Université Joseph Fourier, Grenoble – 2010/2011

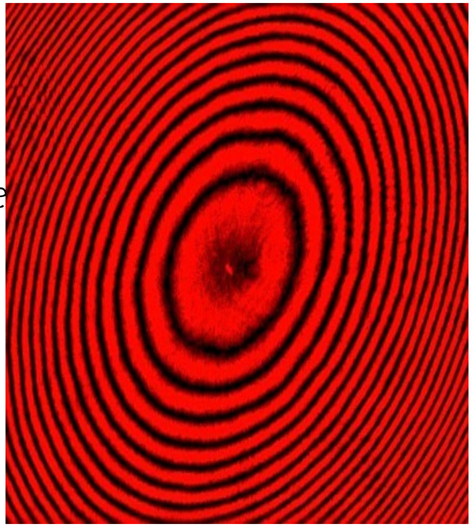
Optique Ondulatoire - IUT1 Mesures Physiques

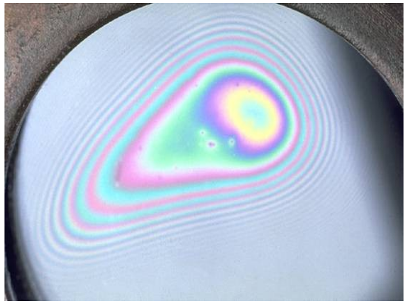
III. Interferences

2. Historique

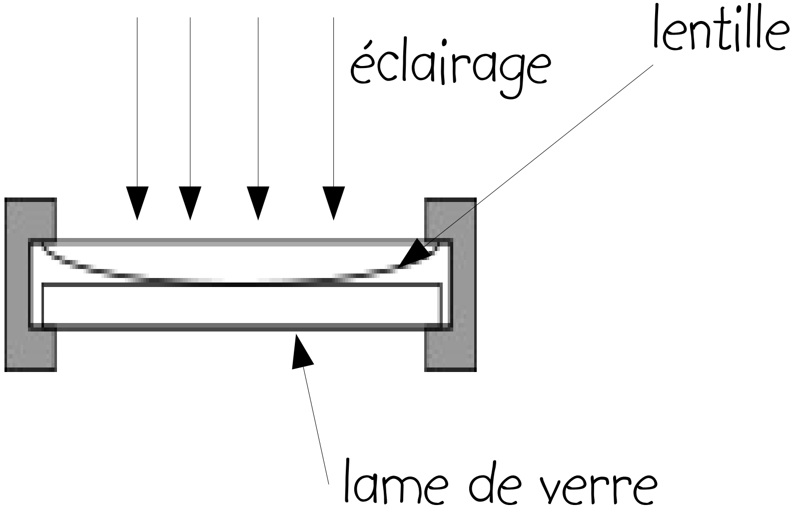
Les premières observations d'interférences semblent avoir été décrites par Robert Boyle (1627-1691) en 1663. C'est ce que l'on appelle aujourd'hui les anneaux de Newton. Ils sont obtenus en éclairant une lentille convexe posée sur une lame épaisse de verre.

Anneaux de Newton en lumière laser rouge

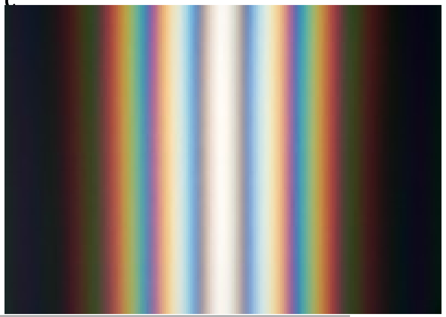




Anneaux de Newton en lumière du jour.



Mais ce sont les expériences des deux fentes de Young (1773-1829) qui sont restées comme les plus célèbres observations d'interférences, même si leur interprétation complète fait appel à la diffraction que nous verrons plus tard. Réalisées en 1802, elles marquent le véritable début de l'optique ondulatoire.



3. Interférences : définition

Rappel : l'intensité d'une onde est la quantité d'énergie qu'elle transporte par unité de temps et par unité de surface (W/m^2).

Les récepteurs photosensibles des yeux intègrent (somment) l'intensité lumineuse sur un temps compris entre 10 ms (cônes) et 100 ms (bâtonnets).
Les photodétecteurs rapides ont un temps de réponse de l'ordre de la nanoseconde (10^{-9} s). Or il y a environ un million de périodes d'une onde lumineuse dans 1 ns.
Ce qui signifie que l'on mesure ou voit l'intensité moyenne sur une période (car l'onde est périodique) :

$$I(M) = \langle I(M,t) \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T I(t,M)\,dt$$

Dans le premier chapitre, nous avons montré que : $I(M)=\frac{1}{2}\epsilon_0 c\, n |\vec{E}|^2$

On dit que des ondes interfèrent si l'intensité moyenne résultant de leur somme est différente de la somme de leurs intensités moyennes individuelles, c.-à-d. :

$$I(M) \neq I_1(M)+I_2(M)+\ldots+I_N(M)$$

4. Interférences : d'ondes multiples

Principe de superposition : La somme de n solutions de l'équation de propagation d'ondes est elle-même solution de cette même équation.

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \vec{E}_1(\vec{r},t)+\vec{E}_2(\vec{r},t)+\ldots+\vec{E}_n(\vec{r},t)$$

champ électrique de l'onde 1

$$I(M) \propto \langle |\vec{E}(\vec{r},t)|^2 \rangle$$

Moyenne sur une période

complexe conjugué

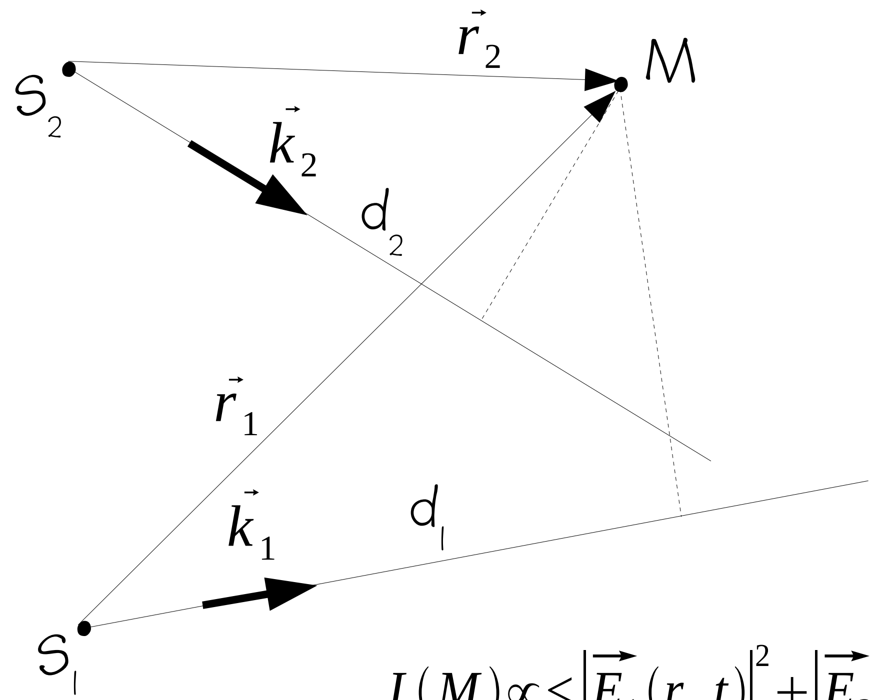
$$|\vec{E}|^2 = (\vec{E}_1(\vec{r},t)+\vec{E}_2(\vec{r},t)+\ldots+\vec{E}_n(\vec{r},t)) \cdot (\vec{E}_1^*(\vec{r},t)+\vec{E}_2^*(\vec{r},t)+\ldots+\vec{E}_n^*(\vec{r},t))$$

$$= |\vec{E}_1(\vec{r},t)|^2+|\vec{E}_2(\vec{r},t)|^2+\ldots+|\vec{E}_n(\vec{r},t)|^2 + \vec{E}_1(\vec{r},t)\cdot\vec{E}_2^*(\vec{r},t)+\vec{E}_2(\vec{r},t)\cdot\vec{E}_1^*(\vec{r},t)+\ldots$$

termes d'interférences

Il est difficile d'aller au-delà de cette expression pour le cas général, mais on peut noter que l'intensité de la somme n'est pas nécessairement la somme des intensités.

5. Interférences à deux ondes planes : conditions d'interférences



$$\vec{E}_1(\vec{r},t) = \vec{E}_{01} e^{i(\vec{k}_1\cdot\vec{r}_1-\omega_1 t+\Phi_1)}$$

$$\vec{E}_2(\vec{r},t) = \vec{E}_{02} e^{i(\vec{k}_2\cdot\vec{r}_2-\omega_2 t+\Phi_2)}$$

$$I(M) \propto <\left|\vec{E}_1(\vec{r}_{1,}t)+\vec{E}_2(\vec{r}_{2,}t)\right|^2>$$

$$I(M) \propto <\left|\vec{E}_1(r,t)\right|^2+\left|\vec{E}_2(r,t)\right|^2+\vec{E}_1(\vec{r}_{1,}t)\cdot\vec{E}_2(\vec{r}_{2,}t)^*+\vec{E}_2(\vec{r}_{2,}t)\cdot\vec{E}_1(\vec{r}_{1,}t)^*>$$

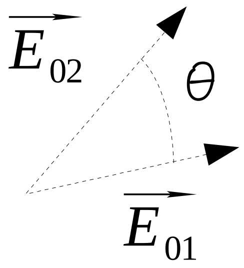
termes d'interférence

$$\begin{aligned}\vec{E}_1(\vec{r}_{1,}t)\cdot\vec{E}_2(\vec{r}_{2,}t)^*+\vec{E}_2(\vec{r}_{2,}t)\cdot\vec{E}_1(\vec{r}_{1,}t)^* &= \vec{E}_{01}\cdot\vec{E}_{02}\left(e^{i(\vec{k}_1\cdot\vec{r}_1-\omega_1 t+\Phi_1)}e^{-i(\vec{k}_2\cdot\vec{r}_2-\omega_2 t+\Phi_2)}+e^{i(\vec{k}_2\cdot\vec{r}_2-\omega_2 t+\Phi_2)}e^{-i(\vec{k}_1\cdot\vec{r}_1-\omega_1 t+\Phi_1)}\right)\\ &= \vec{E}_{01}\cdot\vec{E}_{02}\cdot 2\cos\left[(\vec{k}_1\cdot\vec{r}_1-\vec{k}_2\cdot\vec{r}_2)+(\omega_1-\omega_2)t+(\Phi_1-\Phi_2)\right]\end{aligned}$$

6. Interférences à deux ondes planes : conditions d'interférences

$$\vec{E}_1(\vec{r}_{1,}t)\cdot\vec{E}_2(\vec{r}_{2,}t)^* + \vec{E}_2(\vec{r}_{2,}t)\cdot\vec{E}_1(\vec{r}_{1,}t)^* \;=\; \vec{E}_{01}\cdot\vec{E}_{02}\cdot 2\cos[(\vec{k}_1\cdot\vec{r}_1-\vec{k}_2\cdot\vec{r}_2)+(\omega_1-\omega_2)t+(\Phi_1-\Phi_2)]$$

On supposera que ces deux ondes sont linéairement polarisées :



$$\vec{E}_{01}\cdot\vec{E}_{02} = E_{01}\,E_{02}\cos\theta$$

Moyenne temporelle

$$<\vec{E}_1(\vec{r}_{1,}t)\cdot\vec{E}_2(\vec{r}_{2,}t)^* + \vec{E}_2(\vec{r}_{2,}t)\cdot\vec{E}_1(\vec{r}_{1,}t)^*> \;=\; 2E_{01}E_{02}\cos\theta\cdot<\cos[(\vec{k}_1\cdot\vec{r}_1-\vec{k}_2\cdot\vec{r}_2)+(\omega_1-\omega_2)t+(\Phi_1-\Phi_2)]>$$

Le terme d'interférence peut être non-nul si et seulement si :

$$\theta \neq \frac{\pi}{2}$$

$$\omega_1 = \omega_2$$

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \mathrm{cte}$$

Si les ondes issues de S_1 et S_2 satisfont ces conditions, elles sont dites cohérentes .

7. Interférences à deux ondes planes cohérentes :

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega \Rightarrow k_1 = k_2 = \frac{2\pi n}{\lambda_0}$$

indice optique du milieu

longueur d'onde dans le vide

$\theta = 0$, on suppose de plus que les ondes ont la même polarisation

$$< \vec{E}_1(\vec{r}_{1,} t) \cdot \vec{E}_2(\vec{r}_{2,} t)^* + \vec{E}_2(\vec{r}_{2,} t) \cdot \vec{E}_1(\vec{r}_{1,} t)^* > \; = \; 2 E_{01} E_{02} \cdot \cos[(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2) + (\Phi_1 - \Phi_2)]$$

$$= \; 2 E_{01} E_{02} \cdot \cos[\frac{2\pi n}{\lambda_0}(d_1 - d_2) + (\Phi_1 - \Phi_2)]$$

On obtient finalement :

différence de phases

$$I(M) = I_1(M) + I_2(M) + 2\sqrt{I_1(M) I_2(M)} \; \cos(\frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta \; + \; \delta\Phi)$$

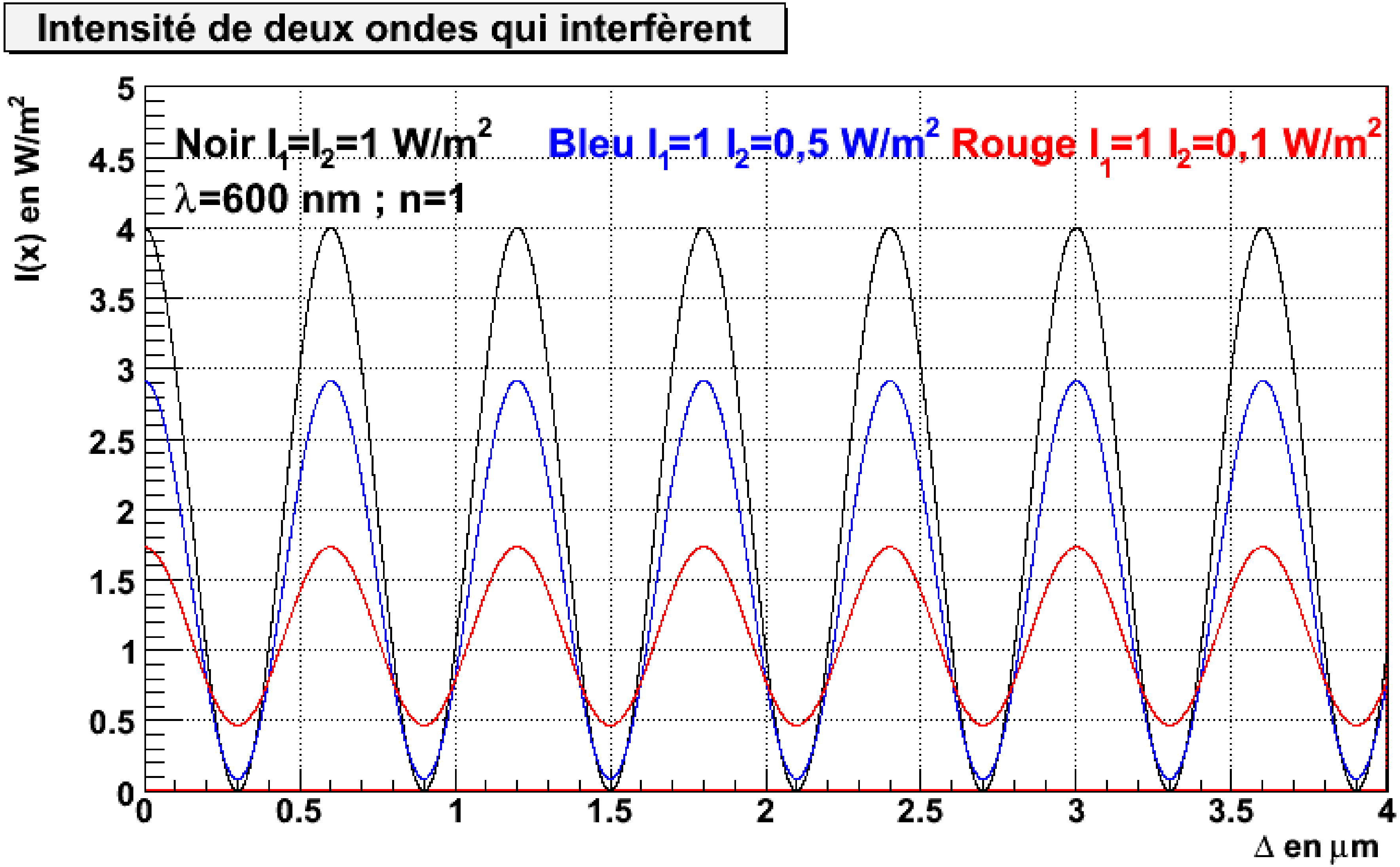
$$\Delta = n(d_1 - d_2)$$

différence de marche optique

On définit le contraste de franges par : $C = \frac{(I_{max} - I_{min})}{(I_{max} + I_{min})}$

Si $I_1 = I_2$, C=1 . Si $I_1 \ll I_2$, $C \approx 0$.

8. Interférences à deux ondes planes cohérentes :



9. Types d'interférences à deux ondes :

En pratique les deux faisceaux qui interfèrent doivent être issus d'une même source car cela garantit que les fréquences sont identiques et que la différence de phases est constante.

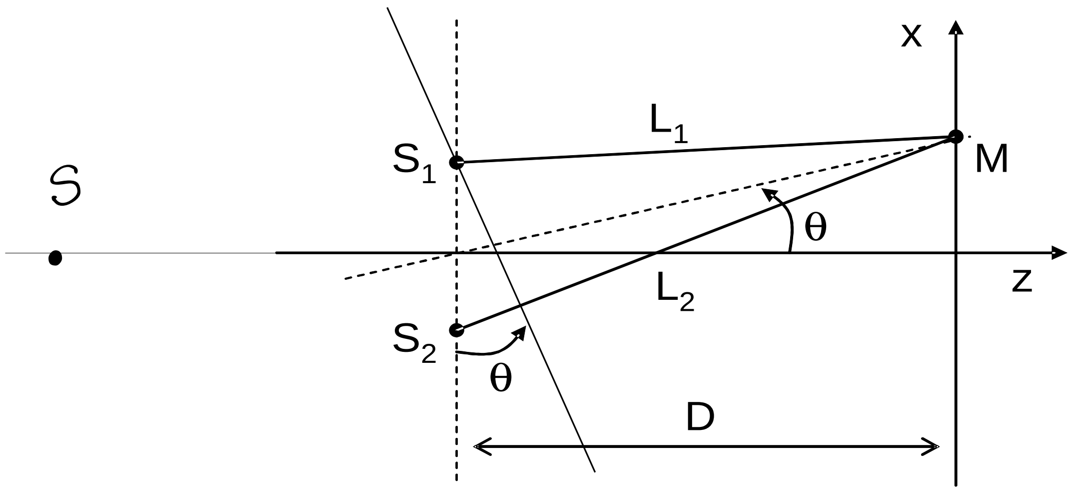
En pratique on distingue :

- les interférences par division d'un front d'onde (fentes de Young)

- les interférences par division d'amplitude (lames minces, Michelson, Fabry-Pérot ...)

Il est plus commode de travailler avec une lumière monochromatique issue d'un LASER.

10. Application : franges de Young



S éclaire les fentes S_1 et S_2 par une onde plane. S_1 et S_2 - supposées extrêmement fines - réémettent cette lumière sous la forme de deux ondes sphériques quasi planes si $D \gg S_1S_2$.

Les polarisations sont identiques.

$$I(M)=I_1(M)+I_2(M)+2\sqrt{I_1(M)I_2(M)}\ \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\ +\ \delta\Phi\right)$$

$I_1=I_2=I_0$ $\qquad$ $\delta\Phi=0$ $\quad$ car c'est le même front d'onde qui est divisé sur S_1 et S_2

$$\Delta=L_2-L_1\ \simeq\ S_1S_2\ \sin\theta\ \simeq\ S_1S_2\ \tan\theta\ \simeq\ S_1S_2\ \frac{x}{D}$$ si $x \ll D$

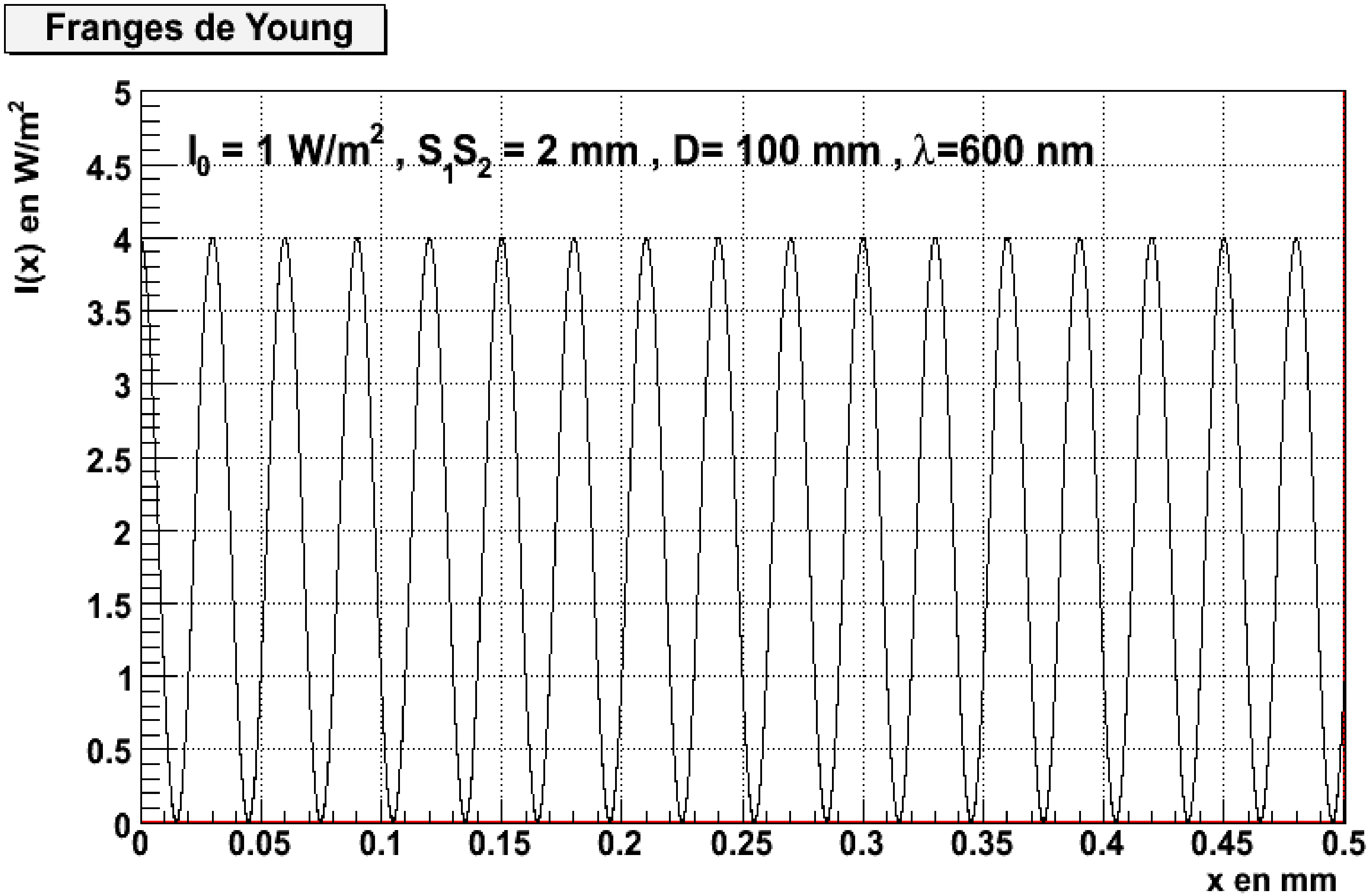
$$I(x)=2I_0\left(1+\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\ S_1S_2\ \frac{x}{D}\right)\right)$$

franges brillantes (max.) : $x=m\dfrac{\lambda D}{S_1S_2}$

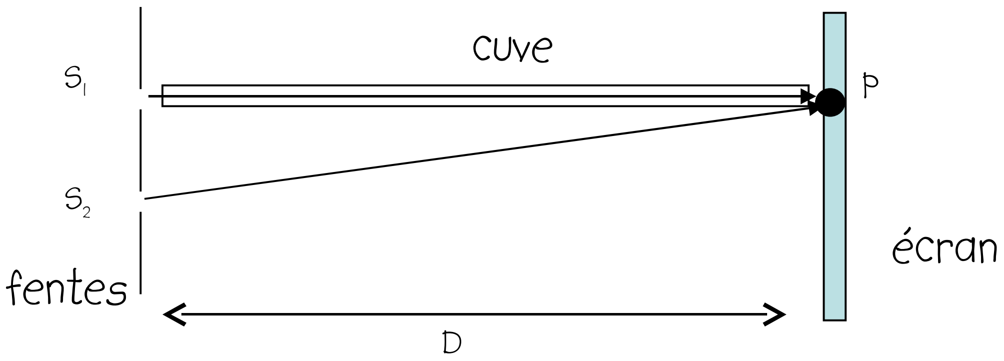
Interfranges : $IF=\dfrac{\lambda D}{S_1S_2}$

franges noires (min.) : $x=\dfrac{(2m+1)}{2}\dfrac{\lambda D}{S_1S_2}$

II . Application : franges de Young



EXO: Mesure de l'indice de l'air:

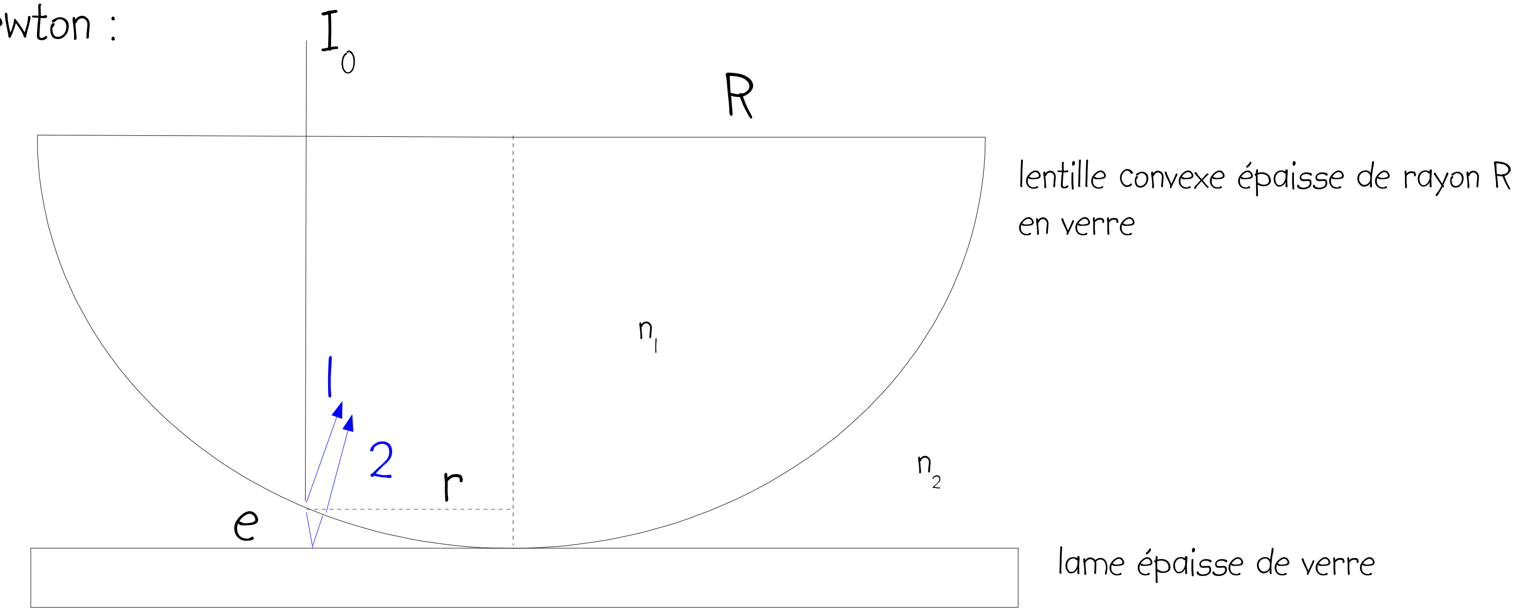


1-En utilisant λ=633nm et D=1m on obtient, lorsqu'on a fait le vide dans la cuve, une interfrange de 42,2μm. Déterminez la séparation entre les fentes S_1S_2.

2-On se place sur une frange brillante au voisinage de P, on introduit de l'air dans la cuve à P_{atm} et on voit défiler des franges. L'équilibre est atteint sur une frange noire, après passage de 472 franges brillantes. Déterminez l'indice de l'air (on considère $S_1S_2 \ll D$).

EXO: anneaux de Newton :

Une onde plane d'intensité I_0 de longueur d'onde 633 nm donne naissance - en incidence normale - aux deux ondes réfléchies 1 et 2 qui interfèrent avant de ressortir de la lentille.



1) Quelles sont en fonction de I_0 les intensités des ondes 1 et 2 lorsqu'elles sortent de la lentille ?

2) Trouver l'expression de la différence de marche optique $\Delta=2e$ entre 1 et 2 en fonction de r et R ?

3) Quelle est la valeur de leur différence de phases ?

4) Déterminer les rayons des anneaux noirs

13. Pour en savoir plus :

- Modern Optics, Robert Guenther, John Wiley & sons
- Optique, Marie May, Anne-Marie Cazabat , Dunod
- Optique, Georges Bruhat, Masson