Chapitre 3.8 – L'interférence dans les pellicules minces

Lumière à l'interface d'une pellicule

Lorsqu'une onde lumineuse arrive à l'interface d'un milieu différent, il se produit un phénomène de réflexion et de transmission. Puisque l'onde réfléchie et l'onde transmise proviennent de la même onde d'origine, on peut affirmer que l'onde réfléchie et l'onde transmise sont en phase.

Voici une représentation de la situation (schéma ci-contre).

Onde **1** : Onde réfléchie sur la paroi externe de la pellicule correspondant à la surface **AP.** L'onde **1** demeure toujours dans le milieu **A**.

Onde **2** : Onde transmise dans la pellicule de milieu **P**, réfléchie sur la paroi interne de la pellicule correspondant à la surface **PB** et retransmise vers le milieu **A**. L'onde **2** voyage dans le milieu **P** pour retourner vers le milieu A après un certain parcours supérieur à l'onde **1**.

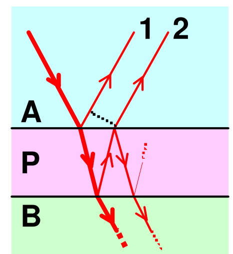


Illustration de l'interférence sur pellicule mince.

Pour simplifier nos calculs, nous proposons deux approximations :

1) Approximation du faisceau perpendiculaire

Nous étudierons seulement le phénomène d'interférence associé à une onde lumineuse arrivant perpendiculairement à la pellicule ce qui néglige le mouvement triangulaire de l'onde **2** dans la pellicule en raison de la réfraction.

2) Approximant de l'interférence à deux ondes

Nous étudierons l'interférence occasionnée par qu'une seule réflexion interne. Ainsi, les réflexions multiples à l'intérieur de la pellicule mince seront négligées dans notre analyse de la superposition ondulatoire.

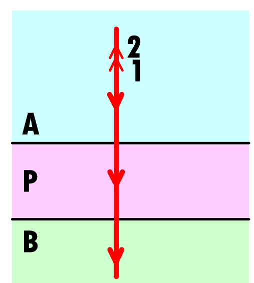
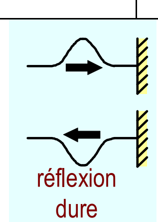


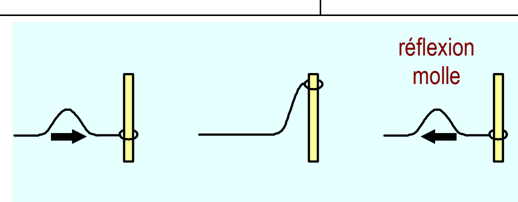
Illustration des approximations utilisées.

Réflexion d'une onde

Voici un rappel[1] des propriétés d'une onde qui subit une réflexion dure ou molle :

Type de réflexion	Critère au frontière	Inversion par rapport à l'axe de propagation	Déphasage par rapport à l'onde incidente
dure	$\mu_1 < \mu_2$	Oui	π
molle	$\mu_1 > \mu_2$	Non	0



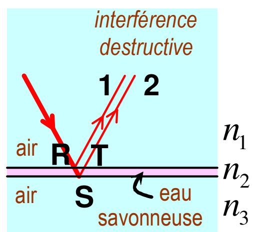


[1] La réflexion d'une onde fut étudiée au chapitre 1.11.

Interférence sur une pellicule d'épaisseur négligeable

Lorsqu'on effectue une interférence avec une pellicule d'épaisseur négligeable, il n'y a pas de déphasage associé à une différence de marche spatiale, car l'onde transmise effectue un déplacement supplémentaire négligeable dans la pellicule. Par contre, il y aura quand même un phénomène d'interférence selon les différentes combinaisons de réflexion effectuées par les deux ondes : ($n_{air} = 1$, $n_{eau} = 1{,}33$ et $n_{verre} = 1{,}5$)

situation i



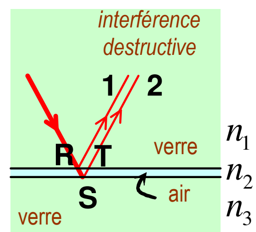
pellicule d'épaisseur négligeable

Réflexion 1 : $n_1 < n_2$
(réflexion dure)
$\delta = \lambda/2$ ou $\Delta\phi = \pi$

Réflexion 2 : $n_2 > n_3$
(réflexion molle)
$\delta = 0$ ou $\Delta\phi = 0$

Décalage relatif total :
$\delta = \lambda/2$ ou $\Delta\phi = \pi$
$\Rightarrow$ interférence destructive

situation ii



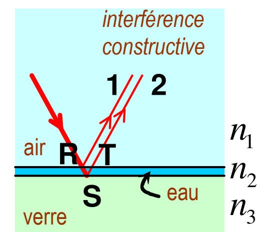
pellicule d'épaisseur négligeable

Réflexion 1 : $n_1 > n_2$
(réflexion molle)
$\delta = 0$ ou $\Delta\phi = 0$

Réflexion 2 : $n_2 < n_3$
(réflexion dure)
$\delta = \lambda/2$ ou $\Delta\phi = \pi$

Décalage relatif total :
$\delta = \lambda/2$ ou $\Delta\phi = \pi$
$\Rightarrow$ interférence destructive

situation iii



pellicule d'épaisseur négligeable

Réflexion 1 : $n_1 < n_2$
(réflexion dure)
$\delta = \lambda/2$ ou $\Delta\phi = \pi$

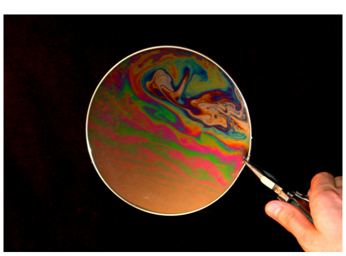
Réflexion 2 : $n_2 < n_3$
(réflexion dure)
$\delta = \lambda/2$ ou $\Delta\phi = \pi$

Décalage relatif total :
$\delta = \lambda$ ou $\Delta\phi = 2\pi$
$\Rightarrow$ interférence constructif

Lorsque l'**épaisseur** de la **pellicule** est **négligeable**, il n'y a pas de différence de marche spatiale et toutes les **longueurs d'onde** subiront le **même type d'interférence**. (ex : Une bulle de savon devient localement noire avec d'éclater, car toutes les longueurs d'onde sont en interférence destructive à cette épaisseur.)

Interférence sur une pellicule mince (petite épaisseur)

Lorsque **l'épaisseur** de la **pellicule n'est plus négligeable**, il faut considérer la **différence de marche spatiale** entre les deux ondes ce qui produit un phénomène **d'interférence particulier** pour chaque **longueur d'onde** :

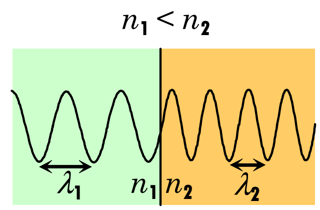


Pellicule d'eau savonneuse

Bulle de savon

Tâche d'huile ou d'essence

Indice de réfraction et longueur d'onde de la lumière

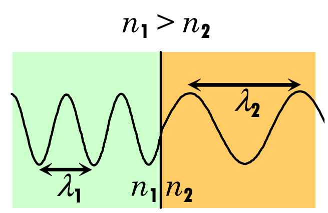


Onde voyageant vers un milieu lent.

Lorsque la lumière voyage dans le vide, l'indice de réfraction est $n = 1$ et la longueur d'onde λ est alors maximale. Lorsque la lumière voyage dans de la matière, l'indice de réfraction est supérieur à $n = 1$ et la longueur d'onde diminue, car elle voyage à plus petite vitesse tout en conservant sa fréquence *f*.

La relation entre les longueurs d'onde et les indice de réfraction est la suivante :

$$n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2$$



Onde voyageant vers un milieu rapide.

où λ_1 : Longueur d'onde de la lumière dans le milieu #1 (m)

λ_2 : Longueur d'onde de la lumière dans le milieu #2 (m)

n_1 : Indice de réfraction du milieu #1

n_2 : Indice de réfraction du milieu #2

<u>Preuve :</u>

La **fréquence** *f* de la **lumière** **<u>ne changera pas</u>** sous le **changement** de **milieu** (transmission). Évaluons la modification de la longueur d'onde lors d'une transmission d'un milieu n_1 vers un milieu n_2 à partir de $f_1 = f_2$:

$f_1 = f_2 \quad \Rightarrow \quad \dfrac{v_1}{\lambda_1} = \dfrac{v_2}{\lambda_2}$ (Remplacer $f = \dfrac{v}{\lambda}$, car $\lambda = vT = \dfrac{v}{f}$)

$\Rightarrow \quad \dfrac{c/n_1}{\lambda_1} = \dfrac{c/n_2}{\lambda_2}$ (Indice de réfraction, $n = \dfrac{c}{v}$ donc $v = \dfrac{c}{n}$)

$\Rightarrow \quad \dfrac{1/n_1}{\lambda_1} = \dfrac{1/n_2}{\lambda_2}$ (Simplifier *c*)

$\Rightarrow \quad n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2 \quad \blacksquare$ (Inverser les fractions)

Différence de marche dans une pellicule mince

L'interférence se produit lorsqu'il y a une différence de marche entre deux ondes. Dans le cas des pellicules minces, la différence de marche se comptabilisera de deux façons.

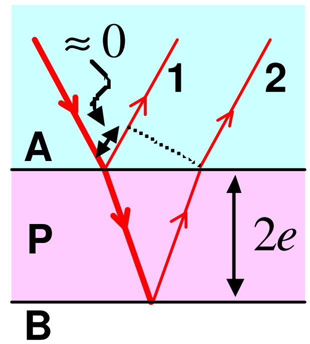
Différence de marche par l'épaisseur : (l'approximation du faisceau perpendiculaire)

Puisque l'onde transmise doit parcourir la pellicule, réfléchir et parcourir à nouveau la pellicule afin d'être transmise vers le milieu initiale, on définit la différence de marche due à l'épaisseur δ_e de la façon suivante dans l'approximation d'un rayon perpendiculaire à la pellicule :

$$\delta_e = 2e$$

où δ_e : Différence de marche par l'épaisseur (m)

e : Épaisseur de la pellicule mince (m)



Approximation d'une onde perpendiculaire à la surface.

Différence de marche par réflexion :

Puisque cette interférence nécessite l'analyse de deux réflexions **AP** (haut de la pellicule) et **PB** (bas de la pellicule), il y aura une différence de marche par réflexion selon les différentes combinaisons de réflexions. On utilise l'expression de la longueur d'onde dans la pellicule λ_P, car la différence de marche sera strictement causé par le déplacement de l'onde dans la pellicule puisque l'onde **1** réfléchie se déplace dans le milieu **A** d'une distance négligeable avant d'interférer avec l'onde **2** :

Réflexion molle-molle ($\Delta\phi = 0$)	Réflexion dure-dure ($\Delta\phi = 0$ ou $\Delta\phi = 2\pi$)	Réflexion dure-mole ($\Delta\phi = \pi$)
$\delta_r = 0$	$\delta_r = 0$	$\delta_r = \lambda_P / 2$

Interférence de réflexion sur pellicule mince

Durant le voyage de l'onde transmise dans le milieu de la pellicule, la longueur d'onde est influencée par le milieu. Pour cette raison, nous devons adapter nos équations de l'interférence constructive et destructive de la façon suivante pour les interpréter adéquatement avec notre différence de marche :

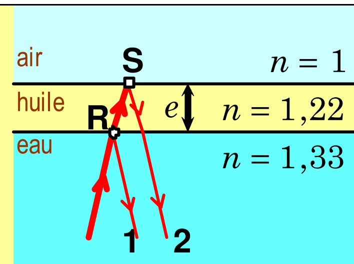
Différence de marche totale	Interférence constructive de réflexion (Maximiser la réflexion) (Minimiser la transmission)	Interférence destructive de réflexion (minimiser la réflexion) (maximiser la transmission)
$\delta = \delta_e + \delta_r$	$\delta = m\lambda_P$	$\delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_P$

où δ : Différence de marche totale (m)

m : Multiple entier de longueur d'onde ($m \varepsilon \mathrm{N}^*$)

λ_P : Longueur d'onde dans le milieu de la pellicule (m)

Situation 1 : *Les minimums de réflexion.* Une couche d'huile (n = 1,22) flotte sur de l'eau d'une piscine (*n* = 1,33). Un rayon de lumière voyageant dans l'eau verticalement vers le haut frappe la pellicule. La longueur d'onde de la lumière *dans l'eau* est égale à 500 nm. On désire déterminer les trois plus petites valeurs de l'épaisseur de la couche d'huile pour lesquelles l'intensité de la lumière réfléchie est *minimale*.



Nous avons les différences de marche suivantes :

Différence de marche due à l'épaisseur	Différence de marche due aux réflexions
$\delta_e = 2e$	$\delta_r = 0$ (Réflexion eau-huile : molle) (Réflexion huile-air : molle)

Évaluons la longueur d'onde de la lumière dans l'huile :

$n_1\lambda_1 = n_2\lambda_2 \quad \Rightarrow \quad n_{eau}\lambda_{eau} = n_{huile}\lambda_{huile}$ (Changement d'indice)

$\Rightarrow \quad (1{,}33)(500\times10^{-9}) = (1{,}22)\lambda_{huile}$ (Remplacer valeurs num.)

$\Rightarrow \quad \boxed{\lambda_{huile} = 545\times10^{-9}\ \text{m}}$

À partir de l'équation de l'interférence destructive, évaluons l'épaisseur requise :

$\delta = \left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda_P \quad \Rightarrow \quad 2e = \left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda_{huile}$ (Remplacer $\delta = \delta_e + \delta_r$ et $\lambda_P = \lambda_{huile}$)

$\Rightarrow \quad e = \left(m+\frac{1}{2}\right)\frac{\lambda_{huile}}{2}$ (Isoler l'épaisseur)

$\Rightarrow \quad e = \left(m+\frac{1}{2}\right)\frac{(545\times10^{-9})}{2}$ (Remplacer valeurs num.)

$\Rightarrow \quad e = 272{,}5\times10^{-9}\left(m+\frac{1}{2}\right)$ (Simplification numérique)

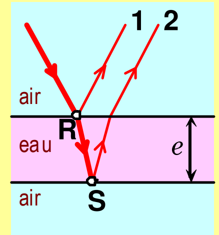
Nous pouvons maintenant évaluer les trois plus petites valeurs d'épaisseur produisant une interférence destructive :

$m = 0$: $\quad e = 272{,}5\times10^{-9}\left((0)+\frac{1}{2}\right) \quad \Rightarrow \quad \boxed{e = 136\ \text{nm}}$

$m = 1$: $\quad e = 272{,}5\times10^{-9}\left((1)+\frac{1}{2}\right) \quad \Rightarrow \quad \boxed{e = 409\ \text{nm}}$

$m = 2$: $\quad e = 272{,}5\times10^{-9}\left((2)+\frac{1}{2}\right) \quad \Rightarrow \quad \boxed{e = 681\ \text{nm}}$

Situation 2 : *La couleur d'une bulle de savon.* Un faisceau de lumière blanche (un mélange de toutes les longueurs d'onde entre 400 nm et 700 nm) tombe perpendiculairement sur une pellicule d'eau savonneuse (n = 1,33) de 650 nm d'épaisseur. On désire déterminer pour quelles longueurs d'ondes la réflexion est *maximale.*



Nous avons les différences de marche suivantes :

Différence de marche due à l'épaisseur	Différence de marche due aux réflexions
$\delta_e = 2e$	$\delta_r = \dfrac{\lambda_{\text{eau}}}{2}$ (Réflexion air-eau : dure) (Réflexion eau-air : molle)

Évaluons la longueur d'onde de la lumière dans l'eau :

$n_1\lambda_1 = n_2\lambda_2 \quad \Rightarrow \quad n_{\text{air}}\lambda_{\text{air}} = n_{\text{eau}}\lambda_{\text{eau}}$ (Changement d'indice)

$\Rightarrow \quad \lambda_{\text{eau}} = \dfrac{n_{\text{air}}}{n_{\text{eau}}}\lambda_{\text{air}}$ (Isoler λ_{eau})

$\Rightarrow \quad \lambda_{\text{eau}} = \dfrac{(1)}{(1{,}33)}\lambda_{\text{air}}$ (Remplacer valeurs num.)

$\Rightarrow \quad \boxed{\lambda_{\text{eau}} = 0{,}752\lambda_{\text{air}}}$ (Relation des longueurs d'onde)

À partir de l'équation de l'interférence constructive, évaluons les longueurs d'onde admissibles :

$\delta = m\lambda_{\text{P}} \quad \Rightarrow \quad 2e + \dfrac{\lambda_{\text{eau}}}{2} = m\lambda_{\text{eau}}$ (Remplacer $\delta = \delta_e + \delta_r$ et $\lambda_{\text{P}} = \lambda_{\text{eau}}$)

$\Rightarrow \quad 2e = \left(m - \dfrac{1}{2}\right)\lambda_{\text{eau}}$ (Regrouper λ_{eau} et le factoriser)

$\Rightarrow \quad 2e = \left(m - \dfrac{1}{2}\right)(0{,}752\lambda_{\text{air}})$ (Remplacer $\lambda_{\text{eau}} = 0{,}752\lambda_{\text{air}}$)

$\Rightarrow \quad \lambda_{\text{air}} = 2{,}66e\left(m - \dfrac{1}{2}\right)^{-1}$ (Isoler λ_{air})

$\Rightarrow \quad \lambda_{\text{air}} = 2{,}66(650\times10^{-9})\left(m - \dfrac{1}{2}\right)^{-1}$ (Remplacer valeurs num.)

$\Rightarrow \quad \boxed{\lambda_{\text{air}} = 1729\times10^{-9}\left(m - \dfrac{1}{2}\right)^{-1}}$ (Simplification numérique)

Nous pouvons maintenant évaluer les longueurs d'onde qui produiront de l'interférence constructive :

$$\lambda_{\text{air}} = 1729\times10^{-9}\left(m-\frac{1}{2}\right)^{-1}$$

(Équation précédente)

$m = 0$: $\lambda_{\text{air}} = 1729\times10^{-9}\left((0)-\frac{1}{2}\right)^{-1} \Rightarrow$ « Non physique »

$m = 1$: $\lambda_{\text{air}} = 1729\times10^{-9}\left((1)-\frac{1}{2}\right)^{-1} \Rightarrow \lambda_{\text{air}} = 3458\ \text{nm}$

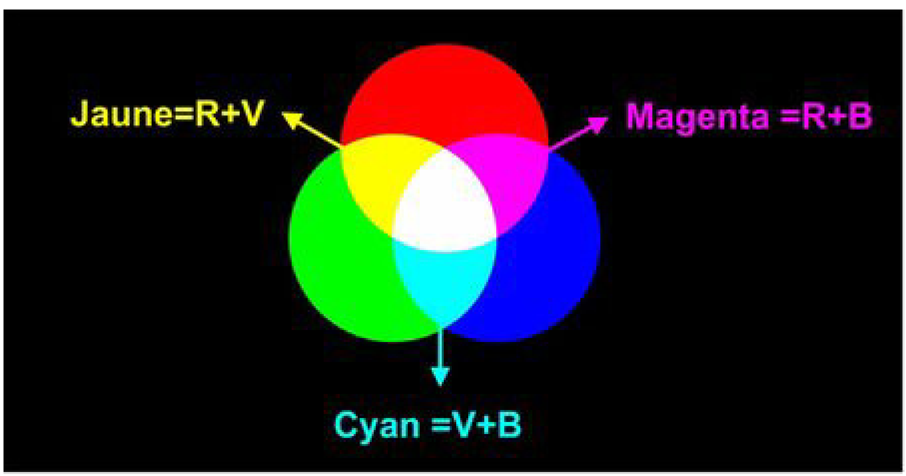
$m = 2$: $\lambda_{\text{air}} = 1729\times10^{-9}\left((2)-\frac{1}{2}\right)^{-1} \Rightarrow \lambda_{\text{air}} = 1153\ \text{nm}$

$m = 3$: $\lambda_{\text{air}} = 1729\times10^{-9}\left((3)-\frac{1}{2}\right)^{-1} \Rightarrow \boxed{\lambda_{\text{air}} = 692\ \text{nm}}$ (**rouge**) entre 400 nm et 700 nm

$m = 4$: $\lambda_{\text{air}} = 1729\times10^{-9}\left((4)-\frac{1}{2}\right)^{-1} \Rightarrow \boxed{\lambda_{\text{air}} = 494\ \text{nm}}$ (**vert**) entre 400 nm et 700 nm

$m = 5$: $\lambda_{\text{air}} = 1729\times10^{-9}\left((5)-\frac{1}{2}\right)^{-1} \Rightarrow \lambda_{\text{air}} = 384\ \text{nm}$

À cette épaisseur de pellicule, ces deux couleurs seront superposés aux mêmes endroits et, la couleur observée sera jaune.



http://physiquelumiere.canalblog.com/archives/2010/10/22/19337885.html
Couleur observée lors de la superposition de plusieurs couleurs pures.

Exercices

3.8.8 ***La couleur des bulles de savon.*** À un certain endroit de la surface d'une bulle de savon (n = 1,33) éclairée par de la lumière blanche, on observe qu'il y a un *minimum* de réflexion dans le vert à 501 nm et un *maximum* de réflexion dans le rouge à 668 nm. Donnez les deux plus petites valeurs possibles pour l'épaisseur de la bulle à cet endroit.

Solutions

Puisque la lumière qui réfléchit sur la paroi externe de la bulle de savon subit une réflexion dure ($n_1 = 1 \rightarrow n_p = 1{,}33$) et que la lumière qui réfléchit sur la paroi interne de la bulle de savon subit une réflexion molle $n_p = 1{,}33 \rightarrow n_2 = 1$), alors on peut déterminer la différence de marche suivante pour l'onde 1 qui réfléchit sur la paroi externe et l'onde 2 qui réfléchit sur la paroi interne de notre pellicule mince (bulle de savon) :

$$\delta = \delta_{\mathrm{e}} + \delta_{\mathrm{r}} = 2e + \frac{\lambda_{\mathrm{eau}}}{2}$$

Évaluons l'expression de la longueur de la lumière exprimée dans l'air mais représenté dans l'eau :

$$n_{\mathrm{air}}\lambda_{\mathrm{air}} = n_{\mathrm{eau}}\lambda_{\mathrm{eau}} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\mathrm{eau}} = \frac{(1)}{(1{,}33)}\lambda_{\mathrm{air}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\lambda_{\mathrm{eau}} = 0{,}752\lambda_{\mathrm{air}}}$$

Évaluons les épaisseurs où il y aura *minimum* en réflexion pour la lumière verte à 501 nm :

$$\delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_{\mathrm{p}} \quad \Rightarrow \quad 2e + \frac{\lambda_{\mathrm{eau}}}{2} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_{\mathrm{eau}}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{e = \frac{m}{2}(0{,}752\,\lambda_{\mathrm{air}})} \quad \text{pour } \lambda_{\mathrm{air}} = 501\,\mathrm{nm}$$

$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$	$m = 6$
e = 188,376 nm	e = 376,752 nm	e = 565,128 nm	e = 753,504 nm	e = 941,88 nm	e = 1130,26 nm

Évaluons les épaisseurs où il y aura *maximum* en réflexion pour la lumière rouge à 668 nm :

$$\delta = m\,\lambda_{\mathrm{p}} \quad \Rightarrow \quad 2e + \frac{\lambda_{\mathrm{eau}}}{2} = m\frac{\lambda_{\mathrm{eau}}}{2}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{e = \left(m - \frac{1}{2}\right)\frac{(0{,}752\,\lambda_{\mathrm{air}})}{2}} \quad \text{pour } \lambda_{\mathrm{air}} = 668\,\mathrm{nm}$$

$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
e = 125,584 nm	e = 376,752 nm	e = 627,92 nm	e = 879,088 nm	e = 1130,26 nm

Nous deux plus petites épaisseurs communes seront ***e* = 376,8 nm** et ***e* = 1130,3 nm**.