

Application directe du cours

Exercice 1 Longueur d'onde = couleur ?

On étudie une onde monochromatique dont la longueur d'onde dans le verre (indice $n_1 = 1,5$) vaut $\lambda_1 = 450 \text{ nm}$.

On rappelle que l'indice n d'un milieu est défini par $n = \frac{c}{v}$ où v est la célérité de la lumière dans ce milieu et c la célérité de la lumière dans le vide.

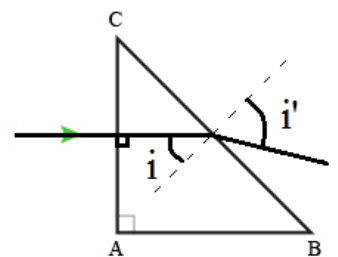
- 1) Rappeler la relation entre la fréquence f d'une onde, sa longueur d'onde λ , et la célérité v de l'onde.
- 2) Calculer numériquement la fréquence f de la radiation étudiée.
- 3) Déterminer la longueur d'onde dans le vide λ_0 de cette radiation. Quelle est la couleur correspondante ?
- 4) Corriger l'affirmation suivante : "Une radiation monochromatique est caractérisée par sa longueur d'onde. C'est la longueur d'onde qui détermine la couleur perçue."

Exercice 2 Prisme de verre

Dans les milieux autres que le vide, l'indice de réfraction n dépend de la fréquence de la radiation monochromatique considérée. La relation suivante (loi de Cauchy) représente de façon approchée la variation de l'indice pour le verre dans le domaine visible :

$$n = A + \frac{B}{\lambda_0^2} \quad \text{où } \lambda_0 \text{ désigne la longueur d'onde dans le vide}$$

On étudie un prisme de verre pour lequel $A = 1,504$ et $B = 4,052 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. Un faisceau lumineux monochromatique arrive à incidence normale sur une face du prisme ; l'indice de l'air est pris égal à 1.



- 1) Calculer l'indice du verre pour $\lambda_1 = 480 \text{ nm}$, puis pour $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$.
- 2) Pour quelle couleur l'indice est-il le plus élevé : le rouge ou le bleu ?
- 3) D'après la loi de Descartes sur la réfraction, un faisceau rouge sera-t-il plus ou moins dévié par le prisme qu'un faisceau bleu ?

Exercice 3 Visible, infrarouge et ultraviolet

Le domaine visible correspond à l'intervalle $[400 \text{ nm} ; 800 \text{ nm}]$ pour la longueur d'onde dans le vide.

- 1) Quel est l'intervalle de fréquences du domaine visible ?
- 2) Dans quel domaine (UV ou infrarouge) la fréquence $f = 5 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$ se situe-t-elle ?

On rappelle la formule de Planck pour l'énergie d'un photon : $E = hf$ ($h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$) D'autre part, l'électron-volt (eV) est une unité d'énergie définie par $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

- 3) Dans quel domaine un photon d'énergie $E = 0,5 \text{ eV}$ se situe-t-il ?

Exercice 4 Mesure par diffraction

Un fil en fibre de carbone, placé sur le trajet d'un faisceau laser de longueur d'onde $\lambda = 650 \text{ nm}$, produit une figure de diffraction observée sur un écran placé à 2,00 m du fil. On mesure une largeur $L = 17,3 \text{ cm}$ pour la tache centrale.

Quel est le diamètre du fil ?

Exercice 5 Obstacle et figure de diffraction associée (les figures sont en négatif)

1) Associer les figures à un des obstacles suivants : trou circulaire, carré, fente éclairée par un faisceau large.



2) On envisage les deux fentes rectangulaires représentées ci-dessous (à gauche). Eclairée par un laser, laquelle des deux produira sur un écran la figure de diffraction représentée à droite ?



Exercice 6 Modes d'émission de la lumière

1) En utilisant la loi de Wien, calculer la longueur d'onde qui correspond au maximum d'émission du Soleil ($T_s = 5750 \text{ K}$). Quelle est la couleur correspondante ?

2) Les étoiles bleues sont-elles plus chaudes ou plus froides que les rouges ?

3) Parmi les schémas suivants, lequel correspond à l'émission spontanée ? A l'émission stimulée ?



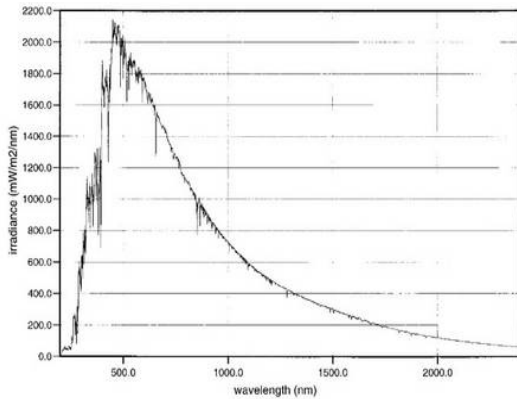
4) Quelle est la relation entre les énergies E_1 , E_2 et la fréquence ν des photons absorbés et émis ?

5) Quel est le mode d'émission mis en oeuvre dans :

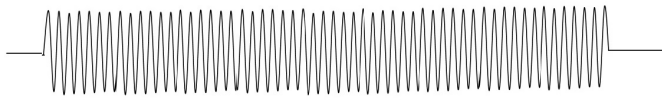
- une lampe à vapeur de sodium
- une ampoule à incandescence
- un tube fluorescent (utilisé dans les ampoules "éco" et pour l'éclairage des salles de classe)

Exercice 7 Spectres et trains d'onde

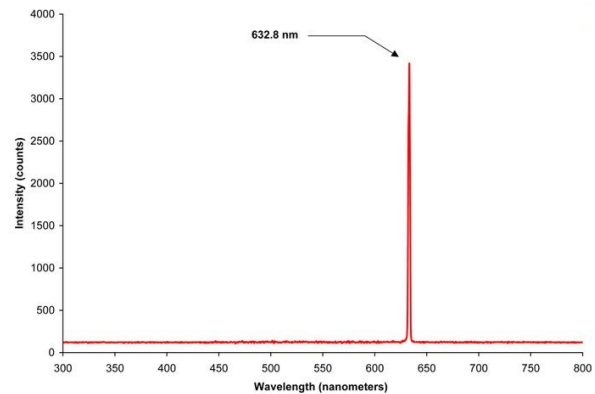
Associer les spectres et les trains d'onde suivants à la source qui lui correspond : laser ou ampoule à incandescence.



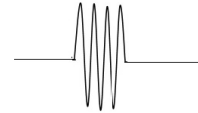
Spectre n°1



Train d'onde n°1



Spectre n°2



Train d'onde n°2

Exercice 8 Temps de cohérence et largeur spectrale

La notice d'un laser Hélium-Néon mentionne les caractéristiques suivantes :

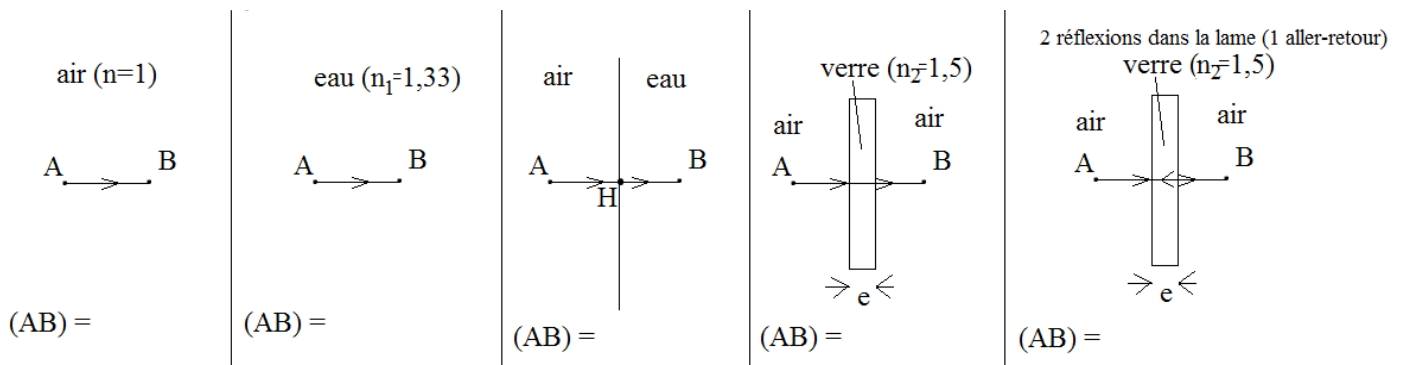
- longueur d'onde centrale $\lambda_m = 632,8 \text{ nm}$ (associée au maximum d'émission)
- largeur spectrale $\Delta f = 1 \text{ MHz}$ (largeur à mi-hauteur du pic dans le spectre en fréquence)
- longueur de cohérence $l_c = 300 \text{ m}$

1) Calculer le temps de cohérence de ce laser. Combien de périodes T chaque train d'onde contient-il ?

2) Quelle semble être la relation entre τ_c et la largeur spectrale Δf ?

Exercice 9 Chemin optique

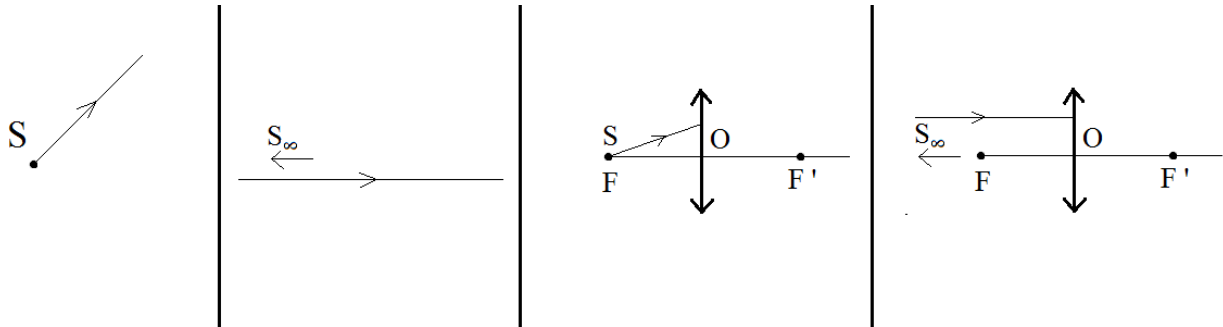
1) Exprimer le chemin optique (AB) dans les situations suivantes en faisant intervenir une ou plusieurs des grandeurs suivantes : longueurs AB , AH , HB , e , indices n_1 , n_2 .



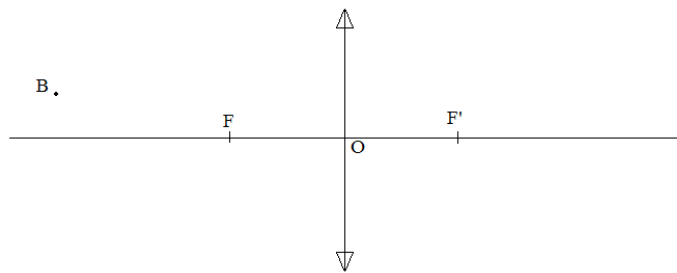
2) Pour une radiation monochromatique de longueur d'onde λ_0 dans le vide, le déphasage $\varphi(B) - \varphi(A)$ est-il le même dans les deux premiers cas ?

Exercice 10 Théorème de Malus

Compléter les schémas suivants en ajoutant quelques rayons lumineux et en représentant des surfaces d'onde.



Exercice 11 Objet, image et surfaces d'onde

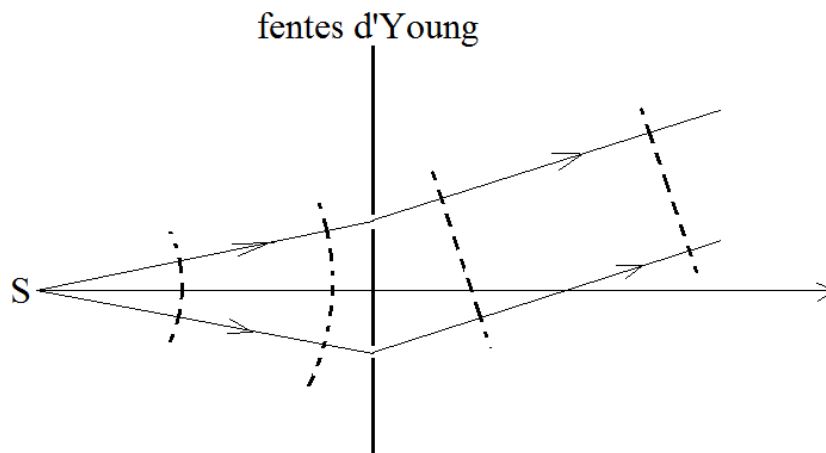


- 1) Construire l'image B' du point B à travers la lentille.
- 2) Représenter des surfaces d'onde de part et d'autre de la lentille.
- 3) Y a-t-il un ou plusieurs rayons qui présentent un chemin optique (BB') minimal ?

Exercice 12 Une erreur fréquente

Un étudiant a bien appris son cours et a retenu que les rayons lumineux sont perpendiculaires aux surfaces d'onde. Il a réalisé le schéma ci-dessous, qui correspond à la situation des fentes d'Young, éclairées par une source ponctuelle. Les surfaces d'onde sont représentées en traits pointillés gras.

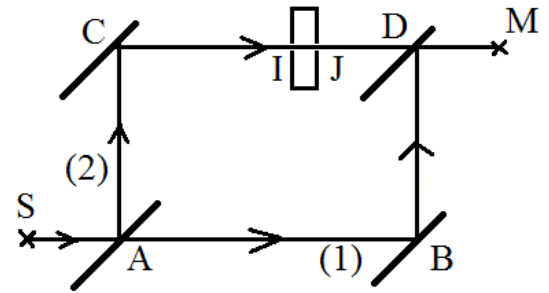
Parmi les surfaces d'onde tracées, lesquelles sont correctes ? Expliquer l'erreur commise, en traçant d'autres rayons réémis par les deux fentes.



Travaux dirigés

Exercice 13 Superposition de deux ondes

La source S émet une onde lumineuse monochromatique de longueur d'onde dans le vide λ . Le dispositif est constitué de 4 lames semi-réfléchissantes. Une lame de verre d'épaisseur $IJ = e$ et d'indice n est placée entre C et D. On ne tient pas compte de l'influence des lames semi-réfléchissantes sur le retard de phase.



On note :

- $(SM)_1$ le chemin optique associé au rayon (1) (trajet SABDM)
- $(SM)_2$ le chemin optique correspondant au rayon (2) (trajet SACDM)

La quantité $\delta(M) = (SM)_2 - (SM)_1$ est la *différence de marche* entre les deux ondes au point M (différence des chemins optiques des deux rayons qui se rejoignent en M).

1) Exprimer $\delta(M)$ en fonction de n et e uniquement.

On note $\varphi_1(M)$ et $\varphi_2(M)$ les retards de phase au point M pour chacune des deux ondes. Le *déphasage entre les deux ondes au point M* est défini par : $\Delta\varphi(M) = \varphi_2(M) - \varphi_1(M)$

2) Rappeler la relation entre $\varphi_1(M)$, $(SM)_1$ et $\varphi(S)$ (retard de phase de l'onde à la source).

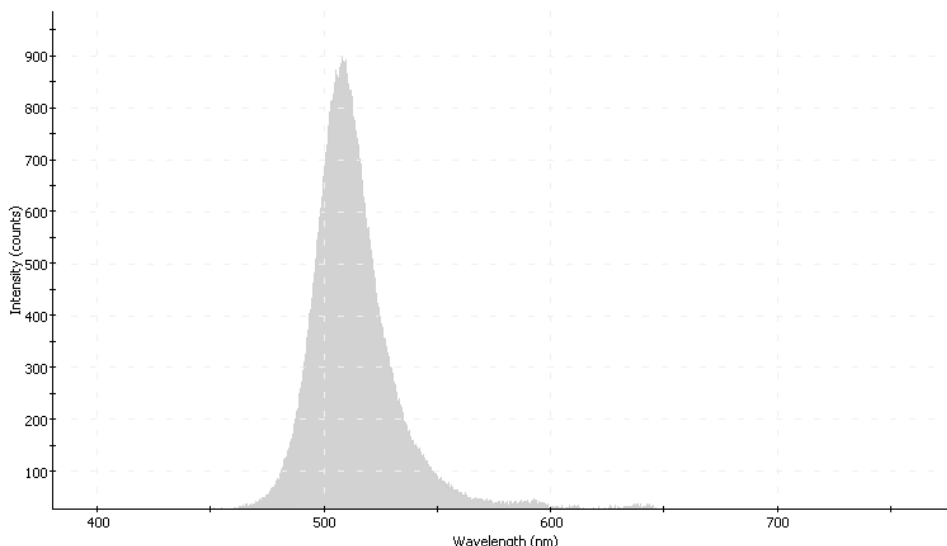
3) En déduire la relation $\Delta\varphi(M) = 2\pi \frac{\delta(M)}{\lambda}$.

4) Application numérique : $e = 5,5 \mu\text{m}$, $\lambda = 500 \text{ nm}$, $n = 1,50$. Les deux ondes sont-elles en phase ou en opposition de phase lorsqu'elles se superposent au point M ? Observera-t-on des interférences constructives ou destructives ?

Exercice 14 Spectre d'une DEL

On fournit ci-dessous le spectre d'une diode électroluminescente, obtenu à l'aide d'un spectromètre à réseau. On

fournit la relation $\frac{\Delta f}{f_{\max}} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_{\max}}$ où $f_{\max}$ et $\lambda_{\max}$ correspondent au maximum d'émission.



1) Quelle est la couleur de cette DEL ?

2) Déterminer graphiquement sa largeur spectrale $\Delta\lambda$, puis sa largeur spectrale en fréquence Δf .

3) En déduire un ordre de grandeur de son temps de cohérence τ_c .

4) Classer ces sources de la plus cohérente à la moins cohérente : cette DEL, une ampoule à incandescence, une lampe à vapeur de mercure, un laser He-Ne.

Exercice 15 Résolution d'un télescope

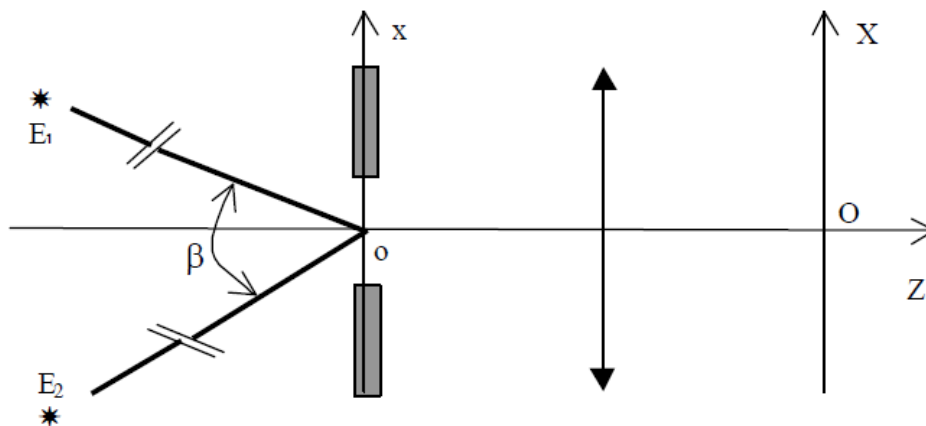
Un télescope utilisé pour les observations astronomiques peut être modélisé par une fente de largeur a devant laquelle se trouve une lentille convergente de distance focale image f' (voir schéma). L'observation des objets lointains se fait dans le plan focal image de la lentille.

On définit le pouvoir séparateur (noté α) du télescope comme la plus petite valeur de distance angulaire correspondant à l'observation de deux images distinctes. A cause de la diffraction, on ne verra qu'une seule tache lumineuse si la distance angulaire entre les deux étoiles est inférieure à α .

On observe à l'aide de ce télescope une étoile double dont les deux composantes E_1 et E_2 émettent des ondes supposées planes, de même intensité I_0 et de même longueur d'onde λ . On désigne par β , appelé distance angulaire, l'angle sous lequel on voit les deux étoiles depuis le télescope.

1. On suppose que le télescope est orienté de façon que les deux étoiles soient symétriques par rapport à l'axe optique Oz (voir schéma). Donner, en fonction de f' et β (supposé faible), l'expression de la distance d_0 séparant les centres des deux taches observées dans le plan focal de la lentille.

2. Exprimer la largeur L de la tache centrale de diffraction associée à chacune des deux étoiles.



3. En adoptant le critère de Rayleigh*, exprimer le pouvoir séparateur α du télescope en fonction de λ et a (Critère de Rayleigh : à la limite de résolution, deux taches de diffraction peuvent être séparées si le centre de l'une est confondu avec le premier minimum nul de l'autre).

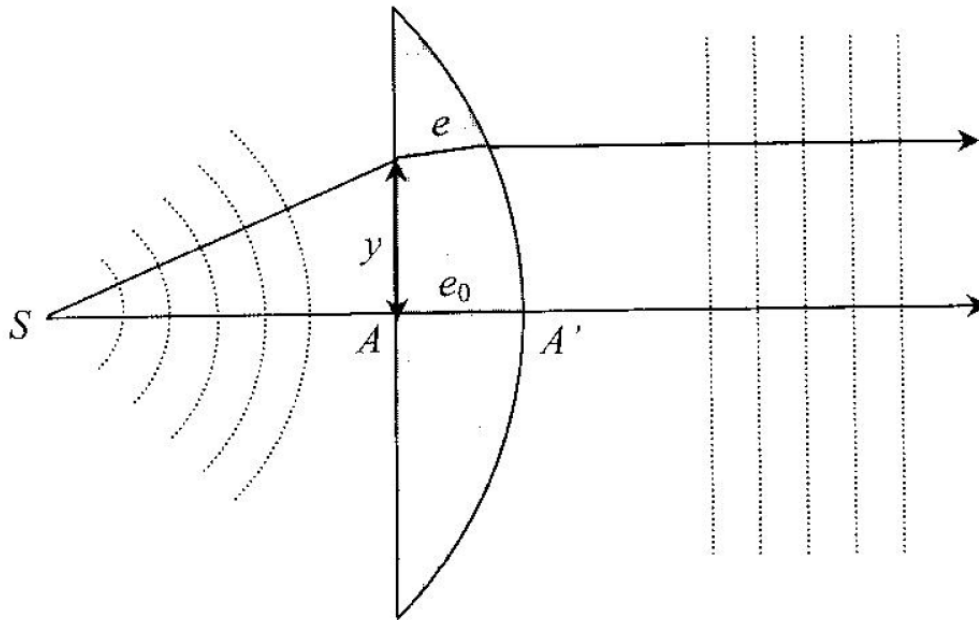
En réalité, le collecteur de lumière pour un télescope est un miroir concave de diamètre D . C'est ce miroir qui limite le front d'onde et joue le rôle d'une ouverture diffractante. Le pouvoir séparateur (en radian) est donné alors par la formule suivante : $\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{D}$.

4. Calculer le pouvoir séparateur du télescope spatial Hubble sachant que le diamètre du miroir collecteur est $D = 2,4$ m et qu'il opère à une longueur d'onde $\lambda = 480$ nm. En déduire la distance minimale entre deux étoiles situées à 4,2 années lumière de la Terre (dans le système d'Alpha du Centaure) pour qu'elles puissent être distinguées par Hubble.

5. Le pouvoir séparateur d'un télescope opérant dans le visible à la surface de la Terre est limité à environ $1''$ à cause des turbulences de l'atmosphère. Quelle serait la valeur du diamètre d'un miroir qui imposerait cette résolution par diffraction ? Pourquoi utilise-t-on alors des télescopes de grands diamètres (3 m à 10 m) pour observer le ciel dans le visible ?

Exercice 16 Lentille et surfaces d'onde

Une source ponctuelle S est placée au foyer objet d'une lentille mince L "plan-convexe" de rayon de courbure R , d'indice de réfraction n et de distance focale f . Le milieu ambiant est l'air (on prendra la valeur 1 pour son indice). On cherche à déterminer l'expression de la distance focale $f = SA$ de la lentille en fonction de son indice n et de son rayon de courbure R .



On s'intéresse à un rayon qui pénètre dans la lentille à la distance y de son centre. On se place dans les conditions de Gauss : $y \ll R$ et le rayon est très peu incliné par rapport à l'axe optique, le trajet parcouru dans la lentille peut être approché par un trajet horizontal.

- 1) Exprimer de façon approchée l'épaisseur e de verre traversée en fonction de la distance y à l'axe de la lentille, de son rayon R et de son épaisseur centrale e_0 (voir schéma).
- 2) Tracer les deux surfaces d'onde contenant respectivement A et A' . On note B et B' les points de ces deux surfaces d'onde appartenant au rayon étudié.
- 3) Exprimer séparément les deux chemins optiques (AA') et (BB') en fonction de n , e_0 , y , f et R .
- 4) Justifier que ces deux chemins optiques sont égaux. En déduire l'expression de la distance focale f en fonction de n et R . Application numérique : on prend $n = 1,5$, calculer R pour obtenir $f = 200$ mm.