# Programme d'optique de 1ère année

Relations de conjugaison:

**Lentilles minces** 

Miroirs sphériques

# Spectroscopie $n(\lambda)$ milieu dispersif

- •D(i,  $\lambda$ )
- Prisme
- Effet Doppler dont redshift

### Fibres optiques n (z)

#### milieu non homogène

- Télécommunications
- Multiplexage
- Médecine
- Beaux-Arts

## Applications à connaître :

(Cf TP-cours)

Instruments d'optique

Préparation d'un faisceau: collimateur

Observation d'un faisceau : lunette de visée

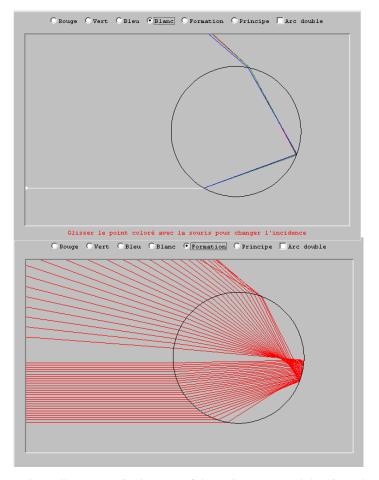


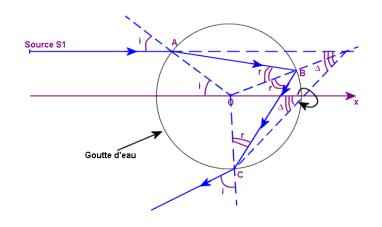
#### Arc-en-ciel simple/double/Accumulation de lumière au minimum de déviation

Savoir retrouver  $\sin^2(i_{m1}) = (4 - n^2) / 3$  et  $\sin^2(i_{m2}) = (9 - n^2) / 8$ .

En 1637, dans son livre « les Météores », Descartes étudie l'arc-en-ciel, « merveille de la nature)

Arc simple (1 réflexion)/ Arc double : 2 réflexions



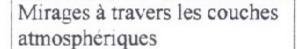


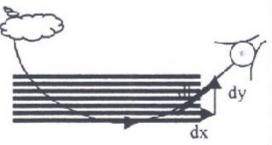
D = 
$$(i-r)+(\pi \in 2r)+(i-r)$$
  
D =  $\pi \in 2i-4r$   
sin i = n sin r

Nous pouvons alors étudier le minimum de déviation : dD = 2di - 4dr = 0 pour un extremum de déviation. Pour une longueur d'onde donnée, cos i di = n cos r dr  $dD = 2di - 4\cos i di / (n \cos r)$   $dD = 2di [1 - (2\cos i / (n \cos r))]$  dD = 0 pour  $2\cos l = n \cos r (l = 59^{\circ} et r = 39,5^{\circ})$ . D'où <u>l'inclinaison maximum A = 2  $\pi$  - D = 42° à 2° près</u>

http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/arcciel.html et BUP n° 749 pour l'étude de la polarisation

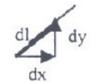
## Milieux isotropes non homogènes





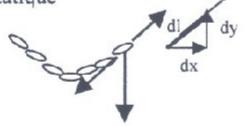
Fibres optiques à gradient d'indice





télécommunications

Analogies en mécanique : cas de la corde pesante en statique



$$n \sin i = constante n_0 et$$
  
 $n = n_0 + bz$ 

sin i = 
$$dx/dl$$
 et  
 $dl = [(dx)^2 + (dy^2)]^{1/2}$   
 $n^2 = K [1 + (dy / dx)^2]$ , d'où,  
en dérivant par rapport à x:

$$d^2y/dx^2 = A (n_0 + bz)$$
  
et A>0

Chaînette

n sin i = constante et  
si fibre parabolique :  
$$n = n_0 (1 - B y^2/z_0^2)^{1/2}$$

$$\begin{aligned} &\sin i = dx/dl \ et \\ &dl = \left[ (dx)^2 + (dy^2) \right]^{1/2} \\ &n^2 = K \left[ \ 1 + (dy \ / \ dx)^2 \right], \ d'où, \\ &en \ d\acute{e}rivant \ par \ rapport \ \grave{a} \ x \ ; \end{aligned}$$

$$d^2y/dx^2 = -Ay \text{ et } A>0$$

Sinusoïde!

Principe fondamental de la dynamique projeté sur 2 axes :  $T \cos \alpha = \text{constante } T_0$   $d(T \sin \alpha) - \mu g dl = 0$ 

d'où 
$$d(T_0 \tan \alpha) = \mu g dl$$

$$T_0 d^2y/dx^2 = \mu g[1 + (dy/dx)^2)]^{1/2}$$

En dérivant par rapport à x et simplifiant  $d^3y/dx^3 = B dy/dx$  et B > 0

Chaînette

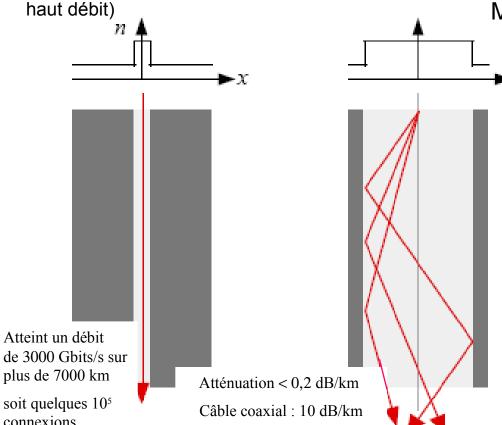
# Fibres optiques

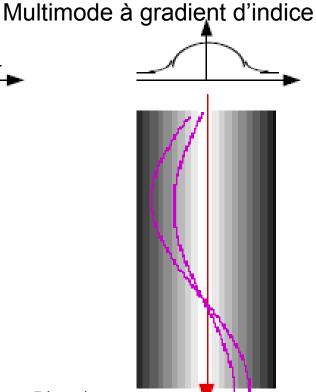
Gaine mécanique Gaine optique Coeur

#### Monomode

(cher, liaisons très longues distances à haut débit)

Multimode à saut d'indice





Dispersion temporelle  $\Delta t$  en sortie

soit quelques 10<sup>5</sup> connexions Internet haut débit

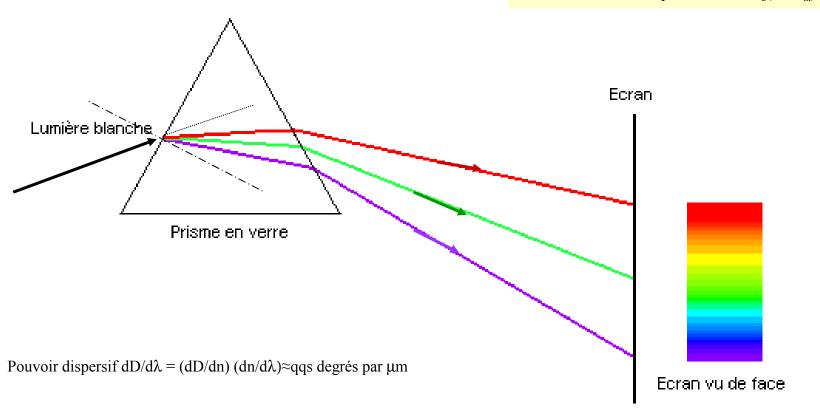
Verre ordinaire: 0,1 dB/km

## **TP-Cours : Spectroscope à prisme**

Courbe D(i) donnant le minimum de déviation

Courbe d'étalonnage D  $(\lambda)$ 

Mesure de l'indice du prisme :  $n = \sin[(A+D_m)/2] / \sin(A/2)$ 



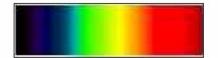
1 – Lampe à incandescence, lampe à filament de tungstène

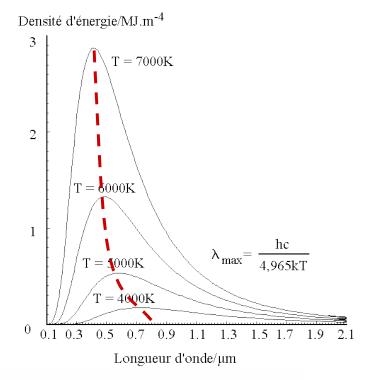
Une lampe blanche est un corps noir ; elle produit un spectre continu :

$$k_B T \approx hv_{pic} = h c / \lambda_{pic}$$

3 K :espace intergalactique	$\lambda$ en mm ; ondes radio
300K : êtres vivants	λ qqs μm; infrarouge
6000 K : le Soleil, chromosphère	λ visible en 0,5 μm

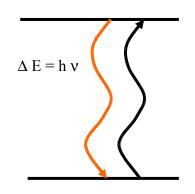




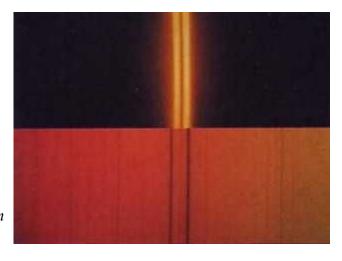




- 2 Les lampes spectrales / décharge électrique dans un gaz
- **a Lampe spectrale** : **raies de transition** entre niveaux d'énergie atomiques discrets:



Raies d'émission d'une lampe au sodium



Raies d'absorption d'une lampe au sodium

b – Quantification à connaître : atome H (1 proton, 1 électron, masse atomique molaire 1g)  $E_{hydrogène} = -13,6 / n^2$  (eV) =>  $hv_{saut\ d'énergie, niveaux\ discrets} = h c / \lambda_{saut}$ 

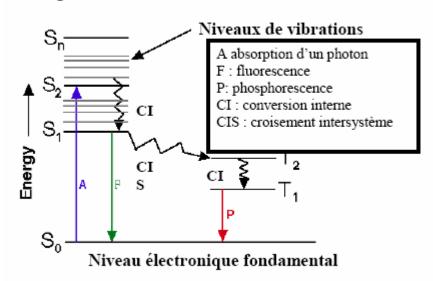
#### man SADA man SADA man sa man sa man sa man man sa man sa man sa man sa man man sa man man sa m

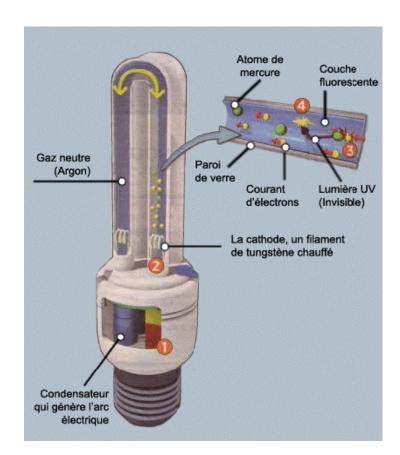
## **3** – Lampes basse consommation = lampes fluocompactes

Lampe à mercure + fluorescence en trichromie « BVR »

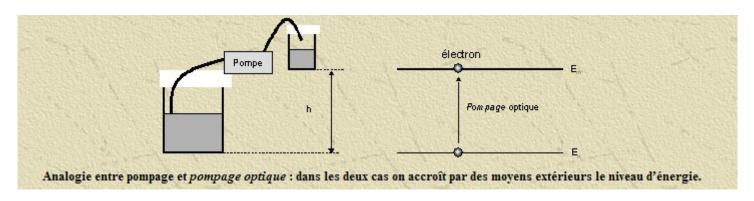
Décharge électrique, production d'UV qui excitent la fluorescence d'un revêtement de pigments (avec décalage des longueurs d'onde de l'UV au visible)

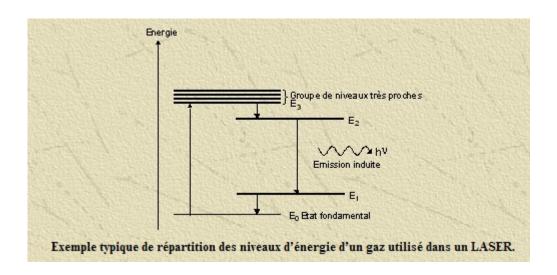
#### Diagramme de Jablonski





# 4 — L.A.S.E.R.S = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation





#### Vers le chapitre II:

Laser: émission induite, donc «contrôlée »

Lampes : émission spontanée de trains

d'onde aléatoires.

# Ordres de grandeur pour la longueur de cohérence des lampes:

Laser: quelques dm

Lampe spectrale: mm à cm

Lampe blanche: 0,1 mm

# CH II – Comment modéliser la lumière? Dualité onde-corpuscule

## I – Modèle monochromatique

1 – Des photons d'énergie  $hv = \hbar \omega$ se propagent à la vitesse c ( $\hbar = h/2\pi$ )

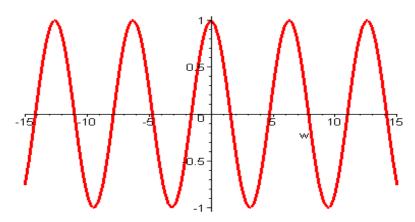
2 – Ces photons sont associés à un champ électrique et à un champ magnétique qui se propagent:

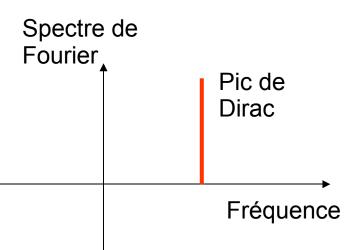
$$\mathbf{E} = \mathbf{E_0} \cos(\omega t - kx) \operatorname{ou} \cos(\omega t + kx)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B_0} \cos(\omega t - kx)$$
 ou  $\cos(\omega t + kx)$ 

$$\omega = 2\pi / T$$
;  $k = 2\pi / \lambda$ ;  $\lambda = c T$ 

3 – Milieu linéaire homogène isotrope (MLHI); indice n = c / v

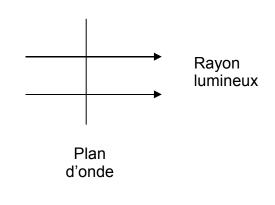




## II - Modèle scalaire de la lumière

## 1 - Onde Plane Progressive Monochromatique : OPPM

Onde plane	Faisceau cylindrique
Onde progressive	Propagation ωt <u>+</u> kx
Onde monochromatique	Tous les photons ont la même fréquence.



#### 2 - Détecteurs

a – Les ondes sont représentées par une vibration scalaire  $s = s_0 \cos(\omega t - k x)$ . Fréquences optiques  $10^{14}$ Hz.

b - L'énergie de ces ondes est proportionnelle à s²

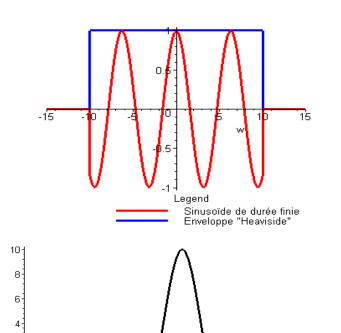
c – Les détecteurs « voient » l'énergie moyenne par unité de surface :

Eclairement = K <s2> ou K s.s\*/2

## III - Train d'onde

- 1 Onde monochromatique de durée τ limitée dans le temps
- 2 Analyse de Fourier d'un train d'onde
- 3 Inégalité d'Heisenberg

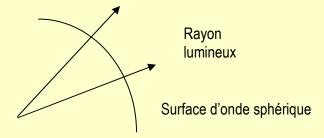
 $\Delta t \cdot \Delta v > 1/2\pi$ 



Spectre de Fourier

# Pour aller plus loin:

- Onde sphérique



# Addendum au CH II – Effet Doppler-Fizeau

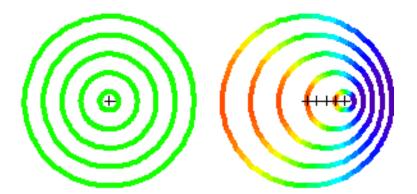
Agitation thermique et largeur de raie:

$$\Delta \lambda / \lambda = v / c$$

- Source et récepteur :
  - s'éloignent l'un de l'autre; étirement décalage vers le rouge :

$$\Delta \lambda / \lambda = v / c$$

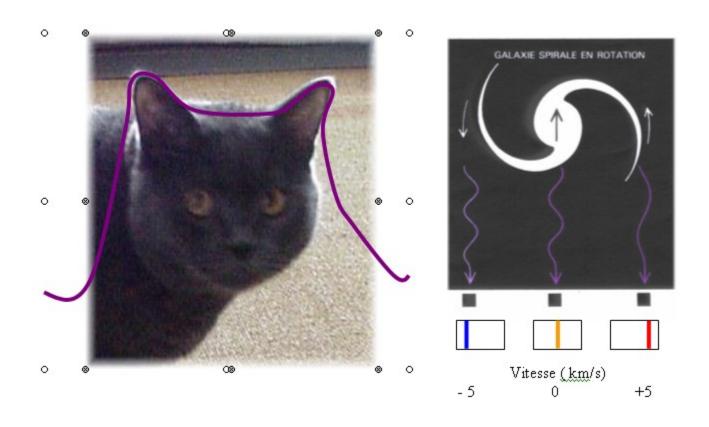
- se rapprochent l'un de l'autre; tassement, décalage vers le bleu :  $\Delta\lambda$  /  $\lambda$  = v / c
- Miroir en mouvement par rapport à la source:  $\Delta \lambda / \lambda = + 2 \text{ v / c}$



#### **Astrophysique:**

- Plasmas en anneaux (anneaux de Saturne) : $\Delta \lambda / \lambda = 4 \text{ v } (\cos(\theta)) / \text{ c}$
- Galaxies « tête de chat »
- Détection d'exoplanètes par effet Doppler.
- Expansion de l'Univers et redshift des galaxies ; loi de Hubble v = H d

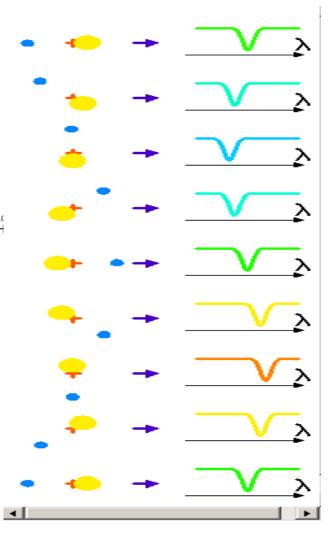
Décalage spectral observé dans les bras d'une galaxie spirale en rotation différentielle (existe dans le domaine visible et en ondes radio)



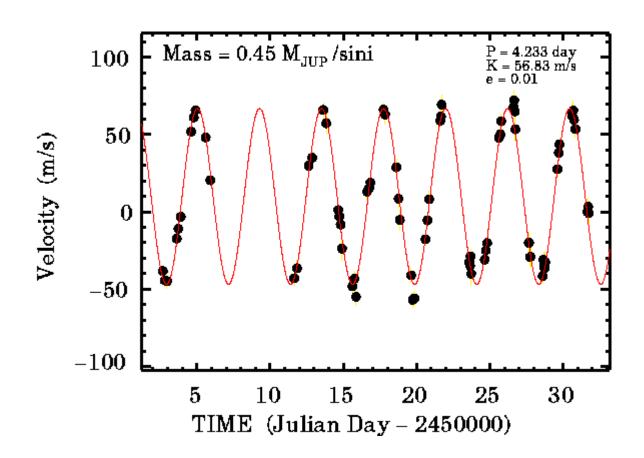
# Effet Doppler dû à l'oscillation d'une étoile en présence d'une exoplanète

 Dans son mouvement autour du cdm planète – étoile, l'étoile tantôt se rapproche, tantôt s'éloigne de l'observateur.

Une raie spectrale est
alternativement décalée vers le
bleu ou vers le rouge, selon la
vitesse relative entre l'étoile et
l'observateur (direction indiquée
par une flèche violette)



Vitesse radiale de l'étoile en fonction du temps, modifiée par la présence d'une planète (étoile 51 Pégase, qui a une exoplanète)



# CH III : Interférences à 2 ondes

#### I – Onde sphérique, onde plane, chemins optiques

- 1 Les définitions
- 2 Le théorème de Malus
- 3 Quelques déphasages particuliers

#### II- Interférences entre 2 ondes planes progressives monochromatiques

- 1 Somme vectorielle ou somme scalaire?
- 2 Différences de chemins optiques

a – Choisir le point de référence

b – Etudier  $\phi = \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_2 - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_3 = p \ 2\pi \text{ ou } \delta = p \ \lambda$ 

3 - Eclairement

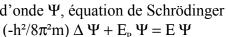
$$\mathcal{E} = \mathcal{K}(s_1 + s_2)(s_1^* + s_2^*) = \mathcal{E}_{max}(1 + \cos \phi)/2$$

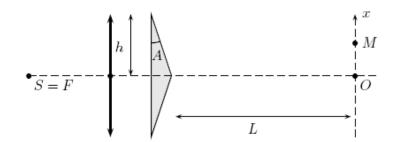
- 4 Expériences avec un biprisme de Fresnel
- a Observations classiques et calculs simples Voir exercices et travaux pratiques
- b Dualité onde-corpuscule: optique électronique, atomique

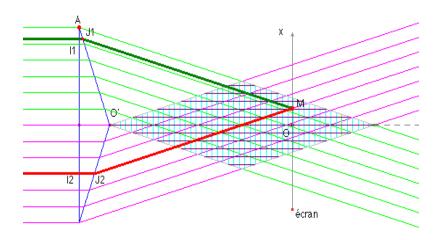
Onde de De Broglie, onde associée à une particule

$$p = mv = h/\lambda$$

Fonction d'onde Ψ, équation de Schrödinger



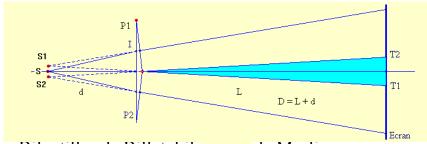




Lycée Chaptal - Classe de PC\* - Cours d'Optique Suzanne FAYE mfaye@club-internet.fr/ 01 47 02 01 57

#### **III**– Sources ponctuelles synchrones

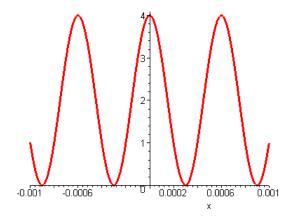
- 1 Produire des sources secondaires synchrones
  - a Division du front d'onde
  - b Division d'amplitude
- 2 Hyperboloïdes d'interférences, calculs approchés
  - a Observations générales
  - b Observation longitudinale, anneaux voir chapitre III
  - c Observation transversale, franges rectilignes
  - 3 Expérience avec le biprisme de Fresnel

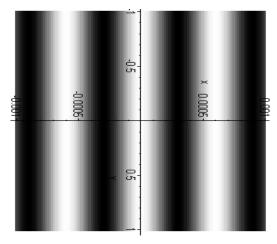


- 4 Bilentilles de Billet, bile...... de Meslin
- 5 Extension de la méthode à l'interférométrie radar par satellite (voir paragraphe IV ci-après)

Modélisation Maple des franges obtenues par observation transversale; *sources secondaires de même amplitude*:

$$E = E_0 [1 + \cos (2 \pi a x / \lambda D)]$$



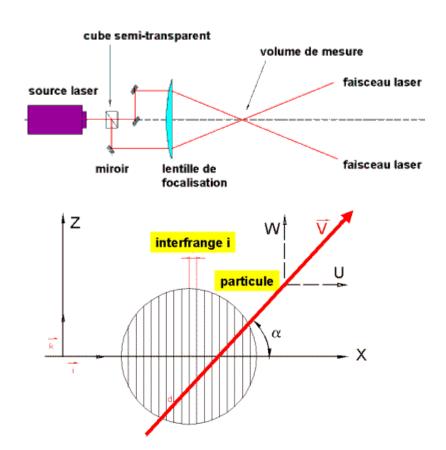


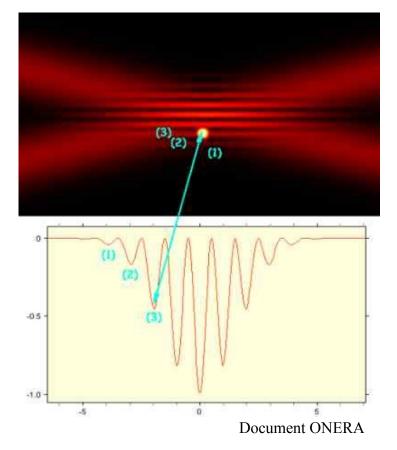
# IV – Premières applications des interférences à 2 ondes

#### 1 - Vélocimétrie laser à franges

Mesure de la vitesse d'un fluide: scintillements d'une particule traversant le champ d'interférence

Interfrange/ facteur d'inclinaison = Vitesse de la particule \* Période de scintillement





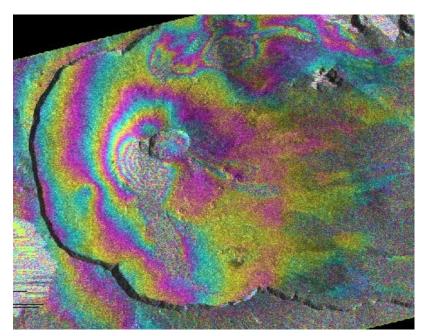
#### IV – 2 – Interférométrie radar par satellite/ Détection des variations temporelles de la surface terrestre

Principe: combinaison informatique des « phases » mesurées par télédétection à chaque passage d'un radar sur satellite au-dessus d'un lieu. Modèles Numériques de Terrain.

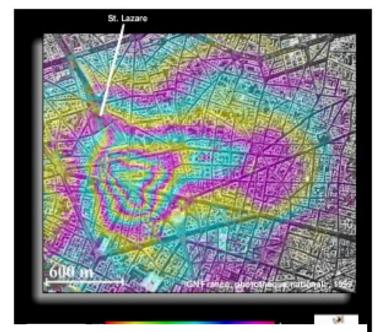
Satellites d'observation; orbites polaires basses, altitudes 450 à 1000 km : satellites

Satellites d'observation; orbites polaires basses, altitudes 450 à 1000 km : satellites ERS1 et ERS2, satellite Radarsat...

Longueurs d'onde centimétriques ; une frange interférométrique correspond à une demi longueur d'onde de déplacement apparent dans la direction sol- satellite.



Surveillance du Piton de la Fournaise, volcan , Ile de la Réunion; interfrange= 3 cm



Mouvements de terrain autour de la gare Saint-Lazare, déplacement global 1,5 cm - www.terrafirma.eu.com

# CH IV Interféromètre de Michelson

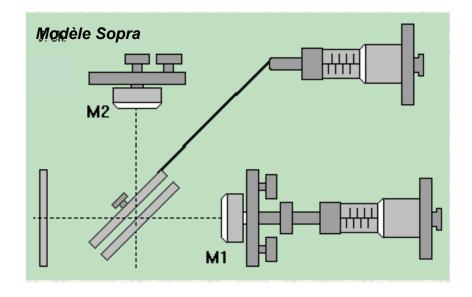
I -Franges d'égale épaisseur, franges d'égale inclinaison

#### 1- Observations en ondes sphériques:

- a Schémas et développements limités
- b Coin d'air, observations transversales
- c Lame à faces parallèles, observations longitudinales

# 2 – Ondes planes et réglage de l'interféromètre de Michelson:

- a Différence de marche  $\delta$  = 2 e cos i
- b- Coin d'air avec i = 0
- c Teinte plate, e = constante
- d Ouverture du faisceau incident, anneaux localisés à l'infini
- e Nouvelle teinte plate contact optique
- f Contrôle de qualité en lumière blanche



Reconnaître l'optique

Reconnaître la mécanique

Observer les teintes plates

Fabriquer un coronographe interférentiel

#### Récapitulatif / Résumé

Coin d'air : observation quasi-transversale

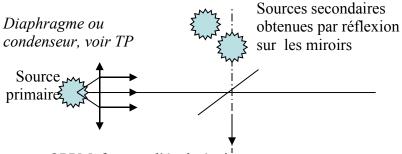
OPPM incidence i = 0;  $\delta = 2$  e (x)

Revoir et comparer : hyperboloïdes équiphases/ fentes d'Young

Lame à faces parallèles : observation longitudinale

 $\delta$  = 2 e cos i

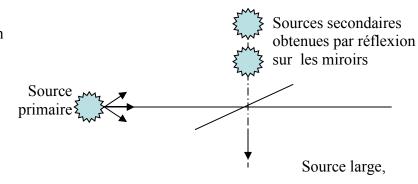
 $\delta$  = 2 e ( 1 – i²/2) = 2 e ( 1 – x² / 2  $\Delta$ ²)  $\Delta$  = grande distance « moyenne » aux sources ou distance focale d'une lentille de projection



OPPM, franges d'égale épaisseur

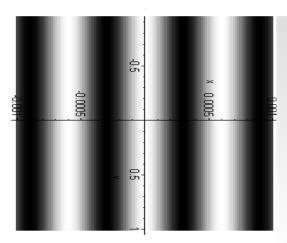
Source ponctuelle: franges non localisées

Source large: franges localisées au voisinage du coin d'air



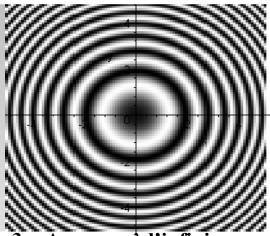
localisés à l'infini *Modèles Maple TD* 

anneaux d'égale inclinaison



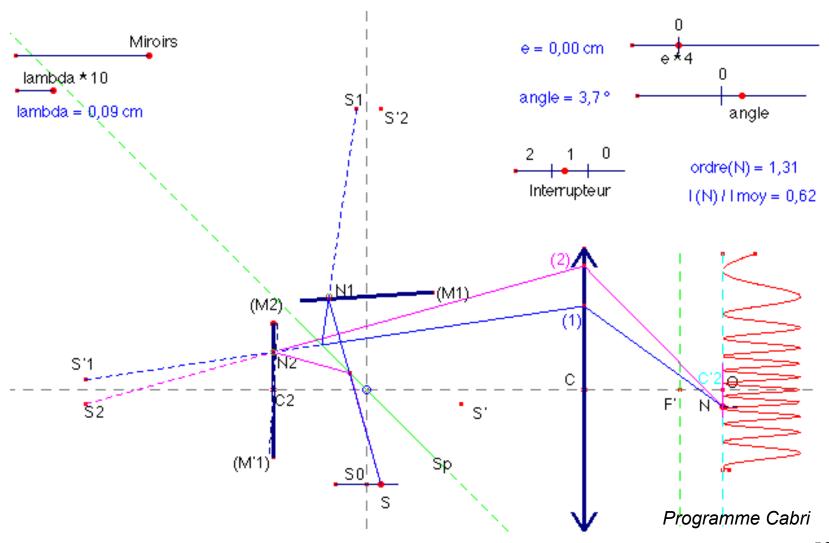
1 - Coin d'air



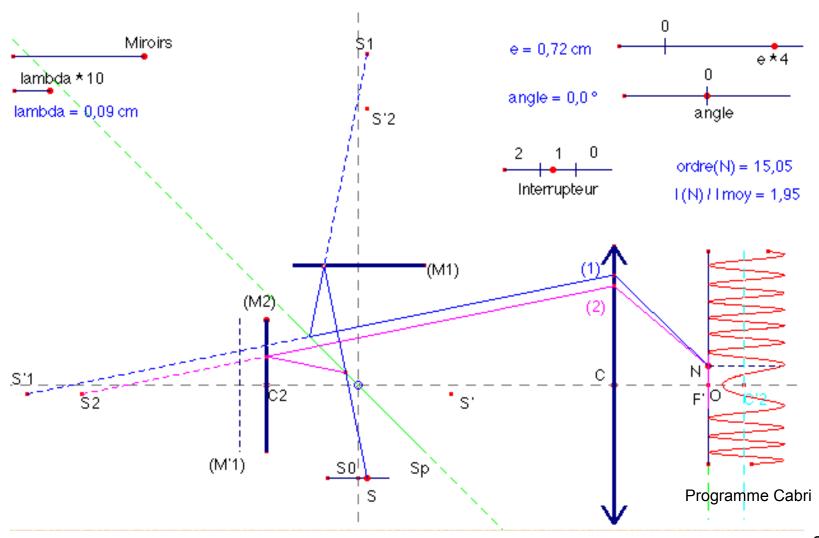


3 - Anneaux à l'infini

# Michelson en coin d'air avec lentille de projection



# Michelson en lames à faces parallèles avec lentille

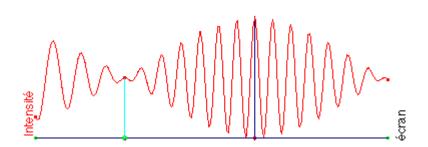


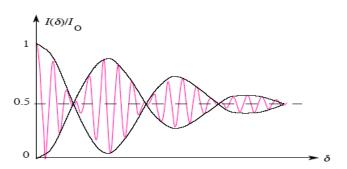
#### II - Notions de cohérence; observations avec un interféromètre de Michelson

#### 1 – Cohérence temporelle partielle

a - Doublet spectral, zéros de battements -

b – Lampe à profil spectral rectangulaire en nombre d'onde





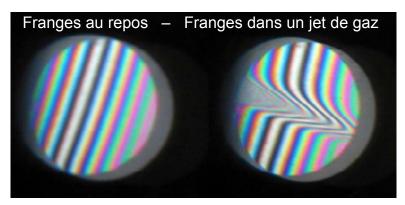
# 2 – Elargissement progressif de la source à l'aige g'un giaphragme, conerence spatiale partielle

a - Diminution du contraste

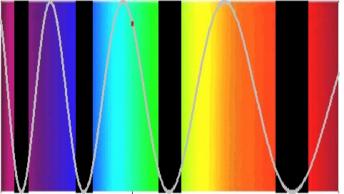
b - Localisation des franges d'interférences

#### 3 - Franges du coin d'air en lumière blanche

a - Teintes de Newton



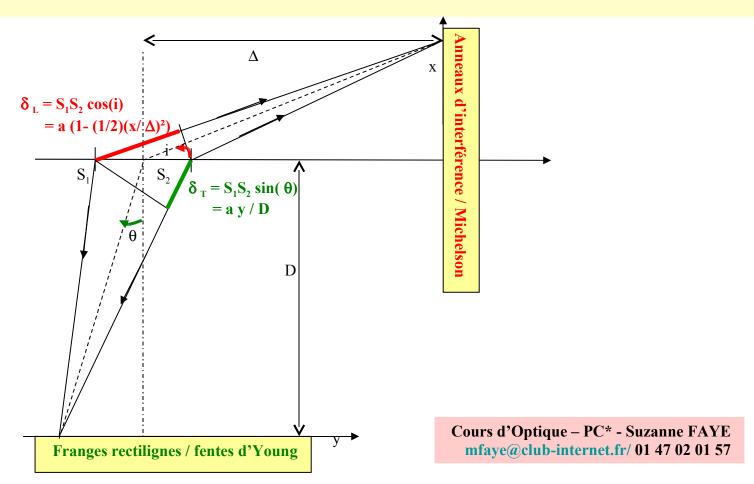
b - Spectre cannelé



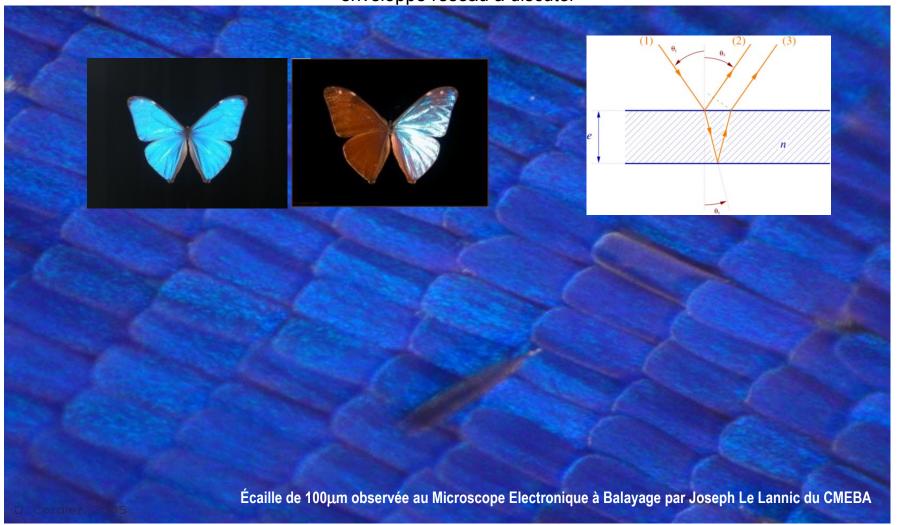
#### SYNTHESE: 2 sources synchrones ponctuelles cohérentes S1 et S2.

M un point d'observation transversale/longitudinale.

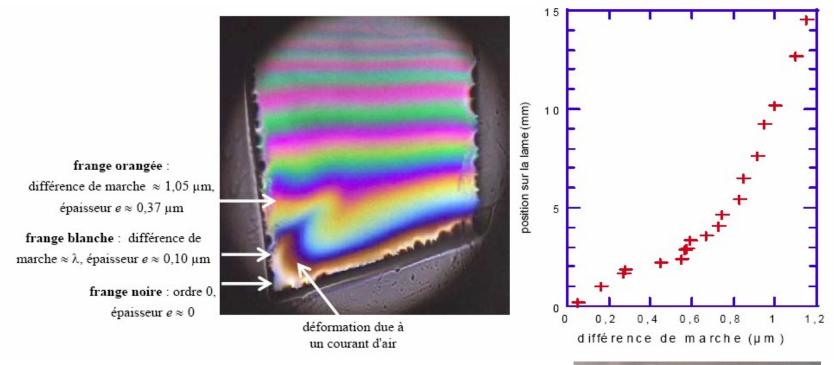
**Différence de phase** entre 2 rayons sous la forme générale d'un produit scalaire  $\phi = \mathbf{k_1} \cdot \mathbf{S_1} \mathbf{M} - \mathbf{k_2} \cdot \mathbf{S_2} \mathbf{M}$ 



**Iridescence:** écailles des ailes de papillon = réseau de lames à faces parallèles figure 1 : éclairage isotrope/ figure 2 : éclairage unidirectionnel/ figure 3 = étude d'une lame / enveloppe réseau à discuter



#### Mots-clés : Localisation des franges- Irisations/ Les cyclones s'étudient dans les bulles de savon



Bulles de savon: interférences localisées au voisinage des lames de savon (voir poly de TP)

La Terre et son atmosphère réduites à une bulle de savon (15km d'atmosphère, Rayon terrestre 6400 km)

Analogies visuelles et quantitatives entre les spirales des bulles de savon et les cyclones atmosphériques.

Hamid Kellay, spécialiste des turbulences au centre de physique moléculaire optique et hertzienne (CNRS, Université de Bordeaux)

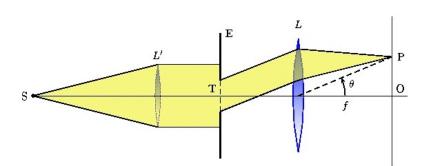
Mél: h.kellay@cpmoh.u-bordeaux1.fr Tél. professionnel: 05 40 00 65 11



# CH V – Diffraction à l'infini

## I – Principe de Huygens-Fresnel et application à une fente rectangulaire

Sources secondaires (Huygens-1678) cohérentes (Fresnel 1818)



$$p_{p} = A \int_{-a/2}^{+a/2} dx \int_{-b/2}^{+b/2} e^{\int \cot \frac{2j\pi}{\lambda} (u_{x}x + u_{y}y)} dy$$

$$p_{P} = A.a.b.e^{j\omega t} \frac{\sin \frac{\pi u_{x}a}{\lambda}}{\frac{\pi u_{x}a}{\lambda}} \frac{\sin \frac{\pi u_{y}b}{\lambda}}{\frac{\pi u_{y}b}{\lambda}}$$

Diffraction à l'infini par une fente infiniment fine, source ponctuelle

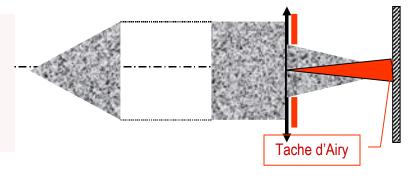
Diffraction à l'infini par une fente rectangulaire, source ponctuelle (Cf trame de rideau)

## II – Rôle de la diffraction à l'infini dans la formation des images

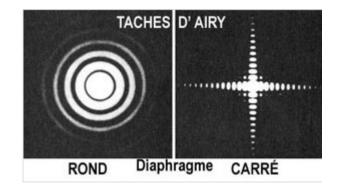
#### 1 – Tache d'Airy

#### Rayon angulaire de la tache =

 $\lambda$  / largeur de la fente si infiniment fine ou 0,61  $\lambda$  / rayon ouverture circulaire 1,22  $\lambda$  / diamètre ouverture circulaire



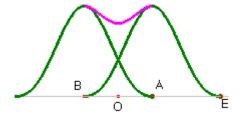
- En texture de gris, l'optique géométrique
- En rouge uni, la diffraction





#### 2 – Critère de Rayleigh

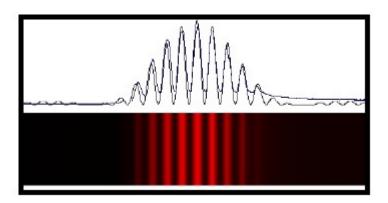
Distance entre deux images  $\geq$  rayon du disque d'Airy.



# III – Diffraction à l'infini par les fentes d'Young

#### 1 - Figure d'interférence, enveloppe de diffraction

Voir Travaux Pratiques et Maple:  $I = I_0 [\sin(u)/u]^2 (1 + \cos\phi)$ 



# 2 – Influence de la largeur de la fente source sur la visibilité des franges; Voir TP et Maple $I = I_0 (1 + [\sin(u)/u]\cos(\phi)$

Ci-contre, observation de deux étoiles de taille différente

#### 3 – Applications à l'astrophysique

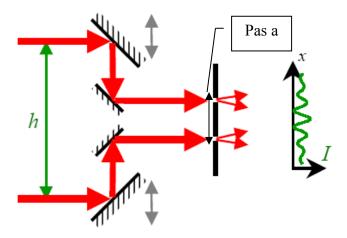
#### a – Mesure de la distance y entre deux étoiles proches

Régler a telle que  $\delta' - \delta = a y / D = \lambda / 2$ 

#### b - Mesure du rayon R d'une étoile

Régler a telle que  $\delta'$ - $\delta = a R / D = \lambda / 2$ 

Interféromètre stellaire de Young:





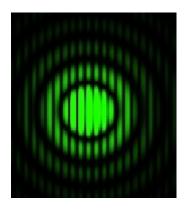


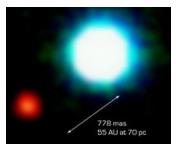
#### Observatoire Sud-Européen Mont Paranal, Chili

#### **VLT Very Large Telescope – Optique adaptative + Interférométrie**



Trous d'Young : figure d'interférences à deux ondes, avec anneaux de diffraction en enveloppe





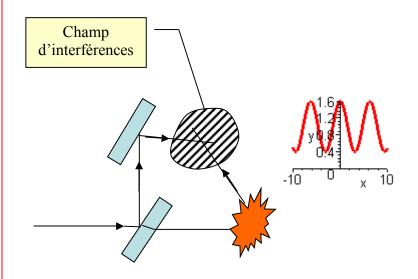
Septembre 2004 : Il est possible que le VLT européen ait, pour la première fois, réussi à prendre la photographie d'une exoplanète autour de son étoile (ci-contre ) .

A ce jour, plus de 100 exoplanètes ont été découvertes, par méthode indirecte : effet Doppler. Méthodes de transit en cours.

#### Addendum: Principe de l'holographie / interférences à 2 ondes d'amplitudes différentes

1891 : Lippman, photographie interférentielle; 1947 : Gabor, principe de l'holographie (Nobel 1971); 1961 :Benton, Leith, Upatnick, invention du L.A.S.E.R.

 Fabrication d'un hologramme : enregistrement d'interférences



Eclairement E = A (  $1 + \epsilon \cos \phi$ )

par exemple

Enregistrement sur plaque holographique ou traitement informatique via cellule CCD (Cf TP)

 Restitution d'un hologramme enregistré sur plaque photo: diffraction par ouverture de transparence variable

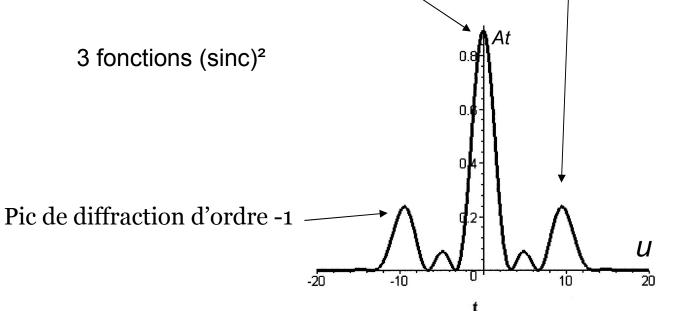
$$\begin{split} &t(\textbf{x},\textbf{y}) = \textbf{k} \textbf{E}^{\gamma} = \textbf{k} \; A \; (1 + \gamma \, \epsilon \; \text{cos} \boldsymbol{\phi} \,) \\ &S_t = \iint t(\textbf{x},\textbf{y}) \; \exp(\; 2\pi \, \textbf{j} \; \alpha \textbf{x}/\lambda) \; \exp(\; 2\pi \, \textbf{j} \; \beta \textbf{y}/\lambda) \; d\textbf{x} \; d\textbf{y} \\ &+ (\textbf{k} \; A \; \gamma \, \epsilon \, /2) \iint \exp[\; \textbf{j} \; (\boldsymbol{\phi} + 2\pi \; (\alpha \textbf{x} \; + \beta \textbf{y})/\lambda)] \; d\textbf{x} \; d\textbf{y} \\ &+ (\textbf{k} \; A \; \gamma \, \epsilon \, /2) \iint \exp[\; \textbf{j} \; (\boldsymbol{\phi} - 2\pi \; (\alpha \textbf{x} \; + \beta \textbf{y})/\lambda)] \; d\textbf{x} \; d\textbf{y} \\ &+ (\textbf{k} \; A \; \gamma \, \epsilon \, /2) \iint \exp[\; \textbf{j} \; (\boldsymbol{\phi} - 2\pi \; (\alpha \textbf{x} \; + \beta \textbf{y})/\lambda)] \; d\textbf{x} \; d\textbf{y} \\ &S_t = \text{faisceau direct} \\ &+ \text{restitution} \; \ll \; \text{arrière} \; \gg \; \text{de l'objet} \\ &+ \text{restitution} \; \ll \; \text{avant} \; \gg \; \text{de l'objet} \\ &S_t = \text{sinc}(\textbf{u}) + (\mu \textbf{C}/2) \text{sinc}(\textbf{u} + \textbf{u} \textbf{0}) + (\mu \textbf{C}/2) \text{sinc}(\textbf{u} - \textbf{u} \textbf{0}) \\ &\text{puis Eclairement} \; \approx \; \textbf{S} \; \text{Termes en (sinc)}^2 \\ &\text{si pics suffisamment séparés} \end{split}$$

**Modélisation Maple** de l'éclairement restitué\_

3 fonctions (sinc)<sup>2</sup>

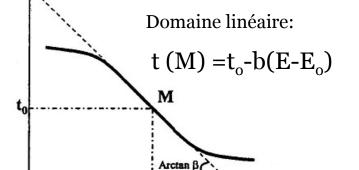
Pic de diffraction d'ordre o

Pic de diffraction d'ordre 1



Transmittance en amplitude d'une plaque holographique en fonction de l'énergie reçue:

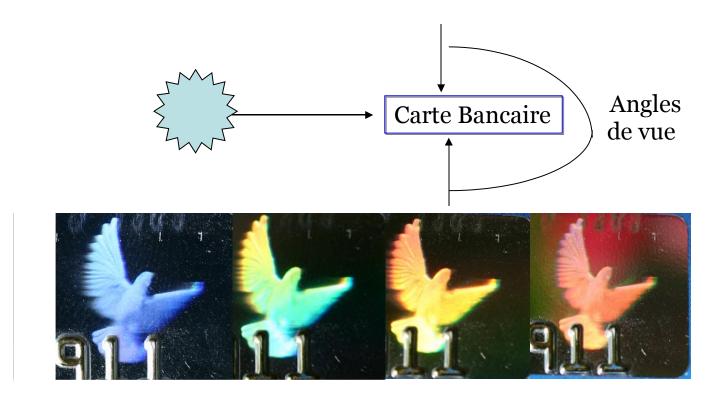
$$t(\mathbf{x},\mathbf{y}) = [B(1+C\cos(w-q))]^{\mu}$$
$$= B^{\mu}(1+C\mu\cos(w-q))$$



Pour mémoire : il existe 2 types d'enregistrements, toujours en lumière laser

- •Enregistrement par réflexion, lecture laser par transmission
- •Enregistrement par transmission, dans l'épaisseur de la plaque, lecture par réflexion, lumière blanche possible

# Exemple : restitution en lumière blanche d'un hologramme réalisé par transmission



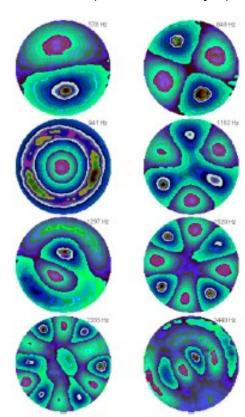
## Modes propres de vibration de solides: étude mécanique; étude holographique

Figures de Chladni: Différentes figures de Chladni d'une plaque carrée. Le sable se dépose aux nœuds de vibration de la plaque, mettant en évidence un mode de vibration particulier pour une fréquence particulière.





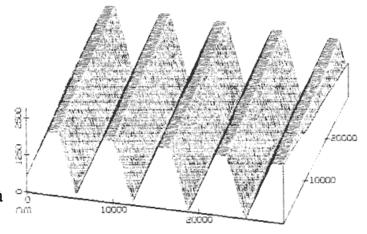
Holographie: étude des modes de vibration de plaques circulaires (société Ettemeyer)

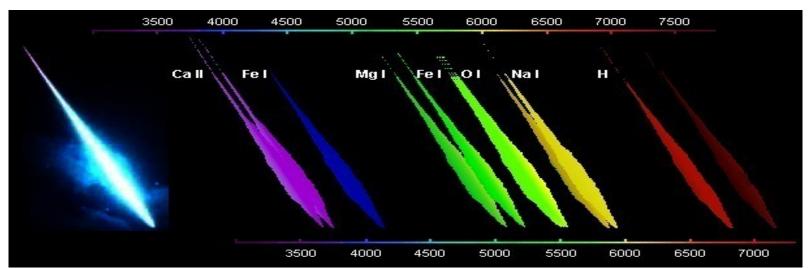


## CH VI : PRESENTATION des RESEAUX, éléments théoriques

#### I - Technologie des réseaux

- **Réseaux :** rainures **périodiques;** profil réalisé par gravure chimique ou par faisceau d'ions . Matrice, puis réplication par pressage à chaud, moulage par injection ou coulée.
- **Profil très fin** (rainures profondes et/ou très serrées), pour avoir une large enveloppe de diffraction.
- Applications nombreuses, dont spectroscopie ; ci-dessous, spectre d'un météore observé avec télescope + spectroscope à réseau





#### II- FORMULE DE BASE ET CONVENTIONS

Réflexion

**Transmission** 

 $\sin \beta \pm \sin \alpha = n p\lambda$  ou  $a (\sin \beta \pm \sin \alpha) = p\lambda$ 

avec:

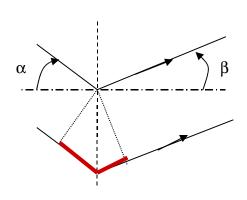
 $\boldsymbol{\alpha}$  : angle d'incidence sur le réseau

n : densité de traits du réseau= 1/a , où a est le pas du réseau

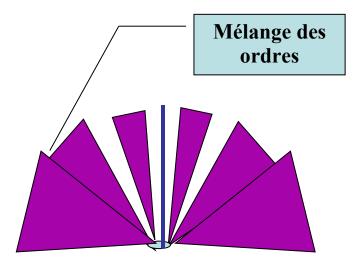
p : ordre de diffraction

 $\boldsymbol{\lambda}$  : longueur d'onde considérée

 $\beta$ : angle de diffraction pour la longueur d'onde  $\lambda$  dans l'ordre p



En rouge, différence de marche; attention aux signes



#### III – SPECTROMETRE à RESEAU

- 1 Minima de déviation 2 a  $sin(D_m/2) = p \lambda$
- 2 Courbes d'étalonnage  $D(\lambda)$  pour  $\alpha$  fixé
- 3 Variation de  $\beta$  avec la longueur d'onde, pouvoir dispersif  $P_D = dD / d\lambda$
- 4 Réseau blazé : le pic principal de diffraction, si assez étroit, coïncide avec l'ordre d'interférence choisi non nul (blaze=éclat) et concentre toute la lumière dans cet ordre.
- 5 Pourquoi les raies sont-elles plus fines qu'avec un prisme ? Discussion.

## Voir TP-cours - Insertion du réseau dans un spectromètre:

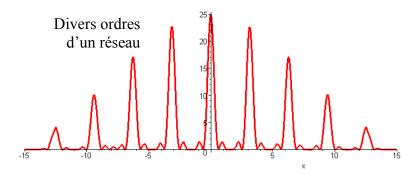
Pouvoir de résolution  $\mathcal{P} = \lambda / \Delta \lambda = v / \Delta v$ 

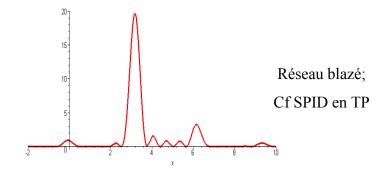
#### Conversions

Le pouvoir de résolution peut être traduit en une vitesse, via l'équivalent Doppler :

$$1/P = v/c$$

#### Courbes d'éclairement tracées avec Maple:

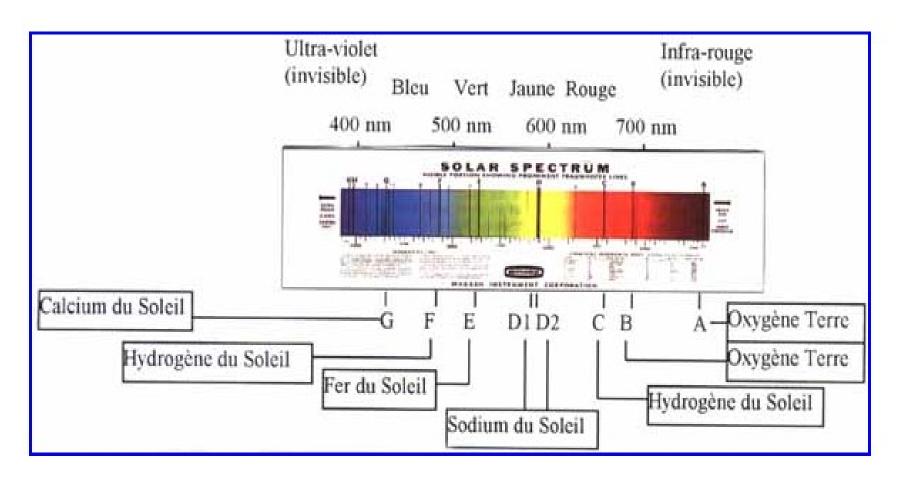




Instrument	Résolution typique	Vitesse équivalente (km/s)
Prisme	500	600
Réseau	5000	60
Réseau blazé	50000	6

**Spectre du Soleil :** spectre continu + raies d'absorption par des éléments présents dans le Soleil ou dans l'atmosphère terrestre.

Voir largeur de raies, agitation thermique, rotation différentielle du Soleil sur lui-même, effet Zeeman, vibrations internes du Soleil (sujet Polytechnique)



# Modélisations par des réseaux: Diffusion de la lumière par des ondes de surface (Centrale 2000) / Comparer au cas de la houle (Mécanique des fluides)

#### La « substantifique moelle » du sujet Centrale 2000:

#### 1 - Libre parcours moyen I\*:

Gaz n  $\sigma$  l\* = 1 , d'où l\*  $\approx$  10<sup>-27</sup> (10<sup>10</sup>)<sup>2</sup> = 0.1  $\mu$ m = 10<sup>-7</sup> m Liquide l\*  $\approx$  2r = Å= 10<sup>-10</sup> m

#### 2 – Fréquences caractéristiques et longueurs d'onde:

Lumière, partie visible du spectre électromagnétique :

10<sup>14</sup> Hz ;  $\lambda$  en  $\mu$ m

Ondes mécaniques sur liquide :

 $\Lambda$  de  $\mu m$  (sujet Centrale 2000) à km (houle); amplitude  $h_{m}\approx 10^{\text{-}13}~\text{m}$ 

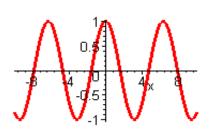
Observer et commenter :

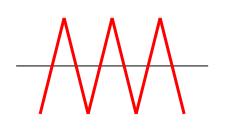
 $h_m << \lambda$  ; diffraction significative si  $\lambda$  proche de  $\Lambda$ 

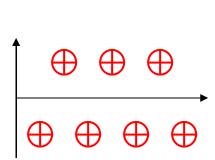
#### 3 - Modéliser une onde de surface par

2 réseaux de miroirs plans

2 réseaux de traits (partie II du sujet)









Rahelais

## CH VII – POLARISATION de la LUMIERE

## I -MODELE VECTORIEL de la lumière

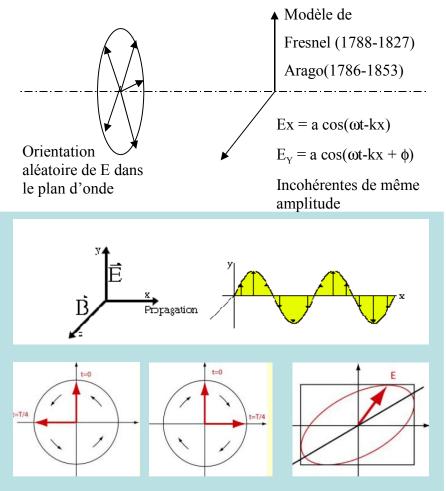
#### 1 – Lumière naturelle:

- a Succession de trains d'ondes incohérents entre eux
- b Deux modèles de lumière naturelle en onde plane progressive monochromatique

La lumière naturelle n'est pas polarisée

#### 2 – Lumière polarisée:

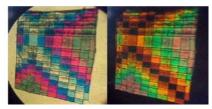
- a Polarisation rectiligne
- b Introduction d'un déphasage de  $\pi/2$  entre les composantes rectilignes  $E_x$  et  $E_y$  d'une vibration rectiligne: vibration circulaire ou elliptique



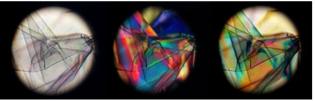
#### I – suite

#### 3 – Expériences en lumière polarisée

#### a -Observation d'interférences entre polariseur et analyseur



Lamelles de scotch



Film d'emballage

#### b - Calcul d'interférences

#### b1 - Interférences en lumière polarisée

Etape 1 - Polariseur  $s_{Polariseur} = a \cos(\omega t)$ 

**Etape 2 - Lame anisotrope** 

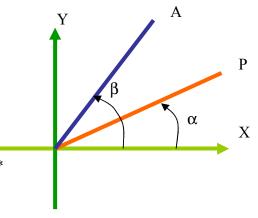
 $X = a \cos(\alpha) \cos(\omega t')$ 

 $Y = a \sin(\alpha) \cos(\omega t' + \phi)$ 

Etape 3 - Analyseur

 $S_A = a \cos(a) \cos(b) \cos(wt) + a \sin(a) \sin(b) \cos(wt) + \phi$ 

puis éclairement  $E = K S S^*$ 



#### b2 - Expérience de Fresnel et Arago

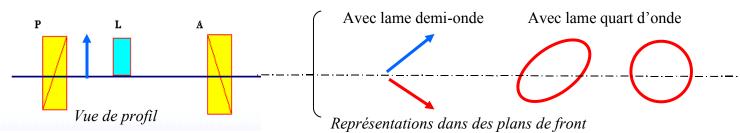
Expérience des fentes d'Young avec polariseurs et analyseur

#### **b3 – Lunettes de soleil à verres polarisants**

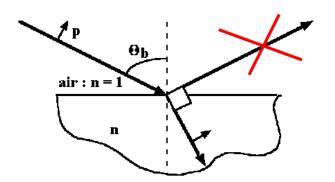
## II – Production de lumière polarisée

1 – Dichroïsme (polariseur, analyseur) et biréfringence(lames)

Interprétation élémentaire des propriétés des lames quart d'onde et demi-onde: existence des axes rapides et lent, indices  $n_x$  et  $n_y$ .



• 2 – Polarisation par réflexion vitreuse, angle de Brewster (début XIXème siècle)



$$\tan \theta_b = n_2 / n_{1 \text{ (démontré en classe)}}$$

Microscopie à l'angle de Brewster pour l'étude des surfaces.

Verre antireflet:

3 – Polarisation par diffusion Rayleigh (bleu du ciel) et

Voir cours sur le rayonnement des antennes , notamment cas champ E parallèle à l'antenne

## III – Applications en lumière polarisée

#### • 1 – Au laboratoire :

Loi de Malus I =  $I_0 \cos^2 \alpha$ 

Interférences en lumière polarisée: expérience de Fresnel et Arago

Analyseur à pénombre-polarimètre de laurent

• 2 – Affichages à cristaux liquides, écrans plats (benzoate de cholestérol ...)

forme d'une molécule de cristal liquide



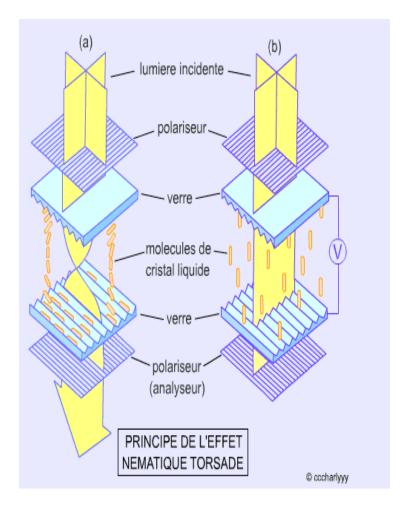
#### • 3 – **Recherche** :

- Observation de lames minces (roches...)
- Polarisation des raies par effet Zeeman; application à l'étude des champs magnétiques en astrophysique :

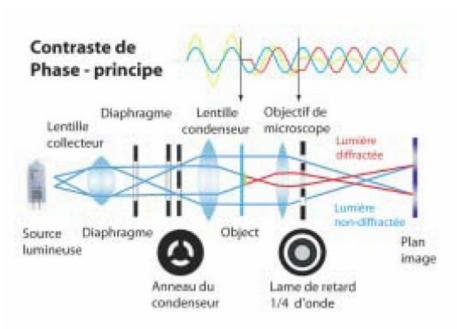
Soleil calme :  $10 \text{ gauss} ( 1 \text{ gauss} = 10^{-4} \text{ teslas})$ 

Taches solaires: 10<sup>4</sup> gauss

Notre Galaxie : raie H<sub>a</sub>; microgauss

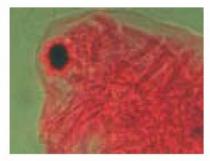


#### Microscope à contraste de phase



La méthode de contraste de phase utilise un objectif avec une lame de retardement d'un quart d'onde et d'un condenseur avec anneau de phase.



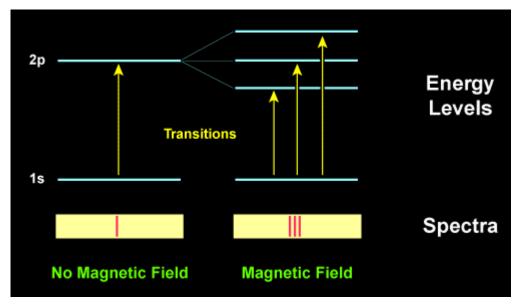


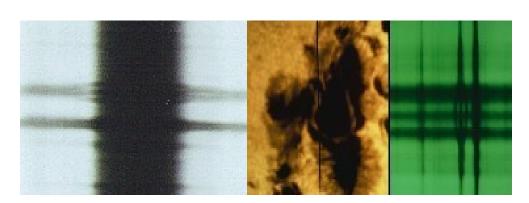
fond clair contraste de phase

La méthode de contraste de phase a été développée par le Néerlandais Frits Zernike afin de rendre visible des objets trop transparents ou trop minces. La technique se base sur les ondes déphasées lors du passage de ceux-ci à travers les tissues. En combinant les ondes déphasées avec les ondes non altérées, ont obtient des images à hauts contrastes.

### Effet Zeeman et lumière polarisée

- 1896: Pieter Zeeman découvre au laboratoire l'effet qui porte son nom; décomposition des raies spectrales sous l'action d'un champ magnétique; prix Nobel 1902. L'effet Zeeman permet d'évaluer l'intensité du champ magnétique qui peut être déterminé à partir de la séparation des raies d'absorption, tandis que la direction du champ se déduit du sens de la polarisation de ses composantes.
- 1908: George Hale (Observatoire du Mont Wilson) découvre l'effet Zeeman dans les raies d'absorption des taches solaires. Grâce à cette découverte les astronomes se sont rendus compte que l'activité du Soleil était régie par le magnétisme.
- A gauche le champ magnétique produit par un aimant provoque un élargissement de cette raie du sodium. A droite le spectre de cette tache solaire montre une triple raie du Fer à 5250.2Å témoignant de l'existence d'un champ magnétique de 4130 gauss. Documents NASA-MSFC et AURA/NOAO/NSF.



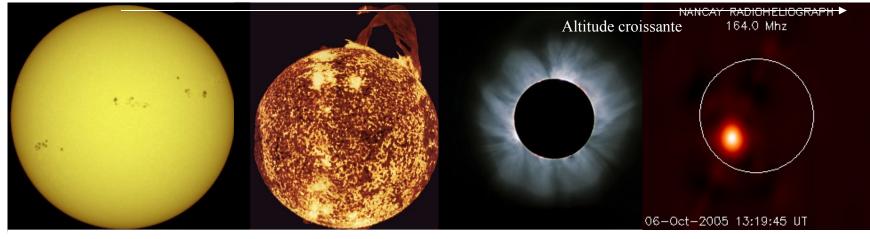


Le télescope Bernard Lyot du Pic de Midi (Hautes-Pyrénées), le spectrohéliographe de l'Observatoire de Meudon, le radiohéliographe (réseau d'antennes) de Nançay dédiés à l'observation du Soleil,

Références : BASS 2000

Base de données solaires de l'Observatoire Paris Meudon et du Pic du Midi de Bigorre

#### en liaison notamment avec le satellite SOHO



Photosphère, taches solaires(visible)

Chromosphère(raie Hα)

Couronne (éclipse)

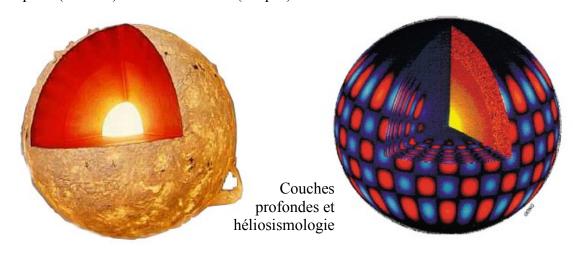
Carte radio du Soleil

#### Bernard Lyot, 1897, 1952 a inventé:

Le filtre à lames cristallines (observation du Soleil en Ha, raie de la série de Balmer)

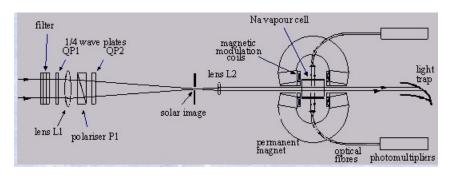
Le coronographe (éclipse artificielle, observation de la couronne solaire)

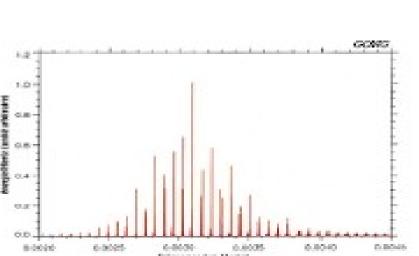
En choisissant judicieusement les raies d'absorption en fonction de leur intensité on peut observer différentes températures, donc différents niveaux de l'atmosphère solaire.

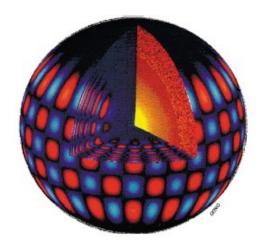


## Expérience GOLF / SOHO – Héliosismologie

(Polytechnique 2004)







- Agitation thermique
- Rotation propre différentielle
- Vibrations sismiques à 3 mHz (ci-contre)
- Taches solaires en surface

(= aimants géants, de la taille de la Terre)

Revues et sites Internet : GOLF +SOHO, Héliosismologie ...

On peut commencer par exemple par :

http://perso.wanadoo.fr/universimmedia/soleil/lexique/heliosismo.htm

## A propos des mesures en optique

### I – Estimer une incertitude

1 – Latitude de réglage / de mise au point; exemple spectroscope

 $D_{m}$  obtenue par réglage; première incertitude, latitude de réglage.

**et** définie par  $D_m = \alpha_1 - \alpha_0$ ; deuxième incertitude, incertitudes sur les lectures angulaires

2 - Calculs d'incertitude, mesures réalisées avec spectroscope

Indice du prisme n = [sin ((A+Dm)/2)]/ sin(A/2) Incertitudes sur A et sur Dm dn/n =[cotan ((A+Dm)) /2][dA +dDm ]/2 - [cotan(A/2)][dA/2] Puis $\Delta n/n =  [\cot ((A+Dm)/2) - [\cot (A/2)]]\Delta A/2 + [\cot ((A+Dm)/2)]\Delta D_m/2$	Pas du réseau $a = p\lambda / [2 \sin(Dm/2)]$ Incertitude sur Dm da/a = $d\lambda/\lambda$ - [cotan (Dm/2)][dDm /2] Puis, souvent $d\lambda/\lambda$ négligeable, d'où alors $\Delta a/a = [\cot(Dm/2)] \Delta D_m/2$
2 causes d'incertitude  - 2 pointés angulaires pour obtenir A  - réglage et pointés pour obtenir D <sub>m</sub>	Une cause d'incertitude / plusieurs ordres  Réglages et pointés pour obtenir D <sub>m</sub> on réduit l'incertitude en prenant l'intersection des résultats obtenus avec les différents ordres

## II - Traitement statistique des mesures

 1 – Méthode de l'étendue r = X<sub>max</sub> – X<sub>min</sub> autour de la valeur moyenne X . Cf TP mesure du doublet du Sodium avec l'interféromètre de Michelson

$$X - q r \leq X \leq X + q r$$

q dépend du nombre n de mesures et du niveau de confiance choisi ; q(95%, 6 mesures) = 0,40

 2 – Méthode de la variance (=écart type= écart quadratique moyen) σ²

Soient n mesures de valeurs X<sub>i</sub>:

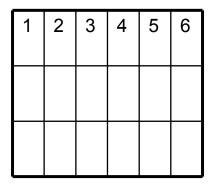
$$\sigma^2 = \sum_{i}^{n} (X_i - \underline{X})^2 / n$$

$$\underline{X} - t \sigma/(n)^{1/2} \leq \underline{X} \leq \underline{X} + t \sigma/(n)^{1/2}$$

t dépend du nombre n de mesures et du niveau de confiance choisi ; t (95%, 6 mesures) = 2,57 t (99%, 6 mesures) = 4,03

3 – Méthode de régression avec Maple, ou Regressi ou calculette.

RELEVE de mesures en vue d'exploitation statistique:



NB : Les mesures doivent être aussi indépendantes que possible