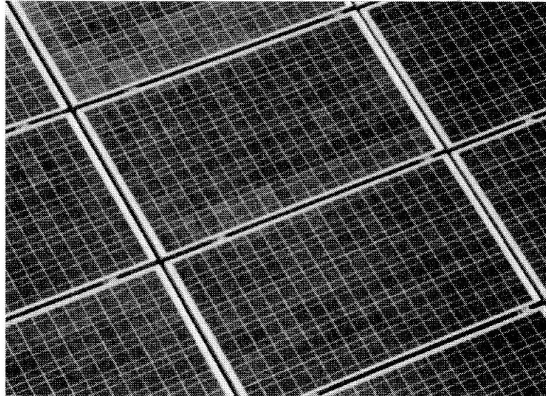


**Problème n°1 : Des panneaux solaires anti-reflets****MOTS-CLES : interférence à deux ondes, lumière polychromatique.**

Les panneaux solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse provenant du Soleil en énergie électrique. Le rendement énergétique d'un panneau solaire va typiquement de 10 à 25 % suivant la technologie utilisée et peut être optimisé en utilisant une couche anti-reflet.

**Panneaux solaires photovoltaïques**

auteur : Wayne National Forest (Licence CC)

On considère une toiture équipée de panneaux solaires ayant un rendement de 20% sur une surface totale  $S = 30 \text{ m}^2$ . On estime que la puissance solaire surfacique maximale reçue dans cette région vaut  $600 \text{ W.m}^{-2}$ .

1) Evaluer la puissance électrique maximale produite par cette installation. Comment faudrait-il orienter les panneaux solaires pour optimiser cette production ?

2) Estimer l'énergie électrique produite en un an. Avec un taux de rachat de l'électricité de 0,30 €/kWh, en déduire le montant de la facture annuelle de rachat.

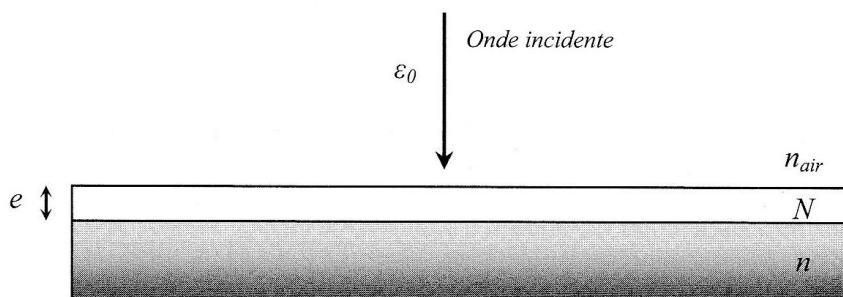
Les cellules photovoltaïques sont en réalité protégées par une plaque de verre d'indice de réfraction  $n = 1,50$ . On rappelle les coefficients de réflexion  $R$  et de transmission  $T$  en puissance à l'interface entre deux milieux transparents d'indices respectifs  $n_1$  et  $n_2$  en incidence normale :

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad \text{et} \quad T = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}.$$

3) Déterminer les pertes par réflexion à l'interface entre l'air (assimilé au vide) d'indice  $n_{\text{air}} = 1$  et le verre. Commenter.

On réalise une couche anti-reflet sur la plaque de verre précédente en déposant une mince couche d'épaisseur  $e$  d'un matériau diélectrique transparent d'indice de réfraction  $N$  (compris entre  $n_{\text{air}}$  et  $n$ ). Une onde incidente monochromatique de longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$  arrive en incidence normale avec un éclairement  $\varepsilon_0$ .

### Couche anti-reflet sur une plaque de verre



4) Faire un schéma faisant apparaître les ondes (1) et (2) issues de la première réflexion à chaque interface air-milieu diélectrique et milieu diélectrique-verre. On négligera l'effet des autres réflexions sur l'onde totale.

5) Déterminer la différence de marche  $\delta$  entre ces ondes.

6) Exprimer l'éclairement  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  des ondes (1) et (2) en fonction de l'éclairement  $\epsilon_0$  de l'onde incidente et des indices  $n_{air}$ ,  $N$  et  $n$ .

7) Etablir deux conditions permettant d'annuler l'onde totale réfléchie à la longueur d'onde  $\lambda_0$ . En déduire l'expression de l'indice  $N$  et de l'épaisseur  $e$  la plus faible permettant de réaliser cette couche anti-reflet. Calculer numériquement  $N$  et  $e$ . Commenter.

8) Expliquer qualitativement ce qu'il se passe si l'onde incidente n'arrive plus normalement sur les panneaux solaires.

En réalité, il faut tenir compte de toutes les longueurs d'onde contenues dans la lumière blanche incidente. Le spectre de la lumière blanche s'étend, en pulsation, entre  $\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}$  et

$\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}$ , où  $\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0}$  et  $\Delta\omega$  est la largeur spectrale du domaine visible. L'éclairement de

l'onde totale réfléchie à la pulsation  $\omega$  dans la fenêtre spectrale de largeur  $d\omega$  peut alors s'écrire :

$$d\epsilon = 2\epsilon_{0\omega} \left( 1 + \cos\left(\frac{\omega\delta}{c}\right) \right) d\omega$$

où  $\delta$  est la différence de marche et  $\epsilon_{0\omega}d\omega$  l'éclairement de chaque onde réfléchie dans la bande spectrale de largeur  $d\omega$ .

9) Quelle serait la couleur de la lumière réfléchie en incidence normale avec l'épaisseur  $e$  trouvée précédemment ?

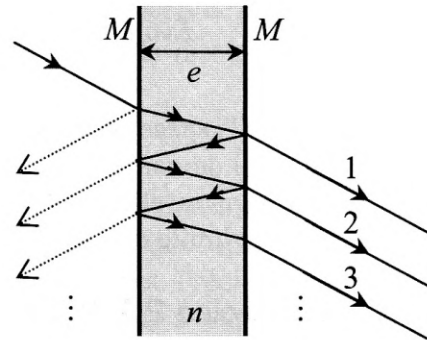
10) En intégrant sur tout le domaine visible, déterminer l'éclairement total  $\epsilon_r$  de l'onde réfléchie. On supposera que  $\epsilon_{0\omega}$  est indépendant de la pulsation.

11) Tracer l'allure de cet éclairement en fonction de l'épaisseur  $e$  de la couche diélectrique. Comment faut-il choisir l'épaisseur  $e$  pour réaliser la couche anti-reflet la plus efficace ?

12) En déduire la valeur du coefficient de réflexion minimal  $R' = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_0}$  qu'il est possible d'obtenir avec ce traitement anti-reflet. Commenter.

**Problème n°2 : (\*) Interféromètre de Fabry-Pérot : interférence à N ondes et application à la fabrication de filtres interférentiels**

L'interféromètre de Fabry-Pérot est constitué de deux lames  $M$  d'épaisseur négligeable, planes et parallèles, argentées sur les faces en regard, de coefficient de réflexion en énergie  $\mathcal{R}$  très proche de 1 (ce sont donc presque des miroirs) et distantes de  $e$ . Entre ces deux lames, l'indice de réfraction est  $n$ . À l'extérieur le milieu est de l'air (indice 1).



On éclaire cet interféromètre par un faisceau parallèle de lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda_0$  dans l'air, en incidence normale. L'éclairement donné sur un écran résulte d'interférences entre une infinité d'ondes transmises par le dispositif après un certain nombre de réflexions internes, comme le montre le schéma ci-dessus où le trajet des rayons a été représenté en incidence oblique pour plus de clarté. On ne s'intéresse pas aux ondes réfléchies de l'autre côté du dispositif. On néglige tout déphasage à la réflexion ou transmission sur les lames argentées  $M$ .

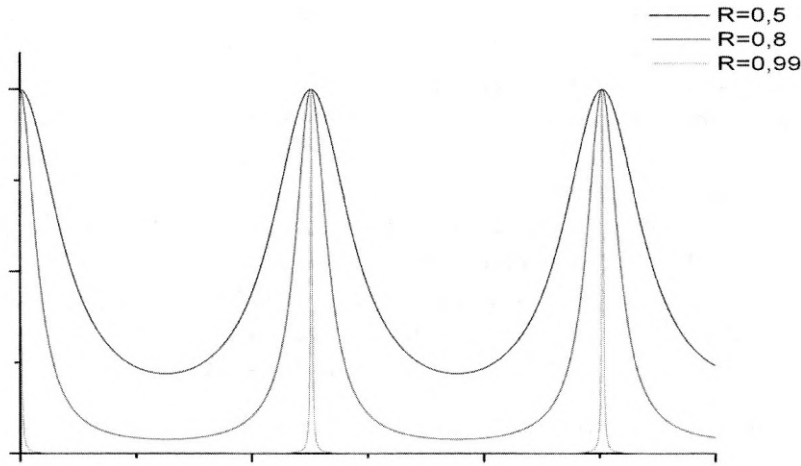
1. Exprimer la différence de marche entre les ondes (1) et (2). En déduire le déphasage  $\Delta\phi$  entre deux ondes successives transmises par le dispositif, en fonction de  $n$ ,  $e$  et  $\lambda_0$ .
2. Les différentes ondes successives transmises par le dispositif sont toutes déphasées de la même quantité  $\Delta\phi$ , l'une par rapport à la précédente, et leur amplitude diminue progressivement jusqu'à 0 en fonction des coefficients de réflexion et transmission à chaque interface  $M$ . Ces différentes ondes étant mutuellement cohérentes, l'onde totale transmise par le dispositif s'obtient en additionnant l'ensemble infini des vibrations (1), (2), (3), ... transmises, en tenant compte des déphasages et de la baisse d'amplitude. On montre que

l'éclairement correspondant peut s'écrire sous la forme 
$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{1 + m_0 \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right)}$$
 où  $\varepsilon_0$  est

l'éclairement incident et le paramètre  $m_0 = \frac{4\mathcal{R}}{(1-\mathcal{R})^2}$  ne dépend que du coefficient de

réflexion  $\mathcal{R}$ . La figure suivante montre le tracé de la fonction  $\varepsilon(\Delta\phi)$  pour différentes valeur de  $\mathcal{R}$  et donc du paramètre  $m_0$ . Volontairement, aucune indication n'a été mise sur les axes de ce graphique.

- a) Par une étude rapide de la fonction  $\varepsilon(\Delta\phi)$ , donner les positions et la valeur des maxima d'éclairement. Commenter en terme d'interférences constructives.
- b) Calculer  $m_0$  pour les trois valeurs de  $\mathcal{R}$  indiquées sur le graphique.
- c) Donner les positions et la valeur des minima d'éclairement. Que trouve-t-on si  $R \rightarrow 1$  ?



- 3.** Par un développement limité au premier ordre au voisinage de  $\Delta\varphi = 0$ , exprimer la largeur à mi-hauteur  $\Delta\varphi_{1/2}$  des pics d'éclaircissement, en fonction de  $\mathcal{R}$ . On définit la finesse de l'appareil par le rapport  $\mathcal{F} = \frac{2\pi}{\Delta\varphi_{1/2}}$ . Donner l'expression de  $\mathcal{F}$  en fonction de  $\mathcal{R}$  et calculer sa valeur pour  $\mathcal{R} = 0,99$ . Commenter ce résultat en lien avec le graphique ci-dessus. Quel est l'intérêt d'utiliser des lames  $M$  de fort pouvoir réfléchissant ? Qu'aurait-on obtenu en tenant compte seulement des interférences entre les deux premières ondes transmises ? (répondre de façon qualitative, sans calculer l'éclairement)
- 4.** Montrer que ce dispositif est quasiment transparent à proximité de certaines valeurs de  $\lambda_0$  qu'on explicitera en fonction de  $n$  et  $e$ . Si on l'éclaire avec une onde dont la longueur d'onde ne vérifie pas cette condition, que devient-elle ?
- 5.** Ce dispositif peut servir à fabriquer un filtre interférentiel, permettant de sélectionner finement une gamme de longueur d'onde  $\Delta\lambda$  autour d'une valeur moyenne  $\lambda_m$ . Comment choisir  $\mathcal{R}$  si on veut un filtre très sélectif ? Montrer que la bande passante  $\Delta\lambda$  du filtre, définie comme la largeur spectrale pour laquelle sa transmission est supérieure à 50 %, est reliée à la finesse par  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_m} = \frac{1}{\mathcal{F} p}$ . Calculer  $\Delta\lambda$  pour un filtre réalisé avec une lame de cryolite d'indice  $n = 1,365$ , d'épaisseur  $e = 600$  nm, de coefficient de réflexion  $\mathcal{R} = 0,9$  et transmettant à  $\lambda_m = 546$  nm (raie verte du Mercure).
- 6.** Expliquer pourquoi ce filtre est plus intéressant qu'un verre coloré classique, contenant un colorant absorbant, en particulier pour les applications avec des sources de forte puissance.