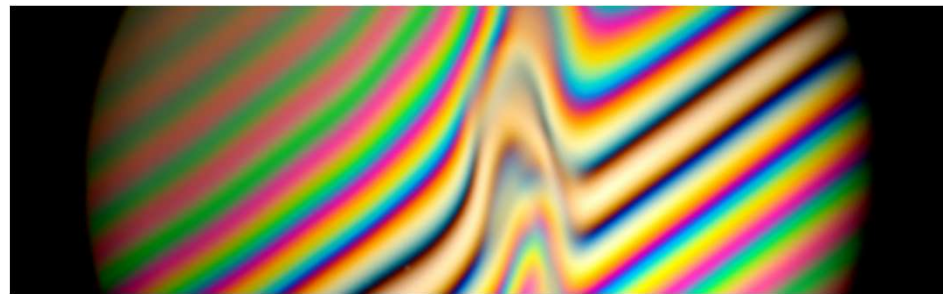


Optique Ondulatoire

Alternant.e.s BUT2
Mesures Physiques – 2026/2027



<https://ecampus.paris-saclay.fr/>

- Cours-TD et cours-TP : elodie.bidal@univ-grenoble-alpes.fr
- TP : irene.ventrillard@univ-grenoble-alpes.fr

Plan du cours

- Ch1 : Les ondes
- Ch2 : Interférences à deux ondes
- Ch3 : Interférences à ondes multiples (réseaux)
- Ch4 : Diffraction



Bibliographie

- Très nombreuses références dont :
 - *Optique Ondulatoire*, collection *H Prépa*, 2^{ième} année, Hachette
 - Physique PC*/PC, collection *Prépas sciences*, Ellipses
 - *Optique*, Hecht, Pearson education
 - Richard Taillet, *Optique physique propagation de la lumière*, De Boeck
- Sites Web (animations, exos, cours, pas seulement optique) :
 - UGA : L2-Phi-234 et L2-Phi-244 (G.Méjean, S. Zanier)
 - <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/>

Organisation de l'enseignement

- Cours/TD : 10 x 2h
- TP – TP/cours – TP/TD (en salle de TP) :
 - 3 x 2h
 - 2 x 4h
 - 1 examen pratique de 2h
- Support de cours : transparents à trous
Pas complets : prendre des notes !
- TD : Travail en groupe, pas de correction au tableau, 1 CR par groupe, correction détaillée dans Chamilo
 - Polys cours/TD/TP
 - Corrections détaillées des exercices

Etre actif durant les séances !

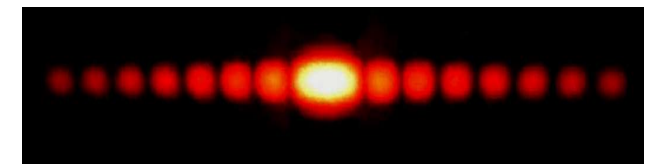
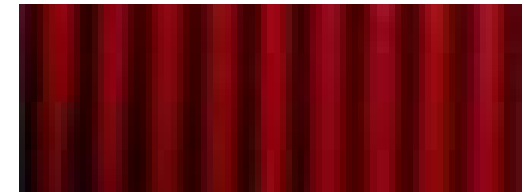
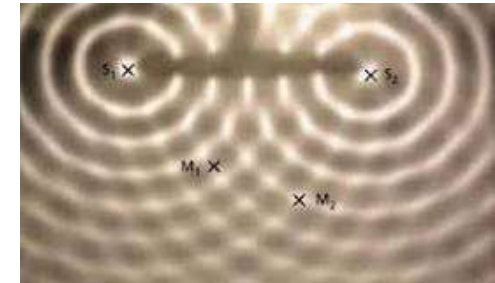


<http://chamilo.univ-grenoble-alpes.fr>

Notion abordées en Terminale

Extrait du programme :

Interférences de deux ondes, conditions d'observation. Interférences constructives, Interférences destructives.	Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes. Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène. <i>Tester les conditions d'interférences constructives ou destructives à la surface de l'eau dans le cas de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase.</i>
Interférences de deux ondes lumineuses, différence de chemin optique, conditions d'interférences constructives ou destructives.	Prévoir les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous d'Young, l'expression linéarisée de la différence de chemin optique étant donnée. Établir l'expression de l'interfrange. <i>Exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas des interférences de deux ondes lumineuses, en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.</i>
Diffraction d'une onde par une ouverture : conditions d'observation et caractéristiques. Angle caractéristique de diffraction.	Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes. Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture. <i>Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées. Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction dans le cas d'une onde lumineuse diffractée par une fente rectangulaire en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.</i>

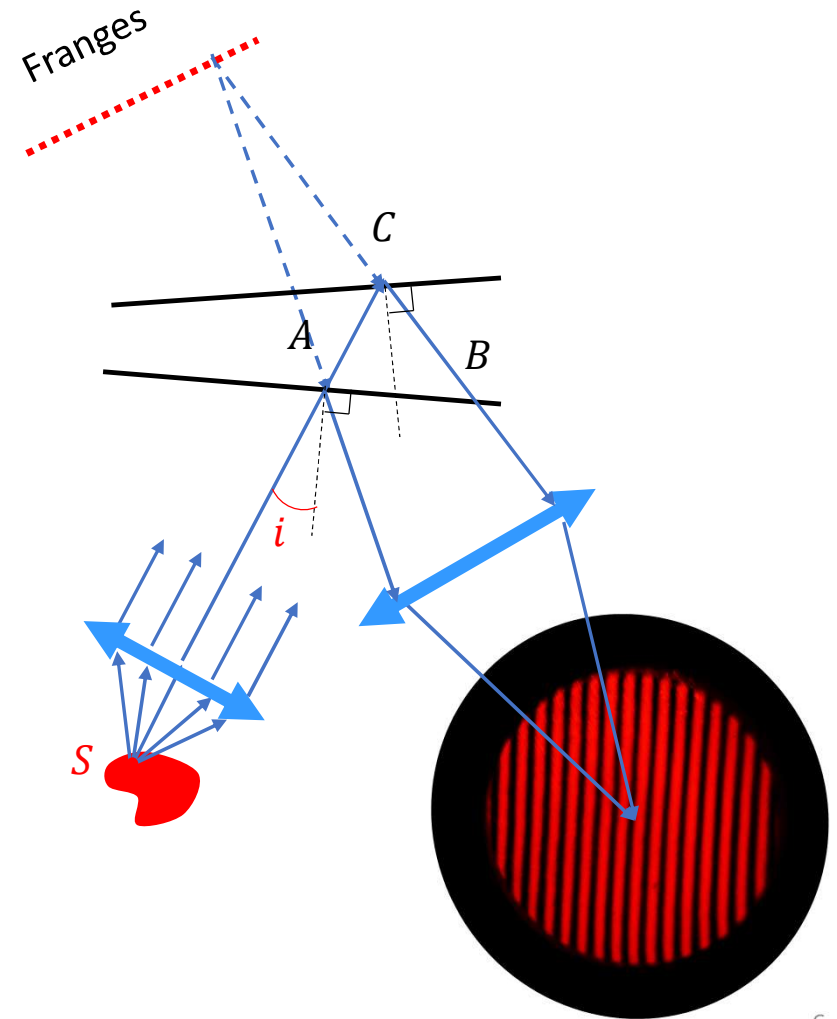


Pré-requis IUT

- **Systèmes optiques (Ressource et SAE S2)**

- Ondes : longueur d'onde, célérité, indice de réfraction
- Propagation des rayons lumineux : dispersion, réflexion, réfraction, dioptre, loi de Snell-Descartes
- Systèmes optiques élémentaires : miroirs, lentilles minces, formules de conjugaison, grandissement

Exemple :



Pré-requis IUT

- Outils mathématiques (S1) :



- Développements limités :

- $\sin(x) \sim$
- $\tan(x) \sim$
- $\sqrt{1+x} \sim$
- $(1+x)^\alpha \sim$

- Intégration : primitives, intégrale d'une fonction continue.

- Fonctions trigonométriques : sinus, cosinus, tangente

- $\cos(x+\pi/2) =$
- valeurs de x telles que $\cos(x) = 1$?
- représentation graphique de $\cos^2(x)$

- $\int \sin(x) dx =$

- $\int_T^{T+2\pi} \cos(\omega t + \varphi) dt =$

- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} =$

Poly de TD : Exercices de révisions de trigo
=> pour séance prochaine

Formulaire de trigonométrie

- Fourni en DS, uniquement le formulaire de linéarisation :

$$\begin{aligned}\cos a \cos b &= \frac{1}{2} [\cos(a+b) + \cos(a-b)] \\ \cos a \sin b &= \frac{1}{2} [\sin(a+b) - \sin(a-b)] \\ \sin a \sin b &= \frac{1}{2} [\cos(a-b) - \cos(a+b)] \\ \cos p + \cos q &= 2 \cos\left(\frac{p+q}{2}\right) \cos\left(\frac{p-q}{2}\right) & \sin p + \sin q &= 2 \sin\left(\frac{p+q}{2}\right) \cos\left(\frac{p-q}{2}\right) \\ \cos p - \cos q &= -2 \sin\left(\frac{p+q}{2}\right) \sin\left(\frac{p-q}{2}\right) & \sin p - \sin q &= 2 \sin\left(\frac{p-q}{2}\right) \cos\left(\frac{p+q}{2}\right)\end{aligned}$$

- Le reste à connaître !

Evaluations

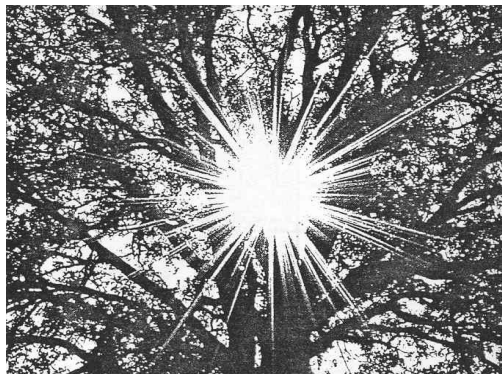
Ressources R3.05 : 2xDS + 1xCC

SAE3.02 : 2/3xExam TP + 1/3xCR

- DS (1h30) :
 - Sans documents, avec calculatrice
 - Formulaire de trigonométrie de linéarisation fourni
- CC : tests (~4, 10-20 min)
 - Questions et démonstrations traitées en cours
 - Calculs effectués en TD
 - Sans calculatrice, pas de rattrapage (si abs injustifiée => zéro)
- TP : Comptes-Rendus

Travail perso nécessaire !

Quizz: que permet d'expliquer l'optique géométrique?



Chapitre 1 :

Les ondes lumineuses

- Qu'est ce qu'une onde ?
- Comment détecter une onde lumineuse ?
- Objectif : définir un formalisme pour décrire une onde lumineuse



palmes.wordpress.com



fr.123rf.com

1. Optique : quel type d'onde ?

1.1. Formalisme mathématique

Expression d'une onde qui se propage :

- temporellement : $E(t) =$
- spatialement : $E(z) =$
- spatialement et temporellement :

$E(z, t) =$

$=$

Vecteur d'onde :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Pulsation :

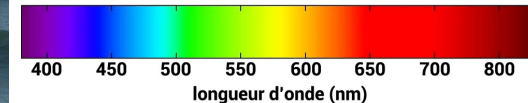
$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

hauteur de la vague
= amplitude E_0

sens de l'oscillation
= polarisation $\vec{E}$



distance entre les vagues
= longueur d'onde λ



1.2. Equation d'onde

$$\Delta E - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

Variation spatiale

Variation temporelle

- “v” est la vitesse de l’onde
- Δ = Laplacien, à 1 D : $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

- Relation entre l’espace et le temps
- Solution en coordonnées sphériques :

$$E(r, t) =$$

« Onde Sphérique Monochromatique »

- Solutions en coordonnées cartésiennes (à démontrer) :

$$E(z, t) =$$



« Onde Plane Progressive Monochromatique » (OPPM)

Dans un plan perpendiculaire à z , E est constant à un instant t donné.

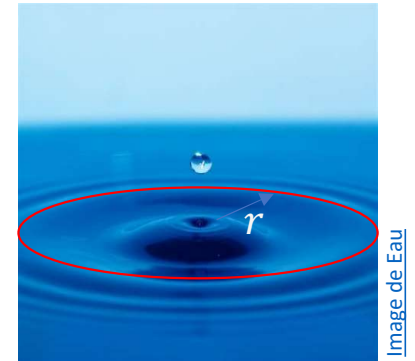
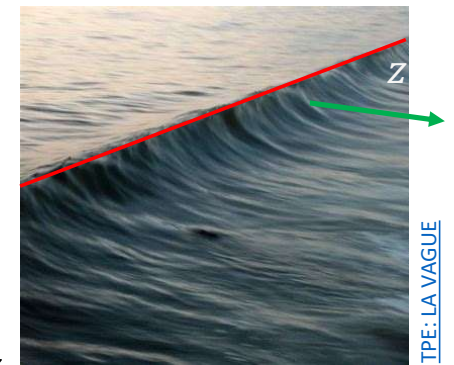


Image de Eau



TPE: LA VAGUE

1.3. Relation de dispersion

- Déduite de l'équation d'onde :

$$\omega = v k$$

$\Leftrightarrow$

$$\lambda =$$

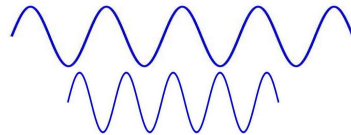
=> Relation entre la périodicité spatiale et temporelle

- Effet de l'indice de refraction sur la longueur d'onde :

$$n = \frac{c}{v}$$

Démontrer que :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$



- λ_0 Longueur d'onde dans le vide
- λ Longueur d'onde dans un milieu d'indice n

=> Modification de la vitesse et de la de l'onde

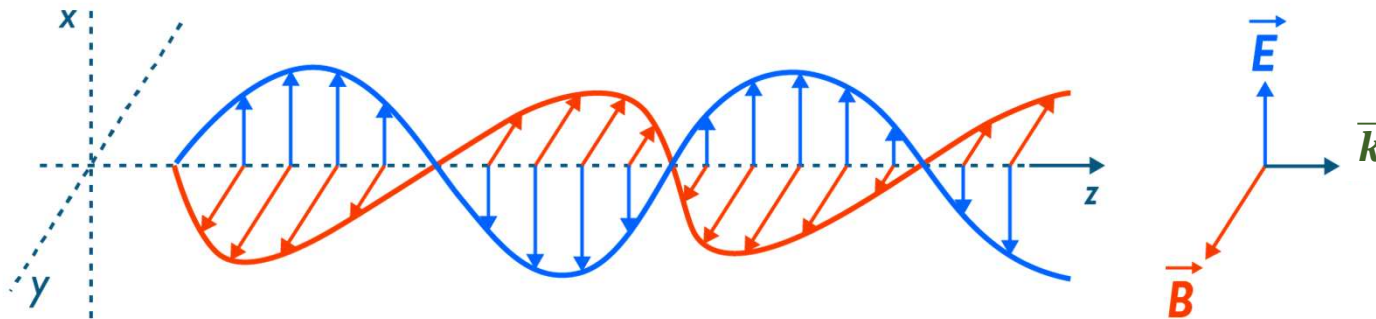
Application : Un baigneur a un maillot de bain rouge. Quel est la longueur d'onde de ce maillot dans l'eau ? A quelle couleur est-ce que cela correspond ?



1.4. Onde électromagnétique

- Champs électrique et magnétique couplés :
[Animation \(eduMedia\)](#)
$$\vec{B} = \frac{1}{\omega} \vec{k} \wedge \vec{E} = \frac{n}{c} \vec{e}_z \wedge \vec{E}$$

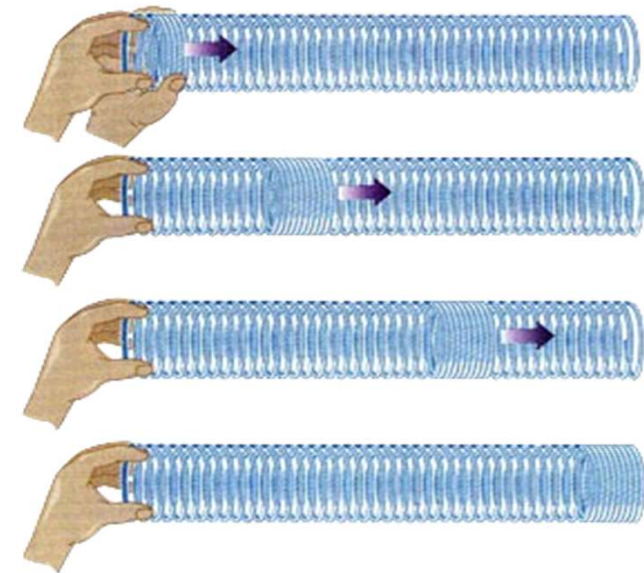
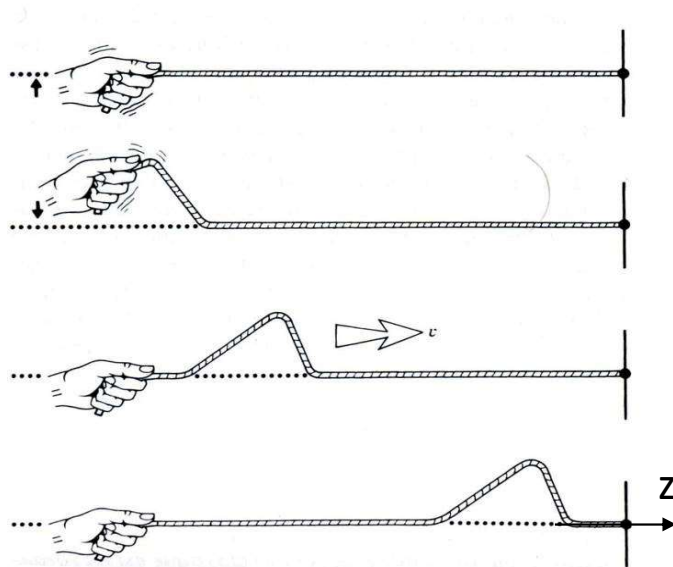
(cf éq. Maxwell)



© SCHOOLMOUV

- Le vecteur d'onde est dans la direction de propagation (z)
- $\vec{E}$, $\vec{B}$ et $\vec{k}$ sont orthogonaux
- Onde transverse

1.5. Onde transverse et Onde longitudinale



Onde transverse : Signal perpendiculaire à l'axe de propagation.

Onde longitudinale : signal parallèle à l'axe de propagation.

Onde progressive et Onde transversale (EduMedia)

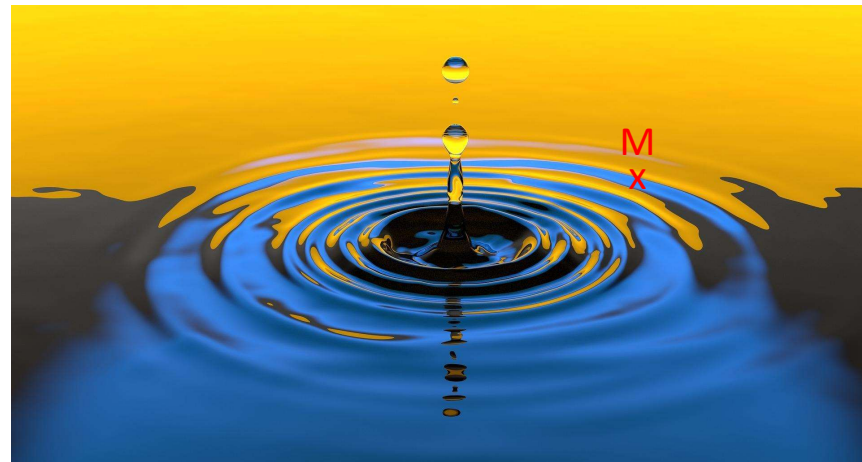
2. Phase de l'onde

2.1. Définition et importance

$$E(z, t) = E_0 \cos[\underbrace{\omega t \pm kz + \phi_0}_{\text{Phase : } \phi(t, z)}]$$

ϕ_0 :

Le signal en M dépend de la phase : liée au déphasage (au niveau de la source), à la distance de propagation et au temps.

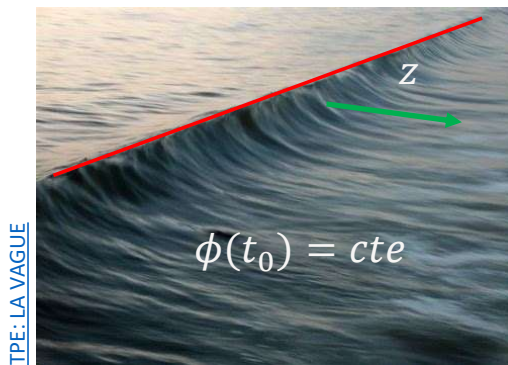


2.2 Front d'onde

- Définition : ensemble des points ayant une même phase

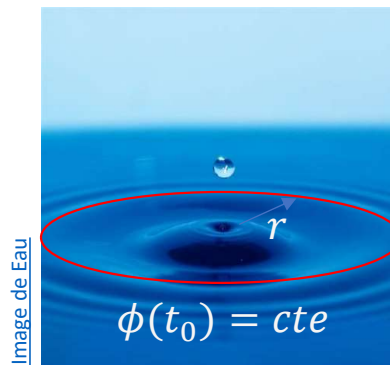
Onde plane :

$$\phi = \omega t - kz + \phi_0$$



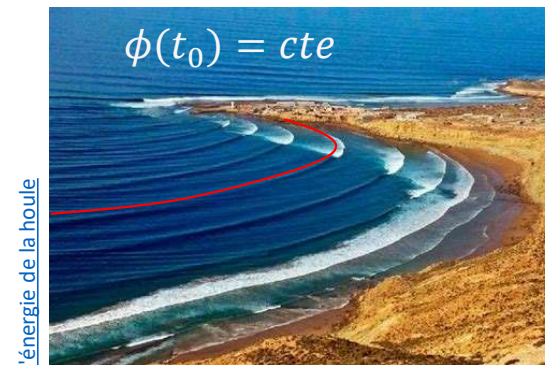
Onde sphérique :

$$\phi = \omega t - kr + \phi_0$$



Onde quelconque :

$$\phi = ?$$



2.3. Vitesse et sens de propagation

- La propagation est définie par le déplacement du front d'onde
- Soit le front d'onde d'une OPPM telle que :

$$\phi(t, z) = \omega t - kz + \phi_0 = Cste_1$$

$$\Rightarrow z = \frac{\omega}{k} t + Cste_2$$

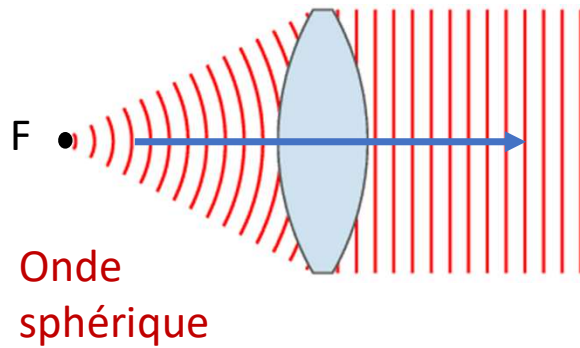
(on retrouve la vitesse $v = \frac{\omega}{k}$)

Quand le temps augmente, z augmente $\Rightarrow$ il s'agit d'une onde qui se déplace vers les z

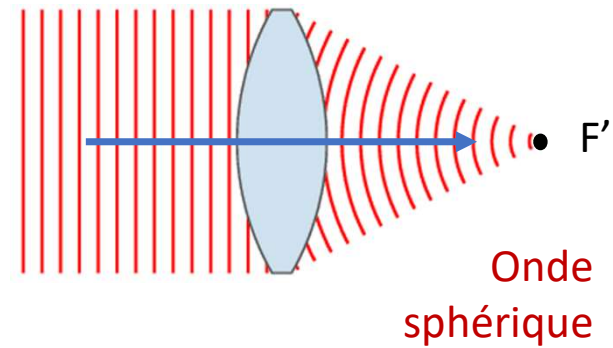
- Par analogie, une OPPM ayant une phase $\phi(t, z) = \omega t + kz + \phi_0$ se déplace vers les z

2.4. Effet d'une lentille

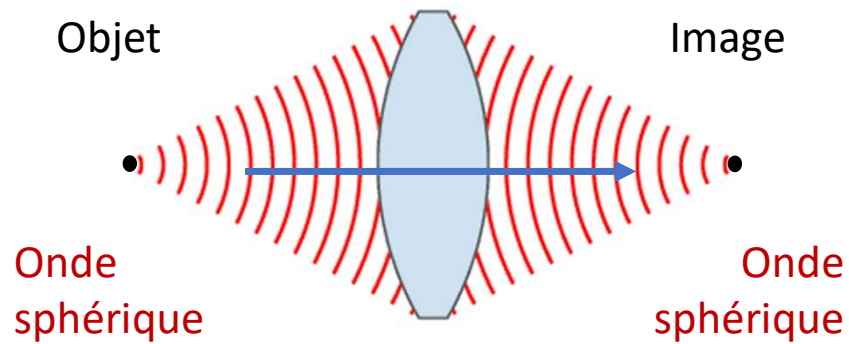
Source/Objet



Image



Objet



3. Détection de la lumière

- Quels instruments ?

-

- Quels temps de réponse ?

-

- Quelle est la grandeur physique détectée?



– Période d'oscillation d'une onde visible :

Exemple : $\lambda = 600 \text{ nm} \Rightarrow f = \text{}$, $T = \text{}$

=> un capteur mesure uniquement la du flux énergétique

3.1. Moyenne temporelle

- Définition pour une fonction $f(t)$ de période T :

$$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt$$

Notation : $\langle \rangle$ pour « moyenne temporelle »

- Propriétés :

$$\langle f(t) + g(t) \rangle =$$

$$\langle f(t) \times g(t) \rangle =$$



- $\langle \cos(t) \rangle =$

- Est-ce que l'énergie détectée est proportionnelle à $\langle E(t) \rangle$?

3.2. Intensité lumineuse

- L'énergie est proportionnelle à $\epsilon(z, t)$ (cf eq. Maxwell) :

$$\epsilon(z, t) = \epsilon_0 n c \times E^2(z, t)$$

n : indice du milieu

ϵ_0 : permittivité diélectrique du vide ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m)

- Détecteurs sensibles uniquement à la moyenne temporelle.
- Pour simplifier les notations, on étudiera l'intensité lumineuse qu'on appellera aussi de manière abusive « intensité » :

$$I(z) = \langle E^2(z, t) \rangle$$

- Unités de l'intensité lumineuse ?

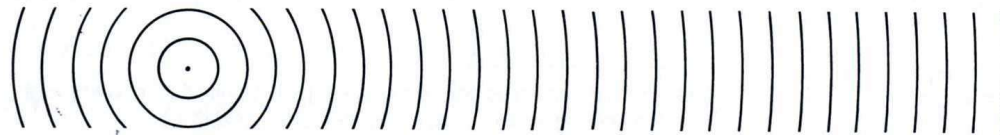
$$\langle \cos^2(t) \rangle =$$

OPPM : un modèle réaliste ?

- Est-ce qu'une onde peut être rigoureusement une OPPM ?

- Exemples :

- Source ponctuelle



- Faisceau laser collimaté



BILAN du Chapitre 1 :

Les ondes lumineuses

Savoirs :

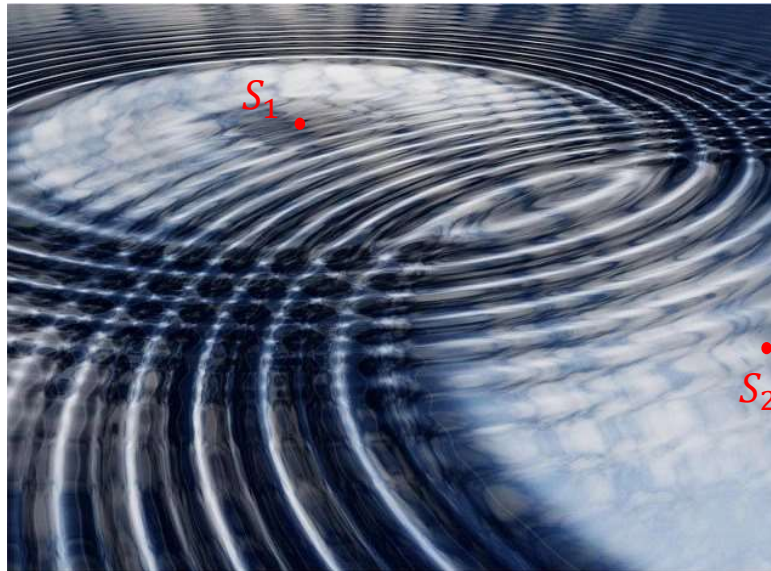
- ✓ Connaitre la nature de l'onde : transverse, progressive, plane, onde plane progressive, onde plane progressive monochromatique (OPPM)
- ✓ Connaitre la notion d'indice optique, de vitesse d'une onde, de vecteur d'onde
- ✓ Connaitre la relation de dispersion

Savoir-faire :

- ✓ Exprimer le champ électrique d'une onde plane progressive monochromatique (OPPM)
- ✓ Déterminer les fronts d'onde
- ✓ Calculer une intensité lumineuse
- ✓ Calculer une moyenne temporelle

Chapitre 2 :

Interférences à deux ondes

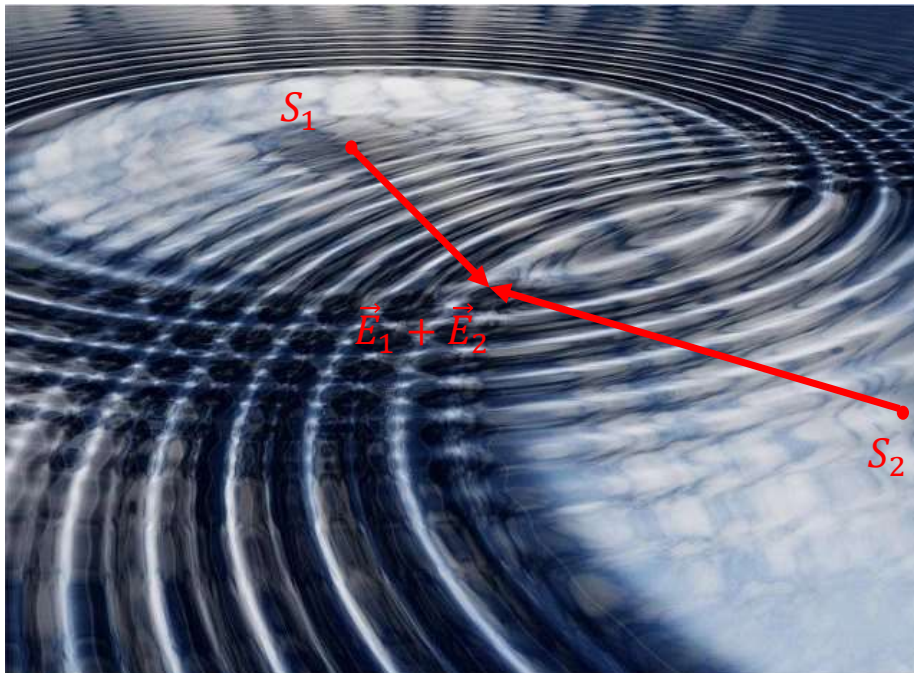


- Qu'est-ce que des interférences ?
- Comment calculer l'intensité résultant d'interférences entre deux ondes ?
- Comment caractériser une figure d'interférence ?
- Dans quelles conditions observe-t-on des interférences (notion de cohérence) ?

1. Les interférences

1.1. Description du phénomène

- Interférences = de 2 ondes
- Phénomène transversal en physique : optique, mécanique (onde sonore...)

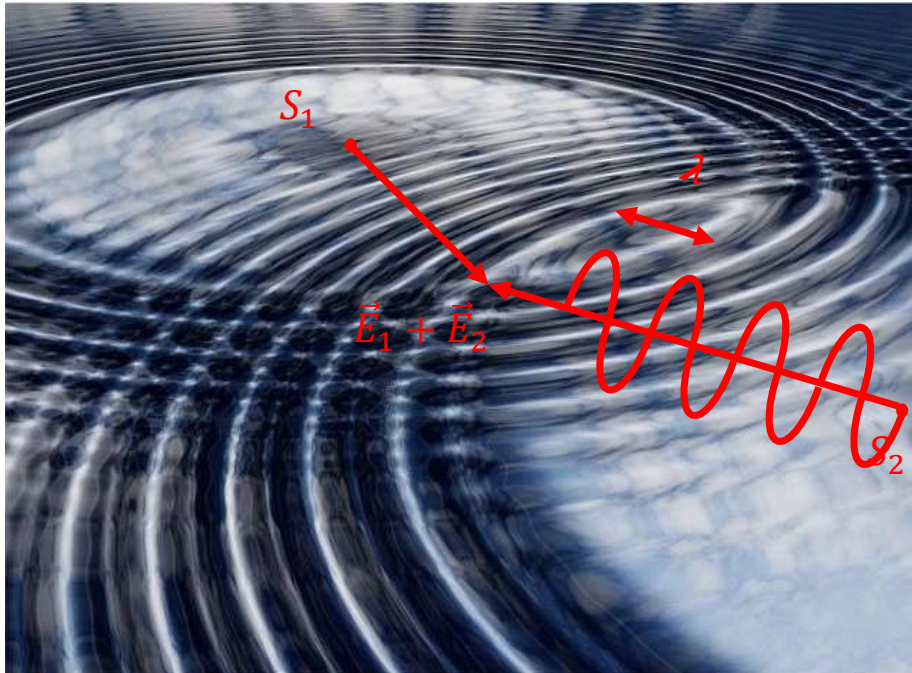


- **Interférences constructives** : E_1 et E_2 sont en phase, les ondes
- **Interférences destructives** : E_1 et E_2 sont en opposition de phase, les ondes se

De quoi dépend le entre les champs E_1 et E_2 ?

1.2. Déphasage

- Le déphasage (= différence de phase) en un point M dépend :



Rappels (onde sphérique) :

$$E_1(r, t) = \frac{E_{01}}{r} \cos[\omega_1 t \pm k_1 r_1 + \phi_{01}]$$

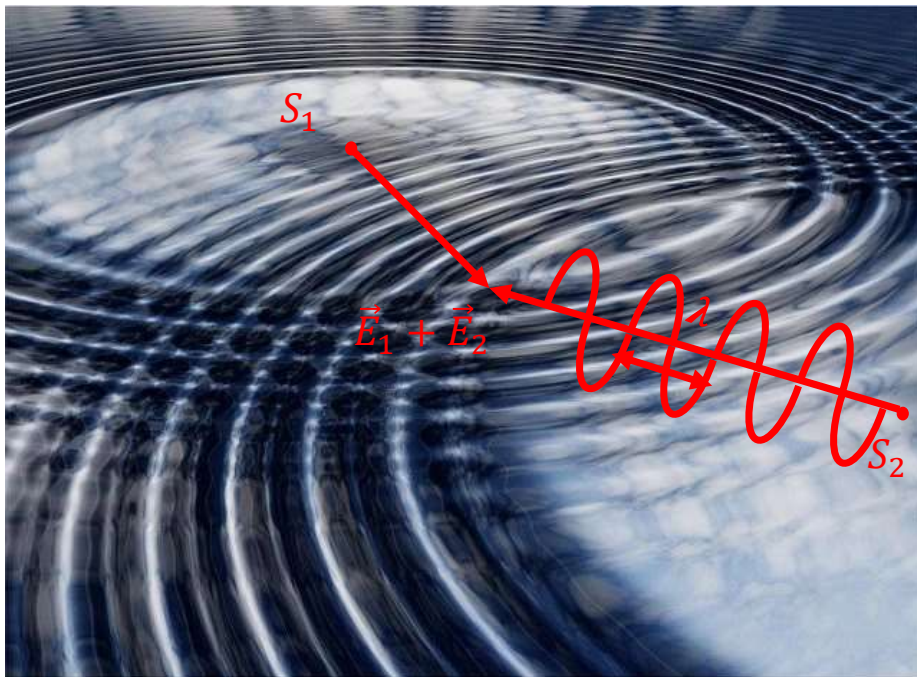
$$E_2(r, t) = \frac{E_{02}}{r} \cos[\omega_2 t \pm k_2 r_2 + \phi_{02}]$$

- Du déphasage des
 $\Delta\phi_s = (\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_{01} - \phi_{02})$
 $\Delta\phi_s = (\Delta\omega)t + \Delta\phi_0$

- Du déphasage dû à la
 $\Delta\phi_p = (k_1 r_1 - k_2 r_2) = \Delta(kr)$
 $\Delta\phi_p = 2\pi\Delta\left(\frac{r}{\lambda}\right)$

On compte le nombre de λ dans le chemin parcouru

1.3. Chemin optique



- λ dépend de l'indice optique :

$$\Delta \phi_p = 2\pi \Delta \left(\frac{r}{\lambda} \right) = 2\pi \Delta \left(\frac{n \cdot r}{\lambda_0} \right)$$

avec λ_0 la longueur d'onde dans le vide.

- En introduisant **le chemin optique** : $L = n \cdot r$

$$\Delta \phi_p = 2\pi \Delta \left(\frac{L}{\lambda_0} \right)$$

- Le chemin optique représente la **distance** **parcourue par l'onde** multipliée par l'indice optique du milieu.

1.4. Différence de chemin optique et déphasage

- Pour deux ondes de longueur d'onde dans le vide λ_0 :

$$\Delta \phi_p = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta L$$

avec ΔL la **différence de chemin optique** (ou **différence**) entre les deux ondes considérées.

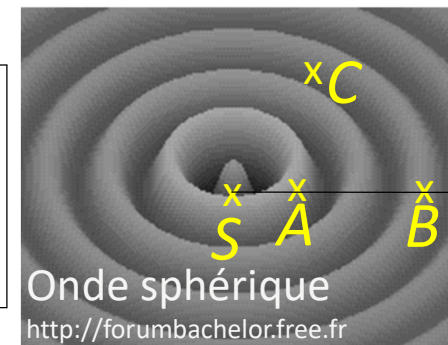
- Exemple d'une source S : différence de marche entre plusieurs points

QUIZ:



$$\Delta L_{AB} = ? =$$

$$\Delta L_{BC} = ? =$$



2. Calcul de l'intensité des interférences

2.1. Définition *via l'intensité*

- 2 sources **interfèrent** si l'intensité résultante de la superposition de la somme des intensités individuelles :

$$I_{Tot} = I_1 + I_2$$

Pas d'interférence

$$I_{Tot} \neq I_1 + I_2$$

Interférences

2.2. Calcul de l'intensité – superposition des champs

- Définition de l'intensité (rappel), en toute rigueur :

$$I(M, t) = \varepsilon_0 n c \langle E^2(M, t) \rangle \quad (\langle \quad \rangle : \text{moyenne temporelle})$$

Mais ici (n fixé) :

$$I(M, t) =$$

$$I(z, t) = \langle E^2(z, t) \rangle$$

- Théorème de superposition des champs :

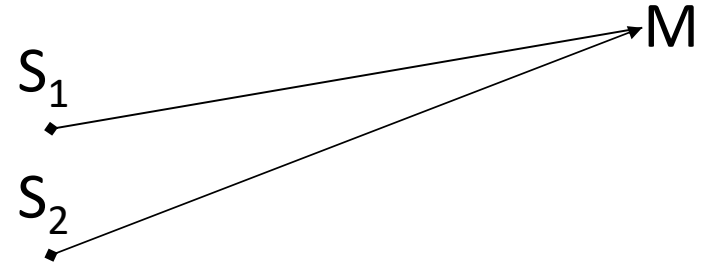
$$E(M, t) = \sum_i E_i(M, t)$$

- *Attention :*

$$I(M, t) = \sum_i I_i(M, t)$$

2.3. Méthodologie

- Deux sources ponctuelles S_1 et S_2



- Méthode pour calculer l'intensité en M (valable pour 2 ou N ondes) :

1) Calcul du champ total (théorème de superposition) :

$$E(M, t) = \sum_i^N E_i(M, t)$$

2) Calcul de l'intensité : $I(M) = \langle E^2(M, t) \rangle$

=> Appliquer cette méthode pour calculer le champ au point M



(calcul)

2.4. Résultat (à savoir retrouver !!!)

$$I_{Tot} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos((\omega_1 - \omega_2)t - (k_1 r_1 - k_2 r_2) + \Phi_{01} - \Phi_{02}) \rangle$$

$$I_{Tot} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos(\Delta\omega t - \Delta(kr) + \Delta\Phi_0) \rangle$$

- Il y a donc interférence si le troisième terme est non nul :

- Si $\Delta\omega = 0$, ie $\omega_1 = \omega_2$: les deux sources ont la longueur d'onde,
- $\Delta\Phi_0 = Cste$, ie la différence de phase entre les sources est dans le temps.

Si ces conditions sont remplies les sources sont dites « en **cohérence** »
ou et on obtient :

$$I_{Tot} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta L + \Delta\Phi_0\right)$$

2.5. Lien entre l'équation et la figure d'interférences

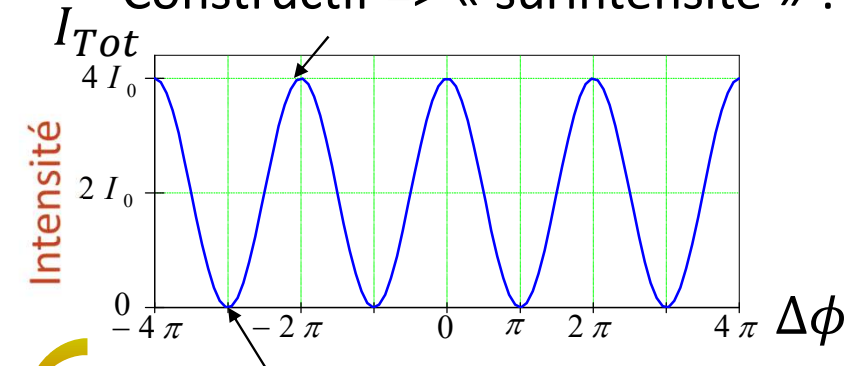
- Cas de 2 sources de même intensité I_0 :

$$I_{Tot} = 2I_0 \left[1 + \cos\left(2\pi \underbrace{\frac{\Delta L}{\lambda_0} + \Delta\Phi_0}_{\Delta\phi}\right) \right]$$

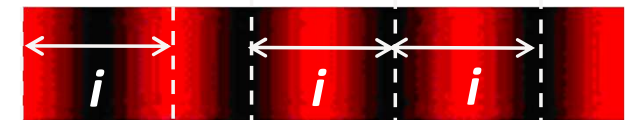
$\Rightarrow I_{Tot}$ dépend du point M considéré

- Franges sombres (min de I) : $I(M) = \square$
- Franges claires, ou brillantes (Max de I) : $I(M) = \square$
- Et l'intensité moyenne ? On a bien $I_{Tot} > 0$ et $\langle I_{Tot} \rangle_{\Delta} = \square$
- Définition : **interfrange i** : distance entre 2 mins (ou 2 Maxs) consécutifs

Constructif $\Rightarrow$ « surintensité » !



Destructif : « lumière + lumière = obscurité ! »



2.6. Contraste

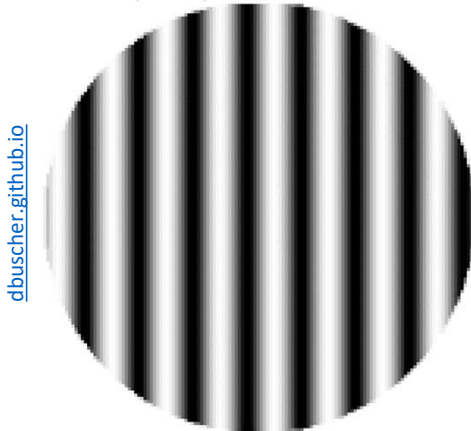
- Définition :

$$C =$$

- $C_{max} =$ obtenu si : $I_{min} =$
- Expérimentalement, le contraste est rarement de 100 %.
- Exemple : Cas de deux ondes d'intensités différentes

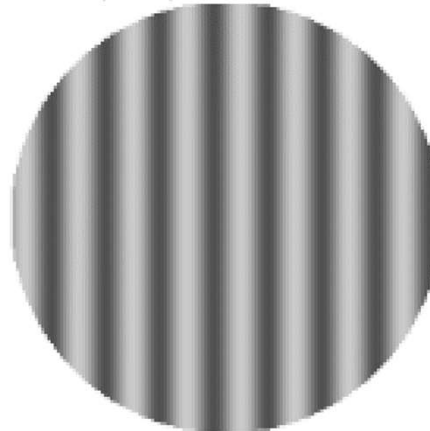
TD2 Exo Tache
d'huile

$$C = 1$$



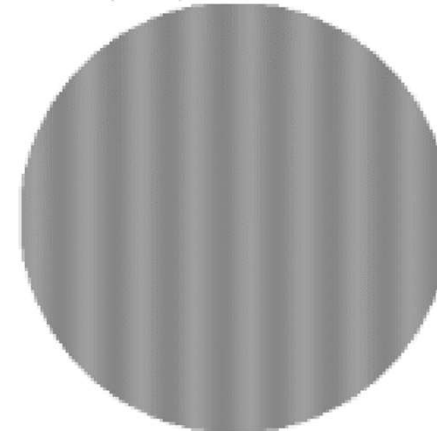
$$I_{min} = 0$$

$$C = 0.5$$



$$I_{min} = \frac{1}{3} I_{max}$$

$$C = 0.1$$



$$I_{min} = \frac{9}{11} I_{max}$$

3. Comment obtenir des interférences ?

Est-ce que 2 sources différentes peuvent interférer ?



- *Expérience 1* : 1 laser vert et 1 laser rouge
- *Expérience 2* : 2 lampes de poche
- *Expérience 3* : 2 lampes de poche avec un filtre très sélectif
- *Expérience 4* : 2 lasers de même longueur d'onde

3. Comment obtenir des interférences ?

3.1. Difficulté d'obtenir des interférences

- Rappel : intensité résultante des interférences de 2 sources de même longueur d'onde :

$$I_{Tot} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \left\langle \cos\left(2\pi \frac{\Delta L}{\lambda_0} + \Delta\Phi_0\right) \right\rangle$$

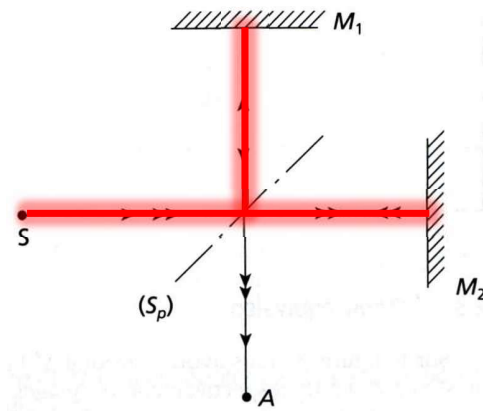
- Une des conditions pour obtenir des interférences est : $\Delta\Phi_0 = Cste$, ie les 2 sources sont synchronisées. Impossible en pratique !



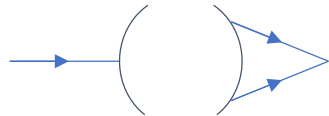
- **Idée** : Créer à partir , 2 sources secondaires (réelles ou virtuelles) ayant donc les mêmes caractéristiques !

3.2. Les 2 types d'interféromètres

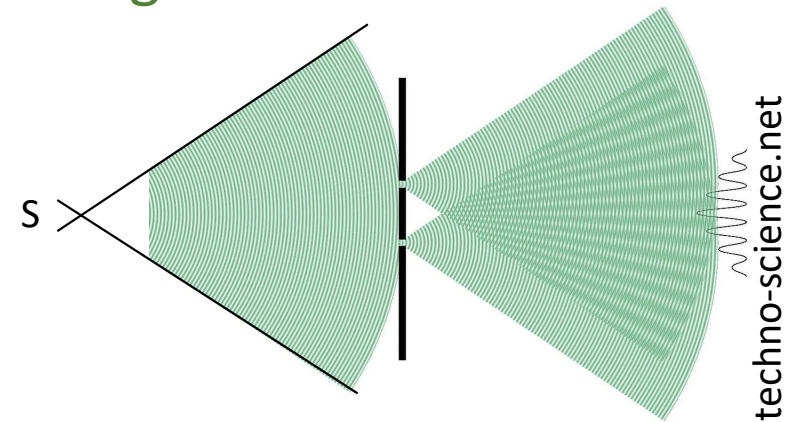
Michelson



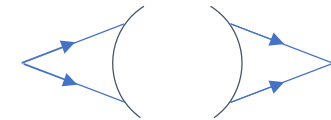
Division d'amplitude : un faisceau est divisé en deux à une interface (ex. : lame semi-réfléchissante, lame à faces parallèle, coin d'air...)



Trous d'Young



Division du front d'onde : le front émis par la source est divisé spatialement (ex. : trous d'Young)



3.3. Exemple des trous d'Young

3.3.1. Description du dispositif

- Dispositif le plus simple pour observer des interférences
- S de très petite dimension éclaire un écran percé de 2 petits trous S_1 et S_2
- D'après les lois de l'optique géométrique, que devrait-on observer sur l'écran ?

=> tâches dans la direction (SS_1) et (SS_2)

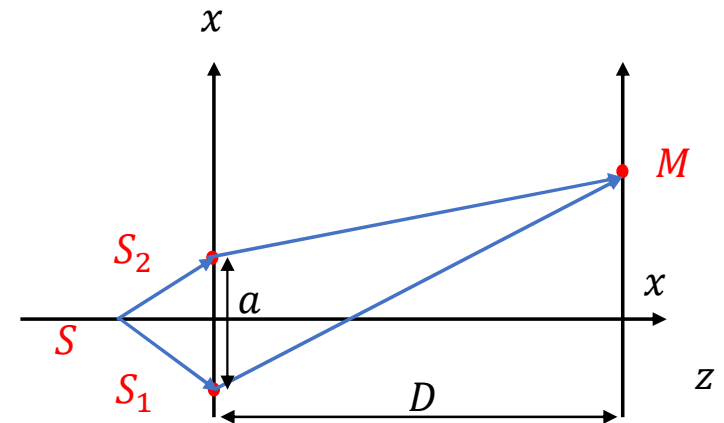
- En réalité :

- S_1 et S_2 sont

=> elles interfèrent dans la zone

de l'espace où elles se

(champ d'interférences)



TD2 Exo trous d'Young

3.3. Exemple des trous d'Young

3.3.2. Hypothèse et conséquences

- On considère que S_1 et S_2 sont des trous de même dimension, symétriques par rapport à l'axe.

- Conséquences :
 - **En phase** car symétrie par rapport à l'axe z

=>

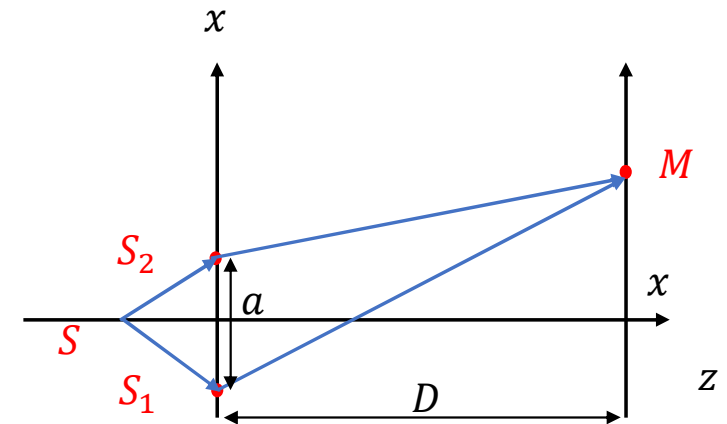
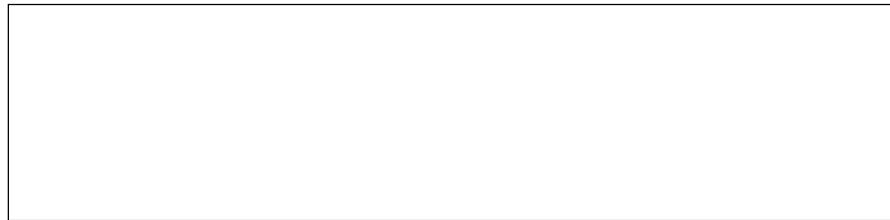


- **Même intensité** (mêmes trous)

=>



- On a donc 2 sources cohérentes de même intensité et en phase :



3.3. Exemple des trous d'Young

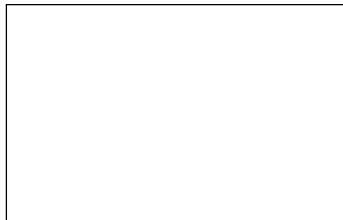
3.3.3. Calcul de la différence de chemin optique au point M

- $\Delta L = S_2M - S_1M$
- Ordres de grandeur :
 $a \sim 1 \text{ mm} ; D \sim 1 \text{ m} ; x < 1 \text{ cm}$

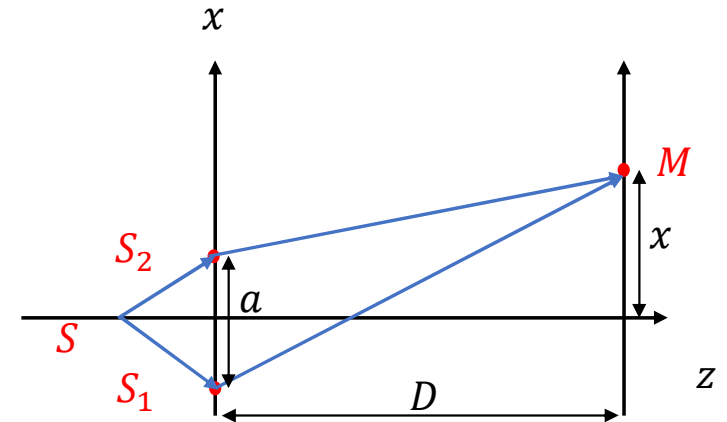
=> Hypothèses :

$$D \gg a \text{ et } D \gg x$$

- Calcul de la différence de marche ΔL



(calcul à savoir faire)



3.3. Exemple des trous d'Young

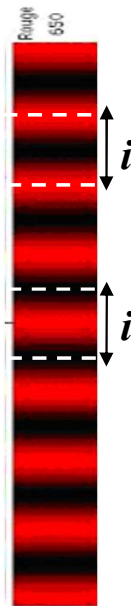
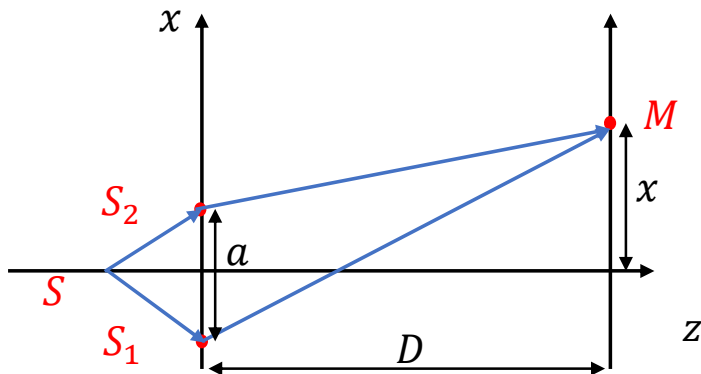
3.3.4. Intensité sur l'écran et interfrange

$$I(M) =$$

- Ne dépend que de x :

⇒ La figure d'interférences est constituée de

- Calcul de l'interfrange :



Méthode :

- 1) Calcul de la position x_m des franges brillantes (ou de la position x_j des franges sombres)
- 2) Calcul de l'interfrange :

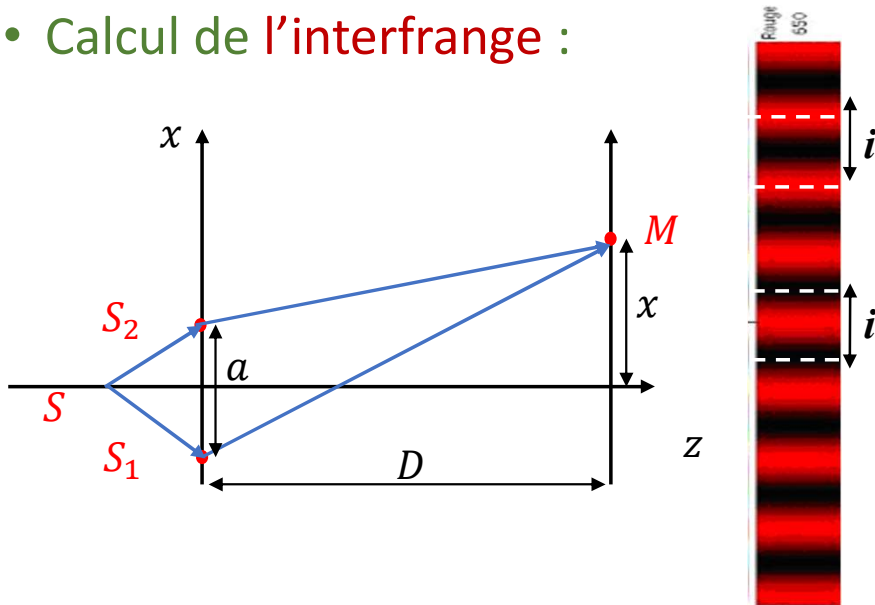
$$i = x_{m+1} - x_m$$

ou
$$i = x_{j+1} - x_j$$

3.3. Exemple des trous d'Young

3.3.5. Calcul de l'interfrange

- Calcul de l'interfrange :



- 1) Positions des franges brillantes (max de I) :

$$x_m \quad \text{(calcul)} \quad \text{?}$$

- 1bis) Positions des franges sombres (min de I) :

$$x_j \quad \text{(calcul)}$$

- 2) Interfrange :

$$i = x_{m+1} - x_m$$

ou $i = x_{j+1} - x_j \Rightarrow i =$

3.3. Exemple des trous d'Young

3.3.6. Ordre d'interférence et frange centrale

- **Ordre d'interférence** : $p =$

Pour les trous d'Young :

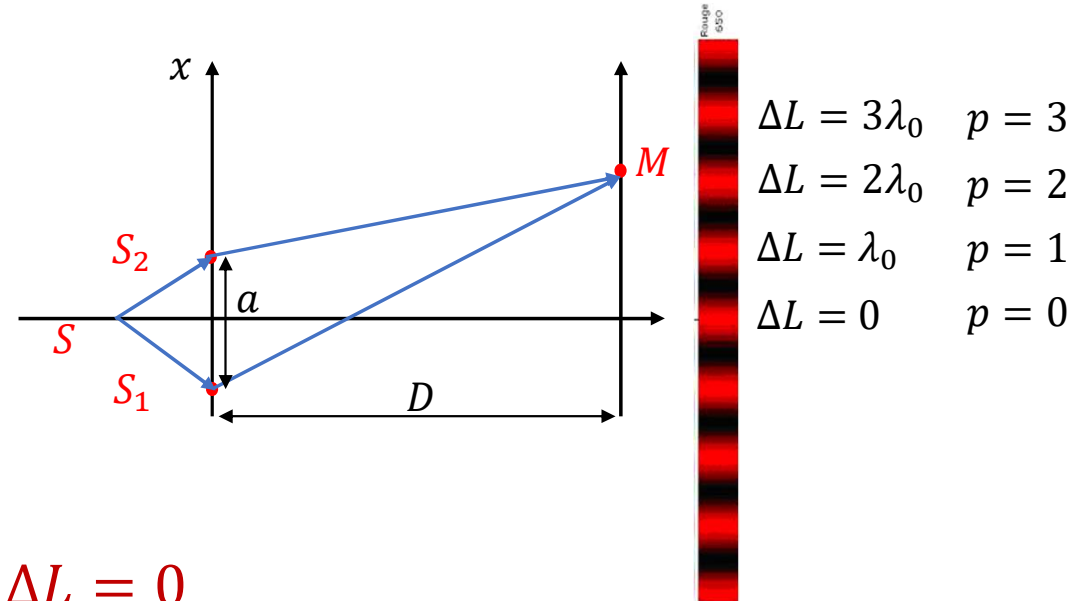
Frangé brillante ? $p =$

Frangé sombre ? $p =$

- **Frangé centrale** : frangé qui correspond à $\Delta L = 0$

$$\Delta L = 0 \Rightarrow p =$$

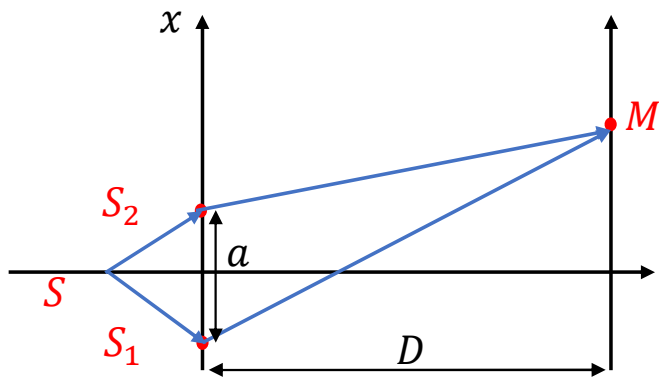
Pour les trous d'Young : la frangé centrale est située en $x =$



3.4. Cohérence temporelle

TD2 Exo cohérence temporelle

- La cohérence temporelle d'une source est liée à

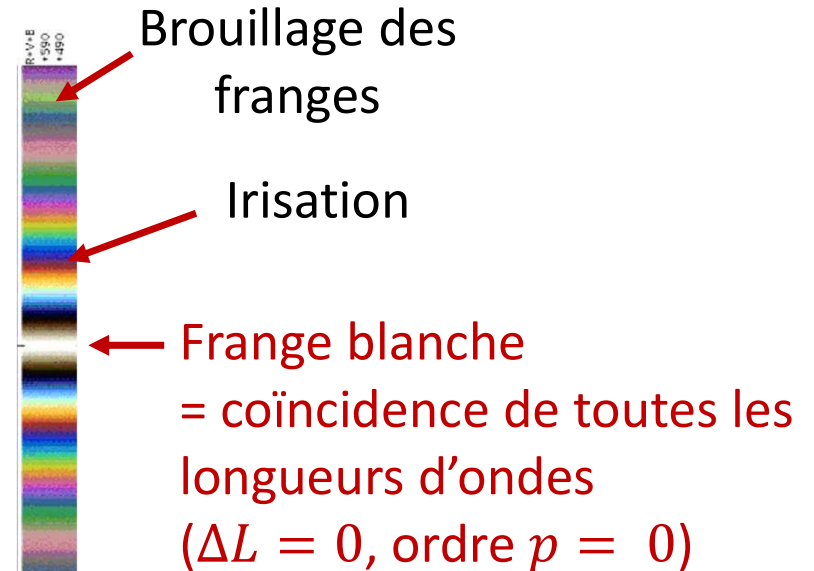
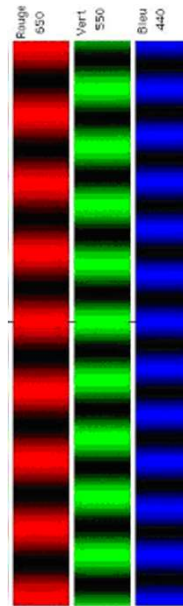


A.N. : $D = 2 \text{ m}$, $a = 1 \text{ mm}$:

$\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ (rouge) $\Rightarrow i = 1,27 \text{ mm}$

$\lambda_0 = 450 \text{ nm}$ (bleu) $\Rightarrow i = 0,90 \text{ mm}$

$$i = \frac{\lambda_0 D}{a}$$

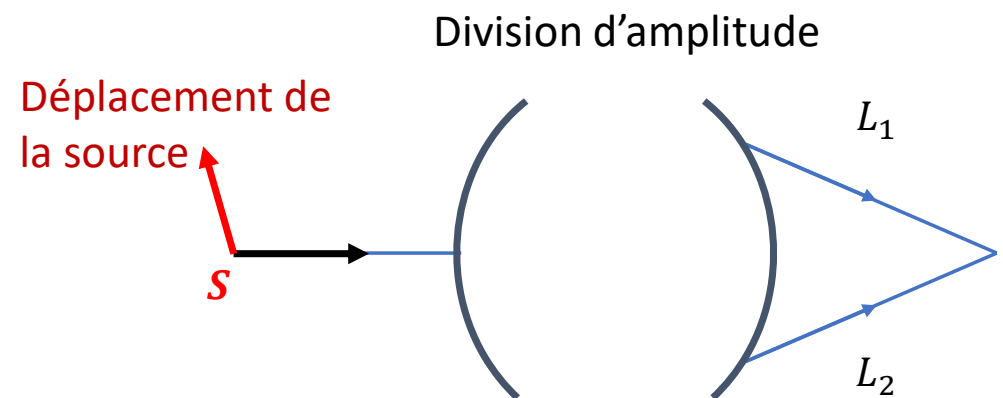
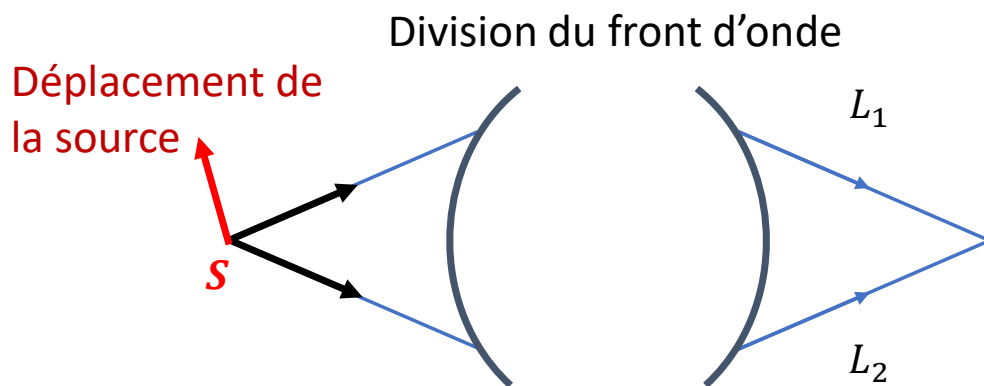


lumière blanche

- Des longueurs d'ondes différentes étant elles n'interfèrent pas : on **somme les intensités** !
- La cohérence temporelle affecte les interféromètres.

3.4. Cohérence spatiale

- La **cohérence spatiale** d'une source est liée à son **étendue**, deux points sources éloignés ne sont pas en phase, ils sont
- Un interféromètre est sensible à la cohérence spatiale si l'extension spatiale de la source induit une différence de chemin optique



⇒ La cohérence spatiale :

- ⇒ les interféromètres fonctionnant par **division d'amplitude**,
- ⇒ les interféromètres fonctionnant par **division du front d'onde**.

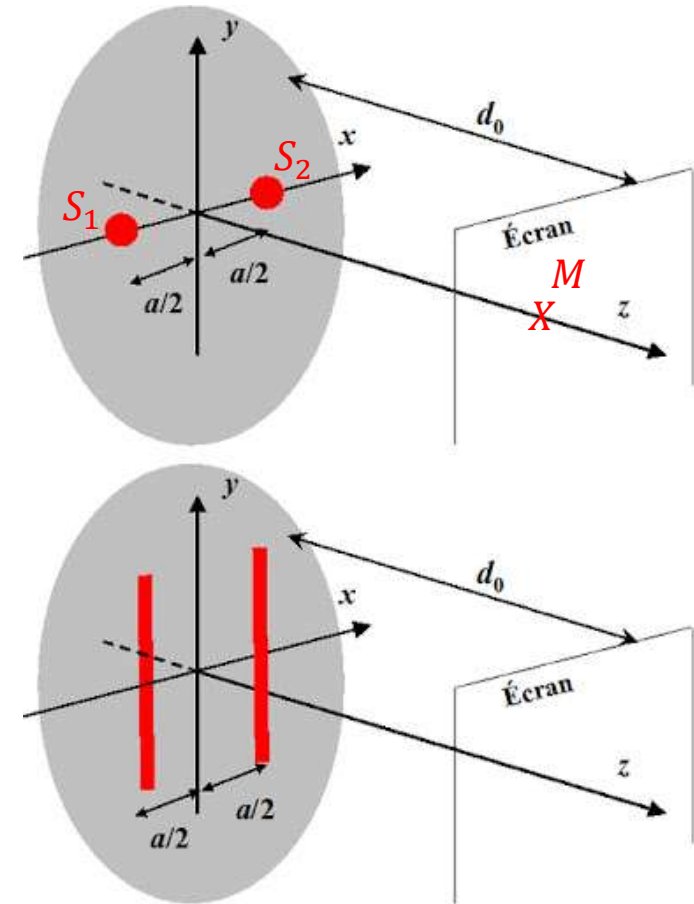
3.4. Cohérence spatiale

Exemple des trous d'Young

- Trous d'Young : les interférences sont affectées par une translation de la source **sauf** **au plan** $S_1 S_2 M$

=> Figure peu lumineuse en pratique avec des sources ponctuelles : on les remplace par des fentes perpendiculaires à l'axe z .

- Les franges d'interférences sont aux fentes.

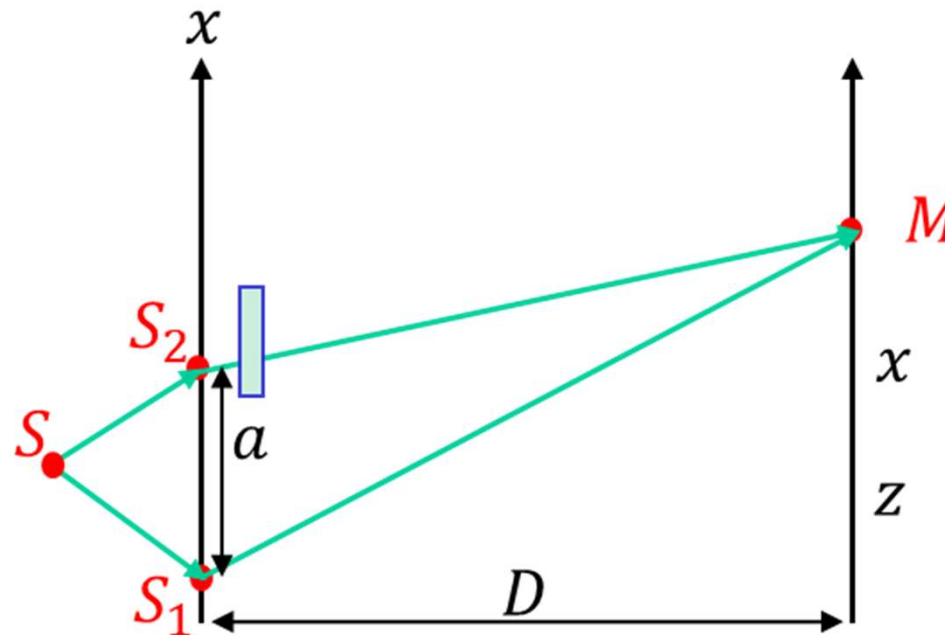


3.5. Exemple d'application des fentes d'Young

$$i = \frac{\lambda_0 D}{a}$$

- A.N. : $D = 2 \text{ m}$, $a = 1 \text{ mm}$, et $\lambda = 633 \text{ nm} \Rightarrow i = 1,27 \text{ mm}$
 $\Rightarrow$ Mesure facile : Thomas Young (1773-1829) a pu mesurer pour la 1^{ère} fois des λ de radiation lumineuse.

- Mesure précise d'indice, d'épaisseur de lames



TD2 Exo trous d'Young
pour mesurer une
lame de faible
épaisseur

3.6. Bilan sur la cohérence

Est-ce que 2 sources différentes peuvent interférer ? 

- *Expérience 1* : 1 laser vert et 1 laser rouge
- *Expérience 2* : 2 lampes de poche
- *Expérience 3* : 2 lampes de poche avec un filtre très sélectif
- *Expérience 4* : 2 lasers de même longueur d'onde

Bilan :

Exp 1 et 2 : longueurs d'onde différentes

=>

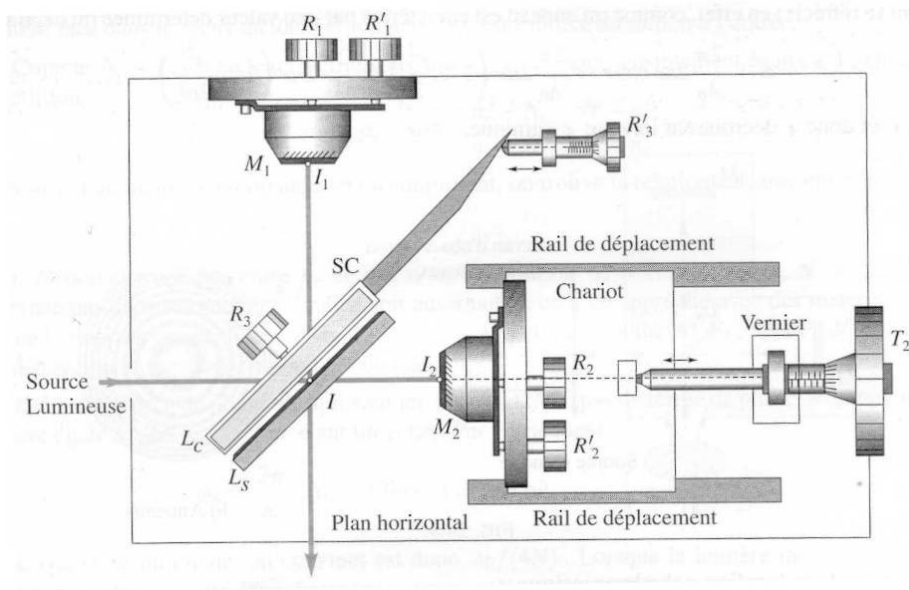
Exp 3 et 4 : 2 sources différentes de mêmes longueurs d'onde éclairent le même point. L'intensité totale est égal à : $I(M) =$

=> condition $\lambda_1 = \lambda_2$:

4. Interféromètre de Michelson

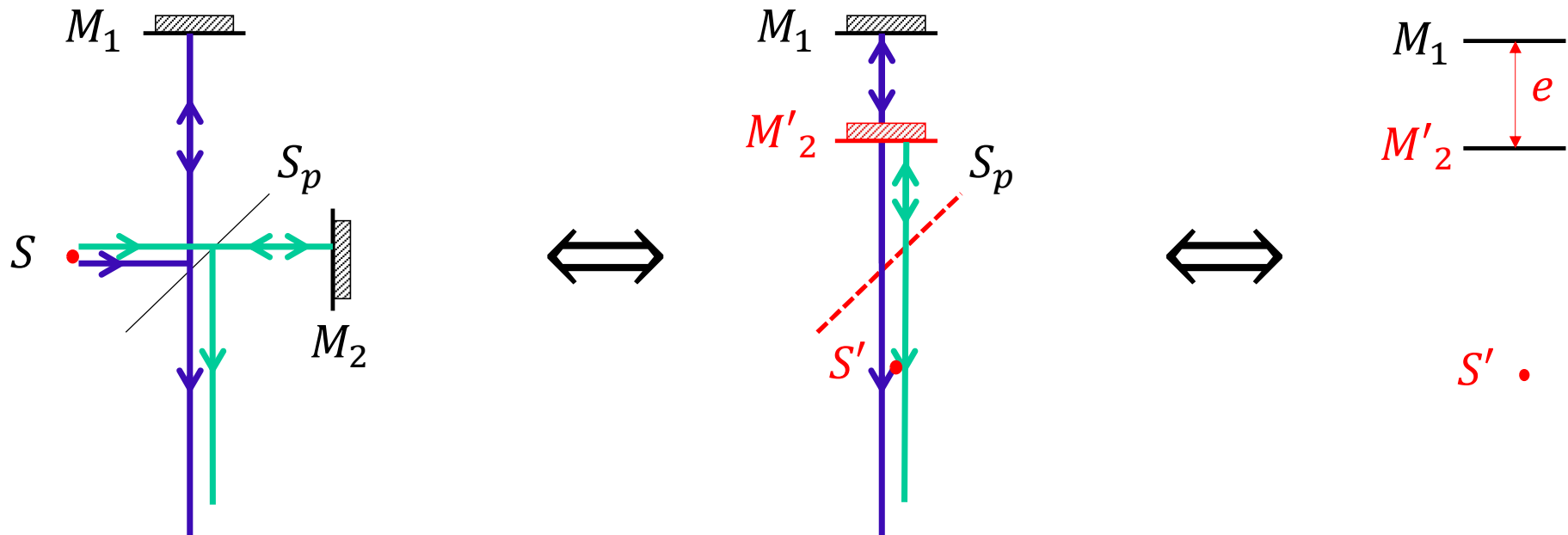
4.1. Description du dispositif

- Système à division d'amplitude
- Schéma de principe et photo :



M_2 est monté sur une translation => Utile pour les mesures...

4.2. Schéma équivalent = lame d'air



- Les systèmes optiques ($\{M_1 + M_2 + S_p\}$ éclairé par S) et ($\{M_1 + M'_2\}$ éclairé par S') sont équivalents.

4.3. lame à face parallèle si $e = Cste$

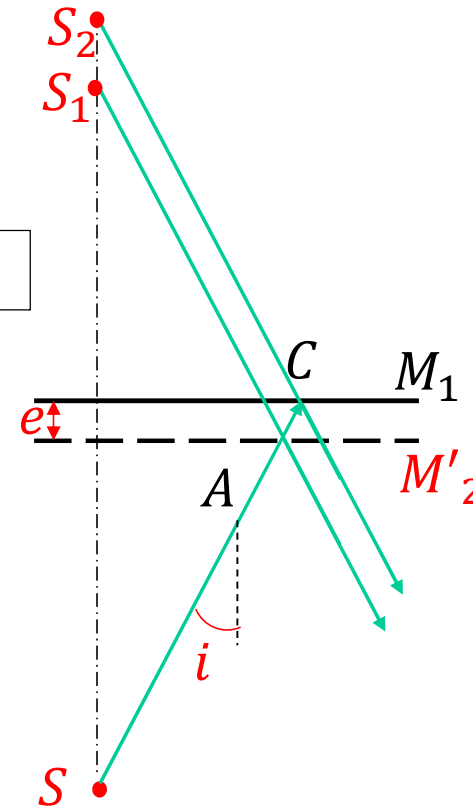
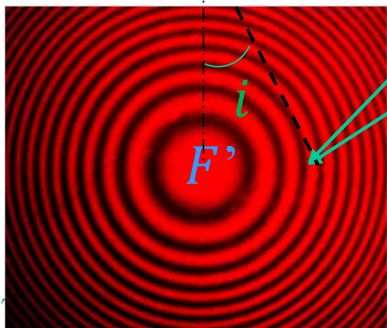
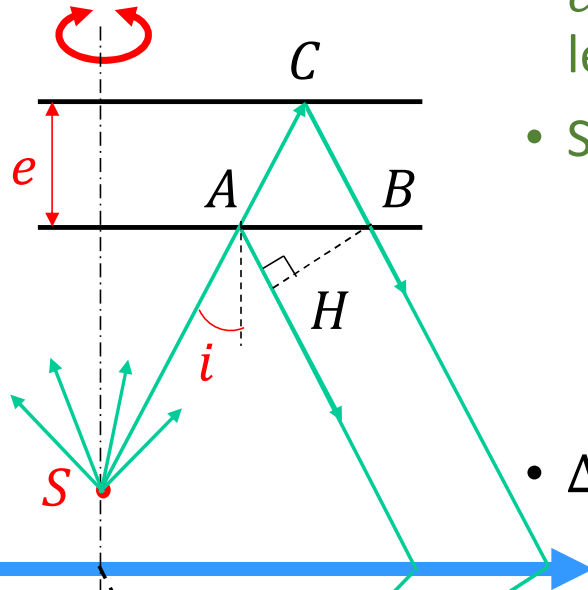
- M_1 et M_2 sont perpendiculaires
- e correspond à la les 2 « bras » de l'interféromètre
- Système équivalent à 2 sources :

- $\Delta L =$ (à savoir démontrer) 🤔

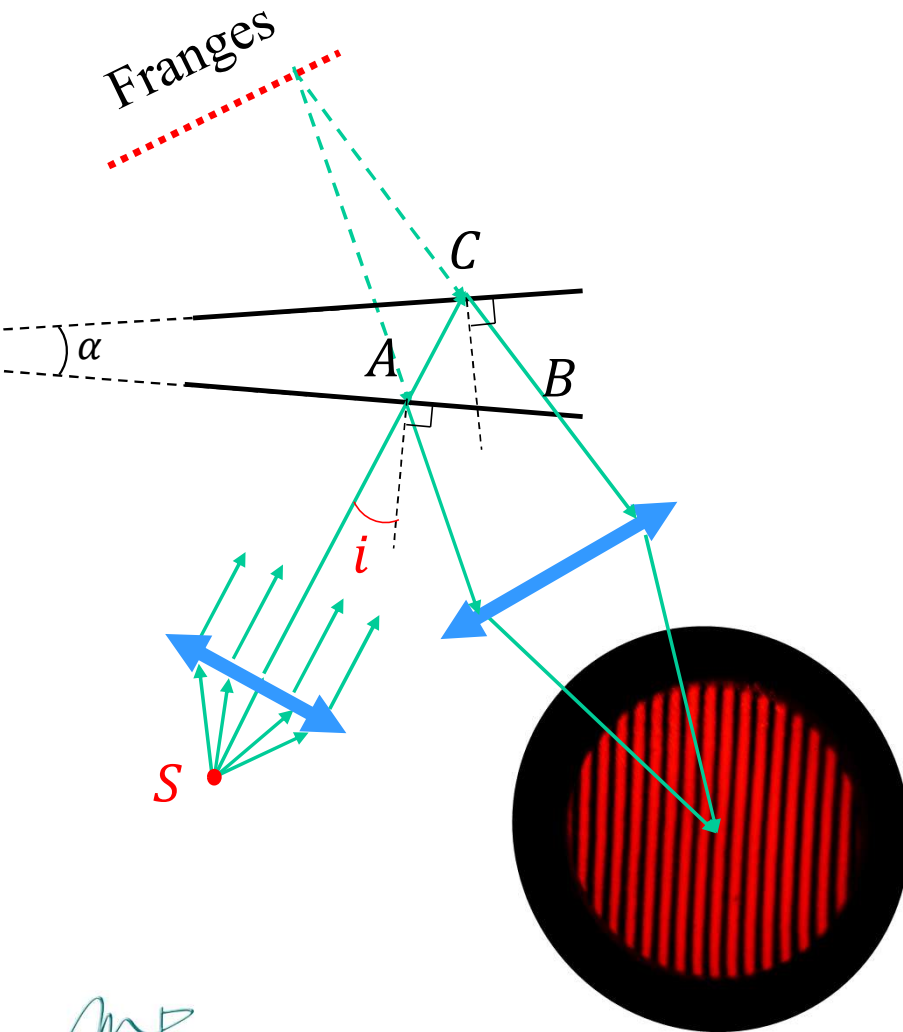
- Quelle figure d'interférences ? Pourquoi ? Où ? 🤔

TD2 Exo 7 et TP

Axe de symétrie



4.4. Coin d'air si les miroirs forment un angle α



- Hypothèses : M_1 est éclairé proche de l'incidence normale et α petit.

- Bilan :

- $\Delta L =$

- Avec x

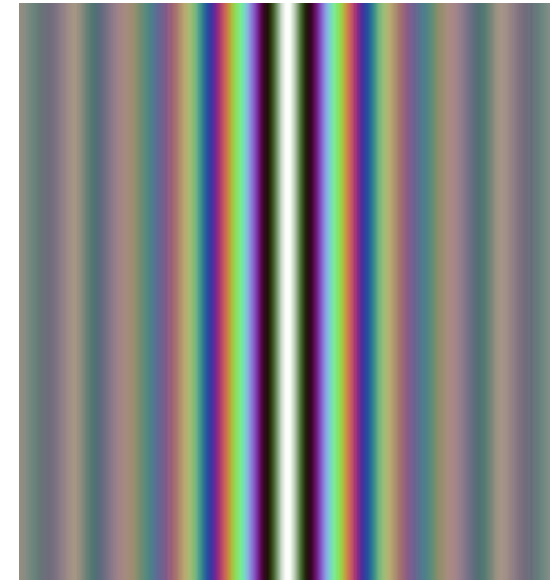
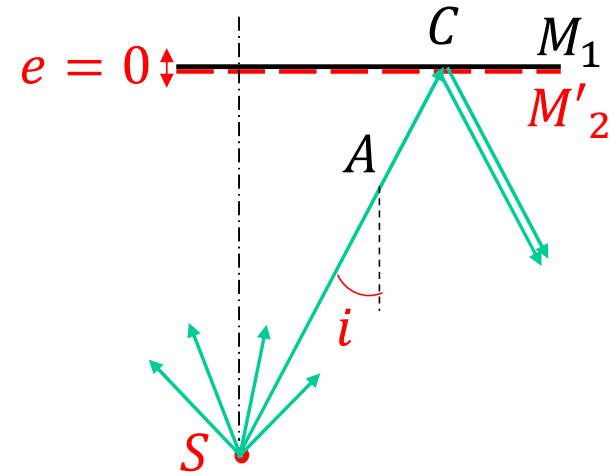
à l'arête du coin d'air

- Quelle figure d'interférences ? Pourquoi ? Où ?

TD2 Exo 6
et TP

4.5. Contact optique

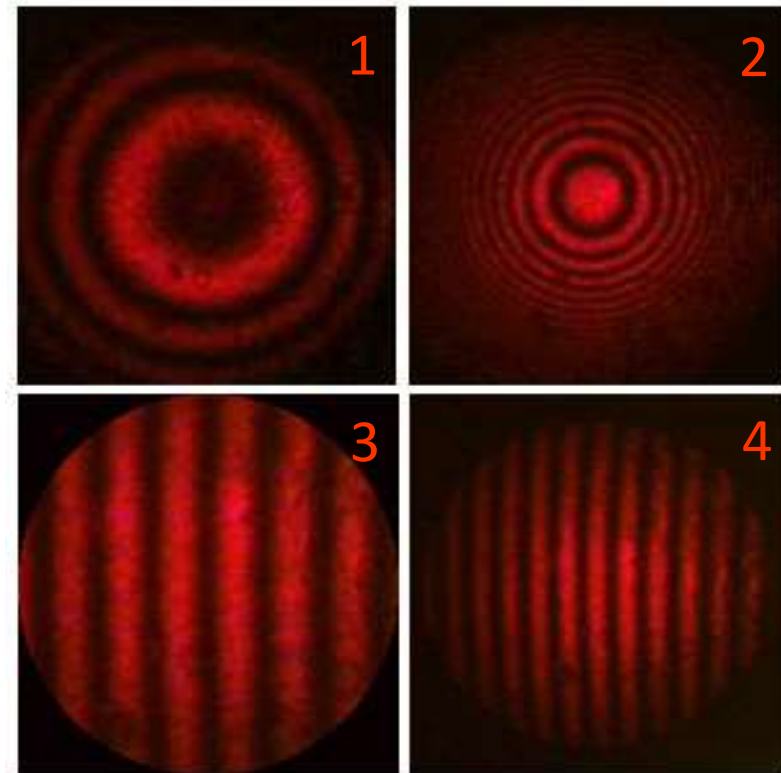
- Le **contact optique** du Michelson correspond à la zone où virtuellement l'image d'un miroir se avec l'autre miroir.
- Au contact optique, que vaut ΔL ? 🤔
- Comment repérer le contact optique à partir de la figure d'interférences ?
 - En lumière monochromatique : c'est lorsque les anneaux sont
 - En lumière blanche : lorsque toutes les couleurs se



4.6. Figures expérimentales

- Quelle configuration du Michelson correspond à chaque observation ?

- Quels sont les paramètres qui ont changé pour passer d'une figure à une autre ?



<http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/>

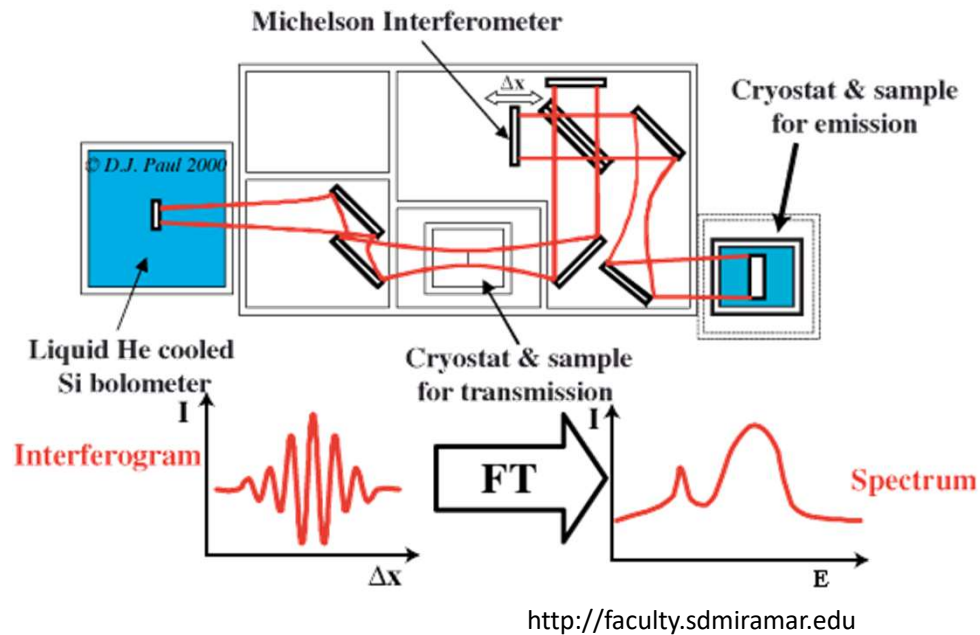
4.5. Exemples d'application ou dans la nature !

- **Lame d'égale épaisseur :**

Couleur des bulles de savon, des ailes de papillon...



- **Spectroscopie à Transformée de Fourier : FT-IR (TP Spectroscopie S3)**



FT-IR Spectrum Two
PerkinElmer (TP spectro)

BILAN du Chapitre 2 : Interférences à 2 ondes

Savoirs :

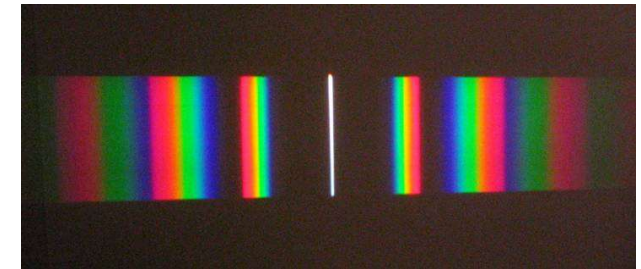
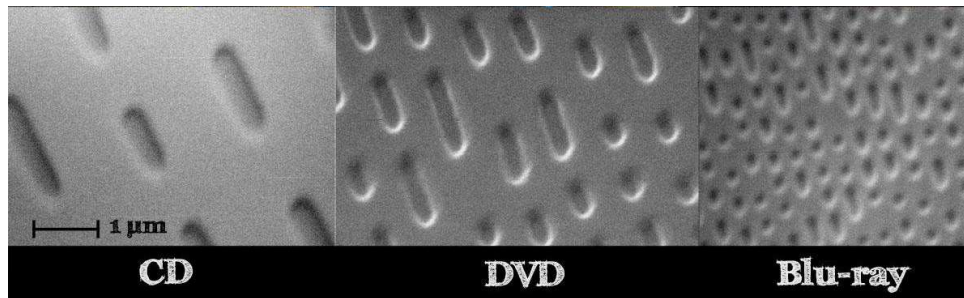
- ✓ Comprendre le phénomène d'interférences
- ✓ Connaître les critères de cohérence mutuelle
- ✓ Connaître la définition du contraste
- ✓ Connaître les définitions de l'interfrange, d'une frange brillante, d'une frange sombre
- ✓ Connaître la définition de l'ordre d'interférence
- ✓ Comprendre le phénomène d'interférence en lumière polychromatique en lien avec la cohérence temporelle
- ✓ Savoir distinguer division du front d'onde et division d'amplitude
- ✓ Connaître le système des trous (ou fentes) d'Young
- ✓ Comprendre le principe d'un interféromètre de Michelson
- ✓ Connaître les configurations « lame d'air à faces parallèles » et « coin d'air »

BILAN du Chapitre 2 : Interférences à 2 ondes

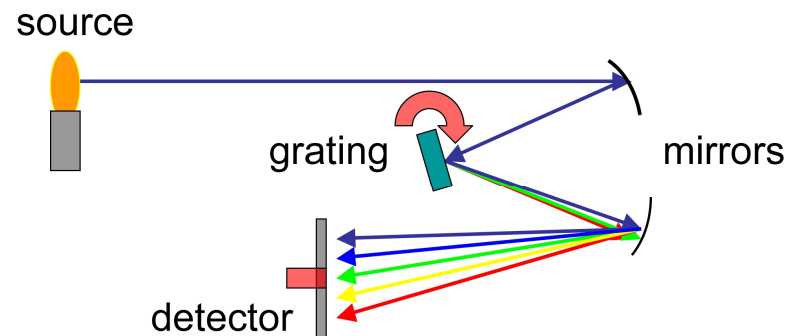
Savoir-faire :

- ✓ Calculer un chemin optique
- ✓ Calculer une différence de marche optique
- ✓ Calculer un déphasage
- ✓ Calculer l'intensité associée à la figure d'interférences pour un système à 2 ondes
- ✓ Calculer la position des franges sombres et brillantes
- ✓ Calculer l'interfrange
- ✓ Savoir utiliser les systèmes optiques équivalents
- ✓ Calculer l'intensité associée à la figure d'interférences et les différences de marche dans le cas des trous d'Young, de la lame d'air à faces parallèles et du coin d'air (Michelson)
- ✓ Expliquer les figures d'interférences observées dans le cas des trous d'Young, de la lame d'air à faces parallèles et du coin d'air (Michelson)

Chapitre 3 : Interférences à ondes multiples (Réseaux)



- Réseaux, application à la spectroscopie



1. Réseaux

1.1. Description

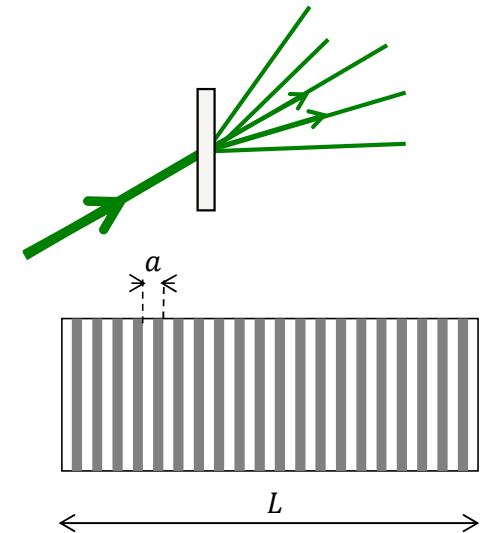
a) Réseaux *en transmission* :

Fentes identiques caractérisées par :

- « Pas du réseau » en mm : a
- « Nombre de traits/mm » : n

⇒ Relation entre n et a :

$$n = \frac{1}{a}$$



- ▶ Grating Designed for Optimum Performance in the Visible
- ▶ Four Groove Densities Available: 300, 600, 830, and 1200 Grooves/mm
- ▶ Three Sizes Available:
12.7 mm x 12.7 mm, 25 mm x 25 mm, and 50 mm x 50 mm



GT25-03
(25 mm x 25 mm)



GT13-03
(12.7 mm x 12.7 mm)

GT50-03
(50 mm x 50 mm)



THORLABS

1.1. Description (suite)

b) Réseaux *en réflexion* :

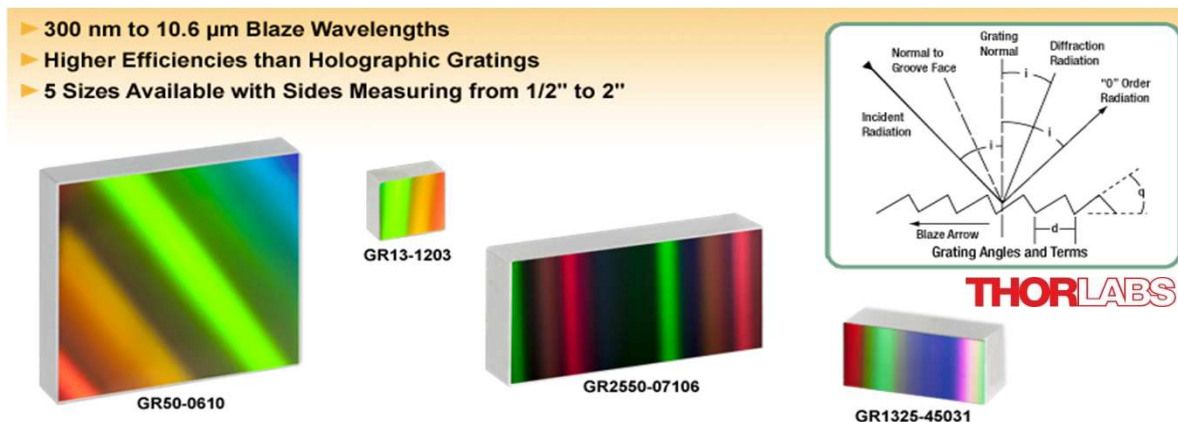
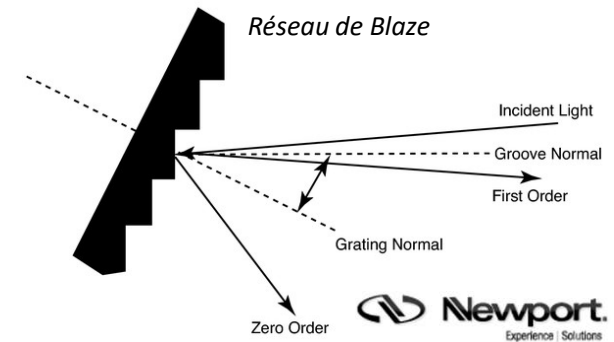
Motifs réfléchissants

Egalement caractérisés par a et n

Exemple de réseaux en réflexion : DVD !

$a \sim 0.74 \mu\text{m}$ pour un DVD $\Rightarrow n = \square$ traits. mm^{-1}

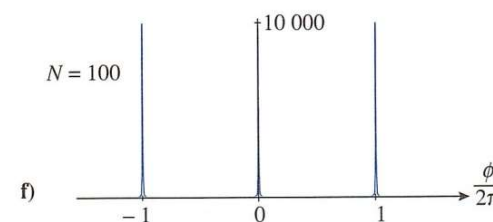
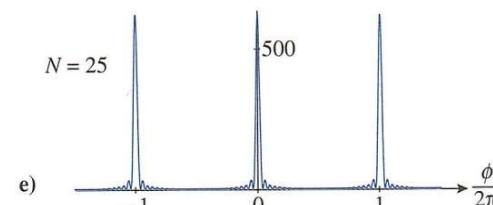
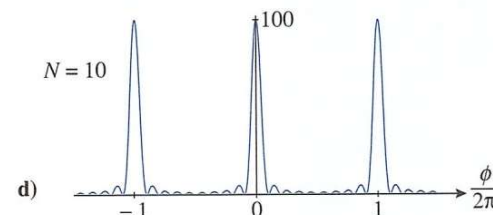
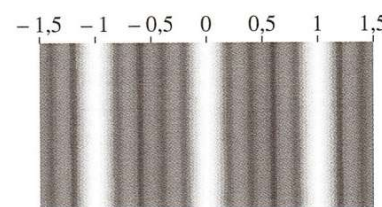
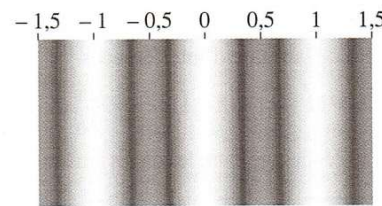
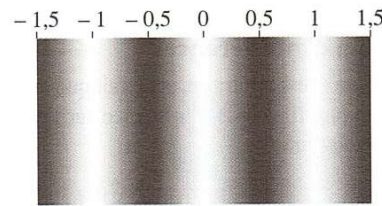
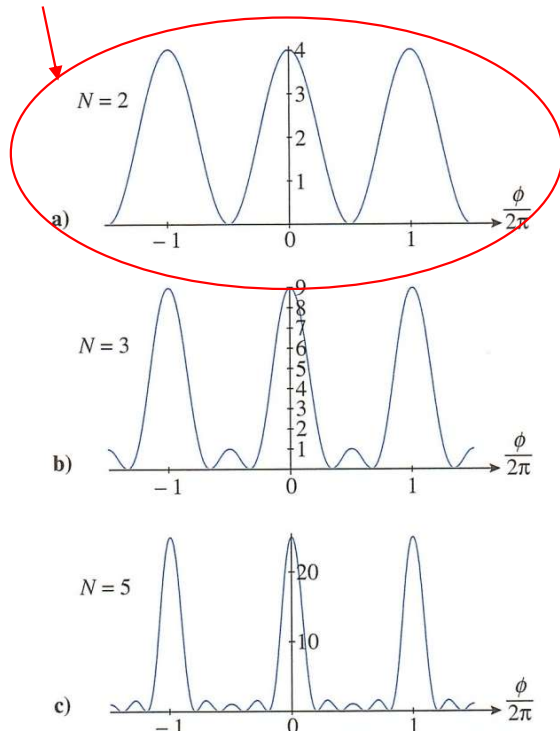
$a \sim 0.32 \mu\text{m}$ pour un Blu-Ray $\Rightarrow n = \square$ traits. mm^{-1}



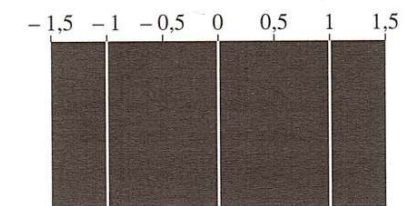
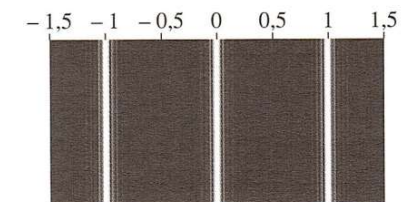
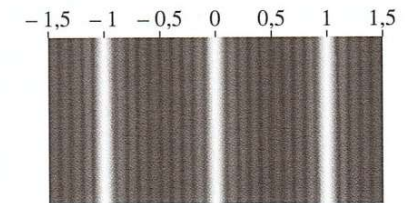
- Dans la suite on étudiera les *réseaux en transmission*, résultats très voisins en réflexion.

1.2. Interférences à N ondes

- Intensités des interférences à 2 ondes



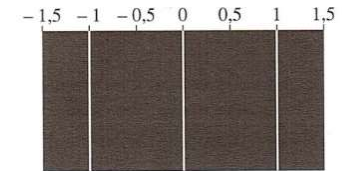
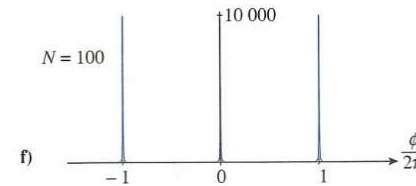
H prépa, *Optique ondulatoire*, Hachette



<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/reseau2.html>

- Augmentation du nombre de fentes $N \Rightarrow$ apparition de maxima secondaires et augmentation de l'intensité des maxima principaux $\Rightarrow$ dès $N = 5$, on ne voit plus que les maxima

1.2. Interférences à N ondes : cas des réseaux



- $N \gg 1 \Rightarrow$ On observe uniquement

- Différence entre ces courbes et la réalité ?

$\Rightarrow$

- Approximation ici :

- Est-ce valable ?

– Propriété principale des réseaux exploitée : positions des maxima

$\Rightarrow$ pour cela inutile de considérer la diffraction

1.3. Loi fondamentale des réseaux

- Recherche de la position des Max d'intensité

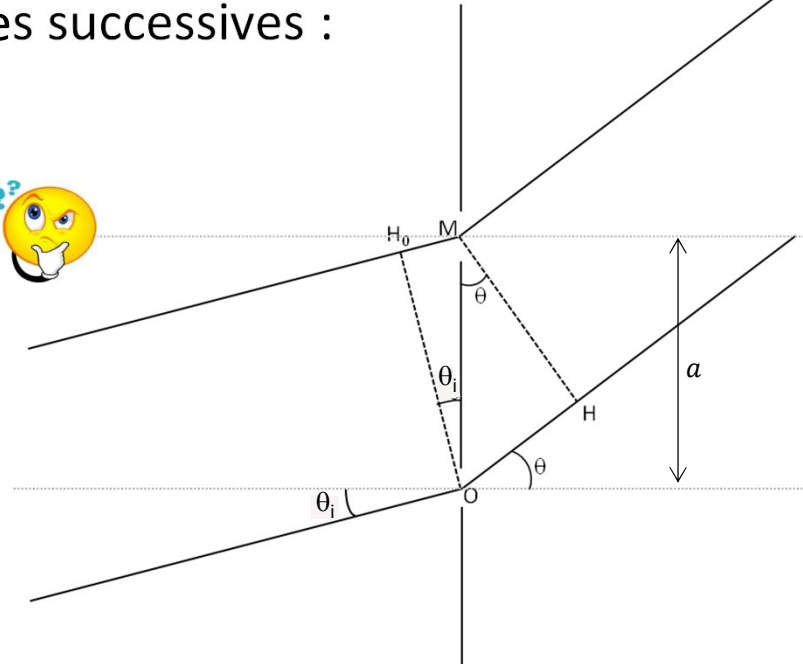
=> résulte des **interférences** entre les différentes fentes

- Chaque fente se comporte comme une source secondaire
- Toutes les fentes sont **cohérentes** => interfèrent
- Pour avoir un max d'intensité, les ondes émises par les fentes doivent être en phase
=> Condition sur le déphasage entre 2 fentes successives :

$$\Delta\Phi =$$

- Calcul de Φ en fonction de l'angle d'incidence θ_i , de l'angle d'observation θ et du pas du réseau a :

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta L =$$



1.3. Loi fondamentale des réseaux (suite)

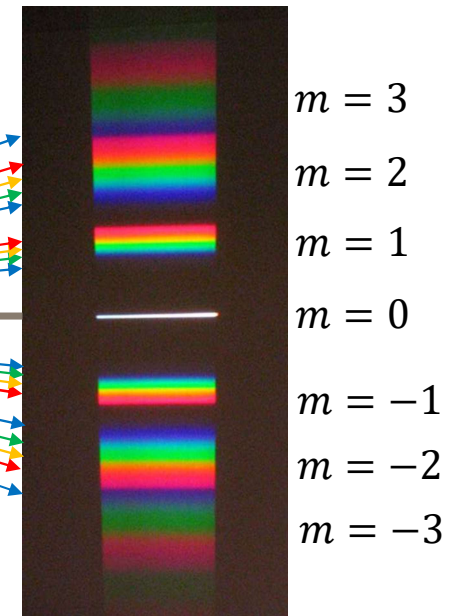
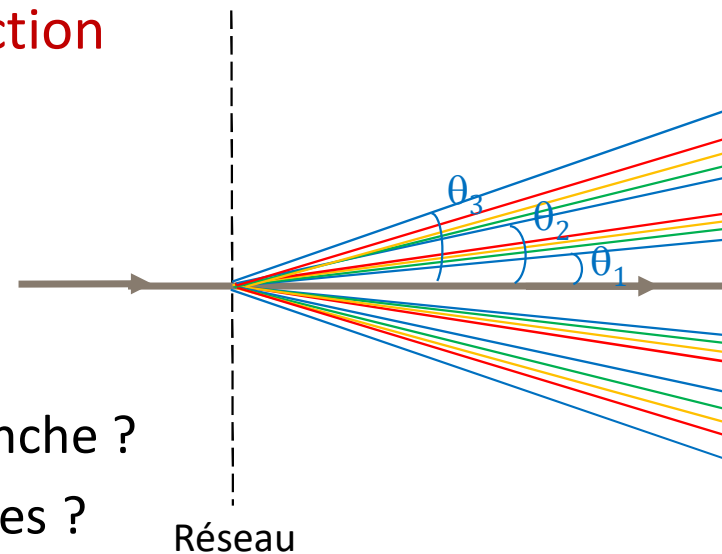
- D'où la direction θ_m du m -ième maximum :



- m est appelé « l'ordre » de diffraction
- Exemple : observation en lumière blanche :

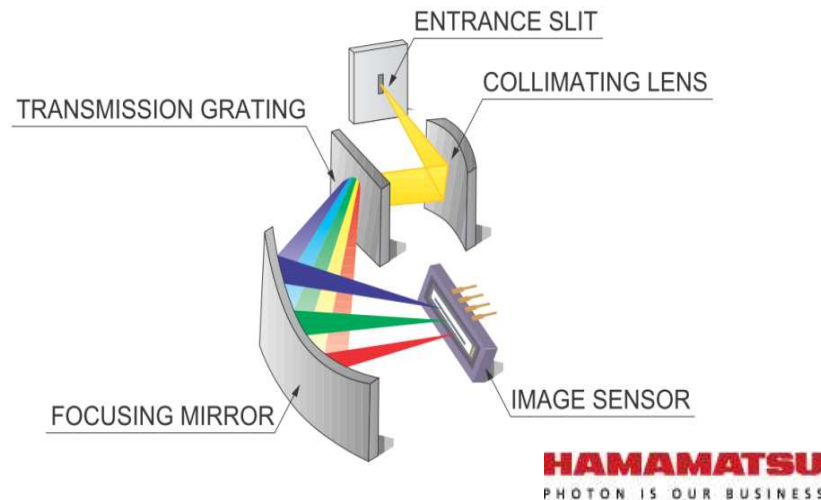


- Combien voit-on d'ordres ?
- Où est l'ordre zéro ?
- Des interférences en lumière blanche ?
- Où sont localisées les interférences ?

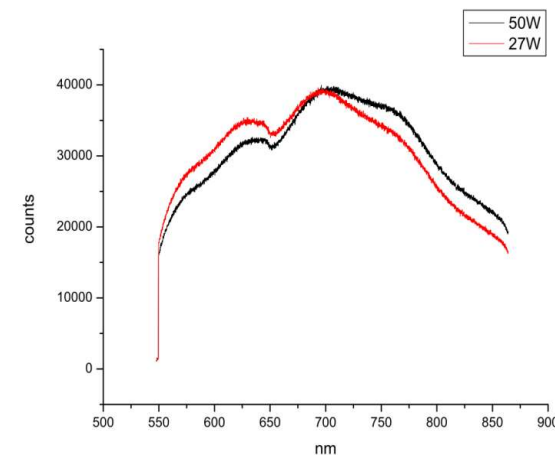


2. Application des réseaux : les spectromètres

- Schéma de principe d'un spectromètre à réseaux :



Petit spectromètre USB, fibré
gamme : 550-850 nm



Source de lumière blanche TP



- Exemple d'utilisation : surveillance de la qualité de l'air, de l'eau (dosage spectrophotométrique)

BILAN du Chapitre 3 : Interférences à ondes multiples (Réseaux)

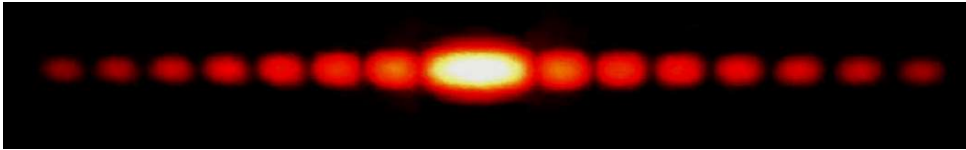
Savoirs :

- ✓ Connaître les caractéristiques d'un réseau (pas et nombre de traits/mm)
- ✓ Connaître la définition de l'ordre de diffraction d'un réseau
- ✓ Connaître la loi fondamentale des réseaux

Savoir-faire :

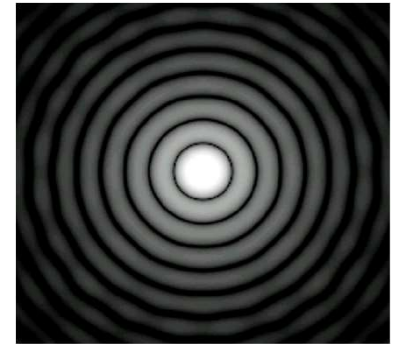
- ✓ Calculer la condition d'interférences constructives pour un réseau
- ✓ En déduire la loi fondamentale des réseaux
- ✓ Calculer l'angle de diffraction des ordres d'un réseau

Chapitre 4 : Diffraction



Diffraction par une fente

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/fentevert.html>



Diffraction par un trou

- Que se passe-t-il si on limite spatialement une onde ?
- Qu'est-ce que la diffraction ?
- Comment calculer l'intensité résultant du phénomène de diffraction (cas d'une fente) ?
- Quelles conséquences de la diffraction (effet sur la résolution) ?

1. Cadre de l'étude

1.1. Cadre et hypothèses

- Que se passe-t-il si on limite spatialement une onde ?
 - Limite de l'optique géométrique : la propagation rectiligne n'est plus vérifiée lorsque la taille caractéristique de l'ouverture est comparable à
 - La zone atteinte se comporte comme une source secondaire d'onde sphérique !
- On se limitera ici aux conditions de Fraunhofer :
 - Onde incidente =
 - Observation de la figure de diffraction à



1.2. Définitions

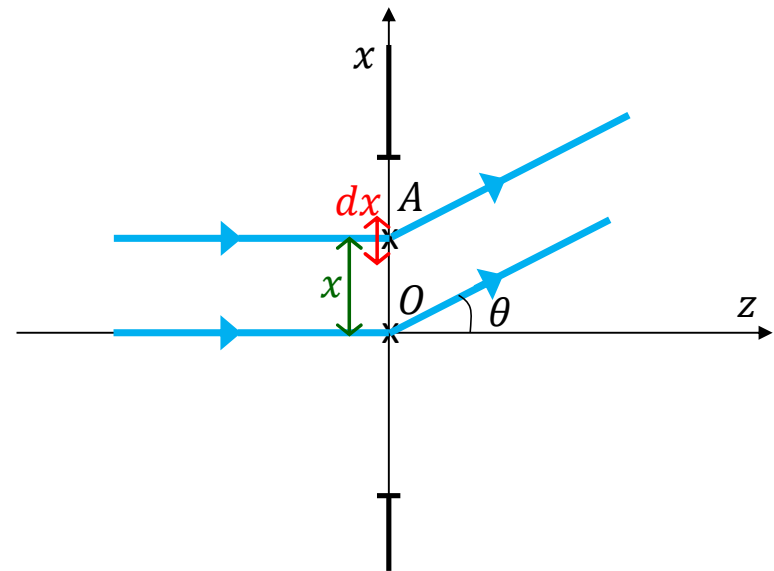
- La diffraction est un phénomène à une infinité d'ondes émises par des sources secondaires éclairées par division du front d'onde (/!\ cohérence spatiale et temporelle).

- Cas d'une fente :

La diffraction résulte de interférences entre des fentes infinitésimales de largeur dx (sources cohérentes).

- Méthode de calcul
=> Calcul de E puis I

TD4 Exo 3



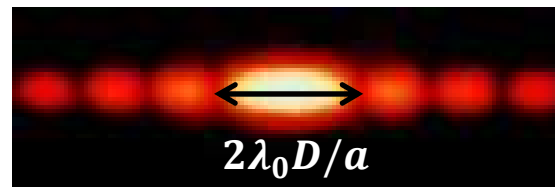
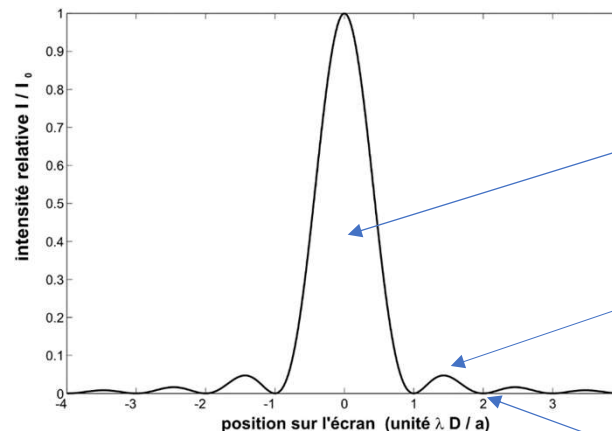
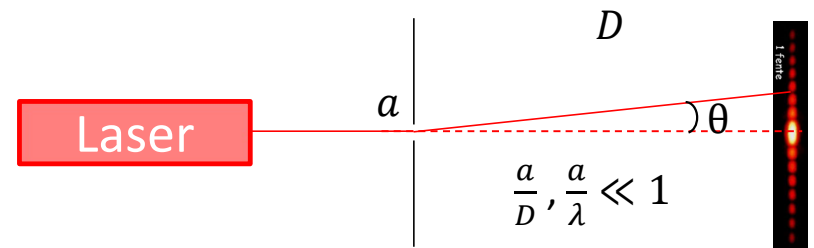
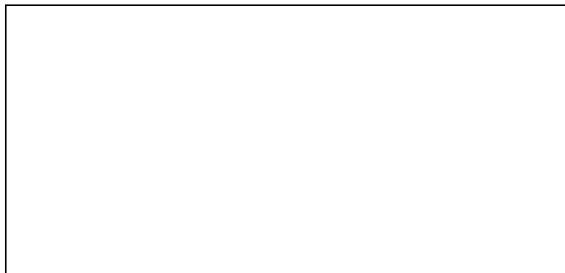
2. Diffraction par une fente

Résumé (cf TD) pour une fente de largeur a :

- Intensité diffractée dans la direction θ :

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi a \sin\theta}{\lambda_0}\right)}{\left(\frac{\pi a \sin\theta}{\lambda_0}\right)} \right]^2$$

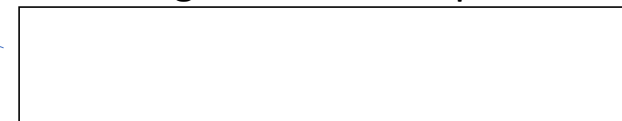
- Si $D \gg a$ et $D \gg \lambda$ alors $\sin\theta \sim x/D$



Pic central plus large
84% de l'intensité diffractée

Pics secondaires très faibles
 $I_{max} \sim$

Zéros régulièrement répartis



- Application : Mesure de la largeur d'une fente (cf TP)
- S'il y a plusieurs fentes, cette intensité est modulée par la figure d'interférence.

3. Diffraction par un trou

- Anneaux de diffraction concentriques
- Pas d'expression analytique simple
- Rayon angulaire de la tache centrale :

$$\theta_A = \frac{1,22\lambda_0}{d}$$

d : diamètre du



A.N : $\lambda = 500 \text{ nm}$, $d = 1 \mu\text{m}$, dimension de la tache centrale à $D = 10 \text{ cm}$?

$d \neq D...!$

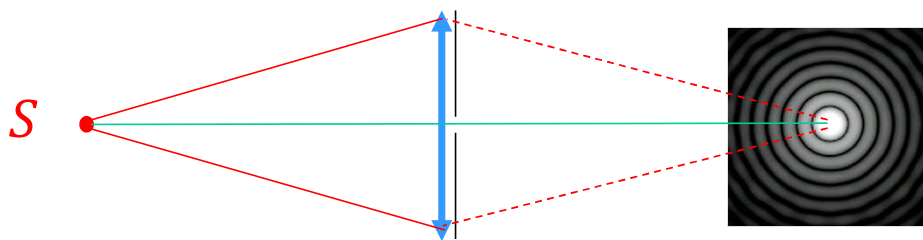


- Conséquence : tout **objet ponctuel** observé à travers un instrument optique impliquant des ouvertures de diamètre fini (lentille) aura pour image une **tâche** (et non un point !)

➔ **Limite de résolution** = plus petite distance séparant deux points qui peuvent être distingués.

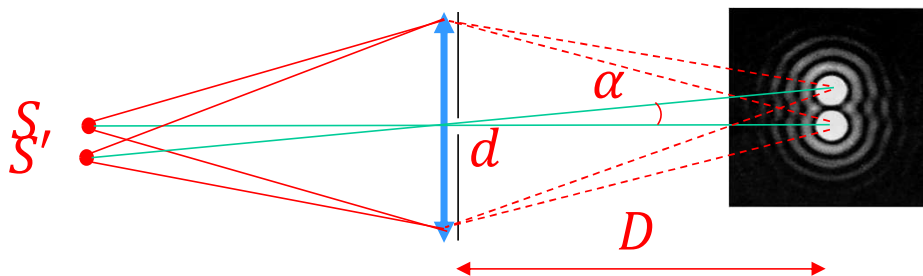
4. Critère de Rayleigh

« Deux points objets seront distinguables (résolus) si le centre de leurs images est séparé d'une distance au moins égale au « rayon » de la

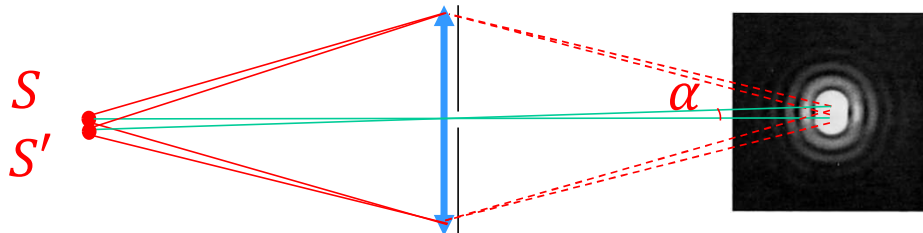


TD4 Exo 5

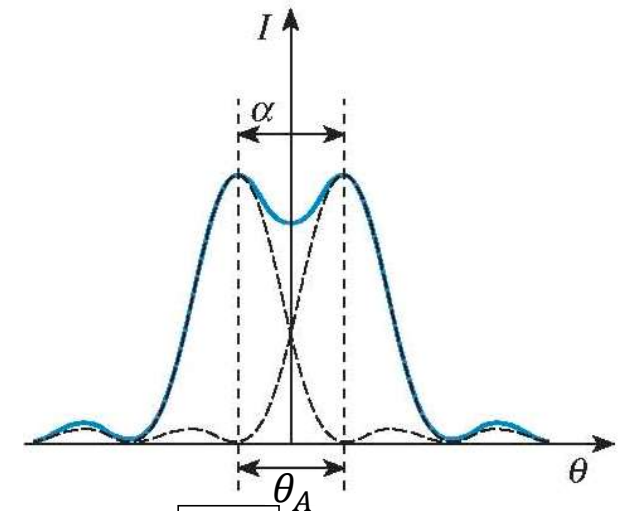
Limite de résolution de l'image de deux sources ponctuelles **incohérentes**



$$\alpha > \alpha_{min}$$



$$\alpha < \alpha_{min}$$

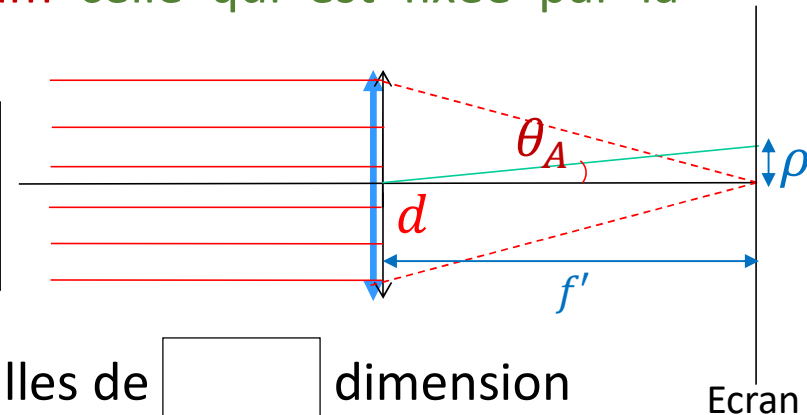
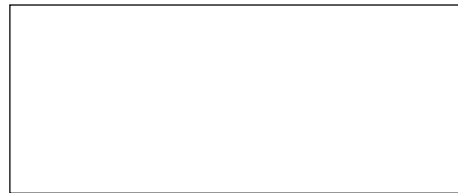


$$\alpha_{min} = \text{[]} = \theta_A = 1.22 \frac{\lambda_0}{d}$$

5. Application à l'imagerie

- Soit un objet « ponctuel » très éloigné (ex : une étoile !) dont on observe l'image avec une lentille de focale f' et de diamètre d .
- Propriété : la dimension de l'image est **au minimum** celle qui est fixée par la **diffraction par la lentille** (appelée **tache d'Airy**).

=> Rayon de la tache sur l'écran :



- Applications :

- Pour observer des étoiles doubles, il faut des lentilles de dimension

- Télescope amateur : $d = 20$ cm, $f = 1$ m de focale, $\lambda = 600$ nm

=>

- Minimum pour l'œil : 4.10^{-4} rad => besoin d'un oculaire avec



The Star HIC 59206 (AO corrected image)
(VLT KUEYEN + MACAO-VLT)

ESO PR Photo 12c/03 (13 May 2003)

© European Southern Observatory

<http://astro2009.futura-sciences.com>

5. Application à l'imagerie : exemple d'un télescope

L'Extremely Large Telescope (ELT) au Chili possède un diamètre effectif de 39 m.

- Quelle est la distance minimale (limite de résolution) entre 2 lucioles situées sur la lune ($D \sim 370\,000\text{km}$) pour que le télescope les distingue ?

Réponse :



Futura



Vue d'artiste du télescope géant de l'ESO: 39 m de diamètre!

BILAN du Chapitre 4 : Diffraction

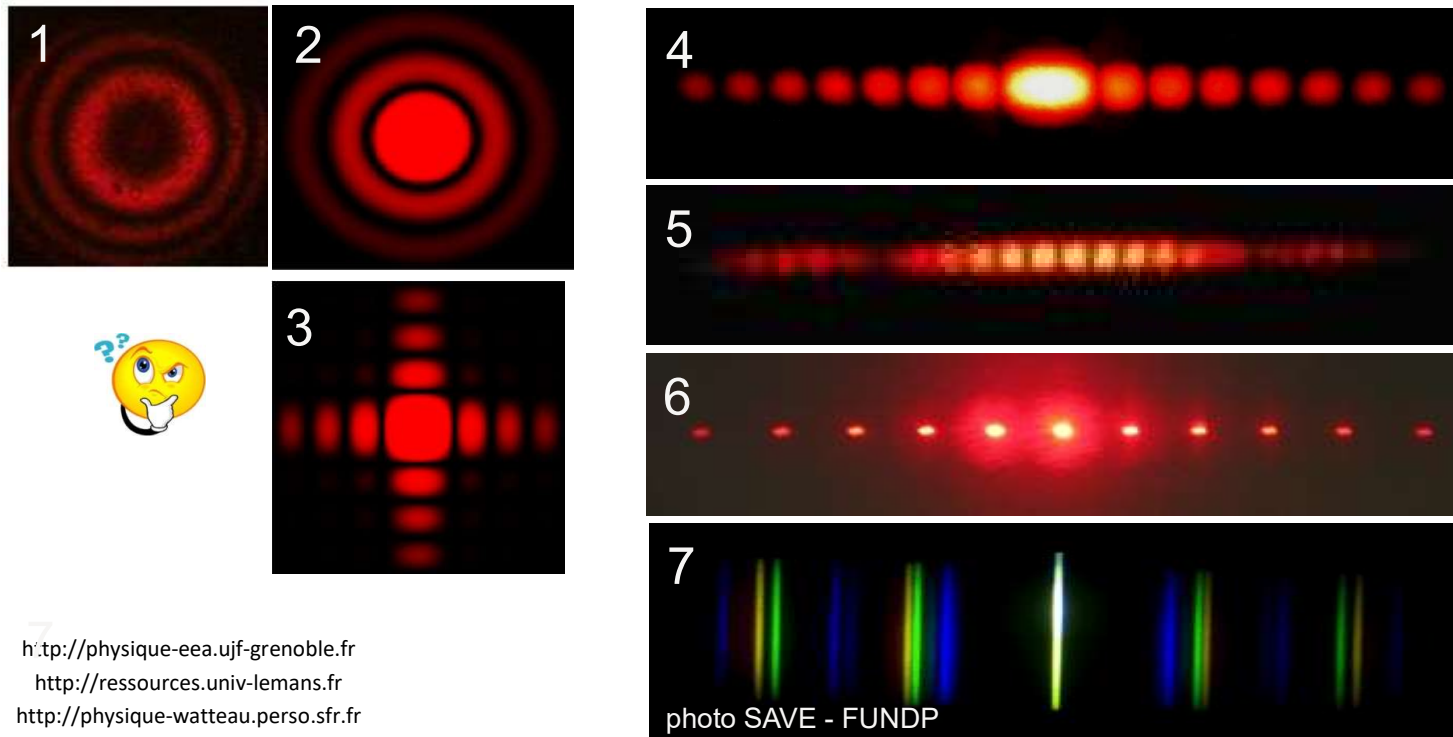
Savoirs :

- ✓ Connaitre les phénomènes de diffraction par une fente et par une ouverture circulaire
- ✓ Connaitre les figures de diffraction par une fente et une ouverture circulaire
- ✓ Connaitre la définition de la limite de résolution et le critère de Rayleigh

Savoir-faire :

- ✓ Calculer l'intensité qui correspond à la figure de diffraction par une fente
- ✓ Calculer la largeur de la tache centrale de diffraction par une fente
- ✓ Calculer la dimension de la tache centrale de diffraction par une ouverture circulaire
- ✓ Appliquer le critère de Rayleigh
- ✓ Calculer une limite de résolution

Comment expliquer ces images ?



- Quels dispositifs optiques ?
- Quels phénomènes optiques ?

Pour finir : Etes vous capable de nommer le phénomène optique correspondant à chaque image ?

