

Exercice I : Pétrole à la surface de l'eau

Un pétrolier indélicat a laissé échapper dans l'océan, une grande quantité de kérosène (indice de réfraction n) qui forme une nappe très étendue de faible épaisseur $e = 0,12 \mu\text{m}$ à la surface de l'eau. La nappe de kérosène se comporte comme une lame mince qui engendre des interférences : lorsqu'elle est vue depuis un avion, on observe des irisations dont les couleurs changent suivant l'angle θ d'observation. L'indice de réfraction du kérosène est $n = 1,5$.

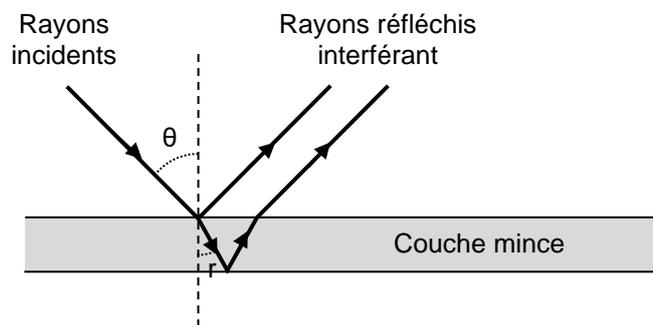
L'étude qui suit permet d'envisager une explication à ce phénomène.

Document 1 : Interférences par couche mince

Lorsqu'une couche mince aux parois semi-réfléchissantes est éclairée en lumière monochromatique parallèle, les rayons issus de la couche sont déphasés entre eux, puisque certains, en rebondissant à l'intérieur, ont pris du retard sur les autres en raison du trajet supplémentaire parcouru. Ce trajet supplémentaire définit la différence de marche.

La différence de marche entre les 2 rayons réfléchis est : $\delta = 2n \cdot e \cdot$

$$\cos(r) + \frac{\lambda}{2}$$



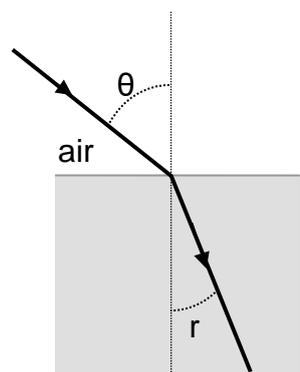
Document 2 : Interférences constructive ou destructive

Les rayons interfèrent de façon constructive lorsque la différence de marche est égale à un nombre entier de longueurs d'onde : $\delta = k \cdot \lambda$ (où k est un nombre entier)

Les rayons interfèrent de façon destructive lorsque la différence de marche est égale à un impair de demi-longueur d'onde : $\delta = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ (où k est un nombre entier)

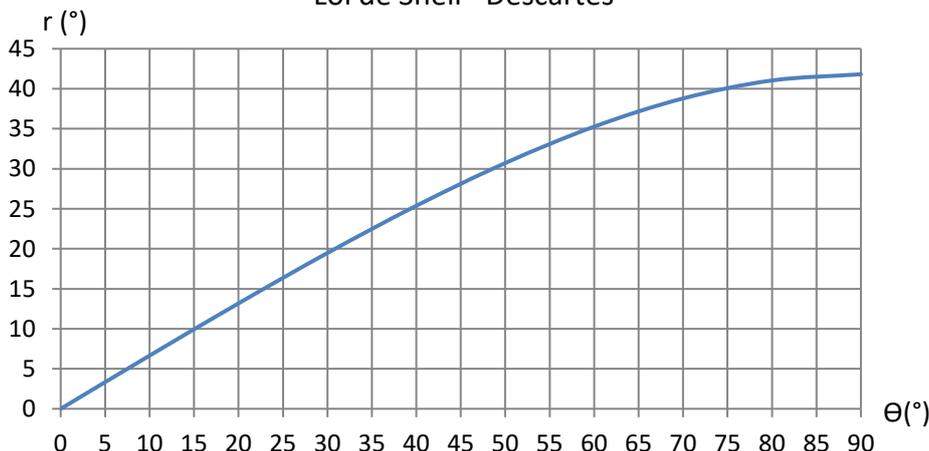
Document 2 : Loi de Snell-Descartes de la réfraction

La loi de Snell-Descartes de la réfraction exprime le changement de direction d'un faisceau lumineux lors de la traversée d'une paroi, séparant deux milieux différents. Le graphe ci-dessous donne l'angle de réfraction r en fonction de l'angle d'incidence θ pour le passage de l'air à un milieu d'indice $n = 1,5$.



θ est l'angle d'incidence
 r est l'angle de réfraction

Loi de Snell - Descartes

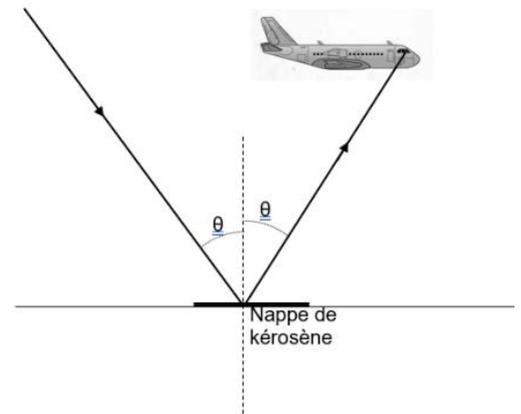


Document 4 : Spectre de la lumière blanche :

Couleur	Longueur d'onde (nm)
Rouge	625 – 740
Orange	590 – 625
Jaune	565 – 590
Vert	520 – 565
Cyan	500 – 520
Bleu	430 - 500
Violet	350 – 430

Questions :

1. La nappe de kérosène est éclairée par le Soleil qui émet de la lumière blanche. Elle est observée verticalement ; on a alors $\theta = r = 0^\circ$.
Calculer les longueurs d'onde des radiations réfléchies (non atténuées) appartenant au domaine du visible.
Quelle est la couleur de la lumière réfléchie ?
2. L'avion avance de telle sorte que le pilote voit la nappe de kérosène sous un angle θ .
Pour quelles valeurs de l'angle θ observe-t-on une couleur jaune ?



Exercice II : Le camouflage optique du papillon

L'iridescence est la propriété de certaines surfaces qui semblent changer de couleur selon l'angle de vue et d'éclairage. Elle est bien visible sur les ailes de mouches, de libellules et certains papillons. Ce phénomène provient d'une couche mince recouvrant ces ailes et produisant des couleurs interférentielles. Dans le cas des papillons, les ailes contiennent des écailles de fond et des écailles de recouvrement, disposées à la manière des tuiles d'un toit. La structure de ces écailles et les pigments qu'elles contiennent jouent un rôle dans la couleur observée. (...)

D'après un site internet (cnrs.fr)

Dans cette partie, le phénomène qui permet à ces papillons de se protéger des prédateurs est modélisé de façon simplifiée. Dans ce modèle élémentaire, schématisé sur la figure 4, on considère que :

- les écailles de l'aile de papillon sont assimilables à des couches minces à face parallèles d'épaisseur constante e ;
- les ondes issues des chemins ① et ② interfèrent au niveau de la rétine de l'observateur ;
- l'aile du papillon est éclairée par de la lumière.
-

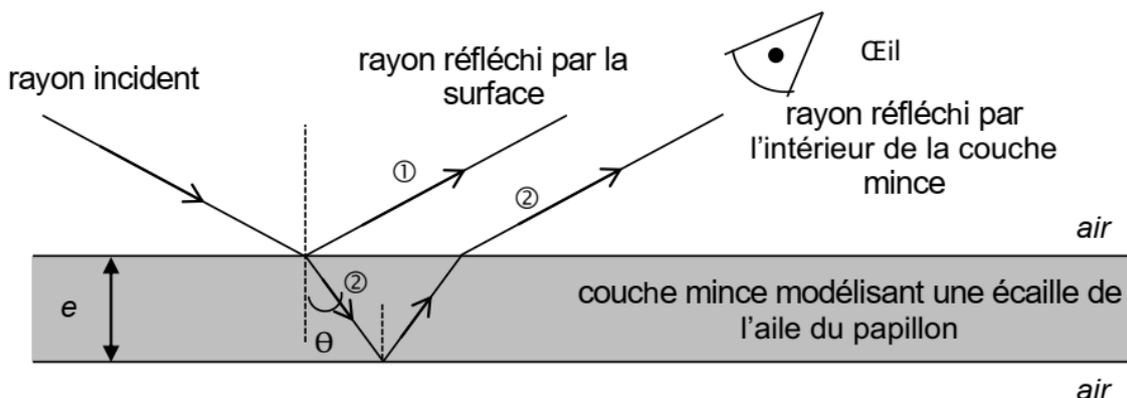


Figure 4. Schéma du trajet d'un rayon lumineux arrivant sur une écaille de l'aile de papillon.

Données :

- la vitesse de la lumière dans l'air est notée c et sa valeur est supposée connue.
- épaisseur des couches minces modélisant les écailles de l'aile du papillon : $e = 100 \text{ nm}$;
- indice optique des couches minces principalement composée de chitine : $n = 1,5$; on admet que cet indice ne dépend pas de la longueur d'onde.
- une onde lumineuse monochromatique est caractérisée par une période temporelle T et une longueur d'onde λ ;
- domaines de longueurs d'ondes de la lumière visible :

Couleur	Violet	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Domaine de longueurs d'ondes (nm)	380-446	446-520	520-565	565-590	590-625	625-780

On note τ le retard de l'onde lumineuse qui a suivi le trajet ② par rapport à l'onde qui a suivi le trajet ①.

1. Pour une onde lumineuse monochromatique de période temporelle T , justifier qu'il y a des interférences constructives pour $\tau = k \times T$ et interférences destructives pour $\tau = (k + \frac{1}{2}) \times T$ où k est un nombre entier.

2. Lorsque la lumière blanche arrive perpendiculairement à la surface de l'aile, le retard τ peut s'écrire :

$$\tau = \frac{2.n.e}{c} + \frac{T}{2}$$

2.1. Quelles ondes monochromatiques peuvent conduire à des interférences constructives ?

2.2. En déduire la couleur qui sera principalement perçue par l'observateur.

3. Lorsque la lumière blanche n'arrive pas perpendiculairement à la surface de l'aile, le retard a pour expression : $\tau = \frac{2.n.e.\cos(\theta)}{c} + \frac{T}{2}$

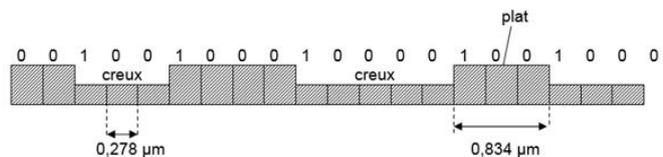
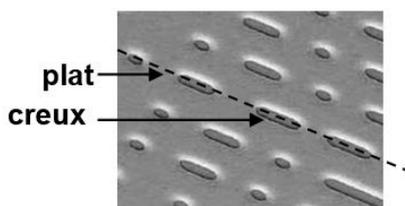
Expliquer pourquoi la couleur de l'aile du papillon perçue par l'observateur sera différente s'il la regarde sous un autre angle.

EXERCICE III : Lecture des informations sur le disque LASER :

La technique du disque LASER repose sur une méthode optique : un faisceau de lumière cohérente (LASER) vient frapper le disque en rotation. Des cavités de largeur $0,6 \mu\text{m}$, dont la longueur oscille entre $0,833 \mu\text{m}$ et $3,56 \mu\text{m}$, sont creusées à la surface réfléchissante du disque, produisant des variations binaires de l'intensité lumineuse du rayon réfléchi qui sont enregistrées par un capteur.

Lorsque le faisceau passe de la surface plane (plat) à une cavité (creux), il se produit des interférences et la valeur binaire 1 est attribuée. Au contraire, tant que le faisceau reste dans un creux ou sur un plat, le capteur détecte le même faisceau original et fait correspondre à cet état la valeur binaire 0.

L'information binaire peut être ensuite transformée en un signal analogique par un convertisseur.

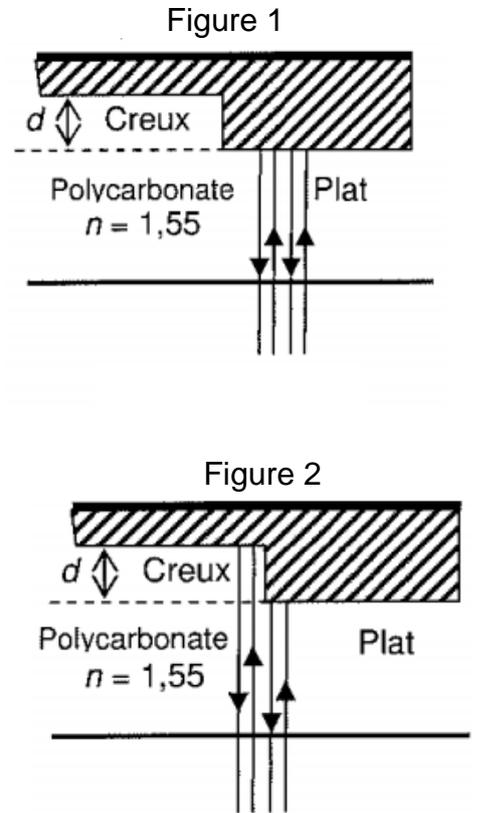
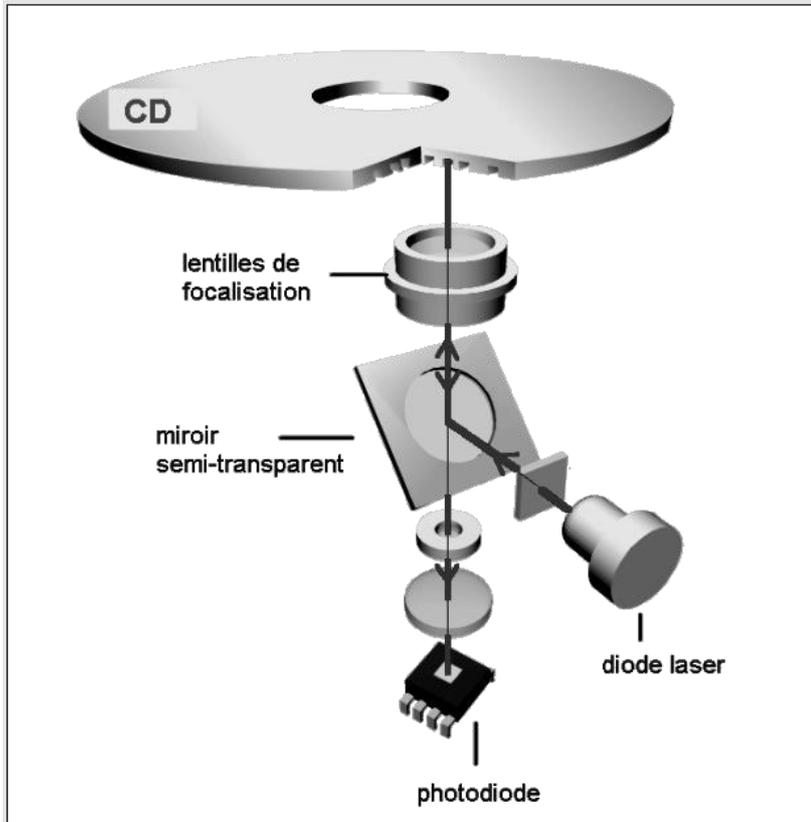


Le document 4 représente le système de lecture du disque.

Le faisceau lumineux, constitué d'une lumière monochromatique de longueur d'onde λ_0 dans le vide est émis par la diode LASER. Il traverse une couche protectrice transparente en polycarbonate dont l'indice est $n = 1,55$, puis il est réfléchi par le disque et détecté par la photodiode.

Lors de la détection d'un 0, le faisceau est entièrement réfléchi par un plat ou par un creux (figure 1 document 4). Tous les rayons composant le faisceau ont donc parcouru un même trajet. Lors de la détection d'un 1, le faisceau laser passe d'un plat à un creux ou inversement (figure 2 document 4). Une partie du faisceau est alors réfléchi par le plat et l'autre partie par le creux. Tous les rayons composant le faisceau n'ont donc pas parcouru le même trajet.

On note ΔL la différence de parcours des deux parties du faisceau qui se superposent et interfèrent lors de leur détection.



Document 4

Dans le polycarbonate, la longueur d'onde de la lumière monochromatique constituant le faisceau est $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$.

1. Donner la condition que doit vérifier ΔL pour que les interférences soient destructives.
2. Montrer que la profondeur minimale d du creux s'exprime en fonction de λ , la longueur d'onde de la lumière laser dans le polycarbonate, par la relation : $d = \frac{\lambda}{4}$.
3. Calculer d pour un CD lu par un faisceau LASER de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 780 \text{ nm}$.
4. Dans quel cas le capteur reçoit-il plus de lumière (Figure 1 ou Figure 2) ? Justifier la réponse.

Exercice I : Pétrole à la surface de l'eau

1.	<p>Les interférences sont constructives si la différence de marche est égale à un nombre impair de fois la longueur d'onde : $\delta = k \cdot \lambda$</p> <p>D'après le document 1 $\delta = 2n \cdot e \cdot \cos(r) + \frac{\lambda}{2}$</p> <p>D'où $2n \cdot e \cdot \cos(r) + \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda$</p> <p>Soit $2n \cdot e \cdot \cos(r) = \left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$</p> <p>Ou encore $\lambda = \frac{2n \cdot e \cdot \cos(r)}{\left(k - \frac{1}{2}\right)} = \frac{4n \cdot e \cdot \cos(r)}{2k - 1}$</p>
	<p>Pour le cas étudié (incidence normale), $\theta = 0$ et $r = 0$</p> <p>On en déduit donc que : $\lambda = \frac{4n \cdot e}{2k - 1}$ A.N. $\lambda = \frac{7,2 \times 10^{-7}}{2k - 1}$</p> <p>Pour $k = 1$ $\lambda_1 = \frac{7,2 \times 10^{-7}}{1} = 7,2 \times 10^{-7} m$ soit environ 720 nm</p> <p>Pour $k = 2$ $\lambda_2 = \frac{7,2 \times 10^{-7}}{3} = 2,4 \times 10^{-7} m$ soit environ 240 nm</p> <p>Seule la radiation de longueur d'onde λ_1 appartient au visible.</p>
	La lumière réfléchie est rouge.
2.	<p>La condition sur la longueur d'onde est : $\lambda = \frac{7,2 \times 10^{-7} \cdot \cos(r)}{2k - 1}$</p> <p>On en déduit donc que $\cos(r) = \frac{(2k - 1) \cdot \lambda}{7,2 \times 10^{-7}}$</p> <p>La couleur jaune est observable si $565 \text{ nm} < \lambda < 590 \text{ nm}$</p> <p>Soit avec $k = 1$: $0,78 < \cos(r) < 0,82$</p> <p>avec $k = 2$: $2,4 < \cos(r) < 2,5$ valeurs impossibles</p> <p>Conséquence $35^\circ < r < 39^\circ$</p> <p>Et en utilisant le graphe : $60^\circ < \theta < 74^\circ$</p>

Le camouflage optique du papillon

1. Si le retard (ou décalage temporel) entre les ondes est de la forme $\tau = k \times T$, les ondes réfléchies sont en phase et donnent donc des interférences constructives.

Si le retard (ou décalage temporel) entre les ondes est de la forme $\tau = \left(k + \frac{1}{2}\right) \times T$, les ondes réfléchies sont en opposition de phase et donnent donc des interférences destructives.

2.1. Il faut déterminer la longueur d'onde λ , on sait que pour une onde électromagnétique, $\lambda = c \cdot T$. Il faut déterminer l'expression de T .

Les ondes monochromatiques conduisant à des interférences constructives vérifient $\tau = k \cdot T$

d'après 1., et $\tau = \frac{2 \cdot n \cdot e}{c} + \frac{T}{2}$, il faut donc évaluer ces 2 expressions.

$$\frac{2 \cdot n \cdot e}{c} + \frac{T}{2} = k \cdot T \quad \frac{2 \cdot n \cdot e}{c} = \left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot T \quad T = \frac{2 \cdot n \cdot e}{\left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot c}$$

avec $\lambda = c \cdot T$ on obtient $\lambda = c \cdot \frac{2 \cdot n \cdot e}{\left(k - \frac{1}{2}\right) \cdot c} \quad \lambda = \frac{2 \cdot n \cdot e}{\left(k - \frac{1}{2}\right)}$

2.2. Déterminons les longueurs d'onde du visible qui respectent la condition précédente :

Pour $k = 0$, $\lambda < 0$, c'est impossible.

Pour $k = 1$, $\Leftrightarrow \lambda = \frac{2 \times 1,5 \times 100 \times 10^{-9}}{\left(1 - \frac{1}{2}\right)} = 6,0 \times 10^{-7} m = 6,0 \times 10^2 \text{ nm}$ couleur orange

Pour $k = 2$, $\Leftrightarrow \lambda = \frac{2 \times 1,5 \times 100 \times 10^{-9}}{\left(2 - \frac{1}{2}\right)} = 2,0 \times 10^{-7} m = 2,0 \times 10^2 \text{ nm}$ (UV)

Inutile de calculer λ pour des valeurs de $k > 2$ car ce n'est plus dans le visible.

Conclusion, c'est la couleur orange qui sera principalement perçue par l'observateur.

3. D'après la relation donnée $\left(\tau = \frac{2.n.e.\cos(\theta)}{c} + \frac{T}{2}\right)$, si l'angle ϑ varie alors le retard τ varie. Ainsi, la longueur d'onde correspondant aux interférences constructives sera modifiée, donc la couleur perçue également.

EXERCICE III : Lecture d'informations

1. Pour que les interférences soient destructives, il faut que la différence de marche soit $\Delta L = (2n+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ avec n entier relatif.
2. $\Delta L = 2d$ et $|\Delta L|$ est minimale si $n = 0$
 $2d = \frac{\lambda}{2}$ donc $d = \frac{\lambda}{4}$
3. $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$
 $d = \frac{\lambda_0}{4.n}$
 $d = \frac{780}{4 \times 1,55} = \mathbf{126 \text{ nm}}$
4. Le capteur reçoit le plus de lumière lorsque les interférences sont constructives. C'est-à-dire lorsque tous les rayons lumineux du faisceau LASER parcourent la même distance. Cette situation est représentée sur la figure 1.