-fentes dans un réseau est donnée par

$$d = \frac{1}{p} \quad (6.8)$$

où p est le pas du réseau.

Une dernière notion à propos des réseaux est leur **pouvoir de résolution**. Cette notion fait référence à la capacité pour un réseau de séparer des longueurs qui sont proches.

POUVOIR DE RÉOLUTION

Le pouvoir de résolution R d'un réseau se calcule par

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN \quad (6.9)$$

où $\Delta\lambda$ est le plus petit écart mesurable de longueur d'onde à partir de λ , m est l'ordre observé et N est le nombre de fentes éclairées par le faisceau lumineux.

Qualitativement, le pouvoir de résolution nous indique à quel point les longueurs d'onde seront séparées après avoir traversé le réseau. Plus il est grand, plus il sera aisé de distinguer deux longueurs d'ondes proches l'une de l'autre.

Exemple 6.4. *Un réseau qui a un pas de 500 traits/mm est éclairé par un faisceau polychromatique (plusieurs longueurs d'onde) de largeur $l = 1$ mm. On place un écran à $L = 5$ m du réseau. Si le faisceau est composé d'un mélange de 2 longueurs d'onde ($\lambda_1 = 500$ nm et $\lambda_2 = 500,7$ nm), ...*

- a) *trouver la position de l'ordre 1 sur l'écran pour les longueurs d'onde λ_1 et λ_2 .*
- b) *trouver le pouvoir de résolution R du réseau à l'ordre 1 et à l'ordre 2.*
- c) *pourrait-on distinguer λ_1 et λ_2 à l'ordre 1 ? À l'ordre 2 ?*

Solution

- a) On utilise la même équation que d'habitude pour trouver les maximums principaux :

$$y_{(max)} = \frac{m\lambda L}{d}$$

On a d'abord besoin de trouver la distance inter-fentes d :

$$d = \frac{1}{p} = \frac{1}{500} = 0,002 \text{ mm}$$

Le maximum d'ordre 1 pour λ_1 est

$$y_{(max)} = \frac{1 \cdot 500 \times 10^{-9} \cdot 5}{0,002 \times 10^{-3}} = 1,25 \text{ m}$$

Pour λ_2 , on a

$$y_{(max)} = \frac{1 \cdot 500,7 \times 10^{-9} \cdot 5}{0,002 \times 10^{-3}} = 1,2525 \text{ m}$$

On voit que les deux longueurs d'onde se retrouvent très près sur l'écran, résultat auquel on pouvait s'attendre. Peut-on cependant distinguer ces deux longueurs d'onde séparées de seulement 2,5 mm ? Il faut répondre aux prochaines questions pour le savoir.

- b) Le pouvoir de résolution est $R = mN$. On a $N = 500$ traits/mm. $1 \text{ mm} = 500$ traits éclairés. Par conséquent,

$$R_1 = 1 \cdot 500 = 500$$

à l'ordre 1 et

$$R_2 = 2 \cdot 500 = 1000$$

à l'ordre 2.

- c) Pour savoir si 2 longueurs d'onde voisines peuvent être distinguées, on utilise la relation

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

donc la plus petite variation de longueur d'onde observable est

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{R}$$

À l'ordre 1, on a

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{R_1} = \frac{500 \times 10^{-9}}{500} = 1 \times 10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nm}$$

Cela signifie qu'on ne pourra pas voir qu'il y a 2 longueur d'onde car λ_2 est à moins de 1 nm de λ_1 . À l'ordre 2, on plutôt

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{R_2} = \frac{500 \times 10^{-9}}{1000} = 0,5 \times 10^{-9} \text{ m} = 0,5 \text{ nm}$$

À l'ordre 2, on peut en théorie distinguer 2 longueurs d'onde séparées de 0,5 nm, ce qui signifie qu'on pourra voir λ_1 et λ_2 séparément.

En pratique, les réseaux dispersent tellement la lumière qu'on observe rarement les ordres plus grands que $m = 2$. En effet, les ordres plus grands sont souvent inexistant car ils seraient produits à des angles plus grands que 90° , ce qui est impossible.

6.3.5 Diffraction produite par une fente simple

On a déjà parlé de diffraction à la section 6.3.2 (voir page 108), où on décrivait les propriétés générales du phénomène. Les cas extrêmes sont simples : une très petite ouverture ($a \ll \lambda$) produit une source ponctuelle, une grande ouverture ($a \gg \lambda$) laisse passer la lumière sans la dévier. Que se passe-t-il pour le cas intermédiaire ? On a vu que la lumière était partiellement déviée, mais cette déviation se calcule.

Étant donné que l'ouverture a a une certaine largeur, on peut supposer qu'elle est constituée d'une multitude d'ouvertures de dimension négligeable, donc de sources ponctuelles. Chacune de ces sources peut faire de l'interférence avec les autres. Droit devant la fente, les rayons de toutes ces sources auront parcouru la même distance et il y aura donc de l'interférence parfaitement constructive.

Ailleurs que droit devant, il se trouve qu'il n'y a de l'interférence parfaitement destructive que pour certaines directions seulement. Dans les autres directions, la lumière interfère partiellement et on peut observer une certaine intensité lumineuse.

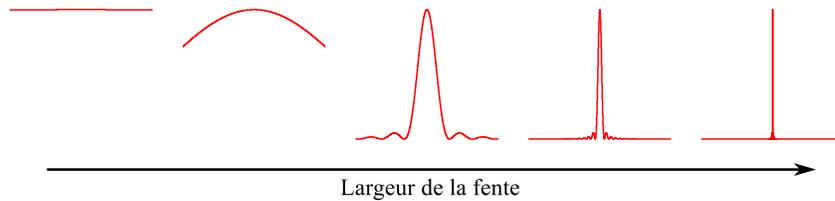


FIGURE 6.13 – Effet de la largeur de la fente sur la diffraction de la lumière. Plus la fente est large, moins la lumière se disperse en la traversant.

POSITION DES MINIMUMS DE DIFFRACTION

Les minimums de diffraction pour une fente simple sont donnés par

$$y = \frac{M\lambda L}{a} \quad M = ,1,2,3 \dots \quad (6.10)$$

où a est la largeur de la fente.

On remarque que l'indice M commence à 1, car s'il commençait à 0 l'équation indiquerait un minimum en $y = 0$ (alors qu'on a affaire à un maximum). Il n'existe pas d'équation exacte pour déterminer la position des maximums de diffraction, mais ils se trouvent approximativement entre les minimums.

6.3.6 Combinaison d'interférence et diffraction

On a parlé de l'interférence entre plusieurs fentes étroites et également de la diffraction produite par une fente simple. En pratique, les fentes utilisées ont toujours une largeur non nulle alors on observe à la fois des effets d'interférence et de diffraction. L'ajout de la diffraction a simplement pour effet de diminuer l'intensité lumineuse aux endroits prédits par l'équation 6.10, les prédictions quant à l'interférence restant inchangée.

Par exemple, si on a 2 fentes de largeur a et séparées d'une distance d , on verra des minimums et des maximum lumineux aux endroits prédits pour des fentes étroites, mais certains endroits seront atténués à cause de la diffraction. Le principe est le même pour plusieurs fentes et les réseaux.

À partir du patron d'intensité lumineuse, on peut en général connaître le nombre de fentes et leur largeur par rapport à la longueur d'onde :

1. Tenter d'identifier l'enveloppe de diffraction et la tracer.
2. Identifier les maximums principaux et minimaux.
3. Compter les minimums secondaires entre les maximums principaux.

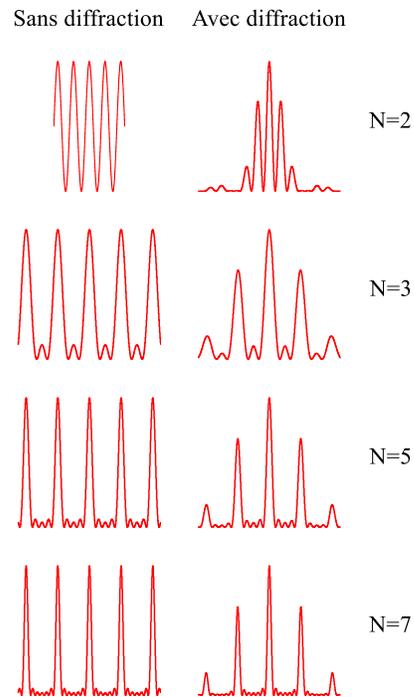
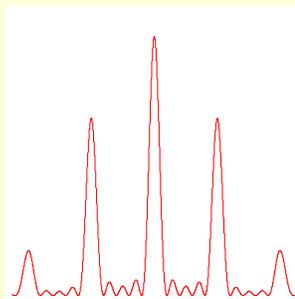


FIGURE 6.14 – Effet de la diffraction sur l'intensité lumineuse.

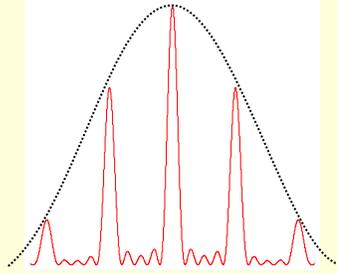
Selon la forme de l'enveloppe de diffraction, on peut déduire la largeur relative de la fente. Le nombre de minimums secondaires renseigne sur le nombre de fentes.

Exemple 6.5. *Identifier qualitativement les caractéristiques du dispositif ayant servi à produire le patron suivant :*



Solution

On commence par tenter de tracer l'enveloppe de diffraction :



Comme on observe l'effet de la diffraction, on en déduit que la fente a une ouverture comparable à la longueur d'onde ($a \approx \lambda$). Partant de là, on remarque les maximums principaux qui sont proéminents par rapport aux autres maximums. On compte 3 maximums secondaires entre les maximums principaux, donc le dispositif avait $3 + 2 = 5$ fentes relativement larges.

6.3.7 Diffraction des rayons X

On a vu qu'en présence de beaucoup de sources lumineuses cohérentes, la lumière qu'elles émettent se concentre en certains points bien précis. On peut obtenir cet effet avec un réseau, mais ce n'est pas la seule façon d'y arriver. Les solides cristallins ont la propriété d'avoir leurs atomes alignés dans des plans très réguliers.

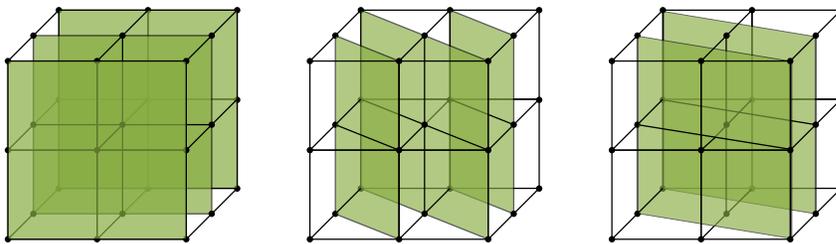


FIGURE 6.15 – Une structure cristalline cubique simple. L'alignement des atomes permet de définir plusieurs plans différents, dont trois sont illustrés ici.

Si on envoie de la lumière d'une longueur d'onde semblable à la distance entre ces plans cristallins, ces derniers peuvent réfléchir cette lumière et agir comme une multitude de sources qui vont interférer entre elles. Selon la structure du cristal, différents plans existent et chaque série de plans produit de l'interférence si elle est correctement orientée. En pratique, l'échantillon est constitué d'une multitude de grains orientés de façon aléatoire. Par conséquent, lorsqu'on le bombarde de rayons X, il y a toujours au moins un grain qui est orienté correctement et qui permet de déterminer la distance entre deux plans atomiques.

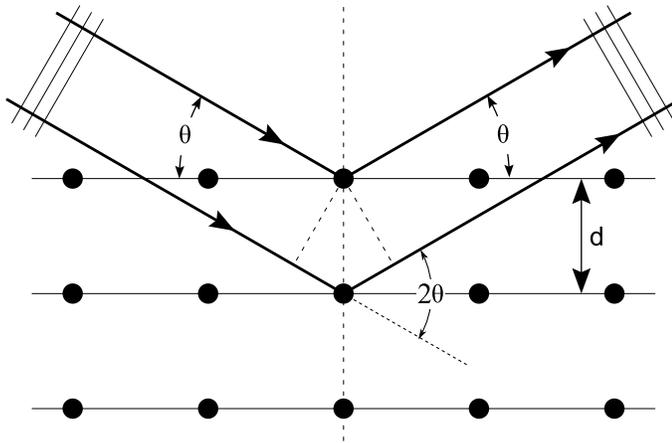


FIGURE 6.16 – Angles et distances utilisés dans la loi de Bragg. On remarque que l'angle est mesuré par rapport à la surface.

Les calculs démontrent qu'il se produit de l'interférence constructive pour certains angles bien précis :

LOI DE BRAGG

Les maximums d'interférence pour un cristal éclairé par des rayons X se forment lorsque

$$2d \sin \theta = m \lambda \quad (6.11)$$

où d est la distance entre les plans atomiques.

Exemple 6.6. *Un échantillon cristallin d'une matière pure inconnue vous est remis. Vous savez cependant qu'il possède une structure cubique simple. À quels angles d'incidence observera-t-on des maximums d'interférence si le paramètre de maille du réseau cristallin (la distance entre les atomes aux coins du cube) est de 15 \AA ? On bombarde l'échantillon avec des rayons X de $\lambda = 1 \text{ \AA}$*

Solution

On précise d'abord que $1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-10} \text{ nm}$. On utilise ensuite la loi de Bragg pour trouver les différents angles :

$$2d \sin \theta = m \lambda$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m \lambda}{2d} \right)$$

Quelles distances doit-on utiliser ? Il faut d'abord étudier la structure cristalline pour le savoir. On se réfère à la figure 6.15 pour la géométrie du problème. On voit qu'il y a une série de plan pa-

rallèles sur l'image de gauche. Ces plans sont espacés d'une distance égale au paramètre de maille, par définition. On définit donc $d_1 = 15 \text{ \AA}$. Pour une deuxième série de plans, on peut utiliser l'image du centre. On remarque que ces plans sont orientés à 45° par rapport aux précédents. À l'aide de trigonométrie, on trouve la seconde distance : $d_2 = d_1 \sin 45 = 10,6 \text{ \AA}$. On pourrait continuer ainsi et trouver par géométrie $d_3 = 6,7 \text{ \AA}$ (image de droite). D'autres plans sont possibles, mais arrêtons-nous ici pour simplement illustrer le principe.

Pour chaque série de plans, on aura un maximum pour chaque ordre m . Plus les ordres sont élevés, moins l'intensité est grande donc on se limitera ici aux ordres 1 à 4.

Ordre m	θ pour d_1	θ pour d_2	θ pour d_3
1	1,91°	2,7°	4,28°
2	3,82°	5,41°	8,58°
3	5,73°	8,14°	12,94°
4	7,67°	10,88°	17,37°

Si on était confronté à ces données pour déterminer le paramètre de maille, il ne serait pas simple de faire la part des choses. Les angles se superposent et il faut donc se fier aussi à l'intensité reçue par le détecteur, ce que ne nous donne pas la loi de Bragg. En pratique, on a en banque les spectres de beaucoup d'éléments différents et un logiciel tente de faire les recoupements permettant de déterminer la structure et la substance analysées.

6.4 Applications en métallurgie

Le département de métallurgie dispose de plusieurs instruments permettant l'analyse d'échantillons dans le but de déterminer leur composition. En voici quelques-uns qui utilisent les principes vus dans ce chapitre.

6.4.1 Spectromètre à excitation par étincelage

Le procédé de spectrométrie à excitation par étincelage permet de connaître la composition chimique d'un échantillon, c'est-à-dire qu'il permet de savoir de quels atomes est constitué l'échantillon. Il ne donne cependant aucune information sur la structure de l'échantillon.

Le procédé consiste à produire une étincelle sur l'échantillon à l'aide d'une électrode en tungstène. Cette étincelle chauffe l'échantillon à



FIGURE 6.17 – Spectromètre à excitation par étincelage utilisé au département de métallurgie.

une température élevée et cela a pour conséquence l'émission de lumière. Les longueurs d'onde produites dépendent de la composition de l'échantillon.

La lumière émise est dirigée vers un réseau ($p = 3600$ traits/mm). Le pas très petit du réseau donne une grande dispersion de la lumière et permet d'avoir un appareil compact. L'ordinateur relié au spectromètre, à l'aide de l'équation des réseaux, peut déduire les longueurs d'onde émises en fonction de l'endroit où elle est enregistrée.

Comme chaque élément émet des longueurs d'onde qui lui sont propres, le logiciel peut indiquer précisément la composition de l'échantillon. Il est ainsi possible de connaître de quelles substances est fait l'échantillon ainsi que dans quelles proportions.

Le tout se passe dans une atmosphère d'argon pur. Il est à noter qu'il s'agit d'un procédé destructif car l'échantillon doit être préparé par un surfaçage au zircon et est «brûlé» après l'analyse.

6.4.2 Diffractomètre à rayons X

Le diffractomètre à rayons X sert aussi à déterminer la composition chimique d'un échantillon, mais il donne en plus sa composition physique, c'est-à-dire qu'il permet de connaître la structure de l'échantillon. Pour utiliser ce procédé, l'échantillon doit évidemment posséder une structure cristalline car il faut qu'il existe des plans d'atomes bien définis.

L'échantillon est placé sur un plateau au centre de l'appareil. La source X, l'échantillon et le capteur sont initialement tous au même niveau. La source émet des rayons X en direction de l'échantillon et le capteur enregistre l'intensité des rayons X réfléchis par l'échantillon.



FIGURE 6.18 – Échantillon après l'analyse par étincelage.

Puis, un goniomètre permet à la source et au détecteur de monter lentement en continuant d'enregistrer l'intensité réfléchiée par la source.

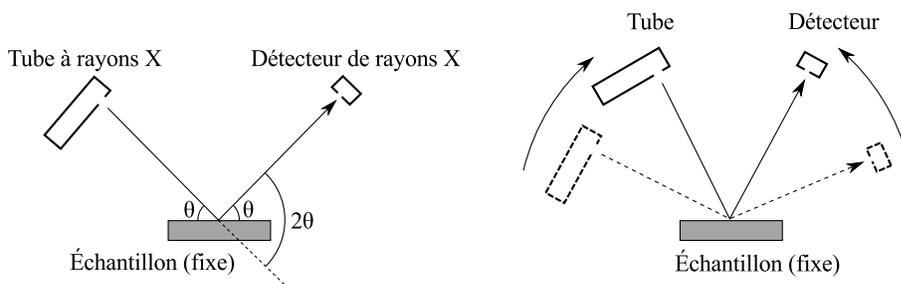


FIGURE 6.19 – Montage utilisé pour la diffractométrie.

Les distances entre les plans atomiques pour plusieurs atomes et structures cristallines étant connues d'avance, il est possible en regardant le spectre de diffraction de savoir exactement la composition de l'échantillon.

Exercices

Ex 6.1. Tracez une onde sinusoïdale progressive de longueur d'onde $\lambda = 4$ cm et d'amplitude $A = 2$ cm. Tracez l'onde 1 s plus tard si elle se déplace à 0,02 m/s vers la droite.

Ex 6.2. Un rayon X de fréquence 6×10^{18} Hz est émis par un diffractomètre.

- Quelle est la vitesse de l'onde ?
- Quelle est la période de l'onde ?
- Quelle est sa longueur d'onde ?
- À l'ordre 1, pour quel angle y aura-t-il un maximum de diffraction pour des plans atomiques séparés de 1 \AA ?

Ex 6.3. Deux impulsions carrées voyagent sur une même corde élastique dans des directions opposées. Tracez la forme de la corde avant, pendant et après que les impulsions se rencontrent si ...

- les impulsions sont toutes les deux vers le haut.
- une des impulsions est vers le haut et l'autre vers le bas.

Ex 6.4. Comment se fait-il qu'on puisse éclairer un écran avec 2 sources lumineuses et voir des endroits où il n'y a pas de lumière ? Où est passée cette lumière ?

Ex 6.5. Deux haut-parleurs séparés par une distance de 3 m émettent chacun la même onde sonore. Un koala placé à 9 m droit devant le point entre les haut-parleurs entend très bien le son provenant des haut-parleurs. Il se déplace alors de côté de 0,4 m et n'entend presque plus le son des haut-parleurs.

- À quelle distance se trouve le koala de chaque haut-parleur une fois qu'il s'est déplacé ?
- Quelle est la différence de marche entre les deux ondes une fois que le koala s'est déplacé ?
- Quelle est la longueur d'onde des ondes sonores ?
- Si le son voyage à 340 m/s, quelle est la fréquence du son émis par les haut-parleurs ?

Ex 6.6. On éclaire un cheveu avec un laser rouge ($\lambda = 632,8$ nm). À 2 m du cheveu, on place un écran sur lequel on observe l'effet de la diffraction. On remarque que la tache centrale a une largeur totale de 6,6 cm.

- Mesurée à partir du centre de la tache, quelle est la position y du premier minimum de diffraction ?
- Quel est le diamètre du cheveu ?

Ex 6.7. Un réseau ayant 333 traits/mm est éclairé par de la lumière de $\lambda = 445 \text{ nm}$.

- Calculez les positions des maximums d'ordre 1 et d'ordre 2 sur un écran placé à 3 m du réseau.
- Si le faisceau de lumière a une largeur de 2 mm, quel est le pouvoir de résolution du réseau à l'ordre 1 ?
- Si on ajoute une deuxième longueur d'onde au faisceau, quelle différence devrait-elle avoir avec la première pour être observable à l'ordre 1 ?

Ex 6.8. Quel est l'effet, sur un patron d'interférence, ...

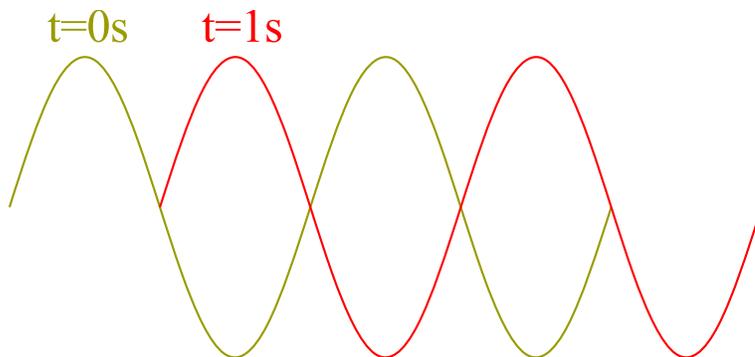
- d'ajouter des fentes ?
- de diminuer l'espacement entre les fentes ?
- d'augmenter la largeur de chacune des fentes ?

Ex 6.9. Tracez qualitativement les patrons d'interférence pour 2 fentes, 4 fentes et pour un réseau si ...

- chaque fente a une largeur beaucoup plus petite que la longueur d'onde
- chaque fente a une largeur beaucoup comparable à la longueur d'onde

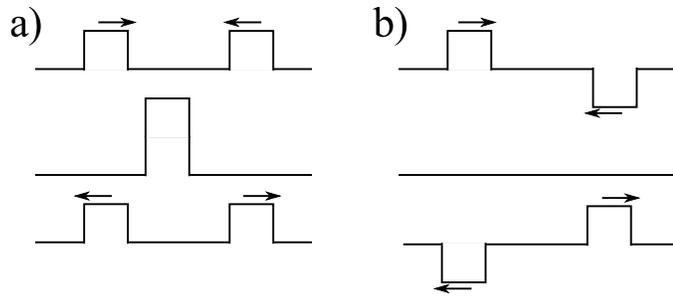
RÉPONSES

6.1



6.2 a) $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ (vitesse de la lumière), b) $166,7 \times 10^{-21} \text{ s}$, c) $0,5 \text{ \AA}$, d) $14,5^\circ$

6.3



6.4 C'est le principe de l'interférence qui explique ce phénomène (voir la figure 6.4 à la page 105). Cela est possible car la lumière a une nature ondulatoire. La lumière absente ne disparaît pas, elle est simplement distribuée autrement (les taches lumineuse sont plus plus brillantes qu'elles ne le seraient sans l'interférence)

6.5 a) 9,198 m et 9,067 m, b) 0,131 m, c) 0,262 m, d) environ 1298 Hz

6.6 a) 3,3 cm, b) 38 μm

6.7 a) 0,445 m et 0,889 m, b) 666, c) 0,668 nm

6.8 a) Il s'ajoute un maximum secondaire pour chaque fente supplémentaire, b) Les maximums principaux se forment plus loin les uns des autres, c) La lumière se concentre plus au centre

6.9 Voir notes.