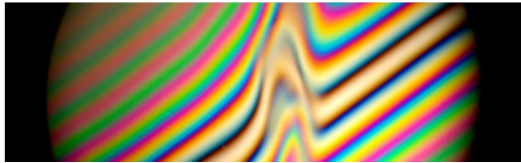


Optique Ondulatoire

Alternants
Mesures Physiques - 2022/2023



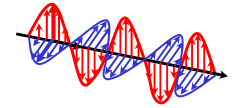
<https://ecampus.paris-saclay.fr/>

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



Plan du cours

- Ch1 : Bases de l'optique ondulatoire
- Ch2 : Interférences à deux ondes
- Ch3 : Interférences à ondes multiples (réseaux)
- Ch4 : Diffraction



2

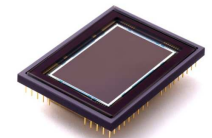
Bibliographie

- Très nombreuses références dont (biblio MP):
 - *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, 2006
- 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/>
 - <http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/>
 - <http://espace-lycee.editions-bordas.fr/enseignan/nodeorder/term/553>

3


Cours en lien avec...

- A l'IUT :
 - Suite de **l'optique géométrique S2**
 - En lien avec le cours de **photonique S4**, d'opto-électronique S5 ou S6...
- Après l'IUT :
 - L3, Master, écoles d'ingénieurs, thèses...
 - L'optique est présente dans notre vie quotidienne et dans beaucoup de métiers !



4

Organisation de l'enseignement

- 9 x 2h Cours/TD
- 4 x 2h Cours/TP
- 3 x 4h de TP
- Cours :
 - Support : 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
- Chamilo: <http://chamilo.univ-grenoble-alpes.fr>
 - Polys crs/TD/TP 
 - Corrections détaillées des exercices


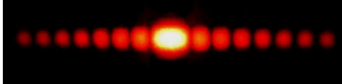
Etre actif durant les séances !



5

Pré-requis

- Matériel : une calculatrice graphique (et pas de téléphone!)
- Ondes (TS) : « Caractéristiques et propriétés des ondes » (onde plane, progressive, sinusoïdale, interférences et diffraction – enseignement de spécialité PC)



- Optique géométrique (S2) :
 - Ondes : Liens entre longueur d'onde, célérité de l'onde, fréquence, définition de l'indice
 - Propagation de la lumière : Dioptries, lentilles, miroirs
- Outils mathématiques (S1) : trigonométrie, fonctions sinus/cosinus, intégrales.

6

Formules de trigonométrie

- Fourni en DS : uniquement le formulaire de linéarisation :


$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a+b) + \cos(a-b)]$$

$$\cos a \sin b = \frac{1}{2} [\sin(a+b) - \sin(a-b)]$$

$$\sin a \sin b = \frac{1}{2} [\cos(a-b) - \cos(a+b)]$$

$$\cos p + \cos q = 2 \cos\left(\frac{p+q}{2}\right) \cos\left(\frac{p-q}{2}\right) \quad \sin p + \sin q = 2 \sin\left(\frac{p+q}{2}\right) \cos\left(\frac{p-q}{2}\right)$$

$$\cos p - \cos q = -2 \sin\left(\frac{p+q}{2}\right) \sin\left(\frac{p-q}{2}\right) \quad \sin p - \sin q = 2 \sin\left(\frac{p-q}{2}\right) \cos\left(\frac{p+q}{2}\right)$$

- Le reste à connaître ! 
 - $\cos(x+\pi/2) = ?$
 - valeurs de x tel que $\cos(x) = 1$?
 - valeurs de x tel que $\cos^2(x)$ est minimum ?

Poly de TD : Révisions de trigo pour séance prochaine

- $\int_0^{\pi} \sin(x) dx = ?$
- $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = ?$
- $\langle \cos(t) \rangle = ?$

7

Evaluations

3xDS + 1xCC + 2xTP

- DS (1h30) : 29 novembre 2022
 - Sans docs, avec calculatrice
 - Formulaire de trigonométrie succinct fourni (cf diapositive « Formulaire de trigonométrie »)
- CC : tests (4 x 20min à priori)
 - Questions et démonstrations traitées en cours (avant traitement du sujet en TD)
 - Exercices (après traitement en TD)
 - Sans calculatrice, pas de rattrapage (si abs injustifiée => zéro)
 - DM éventuellement
- TP : CR

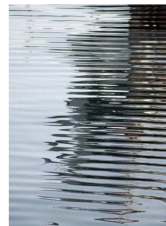
Travail perso nécessaire !

8

Chapitre 1 : Bases de l'optique ondulatoire

- 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

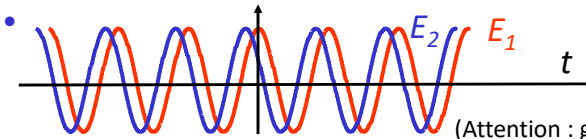
- Objectif : définir un formalisme pour décrire une onde lumineuse

1. Optique : quel type d'onde ? 1.1. Formalisme mathématique

- Ecrire l'expression d'une onde qui se propage :
 - temporellement : $E(t)=$
 - spatialement : $E(z)=$
 - spatialement et temporellement :

$$E(z, t) = \text{[]}$$

- Sens physique des paramètres introduits ?
- Vecteur d'onde ?
- A z fixé, quelle est l'onde qui est en avance ? (ϕ_1, ϕ_2 dans $[0, \pi]$)
- $\phi_2 - \phi_1 > 0$ ou < 0 ?



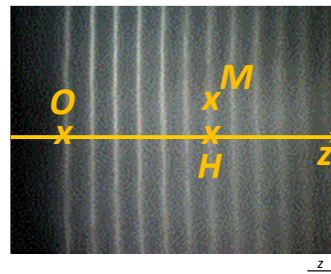
1.2. Onde plane progressive monochromatique (OPPM)

- OPPM se propageant selon (Oz) :

$$E(M, t) = E(z, t) = E_0 \cos[\omega t - kz + \phi_0]$$

- **Onde plane** : Même amplitude dans un plan à un instant t donné.

=> Propriété : à un instant t donné, dans un plan perpendiculaire à l'axe de propagation z, l'amplitude est constante.



OPPM (suite)

$$E(M, t) = E(z, t) = E_0 \cos[\omega t - kz + \phi_0]$$

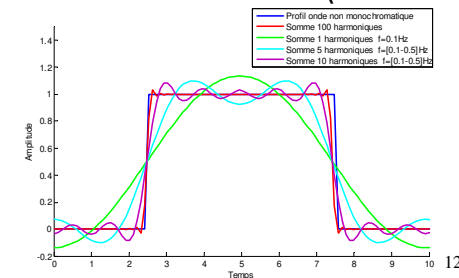
- **Onde progressive** : signal qui progresse sans être déformé

[Onde progressive et transversale](#)

- **Onde monochromatique** : signal à une fréquence donnée (ondes sinusoïdales)

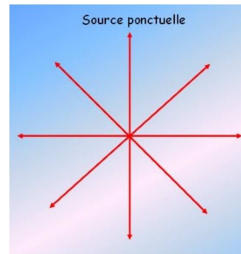
- Prop : Toute fonction périodique est décomposable en une superposition de fonctions sinusoïdales (série de Fourier)

- Ex : Créneaux

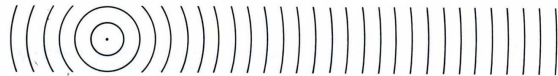


OPPM (suite)

- Est-ce qu'une onde peut être rigoureusement une OPPM ?
- Peut-on décrire une onde émise par une source ponctuelle comme une OPPM?



Modélisation de la source ponctuelle :

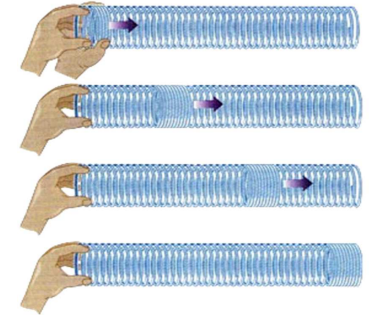
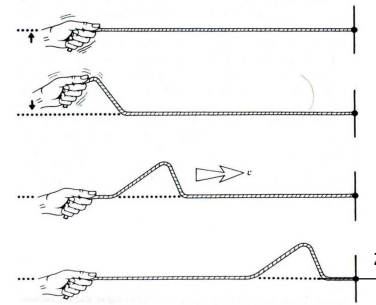


- Faisceau laser collimaté :
Onde progressive ?
Onde plane ?
Onde monochromatique ?



13

1.3. Onde transverse ou longitudinale



- **Onde transverse** : vibration dans le plan perpendiculaire à l'axe de propagation.
- **Onde longitudinale** : vibration dans la direction parallèle à l'axe de propagation.

[Onde progressive et transversale](#)

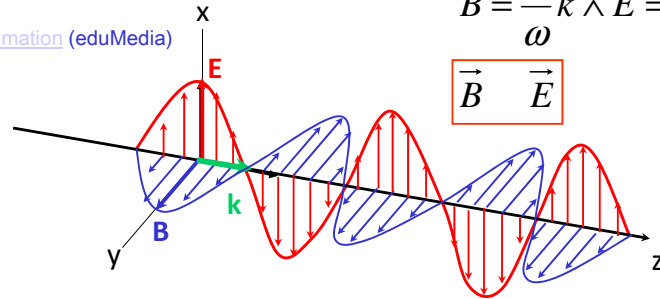
14

1.4. Onde électromagnétique

- Champs électrique et magnétique couplés:

Cas d'une onde plane:

[Animation \(eduMedia\)](#)



$$\vec{B} = \frac{1}{\omega} \vec{k} \wedge \vec{E} = \frac{n}{c} \vec{e}_z \wedge \vec{E}$$

(cf éq. Maxwell)

- OPPM
- Onde transverse
- Vitesse de propagation : $v =$

15

2. Détection de la lumière

- Quels instruments ?

- Quels temps de réponse ?

- Quelle est la grandeur physique détectée?



- Période d'oscillation d'une onde visible :

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

\Rightarrow un capteur mesure uniquement du flux énergétique

- $\langle E(t) \rangle = ?$ (Notation : $\langle \rangle$ moyenne temporelle)

16

Intensité lumineuse et éclaircissement

Les détecteurs sont des détecteurs quadratiques :

sensibles à

Rappel maths:

- On définit l'**intensité lumineuse** comme étant la puissance par unité de surface : I
- => Permet de s'affranchir de la taille du détecteur
- On montre que (équations de Maxwell) :

$$I(M) = \epsilon_0 n c \langle \vec{E}^2(M, t) \rangle$$

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

- Dans le vide (ou l'air), pour simplifier les notations, on étudiera l'**éclaircissement** qu'on appellera aussi de manière abusive « intensité » :

$$\epsilon(M) = "I(M)" = 2 \langle \vec{E}^2(M, t) \rangle$$

17

3. Phase d'une onde lumineuse monochromatique

- Est-ce que les détecteurs optiques sont sensibles à la phase du champ électrique ? =>
- Peut-on tout expliquer en ne raisonnant qu'avec l'intensité lumineuse ?

Exemple : Expérience des fentes d'Young



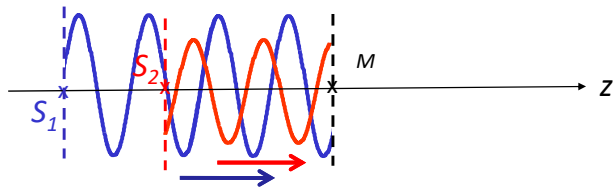
particules.lescigales.org
(manipe)

Animation (<http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr>)

18

3.1. Importance de la phase

- Interférences de 2 ondes lumineuses de même fréquence, issues de S_1 et S_2 arrivant en M :



- Le signal en M dépend du déphasage...

Pour l'onde 1, la « phase globale » en M dépend de la phase au

Pour l'onde 2, la « phase globale » en M dépend de la phase au

$$E_1(z_M, t) =$$

$$E_2(z_M, t) =$$

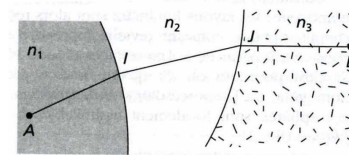
=> Notion de chemin optique

19

3.2. Chemin optique et différence de marche

- Définition du **chemin optique** : $(AB) = nAB$

Généralisation à différents milieux (homogènes) :



$$(AB) =$$

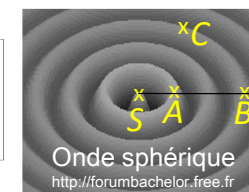
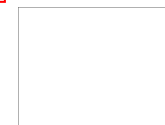
- Soit une source S . La **différence de marche optique** entre A et B est définie par la différence des chemins optiques:

$$\Delta_{AB} = (SB) - (SA)$$

VRAI ou FAUX: $\Delta_{AB} = n AB$?



$\Delta_{BC} = n CB$?



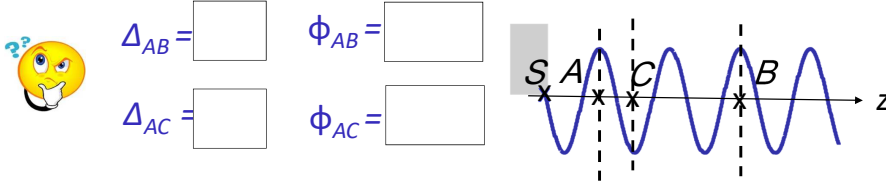
20

3.3. Différence de phase : lien avec la différence de chemin optique

- Pour une OPPM, lien entre déphasage et différence de marche :

$$\phi =$$

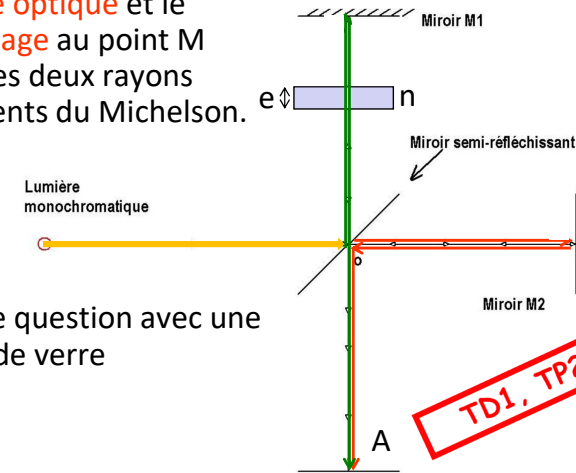
- Application* : Exprimer les différences de marche en fonction de λ et en déduire les déphasages (propagation dans l'air):



21

Exemple : Interféromètre de Michelson

- Calculer la **différence de marche optique** et le **déphasage** au point M entre les deux rayons émergents du Michelson.



- Même question avec une lame de verre



22

3.4. Front d'onde

Définition : le **front d'onde** est le lieu des points M tel que le chemin optique (SM) soit constant

Onde sphérique
(S ponctuelle)

Onde plane
(S à l'infini)

⇒ Conséquence : tous les points d'un front d'onde sont

- Théorème de Malus** : les rayons lumineux issus d'une source ponctuelle sont normaux aux fronts d'onde
- Les rayons représentent la direction de propagation de l'énergie lumineuse (orientés selon \vec{k})

23

BILAN du Chapitre 1 : Bases de l'optique ondulatoire

Savoirs :

- ✓ Connaître la nature de l'onde : onde transverse, onde progressive, onde plane, onde plane progressive, onde plane progressive monochromatique (OPPM)
- ✓ Connaître la composition d'une onde électromagnétique
- ✓ Connaître les notions de rayon lumineux, de chemin optique, de déphasage, de front d'onde (Théorème de Malus)
- ✓ Connaître la notion de vecteur d'onde
- ✓ Connaître la notion de train d'ondes

Savoir-faire :

- ✓ Exprimer le champ électrique d'une OPPM
- ✓ Calculer une intensité lumineuse
- ✓ Calculer un chemin optique
- ✓ Calculer un déphasage
- ✓ Calculer une différence de marche optique

Test Trigo et Ch1
TD1, Exo 1 et 2

Chapitre 2 : Interférences à deux ondes



particules.lescigales.org

- Qu'appelle-t-on « interférences » ?
- Qu'est ce qui caractérise une figure d'interférence ?
- Dans quelles conditions observe-t-on des interférences ?
- Objectif : savoir calculer l'intensité résultante de l'interférences entre 2 ondes et analyser la figure d'interférences.

2. Modèle scalaire de la lumière

- Pour l'étude des interférences, on considère une OPPM qui vibre selon la direction \vec{u} :

$$\vec{E}(M, t) = E(M, t)\vec{u} = E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{z} + \varphi)\vec{u}$$

⇒ On ne s'intéressera qu'à $E(M, t)$ (grandeur scalaire)

Remarques :

- Ce modèle suppose seulement que les différentes composantes vectorielles du champ sont indépendantes.
- Ce modèle considère une onde polarisée rectilignement (chapitre 2).
- **Théorème de superposition des champs :**

$$E(M, t) =$$

- **Attention :**

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

27

1. Introduction

- Définition : 2 sources **interfèrent** si l'intensité résultante de la superposition diffère de la somme des intensités individuelles
- Phénomène transversal en physique :
 - optique
 - ondes sonores (ex : casque anti-bruit)
 - ondes mécaniques.
- Etude des interférences

⇒ Calcul de l'intensité lumineuse, en toute rigueur :

$$I(M) = \epsilon_0 n c \langle \vec{E}^2(M, t) \rangle \quad (\langle \rangle : \text{moyenne temporelle})$$

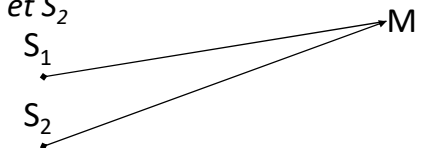
Mais ici (n fixé) :

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

26

3. Interférences à 2 ondes 3.1. Calcul de l'intensité

- Deux sources ponctuelles S_1 et S_2



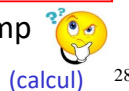
- **Méthode pour calculer l'intensité en M** (valable pour 2 ou N ondes) :

1) Calcul du champ total (théorème de superposition)

$$E(M, t) = \sum_{i=1}^N E_i(M, t)$$

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

⇒ Appliquer cette méthode pour calculer le champ au point M



(calcul) 28

Calcul de l'intensité (conclusion)

Calcul à savoir faire !

- Résultat pour 2 ondes **monochromatiques de même longueur d'onde et de même intensité I_0** :

$$I(M) = 2I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\Delta_M}{\lambda} + \phi_{S_1S_2} \right) \right]$$

$$= 4I_0 \cos^2 \left(\frac{1}{2} \left(\frac{2\pi\Delta_M}{\lambda} + \phi_{S_1S_2} \right) \right)$$

Le déphasage total est lié :

- à la différence de marche $\Delta_M = (S_2M) - (S_1M)$
- au déphasage $\phi_{S_1S_2}$ entre les sources S_1 et S_2 (s'il y en a un)
- attention au signe entre ces 2 termes : **regarder si ces 2 déphasages s'ajoutent ou se retranchent.**

29

Lien entre l'équation et la figure d'interférences observée

$$I(M) = 2I_0 \left(1 + \cos \left(\Phi_{S_1S_2} + \frac{2\pi\Delta_M}{\lambda} \right) \right)$$



30

3.2. Analyse de la figure d'interférences : La magie des interférences...

- Franges sombres (min de I) :** $I(M) = \square$

=> « lumière + lumière = obscurité ! »

Les 2 ondes **interfèrent** \square

- Franges claires, ou brillantes (Max de I) :** $I(M) = \square$

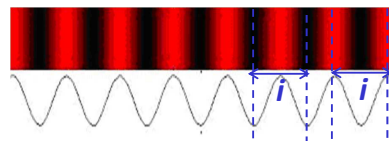
=> Zones de « surintensité » !

Les 2 ondes **interfèrent** \square

- Et l'intensité moyenne? $\langle I(M) \rangle_{\text{écran}} = \square$

- Définition : **interfrange i**

Distance entre 2 mins (ou 2 Max) **consécutifs**



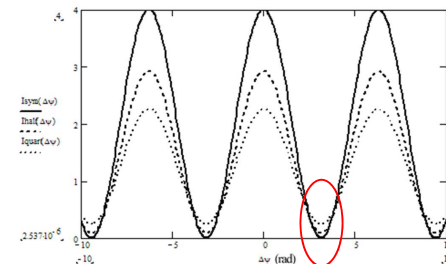
31

3.3. Contraste

- Définition :

$$C = \square$$

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



$I = f(\phi)$:

- trait continu : $I_1 = I_2$
- tirets : $I_1 = 2 I_2$
- pointillés : $I_1 = 4 I_2$

Ex : Tache d'huile (TD2)

- Propriété** : pour avoir un bon contraste il faut une bonne cohérence des sources (sinon brouillage)

32

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



33

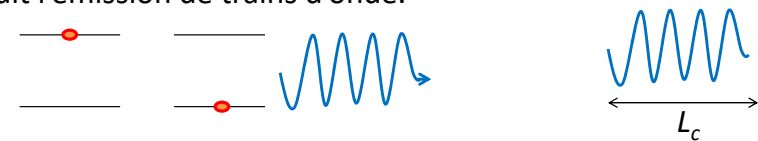
3.4. Critères de cohérence

- Définition : 2 ondes sont cohérentes si elles interfèrent

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

- Théorie des interférences basée sur le modèle d'OPPM (onde sinusoïdale)
 - Une onde réelle a nécessairement un début et une fin !!!
- => meilleur modèle : le train d'onde

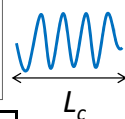
L'émission de lumière repose sur la désexcitation d'atomes qui induit l'émission de trains d'onde.



34

Trains d'onde

- **Train d'onde** : onde dont l'étendue spatiale et temporelle est finie, d'une durée τ_c occupant dans l'espace une longueur L_c , appelée longueur de cohérence.
- Lien entre τ_c et L_c ?

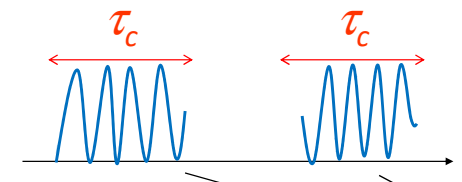


	L_c	τ_c
Lampe à vapeur de Hg	1cm	
Laser He-Ne	1m	
Diode laser à semi-conducteur	100m	



35

Trains d'onde (suite)



- **Phase des trains d'onde** :
 - Durant un train d'onde : ϕ constante
 - D'un train d'onde à l'autre : saut de phase aléatoire

Phase bien définie uniquement pendant la durée τ_c !!

36

Cohérence

Interférence entre 2 ondes :

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2} \left\langle \cos\left(\phi_{S_1S_2} + \frac{2\pi\Delta_M}{\lambda}\right) \right\rangle_\theta$$

θ : temps de réponse du détecteur :

$$\theta \approx \tau_C \quad (\sim 10^{-9} - 10^{-11} \text{s})$$

=> Moyenne sur

- 1^{er} cas : il existe une relation de phase entre S_1 et S_2 fixe dans le temps ($\phi_{S_1S_2} = \text{constante}$). On dit alors que les **sources sont cohérentes**.

$$\left\langle \cos\left(\phi_{S_1S_2} + \frac{2\pi\Delta_M}{\lambda}\right) \right\rangle_\theta = \text{$$



Observe-t-on des interférences dans ce cas ?

37

Cohérence (suite)

Interférence entre 2 ondes :

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2} \left\langle \cos\left(\phi_{S_1S_2} + \frac{2\pi\Delta_M}{\lambda}\right) \right\rangle_\theta$$

- 2^{ième} cas : les sources ne sont pas cohérentes : le déphasage entre 2 sources varie aléatoirement d'un train d'onde à l'autre dans l'intervalle $[0, 2\pi]$. Donc :

$$\left\langle \cos\left(\phi_{S_1S_2} + \frac{2\pi\Delta_M}{\lambda}\right) \right\rangle_\theta = \text{$$



Observe-t-on des interférences dans ce cas ?

38

Est-ce que 2 sources différentes peuvent interférer ? (bis)

- *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 :

$$I(M) = \text{$$

=> condition $\lambda_1 = \lambda_2$

39

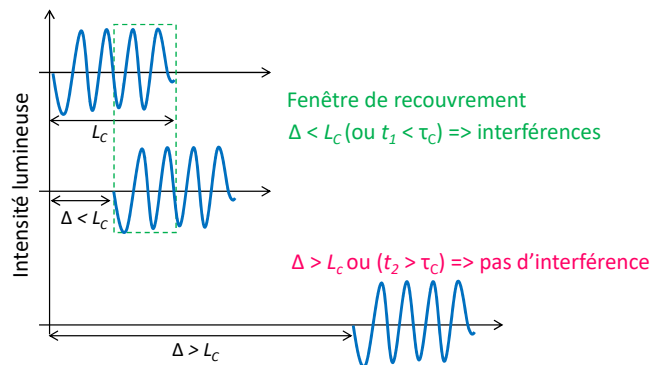
Cohérence spatiale et temporelle

- Expérimentalement la cohérence est reliée à :
 - La dimension de (S) : doit être de petite dimension (**cohérence spatiale**)
 - (S) pas rigoureusement ponctuelle
 - => analogue à plusieurs points sources incohérents
 - La largeur spectrale de (S) : doit émettre dans un intervalle étroit de λ (**cohérence temporelle**)
 - (S) pas rigoureusement monochromatique
 - => analogue à plusieurs sources monochromatiques de λ différentes

40

Cohérence temporelle – une autre façon de voir les choses

Cohérence temporelle : deux trains d'onde ne peuvent interférer que s'ils se recouvrent en partie. Cela est possible si leur différence de marche Δ est inférieure à leur étendue spatiale L_C .



Cohérence spatiale et temporelle

- Conclusion : Si 2 sources sont cohérentes spatialement et temporellement on peut observer des interférences (dans le champ d'interférences...)

<https://www.youtube.com/watch?v=Nj49XrSfkS4>

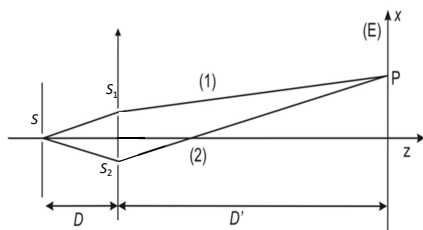
Critères de cohérence

- En pratique : 2 sources sont cohérentes (donc peuvent interférer) si, et seulement si, elles sont issues d'une même source ponctuelle monochromatique.

• Dispositifs expérimentaux pour créer 2 sources cohérentes :

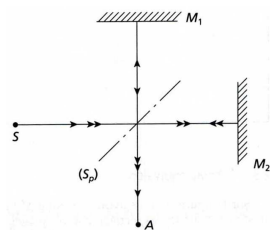
➤ **Système à division du front d'onde :**

Division spatiale du faisceau
(Ex : fentes d'Young)



➤ **Système à division d'amplitude :**

Division du faisceau avec une lame séparatrice
(Ex : interféromètre de Michelson)



4. Interférences avec les trous d'Young en détails

4.1. 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 ?

=>

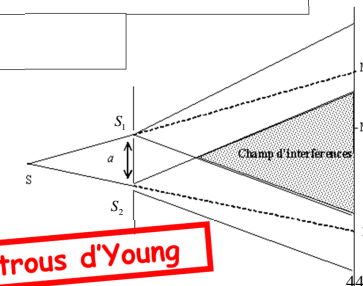
- En réalité :

- S_1 et S_2 sont

=> elles interfèrent dans la zone de l'espace où

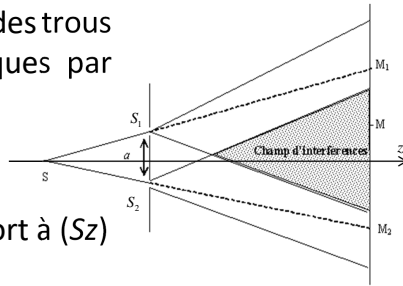
(champ d'interférences)

TD2, Ex trous d'Young



Dispositif des fentes d'Young (suite)

- 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 (Sz)

$$\Rightarrow \phi_{S_1 S_2} = \boxed{}$$

- **Même intensité** (mêmes trous)

$$\Rightarrow I_1 = \boxed{}$$

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

$$I(M) = \boxed{}$$

45

4.2. Etude de l'intensité dans un plan (P) parallèle à $(S_1 S_2)$

- Notations :

$$a = S_1 S_2 ; D = O'O ; x = OM$$

- Ordres de grandeur :

$$a \sim 1 \text{ mm} ; D \sim 1 \text{ m} ; x < 1 \text{ cm}$$

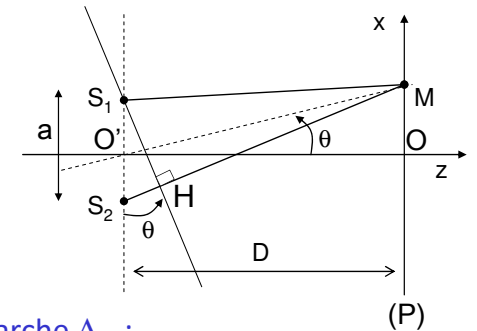
=> Hypothèses :

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

- Calcul de la différence de marche Δ_M :

$$\Delta_M = \boxed{}$$

(calcul à savoir faire)



46

Eclairement dans un plan // à $S_1 S_2$ (suite)

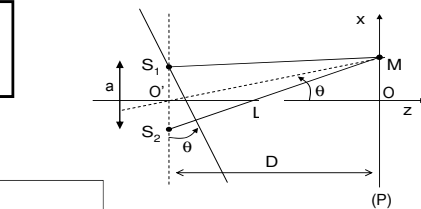
$$I(M) = I(x) = \boxed{}$$

- Ne dépend que de x :

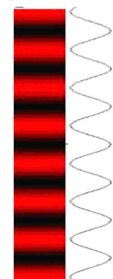
=> La figure d'interférences est constituée de $\boxed{}$

- Fentes verticales**: avec des sources ponctuelles, figure peu lumineuse. Les franges étant rectilignes, on peut remplacer les sources ponctuelles par des fentes // à (Oz)

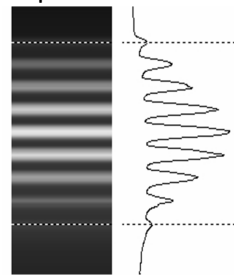
- Les franges d'interférences sont parallèles aux fentes



Théorie :

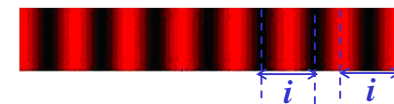


Expérience:



<http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/> 47

4.3. Calcul de l'interfrange



Méthode :

- Calcul de la position x_m des franges brillantes (ou de la position x_j des franges sombres)

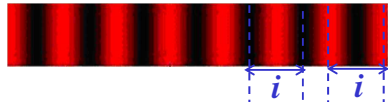
- Calcul de l'interfrange :

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

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

48

Cas des trous d'Young : Calcul de l'interfrange



Cas particulier des trous d'Young (cf TD) :

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

(calcul) $x_m =$

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

(calcul) $x_j =$

2) Interfrange : $i = x_{m+1} - x_m \Rightarrow i =$
ou $i = x_{j+1} - x_j$



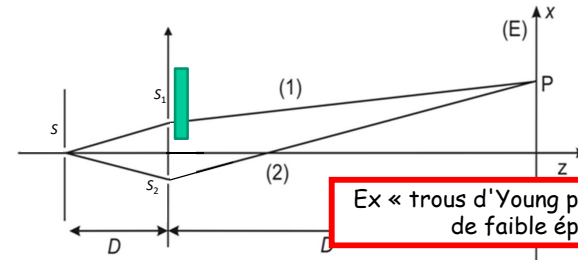
4.4. Exemples d'application des fentes d'Young

$i = \frac{\lambda D}{a}$ • 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

• **Interférométrie stellaire** :

VLTI (Very Large Telescope Interferometer)



4.5. Ordre d'interférence et frange centrale

• Définition : **Ordre d'interférence, p** : $p = \frac{\Delta}{\lambda} \Leftrightarrow p =$
p pas forcément entier !

Pour les trous d'Young :

p pour frange brillante ?

p pour frange sombre ?

• Définition : **Frangne centrale** = frange qui correspond à $\Delta = 0$.

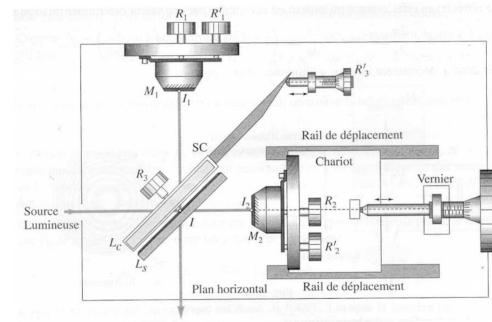
$\Delta = 0 \Rightarrow p =$

\Rightarrow Pour les trous d'Young : la frange centrale est
 située en $x =$

5. Interféromètre de Michelson

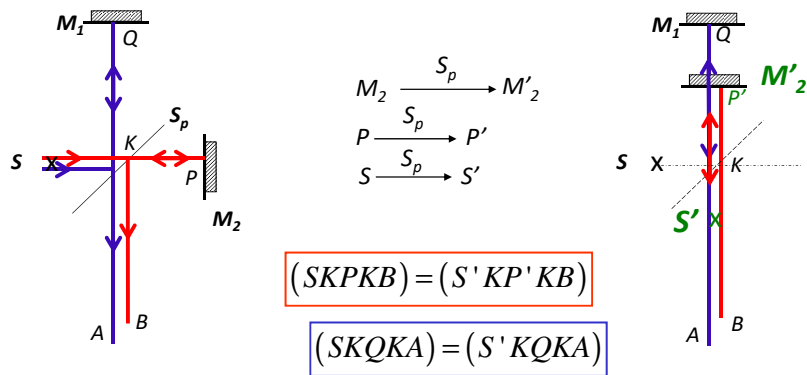
5.1. Description du dispositif

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



M_2 est monté sur une translation
 \Rightarrow Utile pour mesures...

5.2. Schéma équivalent

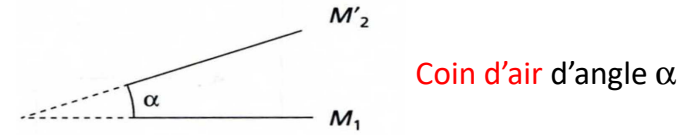


⇒ les systèmes optiques ($\{M_1+M_2+S_p\}$ éclairé par S) et ($\{M'_1+M'_2\}$ éclairé par S') sont équivalents.

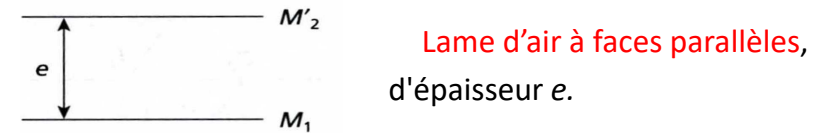
53

Schéma équivalent : lames d'air

- Si M_1 et M'_2 forment un petit angle α :



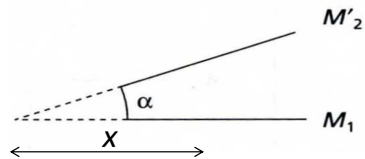
- Si M_1 et M_2 sont perpendiculaires :



e correspond

54

5.3. Coin d'air



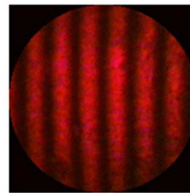
TD2, Exo 5 et TP

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

- Bilan :

$$I(M) = \text{[]}$$

$$\Delta(x) = \text{[]}$$

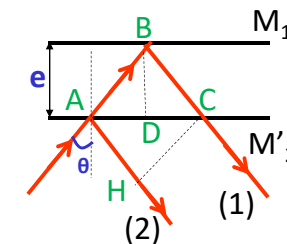
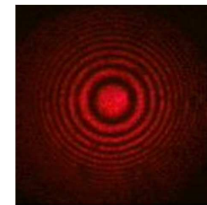


⇒ Figure d'interférences :

Franges

55

5.4. Lame d'air à faces parallèles



⇒ Système équivalent à 2 sources :

$$I(M) = \text{[]}$$

- Calculer Δ en fonction de e et θ
- $\Delta = \text{[]}$ (à savoir démontrer)

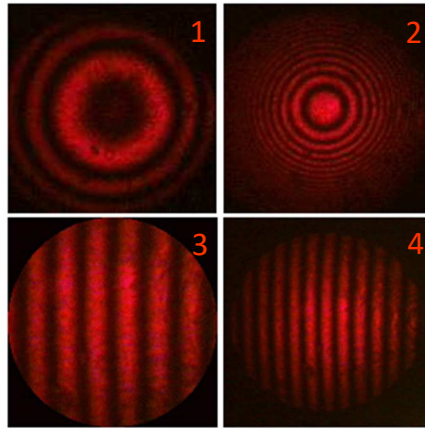
- Quelle figure d'interférences ? Pourquoi ? Où ?

TD2, Exo 6 et TP

56

5.5. 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 ?

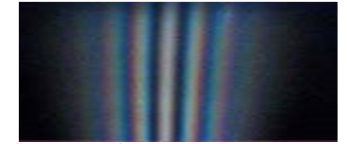


<http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/>

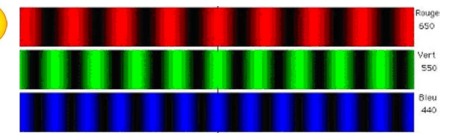
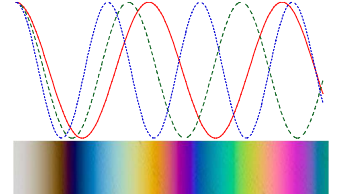
57

6. Interférences à 2 ondes en lumière blanche

- Expérience : avec fentes d'Young ou Michelson
⇒ pas monochromatique mais on voit des franges, pourquoi ???
- i dépend de λ (attendu). Pour trous d'Young :
A.N. : $D = 2 \text{ m}$, $a = 1 \text{ mm}$:
 $\lambda = 633 \text{ nm}$ (rouge) $\Rightarrow i = 1,27 \text{ mm}$
 $\lambda = 450 \text{ nm}$ (bleu) $\Rightarrow i = 0,90 \text{ mm}$
- A quoi correspond la frange blanche ? 🤔



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



http://espacelycee.editions-bordas.fr/enseignant/anim/partie_1_sequence_4_activite_4_interferences

58

« Contact optique »

Contact optique du Michelson : zone où virtuellement l'image d'un miroir se superpose avec l'autre miroir.

- Comment repérer le contact optique à partir de la figure d'interférences en lumière blanche ?
- Au contact optique, que vaut Δ ?
- TP Michelson, 2) « Pourquoi avec l'interféromètre de Michelson on observe uniquement des interférences proche du contact optique, **même en lumière monochromatique** ? »

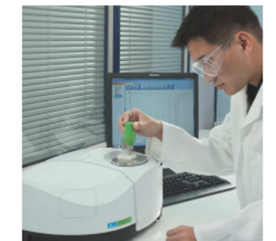
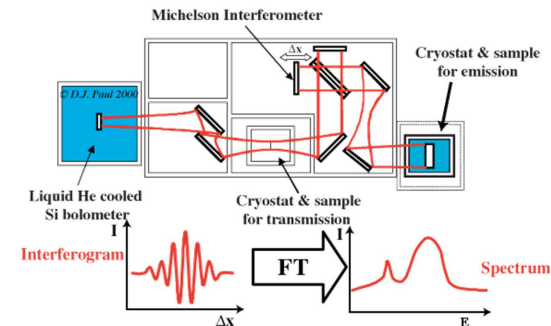


Piste de réflexion \Rightarrow Sur un schéma du Michelson représenter un train d'onde source et les 2 trains d'onde associés à la sortie. Que se passe-t-il si les 2 bras de l'interféromètre ont des longueurs très différentes ?

59

7. Exemples d'applications

- lame d'égal épaisseur : Couleur des bulles de savon, des ailes de papillon...
- Michelson : Spectroscopie à Transformée de Fourier : *FT-IR* (TP Spectroscopie S3)



FT-IR Spectrum Two PerkinElmer (TP spectro)

<http://faculty.sdmiramar.edu>

60

BILAN du Chapitre 2 : Interférences à 2 ondes

Savoirs :

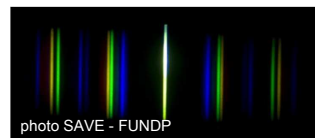
- ✓ Comprendre le phénomène d'interférences
- ✓ Connaître les critères de cohérence
- ✓ Connaître les définitions de l'interfrange, d'une frange brillante, d'une frange sombre
- ✓ Connaître la définition de l'ordre d'interférence
- ✓ Connaître la définition du contraste
- ✓ Comprendre le phénomène d'interférence en lumière polychromatique
- ✓ 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

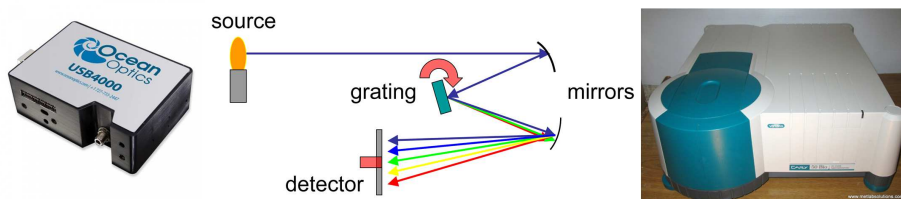
Savoir-faire :

- ✓ Calculer la figure d'interférences pour un système à 2 ondes
- ✓ Calculer la différence de marche
- ✓ Calculer l'interfrange
- ✓ Calculer la position des franges sombres et brillantes
- ✓ Savoir utiliser les systèmes optiques équivalents
- ✓ Calculer la figure d'interférences et des différences de marche dans le cas des trous d'Young, de la lame d'air à faces parallèles et du coin d'air
- ✓ 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

Chapitre 3 : Interférences à ondes multiples (Réseaux)



- Réseaux, application à la spectroscopie



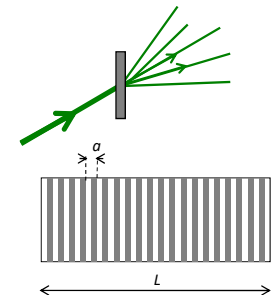
1. Réseaux 1.1. Description

a) Réseaux *en transmission* :

Fentes identiques caractérisées par :

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

⇒ Relation entre n et a : $n =$



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



Description (suite)

b) Réseaux en réflexion :

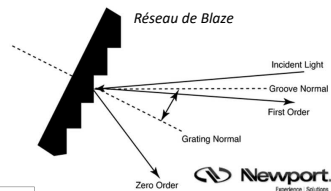
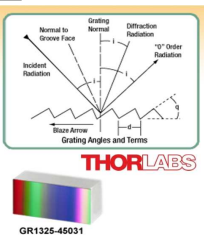
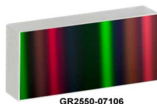
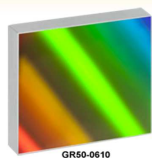
Motifs réfléchissants

Egalement caractérisées par a et n

Exemple de réseaux en réflexion : DVD !

$a \sim 0.74 \mu\text{m}$ pour un DVD $\Rightarrow n =$

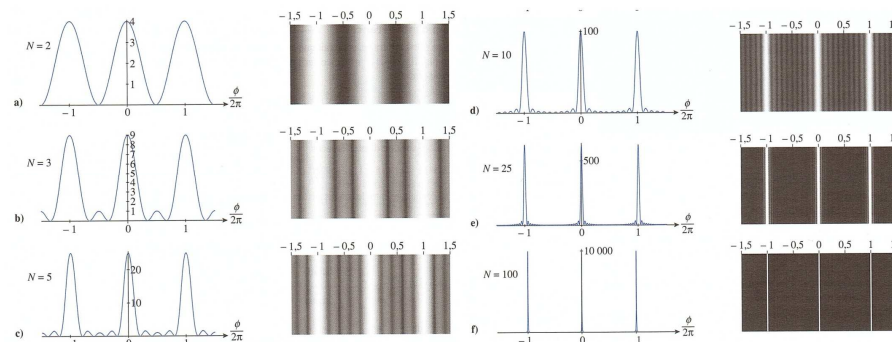
- ▶ 300 nm to 10.6 μm Blaze Wavelengths
- ▶ Higher Efficiencies than Holographic Gratings
- ▶ 5 Sizes Available with Sides Measuring from 1/2" to 2"



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

65

1.2. Interférences à N ondes

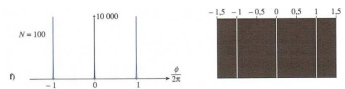


<http://ressources.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/reseau2.html>

H prépa, *Optique ondulatoire*, Hachette

66

Interférences à N ondes : cas des réseaux



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

- Différence entre ces courbes et la réalité ?

\Rightarrow

- Approximation

- Est-ce valable ?

- Propriété principale des réseaux exploitée : positions des max \Rightarrow pour cela inutile de considérer la diffraction

67

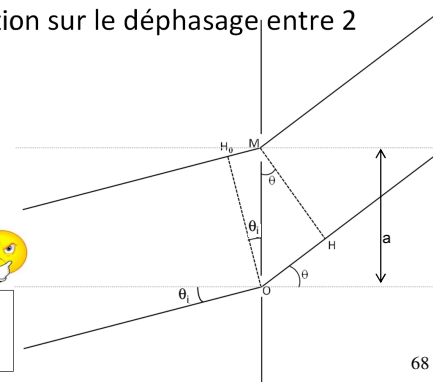
1.3. Loi fondamentale des réseaux

- Recherche de la position des Max d'intensité \Rightarrow résulte de l'interférence entre les différentes fentes
- Chaque fente se comporte comme une source secondaire
- Toutes les fentes sont cohérentes \Rightarrow interfèrent
- Pour avoir un max d'intensité, les ondes émises par les fentes doivent être en phase \Rightarrow Condition sur le déphasage entre 2 fentes successives :

$$\varphi = \text{$$

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

$$\varphi = \text{$$



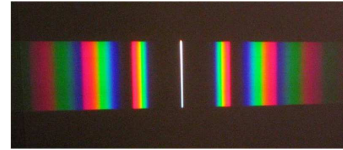
68

Loi fondamentale des réseaux (suite)

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

$$\sin \theta_m - \sin \theta_i = m \lambda \quad \text{avec } m \in \mathbf{Z}$$

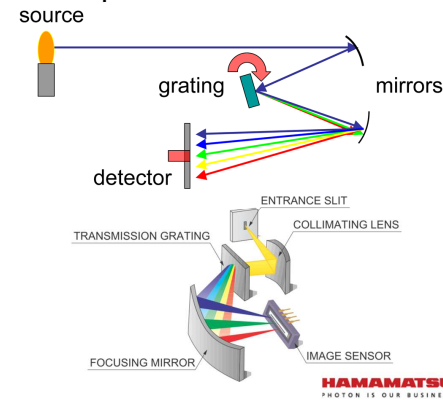
- m est appelé « l'ordre » de diffraction
- Exemple : observation en lumière blanche :
 - Combien voit-on d'ordres ?
 - Où est l'ordre zéro ?
 - Des interférences en lumières blanche ?
 - Où sont localisées les interférences ?



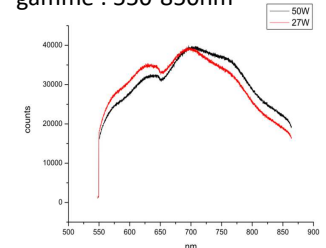
69

2. Une application des réseaux : les spectromètres

- Schéma de principe d'un spectromètre à réseaux :



Petit spectromètre USB, fibré
gamme : 550-850nm



Source de lumière blanche TP

- Exemple d'utilisation : Surveillance de la qualité de l'air

70

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

Savoirs :

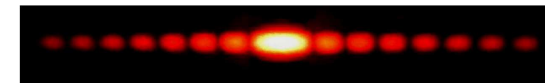
- ✓ Connaître les caractéristiques d'un réseau (pas et nombre de traits/mm)
- ✓ Connaître la définition de l'ordre de diffraction d'un réseau

Savoir-faire :

- ✓ Calculer la condition d'interférences constructives pour un réseau
- ✓ Calculer l'angle de diffraction des ordres d'un réseau

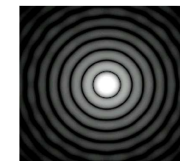
Chapitre 4 : Diffraction

- Diffraction par une fente



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

- Diffraction par un trou

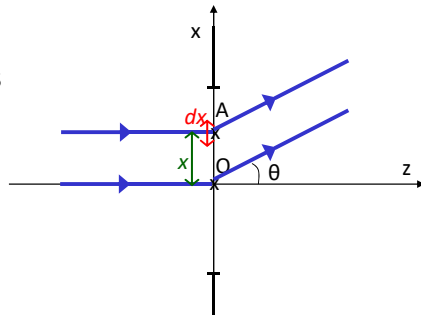


1. Cadre de l'étude

- Limite de l'optique géométrique : propagation rectiligne n'est plus vérifiée lorsque la taille caractéristique de l'ouverture est comparable à λ
- On se limitera ici aux conditions de Fraunhofer :
 - Onde incidente = **onde plane**
 - Observation de la figure de diffraction à **l'infini**
- Exemple pour une fente :

Diffraction résulte de l'interférences entre des fentes infinitésimales de largeur dx (sources cohérentes).

=> Méthode : calculer E puis I



TD4, Exo 3

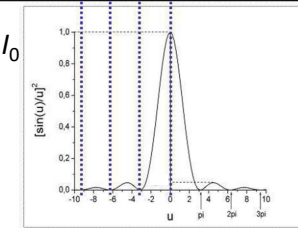
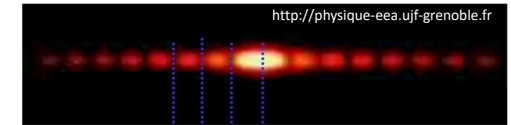
73

2. Diffraction par une fente

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

- Intensité diffractée dans la direction θ :

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



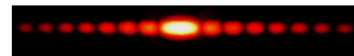
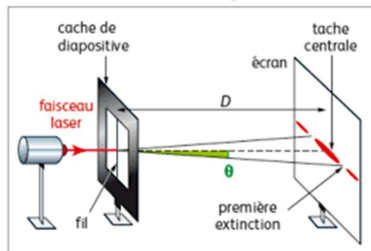
- Valeur du max secondaire = $0,045 \times I_0$
- Puissance dans le lobe principal = 84%
- Tache centrale, deux fois plus large que les autres
- Si $D \gg a$ et $D \gg \lambda$ (alors $\sin \theta \sim X/D$) :
largeur de la tache centrale = $2\lambda D/a$
- Application : Mesure de la largeur d'une fente (cf TP)

a : largeur de la fente

74

3. Principe de Babinet

- Figure de diffraction créée par un cheveu ?



Idem qu'une fente de même dimension !!! (cf TP)

- **Principe de Babinet** : La forme d'une figure de diffraction est la même si elle est obtenue à partir d'un corps opaque ou de son « conjugué », obtenu en perçant une plaque aux emplacements où se situe ce corps (en dehors de l'image géométrique).

75

4. Diffraction par un trou

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

$$\theta_D = \frac{1,22\lambda}{d} \quad d : \text{diamètre du trou}$$



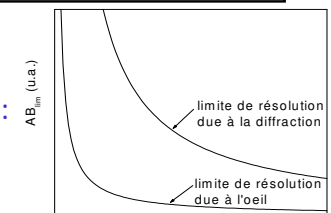
$d \neq D...!$

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



4.1. Limite de résolution

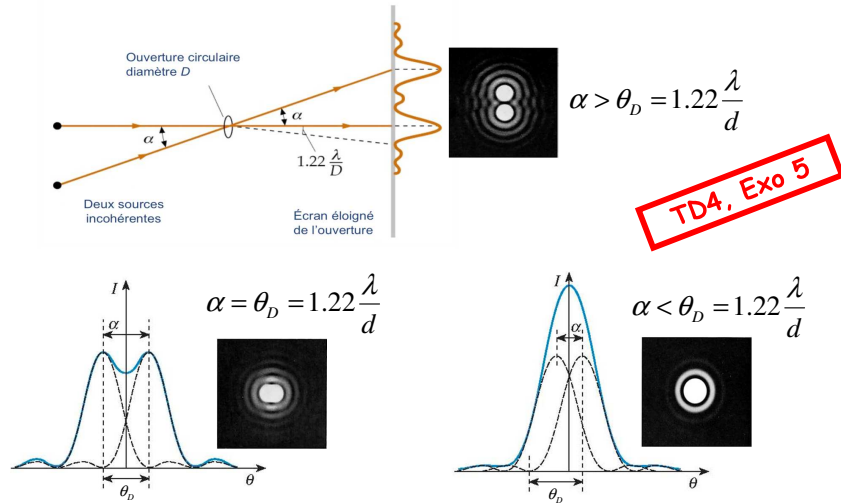
- Def : plus petite distance séparant deux points qui peuvent être distingués.
- Lim de résolution de l'œil dans le visible : 0.1 mm à 25 cm (PP)
- Exemple TP « Microscope » S2 :



Grandissement de l'objectif 76

4.2. Critère de Rayleigh

« Deux points objets seront distinguables si le centre des images est séparé d'une distance au moins égale au « rayon » de la tache de diffraction. »



77

4.3. 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 :

$$\rho = \boxed{}$$

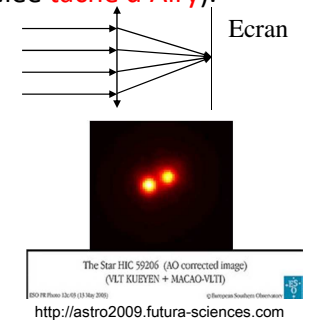
- Applications:
- Pour observer des étoiles doubles, il faut des lentilles de dimension

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

$$\Rightarrow \rho = \boxed{} \Rightarrow \theta_D = \boxed{}$$

Minimum pour l'œil : $4 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$

$$\Rightarrow \text{besoin d'un oculaire avec } \gamma = \boxed{}$$



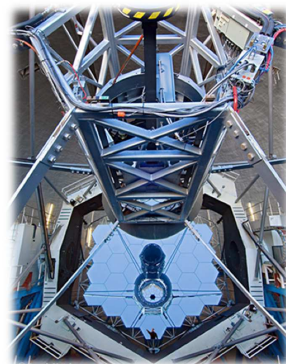
78

Exemple : Télescope

Le télescope Keck à Mauna Kea (Hawaii), possède un diamètre effectif de 10 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 :



79

BILAN du Chapitre 4 : Diffraction

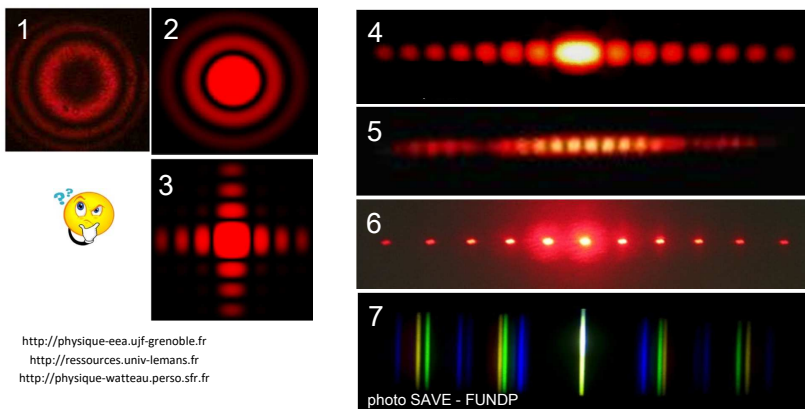
Savoirs :

- ✓ Connaître les phénomènes de diffraction par une fente et par une ouverture circulaire
- ✓ Connaître les figures de diffraction par une fente et une ouverture circulaire
- ✓ Connaître 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

Comment expliquer ces images ?



- Quels dispositifs optiques ?
- Quels phénomènes optiques ?