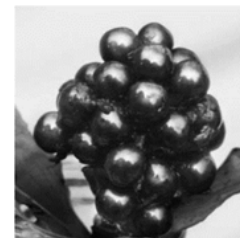


## PROBLÈME 1      Couche antireflet

Les couleurs présentes dans le monde animal, végétal ou minéral sont le plus souvent d'origine pigmentaire, comme la couleur de la plupart des plantes. Certaines couleurs résultent toutefois de propriétés structurales de la matière comme la couleur de certaines nacrés ou celle des ailes de certains papillons et sont régies par un ou plusieurs phénomènes physiques.



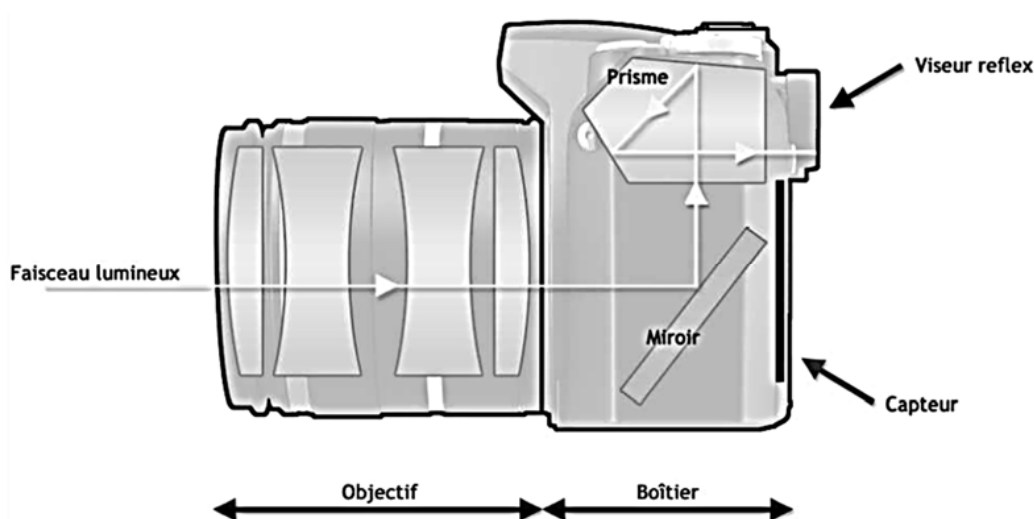
Ces phénomènes sont aussi utilisés dans l'industrie pour fabriquer des dépôts aux propriétés particulières comme les traitements antireflets des pare-brises de voitures, des lunettes ou plus généralement des instruments optiques.

### Partie I - Intérêt d'une couche antireflet

On souhaite savoir s'il est nécessaire d'utiliser des verres traités antireflets dans l'appareil photographique de la **figure 1a** dont une schématisation très simplifiée est proposée **figure 1b**.



**Figure 1a** - Canon EOS R5 ([www.canon.fr](http://www.canon.fr))



**Figure 1b** - Schématisation simplifiée

Pour ce faire, on modélise simplement une face d'une lentille par un dioptre plan séparant le milieu ① d'indice  $n_1$  du milieu ③ d'indice  $n_3$ . Une onde lumineuse incidente, d'intensité  $I$ , arrivant sous incidence normale à l'interface entre les deux milieux est partiellement réfléchi et partiellement transmise (figure 2).

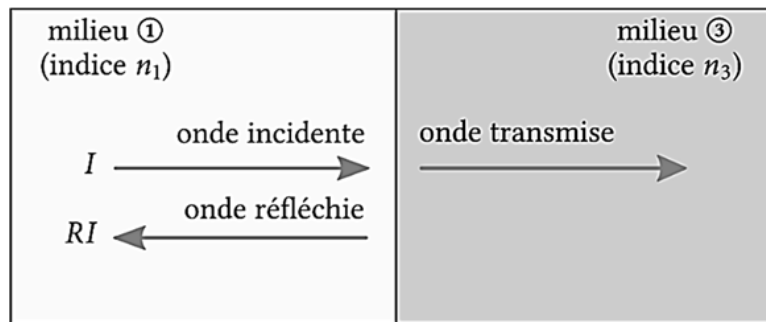


Figure 2 - Modélisation d'une face de lentille

On note respectivement  $r_{13}$  et  $t_{13}$  les coefficients de réflexion et de transmission en amplitude de l'onde lumineuse. Le coefficient de réflexion énergétique, s'appliquant à l'intensité lumineuse, est noté  $R$ . Sous incidence normale, on admet que ces coefficients valent :

$$r_{13} = \frac{n_1 - n_3}{n_1 + n_3} ; \quad t_{13} = \frac{2n_1}{n_1 + n_3} ; \quad R = \left( \frac{n_1 - n_3}{n_1 + n_3} \right)^2 .$$

- Q1.** Dans le cas d'une réflexion air/verre, donner, d'après vos connaissances, un ordre de grandeur de la valeur des indices  $n_1$  et  $n_3$ , puis calculer le coefficient  $r_{13}$ . En déduire quel pourcentage de l'intensité lumineuse incidente est réfléchi. Que devient ce pourcentage dans le cas de la réflexion verre/air ?
- Q2.** On suppose que les faces des lentilles de l'appareil photographique de la **figure 1b** sont assimilables à des dioptres plans dont le coefficient de réflexion énergétique vaut  $R = 0,05$ . Sachant que le miroir bascule horizontalement lorsque l'on prend une photographie, déterminer le pourcentage du flux lumineux incident qui atteint effectivement le capteur. On pourra utiliser le coefficient de transmission énergétique  $T = 1 - R$  et on mettra le résultat sous la forme  $T^n$ , avec  $n$  un entier dont on précisera la valeur. Conclure quant à l'intérêt général du traitement antireflet.

## Partie II - Paramètres d'une couche antireflet

Afin d'augmenter la transmission en réduisant la réflexion, on dépose sur le verre une couche d'un matériau transparent (le milieu ②), d'indice  $n_2$  et d'épaisseur  $e_2$  bien choisis. Le but est d'obtenir des interférences destructives entre les multiples ondes réfléchies, produites grâce à la couche supplémentaire.

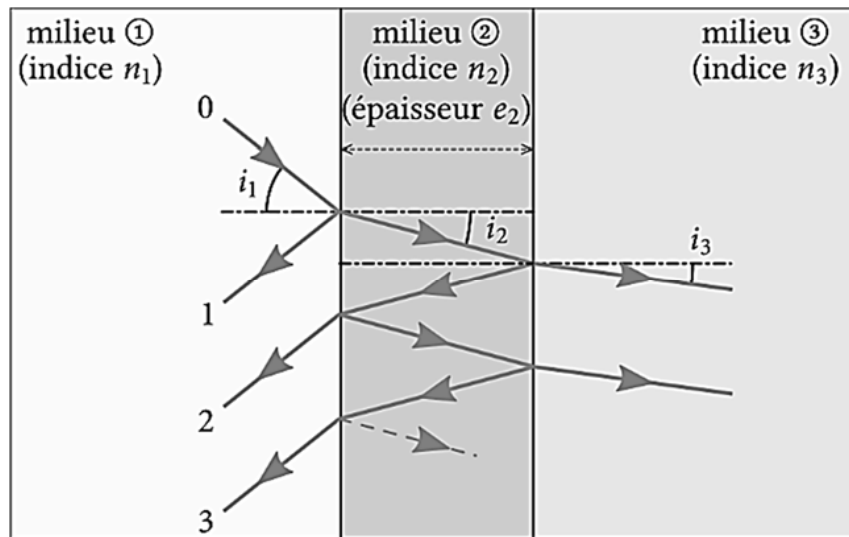


Figure 3 - Principe d'une couche antireflet

Le trajet du rayon lumineux numéro 0 est représenté sur la **figure 3** où l'on note  $i_1$ ,  $i_2$  ou  $i_3$  les angles avec la normale au dioptre en fonction du milieu traversé. Ce rayon engendre une infinité de rayons réfléchis dont seuls les 3 premiers ont été représentés, sous incidence non nulle pour être identifiables. Toutefois, l'étude est menée sous incidence normale, si bien que les angles  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$  sont nuls.

On suppose que les indices satisfont la relation  $n_1 < n_2 < n_3$  et on note  $\lambda_0$  la longueur d'onde dans le vide de l'onde incidente d'intensité  $I_0$ . On note  $I_1$ ,  $I_2$ , ... les intensités des ondes lumineuses réfléchies successives.

### II.1 - Épaisseur de la couche antireflet

**Q3.** Montrer que la différence de marche entre deux rayons lumineux réfléchis consécutifs, par exemple les rayons numéros 1 et 2, vaut  $\delta = \delta_{2/1} = 2n_2e_2$ .

**Q4.** Exprimer la différence de phase  $\Delta\varphi$  associée à la différence de marche  $\delta$  précédente. En déduire que pour obtenir des interférences destructives, l'épaisseur  $e_2$  de la couche antireflet doit satisfaire l'équation :

$$e_2 = (2p + 1) \frac{\lambda_0}{4n_2}, \quad p \in \mathbb{N}.$$

### II.2 - Indice de la couche antireflet

On note ensuite  $r_{12}$  et  $r_{23}$  les coefficients de réflexion en amplitude de l'onde lumineuse exprimés au niveau des interfaces entre les milieux ① et ② et entre les milieux ② et ③.

**Q5.** Exprimer  $r_{12}$  et  $r_{23}$  en fonction des différents indices. Donner la signification du coefficient  $r_{21}$  et son expression par rapport à  $r_{12}$ .

En tenant compte de l'ensemble des ondes lumineuses réfléchies on obtient, dans le cas d'interférences destructives, l'expression admise de l'intensité lumineuse réfléchie suivante :

$$I = I_0 \frac{(r_{12} - r_{23})^2}{1 - 2r_{12}r_{23} + r_{12}^2 r_{23}^2}.$$

**Q6.** Lorsque  $n_2 = n_3$ , quel résultat de la partie I retrouve-t-on ?

**Q7.** Dédurre de l'expression de l'intensité qu'il y a interférences destructives lorsque l'indice  $n_2$  de la couche antireflet satisfait l'équation :

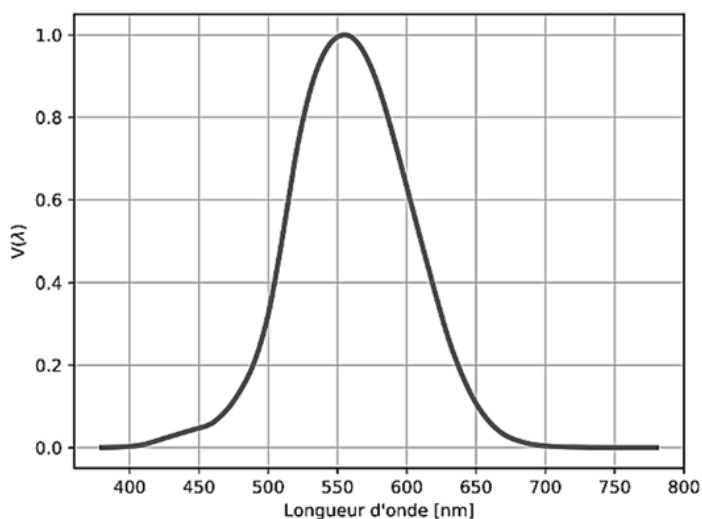
$$n_2 = \sqrt{n_1 n_3}.$$

### Partie III - Exploitation

On souhaite fabriquer une couche antireflet pour des lentilles pouvant être utilisées dans des verres de lunettes ou des objectifs photographiques.

#### Document 1 - Efficacité lumineuse spectrale relative de l'œil humain

La sensibilité de l'œil humain dépend de la longueur d'onde. Des études statistiques menées par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) ont permis de déterminer l'efficacité lumineuse spectrale relative notée  $V(\lambda)$  de l'œil humain moyen, tracée sur la **figure 4**. L'œil est d'autant plus sensible que la valeur de  $V(\lambda)$  est élevée.



**Figure 4** - Efficacité lumineuse spectrale relative (source CIE)

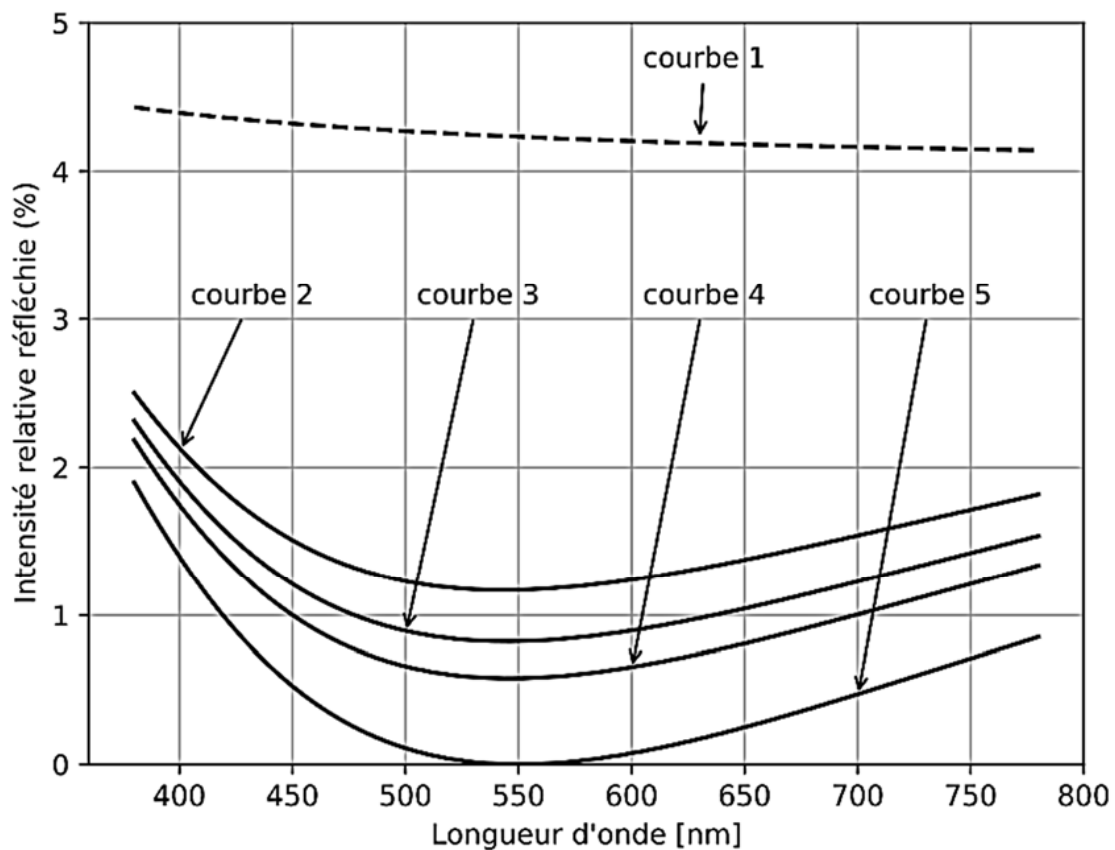
**Q8.** À l'aide du **document 1**, expliquer pour quelle longueur d'onde les couches antireflets sont réalisées et donner sa valeur.

On suppose que le milieu ① est l'air et que le milieu ③ est du verre de type BK7 dont les caractéristiques techniques se trouvent dans le **document 2**.

<b>Document 2 - Caractéristiques techniques du verre BK7</b>								
<b>Indices de réfraction</b>			<b>Transmittance interne <math>\tau_i</math></b>			<b>Autres propriétés</b>		
	$\lambda$ [nm]		$\lambda$ [nm]	$\tau_i$ (10mm)	$\tau_i$ (25mm)	$\alpha_{-30/+70^\circ\text{C}}$ [ $10^{-6}/\text{K}$ ]	7.1	
$n_r$	706.5	1.51289	700	0.998	0.996	$\alpha_{+20/+300^\circ\text{C}}$ [ $10^{-6}/\text{K}$ ]	8.3	
$n_c$	656.3	1.51432	660	0.998	0.994	$T_g$ [ $^\circ\text{C}$ ]	557	
$n_{c'}$	643.8	1.51472	620	0.998	0.994	$T_{10}^{13.0}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	557	
$n_{632.8}$	632.8	1.51509	580	0.998	0.995	$T_{10}^{7.6}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	719	
$n_D$	589.3	1.51673	546	0.998	0.996	$c_p$ [J/(g·K)]	0.858	
$n_d$	587.6	1.51680	500	0.998	0.994	$\lambda$ [W/(m·K)]	1.114	
$n_e$	546.1	1.51872	460	0.997	0.993			
$n_F$	486.1	1.52238	436	0.997	0.992	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2.51	
$n_{F'}$	480.0	1.52283	420	0.997	0.993	$E$ [ $10^3$ N/mm <sup>2</sup> ]	82	
$n_g$	435.8	1.52668	405	0.997	0.993	$\mu$	0.206	
$n_h$	404.7	1.53024	400	0.997	0.992	$K$ [ $10^{-6}$ mm <sup>2</sup> /N]	2.77	
<b>Coefficients de température de l'indice de réfraction</b>							$\text{HK}_{0.1/20}$	610
	$\Delta n_{\text{rel}}/\Delta T$ [ $10^{-6}/\text{K}$ ]			$\Delta n_{\text{abs}}/\Delta T$ [ $10^{-6}/\text{K}$ ]			HG	3
[ $^\circ\text{C}$ ]	1060.0	e	g	1060.0	e	g		
-40/ -20	2.4	2.9	3.3	0.3	0.8	1.2	CR	1
+20/ +40	2.4	3.0	3.5	1.1	1.6	2.1	FR	0
+60/ +80	2.5	3.1	3.7	1.5	2.1	2.7	SR	1
							AR	2.3
							PR	2.3

**Q9.** Compte tenu du résultat de la question précédente, déterminer l'indice de référence  $n_3$  à partir du **document 2**. Calculer alors, avec 3 chiffres significatifs, l'indice  $n_2$  et l'épaisseur minimale  $e_{2,m}$  du dépôt à réaliser sur un verre de type BK7 pour obtenir un traitement antireflet. Que penser des valeurs obtenues ?

Afin de vérifier l'efficacité du dépôt réalisé, on enregistre l'intensité réfléchie en fonction de la longueur d'onde avant et après le traitement, ce qui donne les cinq courbes de la **figure 5**.



**Figure 5** - Intensité relative réfléchie

L'une de ces courbes a été obtenue sans traitement, trois autres correspondent à des dépôts d'un matériau réel (matériaux appelés  $M_1$ ,  $M_2$  et  $M_3$ ) et la dernière provient d'une simulation informatique (matériau X). Les indices correspondants sont rassemblés dans le **tableau 1**.

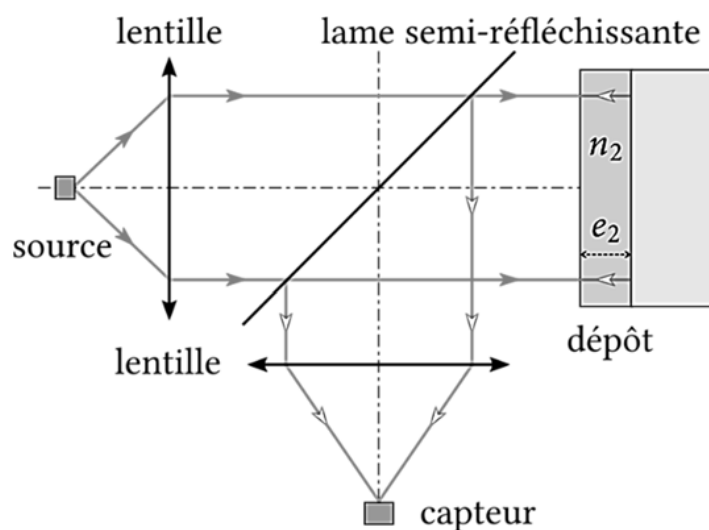
Matériau	X	$M_1$	$M_2$	$M_3$
Indice	1,23	1,33	1,35	1,38

**Tableau 1**

- Q10.** Expliquer simplement pourquoi l'intensité réfléchie dépend de la longueur d'onde.
- Q11.** En justifiant la démarche, associer chaque courbe à un matériau ou à l'absence de matériau.
- Q12.** Malgré le traitement, des reflets colorés persistent. Justifier leur existence et préciser la couleur de ces reflets.

## Partie IV - Contrôle de l'épaisseur du dépôt

Afin de contrôler l'épaisseur  $e_2$  du dépôt d'indice  $n_2$ , on place la lame traitée dans le dispositif de la **figure 6**. Dans ce montage, une source supposée ponctuelle et monochromatique (de longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ ), placée au foyer objet d'une lentille convergente, produit un faisceau de lumière traversant une lame semi-réfléchissante idéale. Le faisceau, réfléchi par le dépôt, est redirigé par la lame semi-réfléchissante vers un capteur placé au foyer image d'une lentille convergente (seuls les trajets des rayons lumineux utiles sont représentés sur la **figure 6**).



**Figure 6** - Dispositif de contrôle du dépôt

Rayon	0	1	2	3
Intensité en %	100	2,00	1,70	$6,10 \cdot 10^{-4}$

**Tableau 2** - Intensité des différents rayons lumineux réfléchis par le dépôt

**Q13.** Justifier, à l'aide des données du **tableau 2** relatives à la **figure 3**, qu'un modèle d'interférences à deux ondes suffit, en première approche, pour étudier l'intensité réfléchie.

L'intensité enregistrée sur le capteur suit la loi  $I(e_2) = 2I_0 \left[ 1 + \cos \frac{4\pi n_2 e_2}{\lambda_0} \right]$ .

**Q14.** Déterminer, en fonction de l'incertitude relative  $\frac{\Delta I}{I_0}$  et des données du problème, l'expression de l'incertitude  $\Delta e_2$  sur l'épaisseur  $e_2$  de la couche formée.

**Q15.** En déduire, pour le matériau  $M_1$ , l'incertitude  $\Delta e_2$  sur la mesure de l'épaisseur d'un dépôt de dimension voisine de 100 nm pour un capteur de sensibilité relative  $\frac{\Delta I}{I_0} = 2,00 \%$ .

Conclure quant à la pertinence de ce dispositif.

# Problème 2

## *Différents aspects de l'écoulement dans une lame de savon*

L'étude d'écoulements tourbillonnaires plans, dits aussi bi-dimensionnels, s'applique dans de nombreux domaines, dont les écoulements géophysiques. Parmi ceux-ci, une thématique particulièrement riche est celle des écoulements tourbillonnaires océaniques et atmosphériques de fluide (eau ou air) sur des distances horizontales grandes devant l'épaisseur de la couche de fluide concernée. L'image satellite de la figure 1 présente une allée tourbillonnaire dans le sillage des îles du Cap Vert (image NASA).

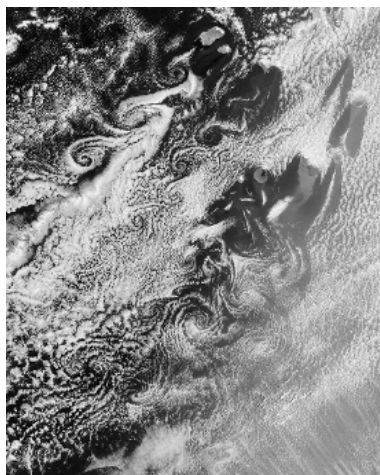


Figure 1

## **I Interféromètre de Michelson et épaisseur d'une lame de savon**

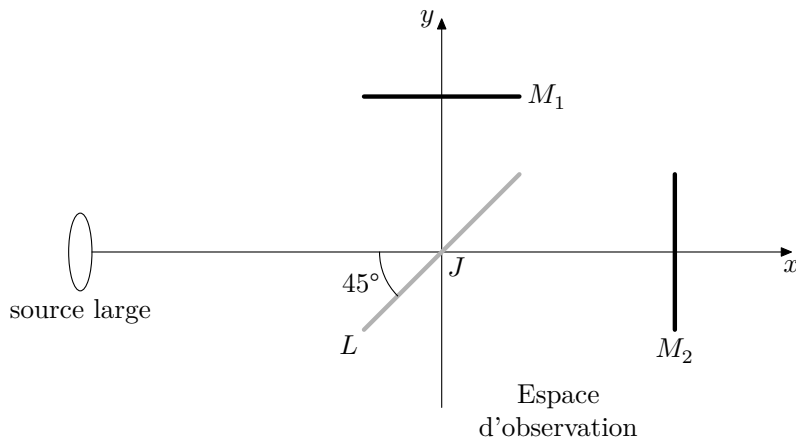
Le but de cette partie est de quantifier, par l'étude de la figure d'interférence à la surface d'une lame de savon, l'écart que présente celle-ci à un écoulement rigoureusement plan. On procédera par analogie avec la figure d'interférence obtenue à l'aide d'un interféromètre Michelson réglé en coin d'air.

**I.A** – On considère un interféromètre de Michelson dans lequel l'ensemble {lame séparatrice + compensatrice} est assimilé à une unique lame semi-réfléchissante d'épaisseur négligeable. On la note par la suite lame séparatrice ( $L$ ).

L'interféromètre, éclairé par une source étendue monochromatique de longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0$  est réglé comme schématisé sur la figure 2 : les deux bras sont dissymétriques du fait de la position relative des miroirs :  $M_1$  est parallèle à  $(J, x)$  et  $M_2$  est parallèle à  $(J, y)$  mais ils ne sont pas à égale distance de  $J$ . On considère que les deux ondes qui émergent de l'interféromètre vers l'espace d'observation ont le même éclairement  $I_0$ .

**Q 1.** Sur la figure A du document réponse, à rendre avec la copie, tracer avec soin les deux rayons issus du rayon incident qui émergent de l'interféromètre dans l'espace d'observation. Sur le même schéma, dans l'espace réservé à cet effet, montrer graphiquement que l'on peut considérer que ces deux rayons sont issus d'une « lame d'air » d'épaisseur  $e$  que l'on représentera. On supposera que l'indice de l'air est égal à 1.

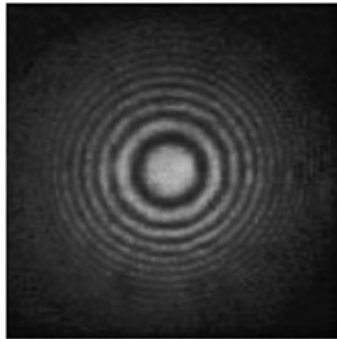
**Q 2.** Établir la différence de marche introduite par le système en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$  sur cette lame et de son épaisseur  $e$ .



**Figure 2** Schéma de l'interféromètre éclairé par une source large

**Q 3.** Où est localisée la figure d'interférence ? Comment l'observer dans de bonnes conditions si l'on dispose d'un jeu complet de lentilles convergentes de distances focales comprises entre 20 cm et 1 m ? Un schéma clair de la situation expérimentale correspondante est attendu.

**Q 4.** Montrer que la figure d'interférence est formée d'anneaux d'égale inclinaison (justifier ce terme). On observe sur l'écran la figure d'interférence présentée figure 3.



**Figure 3** Figure d'interférence : anneaux d'égale inclinaison

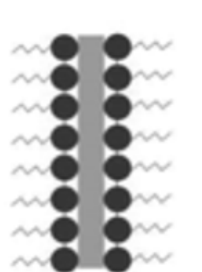
On souhaite maintenant régler l'appareil au contact optique.

**Q 5.** Décrire l'opération : faut-il tourner ou translater un miroir ? Comment savoir dans quel sens ? Décrire l'évolution de la figure d'interférence au cours de l'opération. Quel est l'aspect de l'éclairement sur l'écran une fois ce réglage réalisé ?

**Q 6.** Partant de cette situation on incline un des miroirs d'un petit angle  $\alpha$  pour former un coin d'air. On éclaire le système en incidence quasi-normale de telle sorte que l'on observe des franges d'interférences rectilignes parallèles entre elles. Où sont-elles localisées ? Préciser les conditions de leur observation.

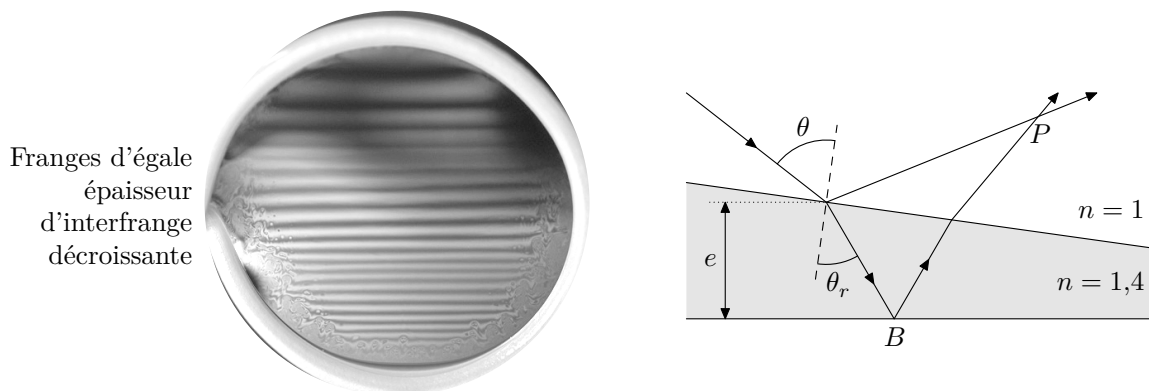
**Q 7.** On admet que la différence de marche introduite par le coin d'air en un point  $M$  de la surface de localisation situé à une distance  $x$  de l'arête commune des deux miroirs est  $\delta(M) \approx \pm 2n\alpha x$  avec  $n = 1$ . Déterminer l'interfrange  $i$  sur la surface de localisation, en fonction de  $\alpha$  et  $\lambda_0$ . Comment évolue la figure d'interférence si l'angle  $\alpha$  varie ?

**I.B** – Une lame de savon est constituée d'une mince couche d'eau entourée de part et d'autre par une couche de savon. Cette configuration est due aux tensio-actifs contenus dans le savon. Ces molécules sont constituées de deux parties distinctes : une tête hydrophile, généralement ionique, et une queue hydrophobe, généralement constituée d'une chaîne carbonée (figure 4).



**Figure 4**

Cette propriété amène ainsi les tensio-actifs à se concentrer et à se fixer les uns aux autres aux interfaces entre l'eau et l'air. En éclairage monochromatique, cette lame fait apparaître des franges d'interférence (figure 5), dont l'interfrange diminue vers le bas de la lame. Ces franges sont liées à un phénomène d'interférence se produisant sur une couche mince. On suppose ici que l'indice de cette fine couche est  $n \approx 1,4$ . L'épaisseur de cette couche est variable de haut en bas sans dépasser une épaisseur maximum d'environ  $1 \mu\text{m}$ . La masse volumique et la viscosité du liquide savonneux sont pris égaux à ceux de l'eau.



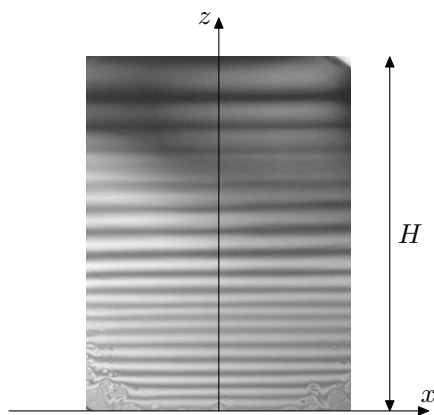
**Figure 5** Interférences sur le film (à gauche) et modélisation des rayons lumineux (à droite)

Le trajet d'un rayon lumineux arrivant sous incidence  $\theta$  sur une lame d'indice  $n$  et d'épaisseur locale  $e$ , doit tenir compte du phénomène de réfraction à l'intérieur de la lame. On note  $\theta_r$  l'angle de réfraction et  $\theta$  l'angle d'incidence. Une division d'amplitude se produit sur la face avant, suivie d'une réflexion sur la face arrière, produisant deux rayons réfléchis par la lame qui interfèrent au point  $P$ . On admet que la réflexion sur un milieu plus réfringent s'accompagne d'un déphasage de  $\pi$ .

**Q 8.** Justifier qu'en incidence quasi-normale, le déphasage entre les deux ondes qui interfèrent peut s'écrire

$$\Delta\phi = 2\frac{\pi}{\lambda_0} \left( 2ne + \frac{\lambda_0}{2} \right).$$

En l'absence de perturbation extérieures (telles que celles qui seront abordées par la suite) la lame n'est le siège que de son écoulement gravitaire (du haut vers le bas sous l'effet de la gravité). Dans le cadre d'un modèle simplifié, dit d'interface sans interaction, la pression  $P$  au sein du fluide en écoulement gravitaire entre l'interface de tensioactifs est supposée uniforme. Le phénomène de drainage des tensioactifs est alors négligé. L'axe ( $Oz$ ) sera pris vertical ascendant. La figure 6 présente la figure d'interférence observée sur un film de savon, ainsi que les notations introduites.



**Figure 6** Vue de face de la lame de savon

On note  $H = 5,0 \text{ cm}$  la hauteur de la lame de savon. On note  $e(z, t)$  l'épaisseur de la lame, dans la direction ( $Oy$ ), à l'altitude  $z$  et à l'instant  $t$ . Du fait de l'écoulement de drainage gravitaire, cette épaisseur varie au cours du temps à  $z$  fixé et à  $t$  fixé elle augmente vers le bas.

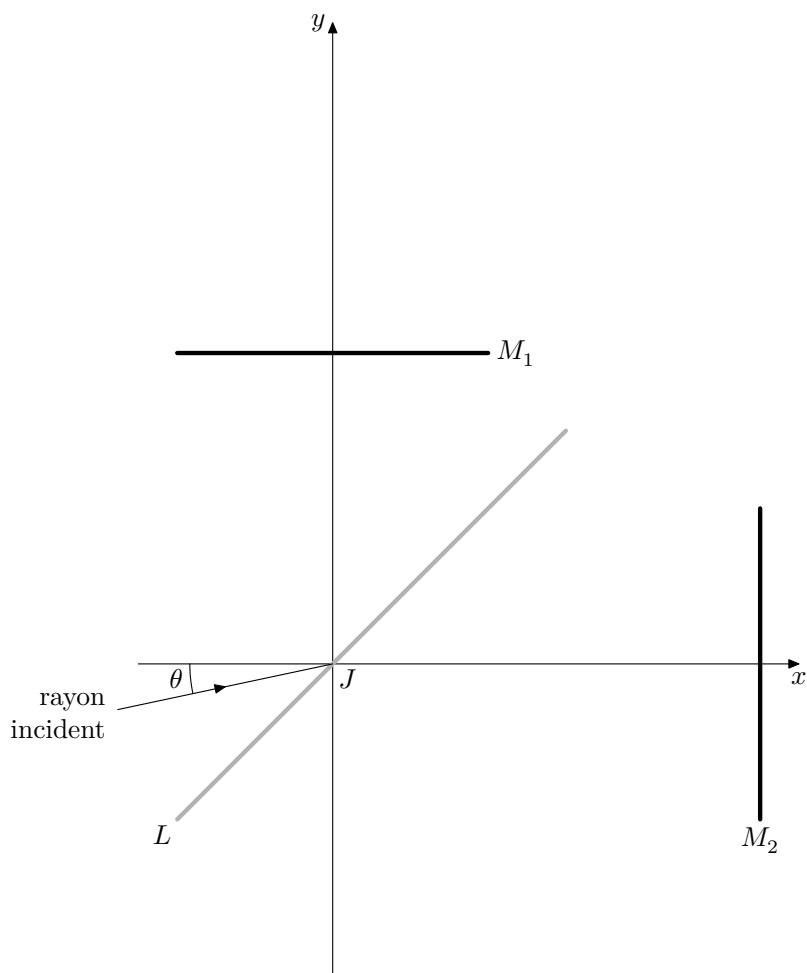
**Q 9.** Compte tenu de la topographie des franges observées sur la figure 6, discuter qualitativement l'écart du profil de la lame à une portion de coin d'angle constant, induit par son drainage gravitaire.

Afin d'interpréter ces différences, une modélisation de mécanique des fluides, non détaillée ici, aboutit à l'expression suivante pour l'épaisseur  $e$  de la lame en fonction de  $z$  et du temps :

$$e(z, t) = \sqrt{\frac{2\eta(H - z)}{\rho g t}}.$$

**Q 10.** Discuter qualitativement la validité de cette expression en regard de la figure 6.

Question 1



Lame d'air équivalente

Figure A

# Problème 3

## *NASA's Mars Exploration Program*

Un demi-siècle après avoir marché sur la Lune, l'exploration spatiale semble se fixer à moyen terme l'objectif de l'exploration de la planète Mars par l'homme. Une telle expédition suppose de résoudre un très grand nombre de problèmes concernant aussi bien les aspects techniques que les aspects humains.

Ce sujet propose d'étudier la cohérence de l'un des nombreux scénarios élaborés par la NASA pour un vol habité vers Mars.

### **I Le voyage entre la Terre et Mars**

Dans toute cette partie du problème, les orbites des planètes autour du Soleil sont assimilées à des cercles de rayon égal au demi-grand axe  $a$  des ellipses. On se place dans le référentiel héliocentrique supposé galiléen.

#### *I.A – Vitesse de la Terre et de Mars dans le référentiel héliocentrique*

**Q 1.** Donner les dimensions de la constante gravitationnelle  $G$  ainsi que son unité dans le système international.

**Q 2.** Montrer que le moment cinétique  $\vec{L}_O$  en  $O$ , centre du Soleil, d'un objet de masse  $m$  est une constante du mouvement.

**Q 3.** On utilise les coordonnées cylindriques  $(O, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$  avec  $\vec{e}_z$  tel que  $\vec{L}_O = L_O \vec{e}_z$ . Justifier que le mouvement est plan et exprimer  $C = r^2 \frac{d\theta}{dt}$  en fonction de  $L_O$  et  $m$ . Quel est le nom de cette grandeur ?

**Q 4.** Déterminer, dans le cas d'une orbite circulaire de rayon  $R$ , la vitesse  $V$  de l'objet en fonction de  $G$ ,  $M_S$ ,  $R$  et  $m$ . Calculer les valeurs numériques de  $V_T$ , la vitesse orbitale de la Terre et de  $V_M$ , celle de Mars, dans le référentiel héliocentrique.

#### *I.B – Aspect énergétique et troisième loi de Kepler*

**Q 5.** Dédire l'expression de l'énergie cinétique, puis de l'énergie mécanique de l'objet de masse  $m$  sur son orbite circulaire autour du Soleil en fonction de  $G$ ,  $M_S$ ,  $R$  et  $m$ .

**Q 6.** Exprimer la période de rotation  $T$  de l'objet en fonction  $G$ ,  $M_S$  et  $R$  (troisième loi de Kepler).

Il est rappelé que les expressions de l'énergie mécanique et de la troisième loi de Kepler obtenues pour un mouvement circulaire peuvent être généralisées au cas d'une orbite elliptique en remplaçant le rayon  $R$  par le demi-grand axe de la trajectoire.

#### *I.C – Voyage aller Terre – Mars, orbite de transfert*

D'un point de vue énergétique, la méthode la plus efficace pour envoyer un vaisseau d'une orbite circulaire à une autre orbite circulaire coplanaire est de le placer sur une trajectoire de transfert elliptique tangente aux deux orbites circulaires, donc ici aux orbites de Mars et de la Terre (ellipse de Hohmann). On admet que seule l'attraction solaire agit sur le vaisseau pendant son mouvement.

**Q 7.** Représenter, sur la figure A du document réponse, montrant les orbites de la Terre et de Mars, l'allure de l'orbite de transfert (trajectoire de Hohmann).

La position de la Terre au temps  $t = 0$  du départ du vaisseau est prise comme origine angulaire ( $\theta_T(t = 0) = 0$ ).

**Q 8.** Au départ de l'orbite de la Terre, exprimer en fonction de  $V_T$ ,  $a_M$  et  $a_T$  la vitesse  $V'_T$  que doit avoir le vaisseau sur sa trajectoire de transfert. En déduire la variation de vitesse  $\Delta V_T = V'_T - V_T$ . Calculer la valeur numérique de  $\Delta V_T$ .

En pratique, la variation de vitesse requise est plus importante en raison de la nécessité de se libérer de l'attraction de la planète à partir d'une orbite basse.

**Q 9.** Exprimer puis calculer la durée  $\Delta t$  du voyage jusqu'à l'orbite de Mars.

**Q 10.** Quel doit être l'angle  $\alpha_0 = \theta_M(t = 0) - \theta_T(t = 0)$  (Terre - Soleil - Mars) formé par les directions de Mars et de la Terre, vus du Soleil, au moment du lancement afin que Mars soit au rendez-vous à l'arrivée du vaisseau ? Calculer la valeur numérique de  $\alpha_0$  et indiquer la position de Mars au moment du lancement sur la figure A du document réponse.

**Q 11.** Dans l'hypothèse d'un problème survenu pendant le voyage aller nécessitant de ne pas explorer la planète, le vaisseau ne modifie pas sa vitesse lors du passage de l'orbite de Mars. Déterminer la position angulaire de la Terre au bout d'une révolution complète de celui-ci sur son orbite de transfert. Commenter.

***I.D – Durée de la mission***

Toujours pour minimiser le cout énergétique, le voyage retour emprunte le même type d'orbite de transfert qu'à l'aller.

**Q 12.** Déterminer l'angle  $\alpha_1$  (Terre - Soleil - Mars) au moment du départ de Mars.

**Q 13.** En déduire le nombre de jours que les astronautes vont pouvoir passer sur la planète rouge, la durée totale de la mission (en jours) et la période entre deux fenêtres de lancement depuis la Terre.

## Données

Masse du Soleil

$$M_S = 2,00 \times 10^{30} \text{ kg}$$

Demi-grand axe de l'orbite de la Terre

$$a_T = 150 \times 10^6 \text{ km}$$

Demi-grand axe de l'orbite de Mars

$$a_M = 228 \times 10^6 \text{ km}$$

Constante gravitationnelle

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ SI}$$

Champ de pesanteur terrestre

$$g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Période de révolution de la Terre

$$T_T = 365 \text{ jours}$$

Période de révolution de Mars

$$T_M = 687 \text{ jours}$$

Questions 7 et 10

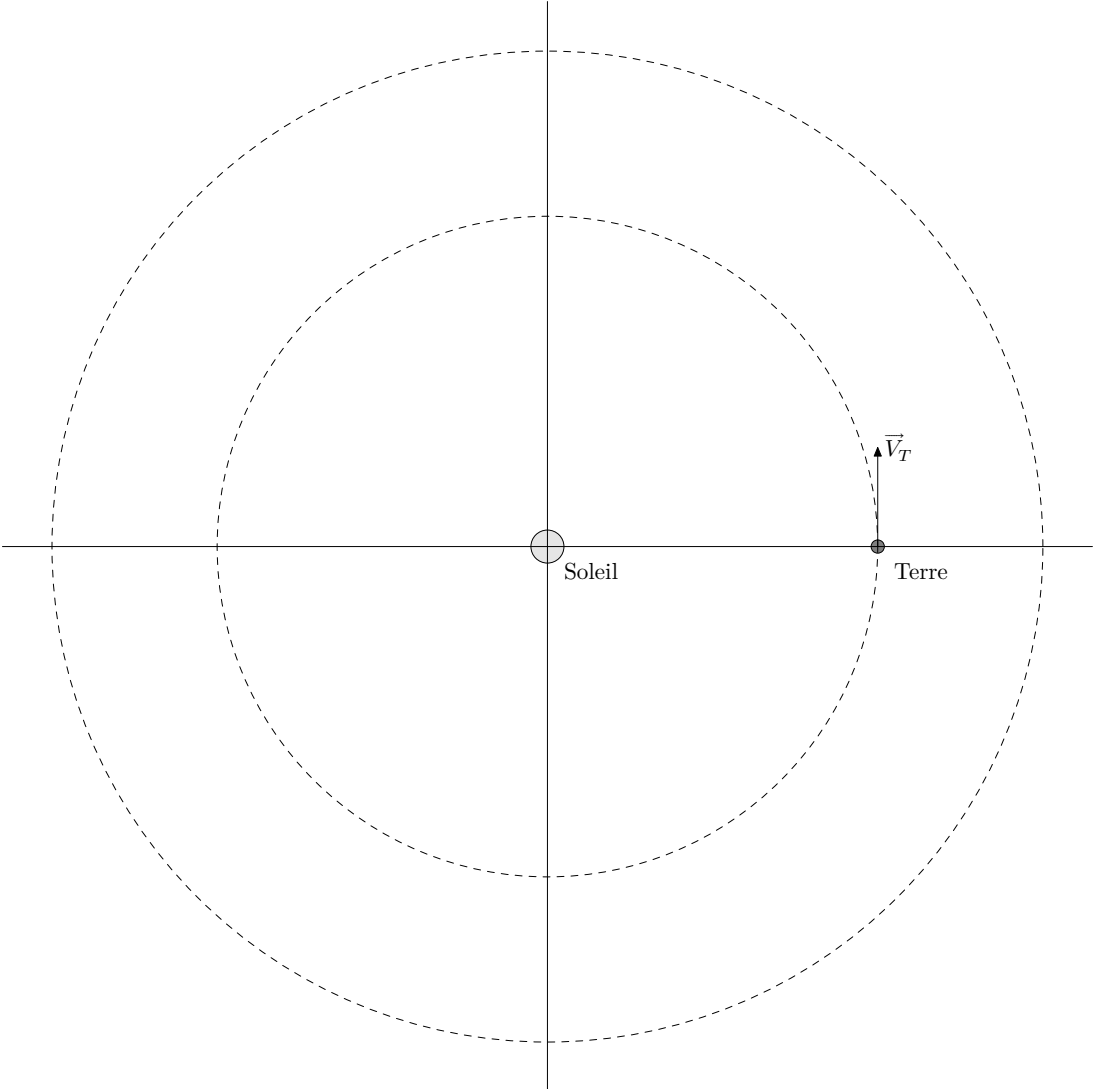


Figure A