

## TDO1 : Modèle scalaire des ondes lumineuses

### Savoirs

- Indice de réfraction et longueur d'onde dans les milieux.
- Définitions et liens entre chemin optique, retard de phase, durée de propagation. Et différence de marche et déphasage.
- Propriétés des ondes sinusoïdales progressives (pulsation, période, vecteur d'onde, longueur d'onde, etc) et leurs relations.
- Surfaces d'ondes et théorème de Malus. Onde plane, onde sphérique, effet d'une lentille mince.
- Valeur moyenne et valeur efficace d'un signal périodique. Cas des signaux sinusoïdaux.
- Longueur de cohérence temporelle, temps de cohérence, largeur spectrale.
- Connaître quelques ODG de  $c$ ,  $n$ ,  $\lambda$ ,  $L_c$ .
- Qualitativement, classer différentes sources lumineuses en fonction du temps de cohérence de leurs diverses radiations.

### Interro de cours

1. Donner la définition de l'indice de réfraction en fonction de la célérité dans le milieu. Valeur de l'indice dans le vide? ODG de célérité des ondes électromagnétiques dans le vide?
2. Donner l'ODG de l'indice dans l'air, l'eau, le verre.
3. Donner le lien entre longueur d'onde dans un milieu et celle dans le vide.
4. Donner l'expression du chemin optique sur le segment de A à B dans un milieu d'indice  $n$ .
5. Pour deux ondes arrivant en un point M, quelle expression relie déphasage  $\Delta\phi$  et différence de marche  $\delta$ ?
6. Que valent la différence de marche et le déphasage quand les deux ondes arrivent en phase? Et dans le cas d'une opposition de phase?
7. Quelle est l'expression générale d'une onde progressive se propageant selon  $+\vec{u}_x$ ? Et selon  $-\vec{u}_x$ ?
8. Quelle est l'expression générale d'une onde plane progressive harmonique se propageant selon  $+\vec{u}_x$ ? Et selon  $-\vec{u}_x$ ?
9. Donner la relation entre deux grandeurs parmi : longueur d'onde, période, fréquence, pulsation, nombre d'onde  $k$
10. Donner l'expression du retard de phase d'onde onde qui s'est propagée de O à M dans un milieu d'indice  $n$  en fonction du chemin optique et la durée de propagation.
11. Soit une source ponctuelle placée au foyer objet d'une lentille convergente. Tracer des surfaces d'onde avant et après la lentille. Indiquer où l'onde est plane ou sphérique.
12. Un faisceau de rayons parallèles arrive sur un dioptre en incidence non nulle. Tracer des surfaces d'onde pour le faisceau incident, réfléchi et réfracté.
13. Donner l'ODG des intervalles de longueur d'onde des couleurs suivantes : violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge.
14. Tracer l'allure des spectres d'une lampe thermique, d'une lampe spectrale, d'un laser.
15. Que valent les moyennes temporelles de  $\cos(\omega t + \phi)$ ,  $\sin(\omega t + \phi)$ ,  $\cos(\omega t + \phi) \cdot \sin(\omega t + \phi)$ ,  $\cos^2(\omega t + \phi)$  et  $\sin^2(\omega t + \phi)$ ?
16. Que vaut la valeur efficace d'un signal sinusoïdal et d'un signal créneau de moyenne nulle et amplitude  $S$ ?
17. Donner la formule reliant temps de cohérence  $\tau_c$  et largeur spectrale en fréquence  $\Delta\nu$  d'une onde.
18. Donner la formule reliant temps de cohérence  $\tau_c$  et largeur spectrale en longueur d'onde  $\Delta\lambda$  d'une onde.
19. Parmi ces deux sources, laquelle a la plus grande longueur de cohérence : lampe à vapeur de mercure ou laser He-Ne? Donner l'ODG de ces longueurs de cohérence.
20. Parmi ces deux sources, laquelle a la plus grande longueur de cohérence : lampe à vapeur de sodium ou lampe blanche? Donner l'ODG de ces longueurs de cohérence.

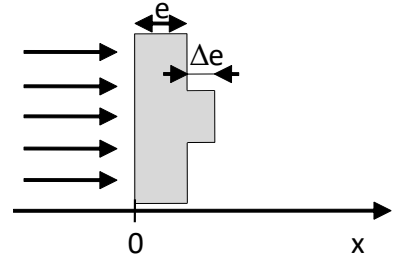
## Savoir-faire

- **Exprimer un chemin optique ou une différence de marche.** Exprimer le retard de phase en un point en fonction du retard de propagation ou du chemin optique. *Exos 1, 4, 5.*
- Tracer l'allure de surfaces d'onde. *Exos 1, 2, 3.*
- Utiliser le théorème de Malus. *Exos 2, 3, 4.*
- Utiliser la relation  $\Delta f \cdot \Delta \tau \simeq 1$  pour relier le temps de cohérence et la largeur spectrale  $\Delta \lambda$  de la radiation considérée. *Exos 6, 7, 8.*

## 1 Traversée d'un défaut

Une onde plane arrive sous incidence normale sur une lame d'indice  $n$ , d'épaisseur globale  $e$  présentant un défaut d'épaisseur  $\Delta e$ .

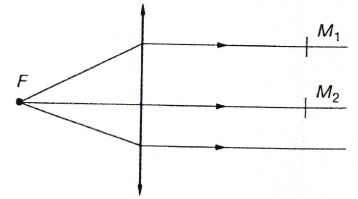
1. Donner la forme des surfaces d'onde avant la lame, dans la lame pour  $x \in [0, e]$ , dans la lame pour  $x \in [e, e + \Delta e]$ , et après la lame. Est-ce une onde plane ?
2. Exprimer la différence de phase (éventuellement fonction de  $x$ ) entre un rayon passant par le défaut et un autre passant à côté pour les quatre domaines précédents de  $x$ .
3. AN : estimer un ordre de grandeur de ce déphasage pour un défaut de  $5 \mu\text{m}$ .



## 2 Effet d'une lentille sur les surfaces d'onde

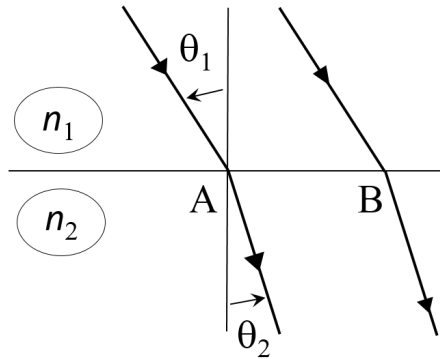
On place une source ponctuelle au foyer objet  $F$  d'une lentille convergente.

1. Quelle est la forme des surfaces d'onde avant la lentille pour l'onde émise par la source placée en  $F$  ?
2. Qu'en est-il après la lentille ?
3. Que dire des chemins optiques  $(FM_1)$  et  $(FM_2)$  ?
4. Comment est-ce possible, vu les distances respectives parcourues ?



## 3 Réfraction

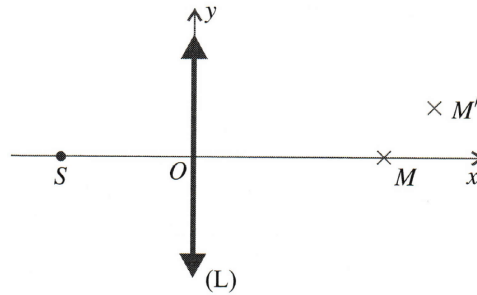
Une onde lumineuse plane monochromatique émise par une source  $S$  à l'infini arrive sur un dioptré plan séparant le milieu d'indice  $n_1$  contenant la source d'un milieu d'indice  $n_2$ . On note  $\theta_1$  l'angle d'incidence sur le dioptré et  $\theta_2$  l'angle de réfraction. L'objectif est de montrer que la loi de Malus permet de retrouver la loi de la réfraction de Snell-Descartes.



1. Justifier la position du point  $H$  situé sur le rayon passant par  $B$  tel que le chemin optique  $(SA)$  soit le même que  $(SH)$ ,
2. En déduire une expression de  $(SB) - (SA)$  en fonction de  $L = AB$  et de  $\theta_1$ .
3. À l'aide de la loi de Malus (et non de la loi de la réfraction), trouver une seconde expression de  $(SB) - (SA)$  en fonction de  $L$  et  $\theta_2$ . En déduire qu'on retrouve la loi de réfraction liant  $\theta_1$  et  $\theta_2$ .

## 4 Chemins optiques à travers une lentille (\*→\*\*)

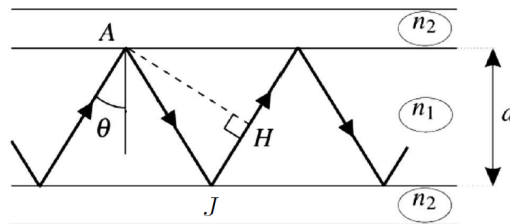
Considérons une lentille mince convergente de distance focale  $f'$ , d'indice  $n$ , et d'épaisseur  $e$  au niveau de son centre optique  $O$ . L'indice de l'air est  $n_a$ . Dans le repère  $Oxy$ , le point  $M$  est de coordonnées  $(x, 0)$ , le point  $M'$  est de coordonnées  $(x', y')$ . Une source ponctuelle  $S$  est placée avant la lentille. On note  $S'$  son conjugué à travers la lentille.



- Dans cette question, la source  $S$  est placée au foyer objet  $F$ .
  - Où est  $S'$  ?
  - Construire les rayons issus de  $S$  qui passent en  $M$  et  $M'$ .
  - Exprimer les chemins optiques  $(SM)$  et  $(SM')$ .
- Dans cette question, la source  $S$  est placée avant  $O$  à une distance  $3f'/2$ .
  - On donne la relation de conjugaison des lentilles minces entre deux points  $A$  et  $A'$  conjugués :  $1/\overline{OA'} - 1/\overline{OA} = 1/f'$ . En déduire la distance  $OS'$ .
  - Construire les rayons issus de  $S$  qui passent en  $M$  et  $M'$ .
  - Que vaut la distance  $M'S'$  ?
  - En déduire finalement  $(SM')$ .

## 5 Fibre optique à saut d'indice (\*\*\*)

Une fibre optique est schématisée par une lame de verre d'épaisseur  $d$  et d'indice  $n_1$  placée entre deux couches de verre d'indice  $n_2 < n_1$ . Les rayons lumineux suivent des trajets compris dans un plan perpendiculaire à la lame, du type de celui qui est représenté sur la figure. Pour qu'il y ait propagation modale, l'onde doit être en phase (à un décalage entier de périodes éventuel près) aux points  $A$  et  $H$  de la figure. Chaque valeur de  $\theta$  correspond à un mode de propagation. Calculer le nombre de modes possibles si  $d = 50,00 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_0 = 500,0 \text{ nm}$ ,  $n_1 = 1,500$  et  $n_2 = 1,400$ .



## 6 Raie spectrale

On considère une raie spectrale de longueur d'onde moyenne  $\lambda_m$ , de largeur spectrale  $\Delta\lambda$  et de longueur de cohérence  $L_c$ .

- Montrer que  $\Delta\lambda = \lambda_m^2/L_c$ .

Considérons une raie spectrale d'une lampe au cadmium de caractéristiques  $\lambda_m = 643,8 \text{ nm}$  et  $\Delta\lambda = 1,3 \text{ pm}$ .

- Quelle est sa couleur ?
- Calculer sa longueur de cohérence et son temps de cohérence.
- Quel est le nombre moyen d'oscillations par train d'ondes ?

## 7 Temps de cohérence et largeur spectrale

1. Déterminer le temps de cohérence d'une source de lumière blanche dont le spectre s'étend de 400 nm à 800 nm.
2. Déterminer l'étendue spectrale  $\Delta\lambda$  d'un laser utilisé en TP sachant que son temps de cohérence est de l'ordre de  $10^{-8}$  s et qu'il émet une radiation de longueur d'onde de 630 nm.

## 8 Effet Doppler et élargissement spectral (\*\*\*)

1. Un observateur est placé en un point O fixe. Un atome S émet un top toutes les  $T_0$  secondes et on pose  $f_0 = 1/T_0$ . Cet atome se déplace sur un axe ( $Ox$ ) à la vitesse constante  $v$ . À chaque top correspond une vibration lumineuse émise par l'atome et qui se propage de manière isotrope à la vitesse  $c$  dans le référentiel du laboratoire de repère lié ( $Oxyz$ ). Montrer que la fréquence d'arrivée en O des tops quand S s'éloigne de O est :  $f = f_0/(1 + v/c)$ . Que devient ce résultat quand S se rapproche de O ?
2. En pratique, la source est une lampe spectrale basse pression fonctionnant grâce à un gaz chaud d'atomes d'hydrogène excités. Exprimer la longueur de cohérence d'une radiation visible quelconque de cette source dont l'élargissement spectral est supposé lié à l'effet Doppler.
3. Déterminer l'ordre de grandeur de cet élargissement en proposant des valeurs crédibles pour les paramètres nécessaires.