

## Semaine 6

27 et 28 mars 2025

### 1.4 Interaction ondes-milieu de propagation

#### 1.4.1 Réflexion et réfraction

1.4.1.1 Réflexion et réfraction à la jonction de deux cordes différentes

1.4.1.2 Ondes planes

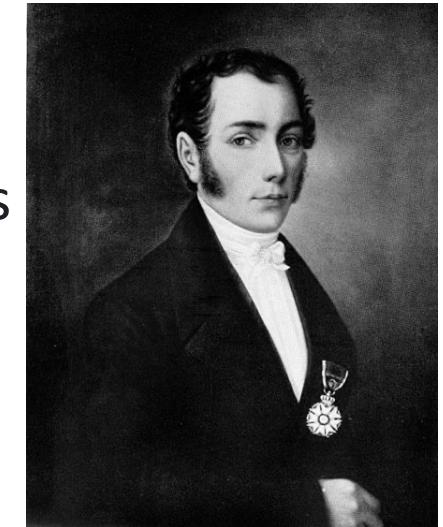
1.4.1.3 Principe de Fermat

#### 1.4.2 Diffraction

1.4.2.1 Diffraction de Fraunhofer à une fente

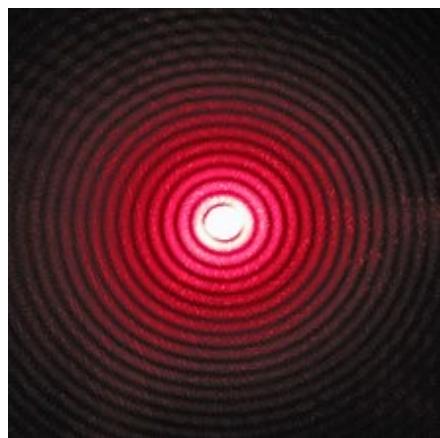
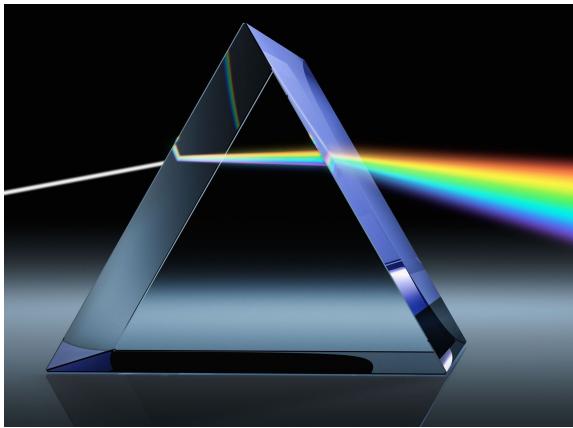
1.4.2.2 Diffraction de Fraunhofer par deux fentes parallèles

#### 1.4.3 Diffusion



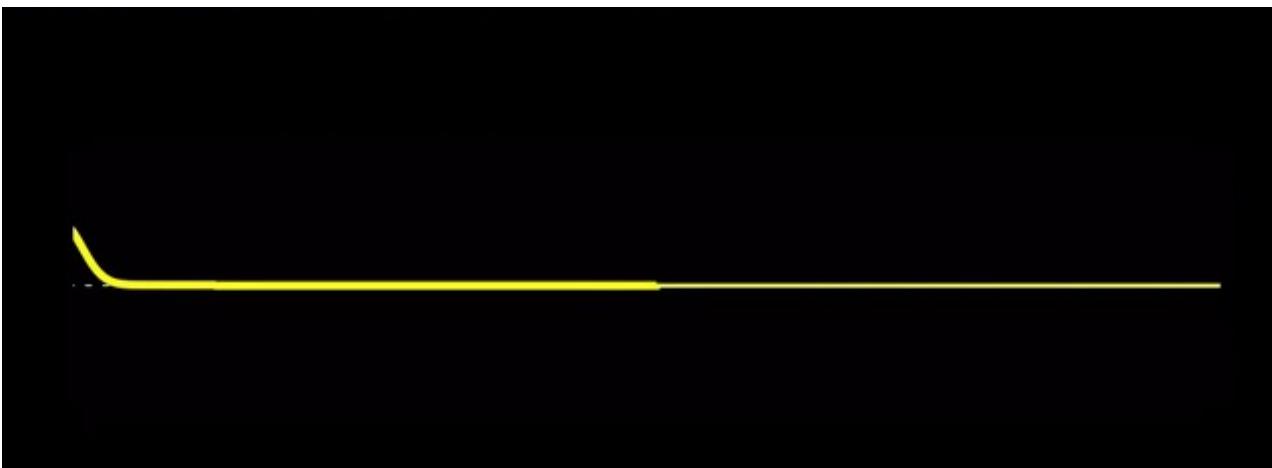
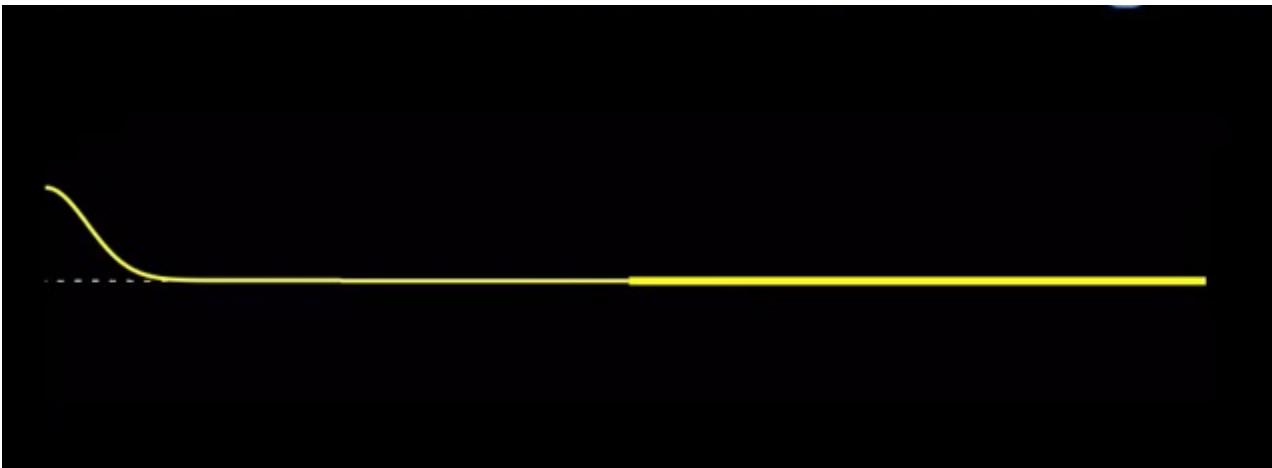
Joseph von Fraunhofer  
(1787-1826)

## 1.4 Interaction ondes-milieu de propagation



- Réflexion et réfraction
- Diffraction
- Diffusion

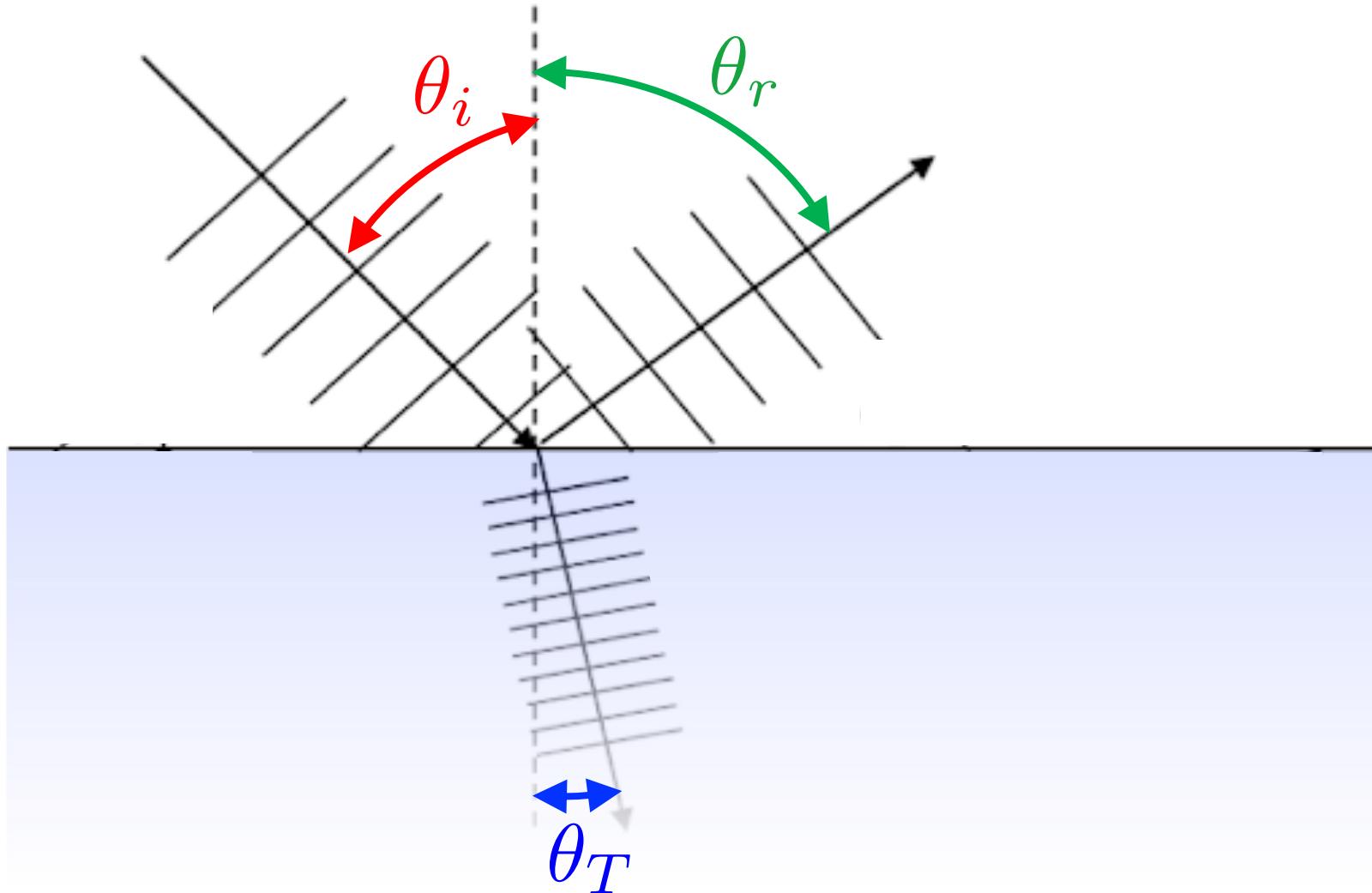
### 1.4.1.1 Réflexion et réfraction à la jonction de deux cordes



$$T = \frac{\xi_{0T}}{\xi_{0i}} = \frac{2\sqrt{\mu_1}}{\sqrt{\mu_1} + \sqrt{\mu_2}}$$

$$S = \frac{\xi_{0r}}{\xi_{0i}} = \frac{\sqrt{\mu_1} - \sqrt{\mu_2}}{\sqrt{\mu_1} + \sqrt{\mu_2}}$$

## 1.4.1.2 Ondes planes



$$\theta_i = \theta_r$$

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_T} = n_{21}$$

### 1.4.1.3 Principe de Fermat

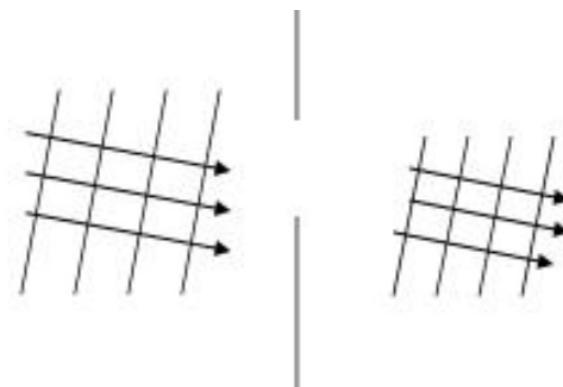
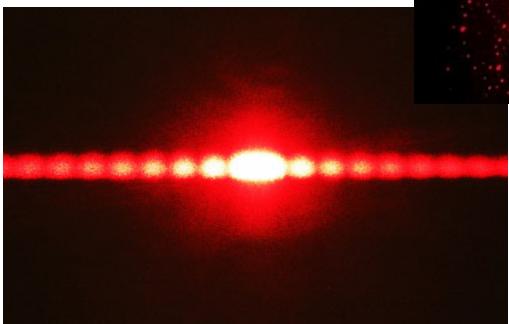
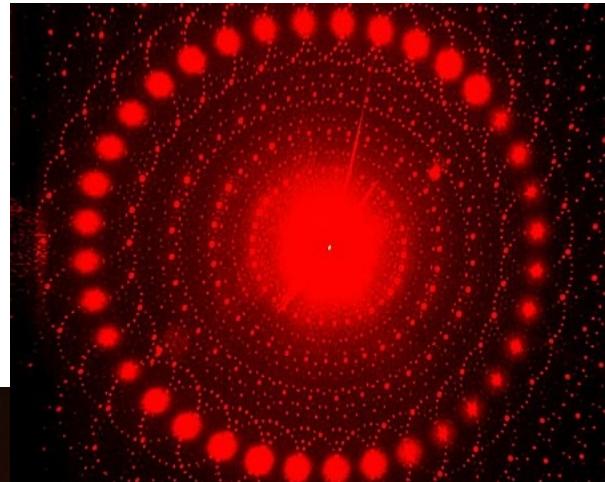
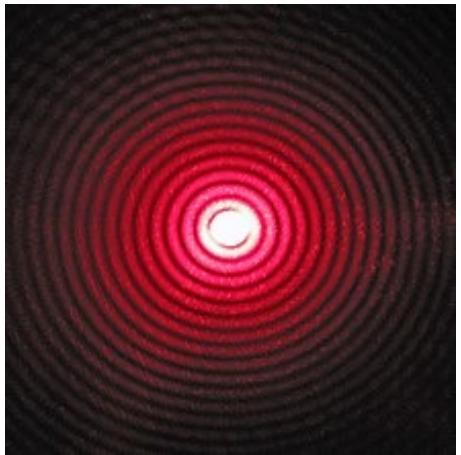
“... que la nature agit toujours par les moyens les plus aisés, c'est-à-dire ou par les lignes les plus courtes, lorsqu'elles n'emportent pas plus de temps, ou en tout cas par le temps le plus court, afin d'acourcir son travail et de venir plus tôt à bout de son operation. ”



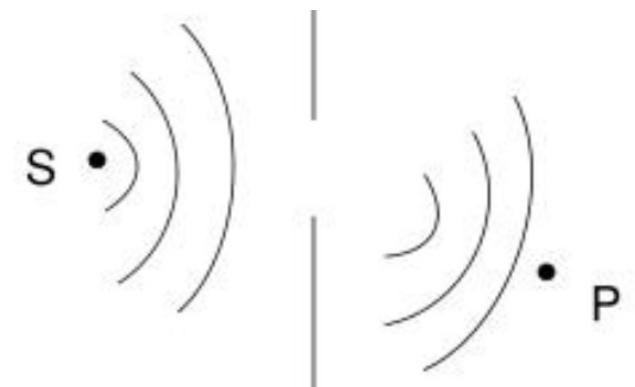
Pierre de Fermat  
(1607-1665)

*Lettre de M. de Fermat à M. de la Chambre,*  
1 janvier 1662

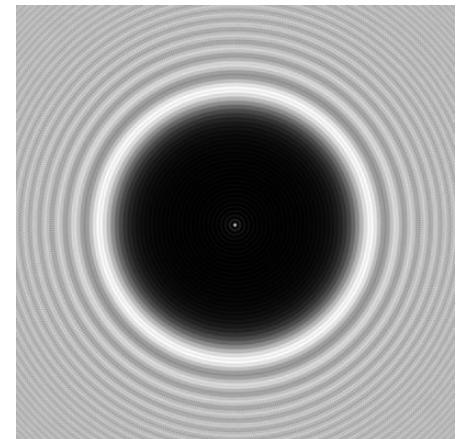
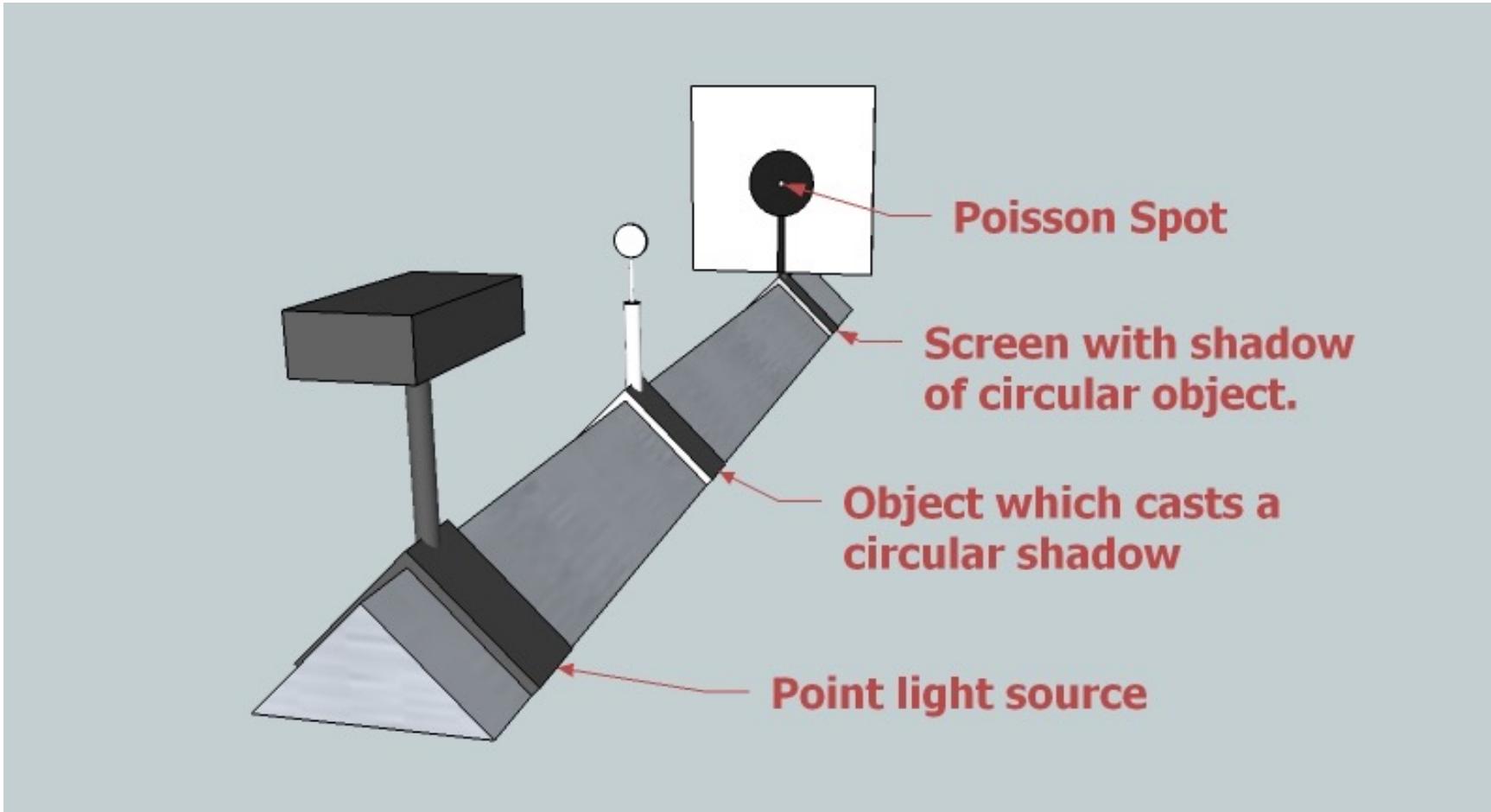
## 1.4.2 Diffraction



Diffraction de Fraunhofer



Diffraction de Fresnel



# Série 6

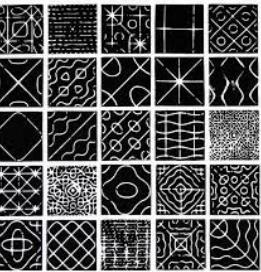
## Série 6 : Ondes stationnaires et diffraction

### 1 Figures de Chladni sur une plaque carrée

Les figures de Chladni sont des motifs élégants pouvant être observés sur une plaque en vibration. Celles-ci correspondent aux modes propres de vibration de la plaque. Quand certains de ces modes sont excités, la poudre placée sur la plaque se concentrera alors aux points correspondant aux nœuds des ondes stationnaires excitées par la vibration. On souhaite décrire un modèle simple de ces figures de Chladni. Pour ce faire, on considère une plaque rectangulaire de dimensions  $L_x$  et  $L_y$ . On va tout d'abord considérer que les vibrations respectent l'équation d'onde. La définition des conditions aux bords de la plaque n'est pas évidente. Par simplicité, on va considérer que la déformation principale de la plaque est une déformation sous forme de cisaillement. Pour ce type de déformation, la pente de la déformation doit être nulle au bord dans la direction perpendiculaire au bord, c'est-à-dire

$$\frac{\partial \psi}{\partial x}(0, y, t) = \frac{\partial \psi}{\partial x}(L_x, y, t) = \frac{\partial \psi}{\partial y}(x, 0, t) = \frac{\partial \psi}{\partial y}(x, L_y, t) = 0, \quad x \in [0, L_x], \quad y \in [0, L_y]. \quad (*)$$

- (a) En utilisant la méthode de séparation des variables, dériver les modes propres de la plaque.
- (b) Quels motifs de Chladni les modes propres trouvés donneraient-ils ? Commenter avec les résultats présentés ci-contre.



### 2 Diffraction par un trou circulaire

La diffraction par un trou circulaire produit ce qu'on appelle une tâche d'Airy. Cette tâche est notamment la cause d'une limite de résolution angulaire des instruments optiques. Dans cet exercice, on souhaite décrire la figure de diffraction produite par un trou circulaire de rayon  $R$ , illuminé par une onde plane incidente de longueur  $\lambda = 2\pi/k$ , placé à une distance  $d$  d'un écran

- (a) En supposant que, selon le principe de Huygens, chaque élément de surface du trou circulaire émet une onde sphérique d'amplitude  $\xi_0$ , montrer que l'amplitude totale de l'onde sur un point  $P$  de l'écran est donnée par :

$$\xi(X, Y) = \frac{\xi_0}{d} \exp(i(kd - \omega t)) \exp\left(ik \frac{X^2 + Y^2}{2d}\right) \int_{\text{trou}} \exp\left(-ik \frac{xX + yY}{d}\right) dx dy,$$

où  $(X, Y)$  et  $(x, y)$  sont, respectivement, les coordonnées du point  $P$  sur l'écran et d'un point sur la surface du trou. Faire les hypothèses  $x, y, X, Y \ll d$  (approximation de Fraunhofer),  $x \ll X$  et  $y \ll Y$  pour dériver ce résultat.

**Indication :** Commencer par exprimer  $\Delta r(x, y, X, Y) = \|MP\|$ , la distance entre le point  $P$  sur l'écran et  $M$ , un élément de surface  $dx dy$  de la fente circulaire.

- (b) En utilisant des coordonnées polaires,  $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$ , démontrer que l'expression de l'intensité moyenne est donnée par :

$$I(r) = I_0 \left( \frac{2J_1(krR/d)}{krR/d} \right)^2. \quad (\dagger)$$

**Indications :** Considérer des coordonnées polaires. Utiliser les identités trigonométriques suivantes :

$$2 \cos \theta \cos \phi = \cos(\theta - \phi) + \cos(\theta + \phi), \\ 2 \sin \theta \sin \phi = \cos(\theta - \phi) - \cos(\theta + \phi).$$

La fonction de Bessel d'ordre  $n$ ,  $J_n$ , est définie par l'intégrale suivante :

$$J_n(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta e^{-i(n\theta - x \sin \theta)},$$

et satisfait aux propriétés suivantes :

$$x^n J_n(x) = \int_0^x dy y^n J_{n-1}(y), \quad J_n(x \ll 1) \approx \frac{1}{n!} \left(\frac{x}{2}\right)^n.$$

L'équation (†) ci-dessus correspond à l'intensité d'une tâche d'Airy. Cette figure de diffraction est rencontrée dans les systèmes optiques possédant une géométrie circulaire et en limite le pouvoir de résolution angulaire.

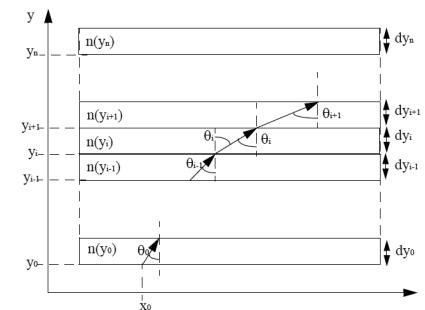
(c) Quelle condition entre  $D = 2R$ , le diamètre du trou, et  $\lambda$  est nécessaire à l'observation d'une figure de diffraction ?

**Indication :** Réécrire  $r$  en fonction de  $\varphi$ , l'angle entre le point  $P$  sur l'écran, le centre de la fente et le centre de l'écran. Le premier zéro de  $J_1(x)$  est donné par  $x_1 \approx 3.83$ .

- (d) On considère deux sources séparées d'un angle  $\vartheta \ll 1$  par rapport au trou, produisant chacune une tâche d'Airy sur l'écran, comme illustré sur la figure ci-dessus. Discuter des conditions sur l'angle  $\vartheta$  afin que les sources soient distinguables sur l'écran, c'est-à-dire que l'on puisse distinguer leurs tâches d'Airy respectives.

### 3 Trajectoire dans un milieu non homogène (revisée)

On considère une situation analogue à l'exercice 3, série 4. Un milieu non homogène possède un indice de réfraction variable  $n(y)$  le long de la direction  $y$ . Comme illustré sur la figure, un rayon de lumière entre dans le milieu. On note  $\theta$  l'angle entre la trajectoire du rayon et l'axe  $y$ .



- (a) Montrer que l'équation de la trajectoire du rayon est :

$$x = x(y) = x_0 + \int_{y_0}^y \frac{dy'}{\sqrt{n^2(y')/C^2 - 1}}, \quad (\ddagger)$$

où  $C$  est une constante à déterminer.

**Indication :** Imaginer que le milieu est stratifié, c.-à-d. qu'il est composé de nombreuses couches d'épaisseur  $dy$ , parallèles à  $x$ , dans lesquelles l'indice de réfraction est constant.

- (b) On souhaite calculer la trajectoire de la lumière pour un milieu où l'indice de réfraction est linéaire, c.-à-d.  $n(y) = n_0 + ay$ . On suppose le point de départ en  $x_0 = y_0 = 0$  et que la lumière est initialement parallèle à l'axe  $x$ . Donner une expression de la trajectoire  $y(x)$ . Calculer le rayon de courbure au point  $x_0 = y_0 = 0$ . Comparer ce résultat à celui de l'exercice 3, série 4.

**Indications :**  $d \cosh^{-1}(x)/dx = 1/\sqrt{x^2 - 1}$ . La formule du rayon de courbure pour une trajectoire  $y(x)$  est donnée par :

$$\rho(x) = \frac{(1 + (y'(x))^2)^{3/2}}{y''(x)}. \quad (\$)$$

Le phénomène de mirages est également dû à un indice de réfraction inhomogène dans les couches atmosphériques. L'indice de réfraction dépend de la pression, de la température et de l'humidité. Pour simplifier, on considère que l'indice de réfraction est donné par la relation  $n(y) = n_0 \sqrt{1 + ay}$ .

- (c) Dériver la forme générale de la trajectoire  $y(x)$  d'un rayon lumineux qui entre dans le milieu en  $x_0 = y_0 = 0$  avec un angle  $\theta_0 \in ]0, \pi[$ .

- (d) En quoi cette trajectoire permet-elle d'expliquer le phénomène de mirage ? Considérer pour cela une source lumineuse en  $(x_0, y_0) = (0, 0)$  qu'un observateur regarde depuis  $(x, y) = (L, 0)$ . Discuter l'influence du signe du paramètre  $a$  sur le type de mirage observé.

challenge

- (e) Le principe de Fermat affirme que la trajectoire suivie par la lumière entre deux points  $A$  et  $B$  est telle que le temps de trajet soit minimal. Montrer que minimiser le chemin optique  $L_{AB}$  est équivalent à minimiser le temps de trajet,

$$L_{AB} = \int_A^B n ds,$$

où  $n$  est l'indice de réfraction du milieu. En dériver l'équation (†) pour la trajectoire.

**Indication :** Paramétriser la trajectoire du rayon lumineux comme  $x(y)$  plutôt que  $y(x)$ .