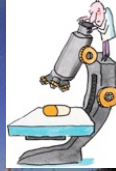


Cours d'optique géométrique

Anne-Laure Melchior (UPMC)



Crédit: Hergé, L'étoile mystérieuse



Crédit: US Food & Drug Administration

Aurore boréale en Alaska. Crédit: Wikipédia

mardi 29 janvier 13

Plan

Introduction	- Bref historique	- Longueurs d'onde
Approximations et omissions de l'optique géométrique	- Fondements - Principe de Fermat - Interférences et diffraction	- Stigmatisme et conditions de Gauss - Les 3 lois de Snell-Descartes
Systèmes optiques	- Dioptrés et miroirs plans - Dioptrés et miroirs sphériques - Lentilles épaisses	- Lentilles minces (constructions et formules) - Autres qualités des instruments d'optique
Instruments d'optique	- Modèle simplifié de l'œil - La loupe	- L'oculaire - Le microscope
Fonction de transfert et diffraction	- Tâche d'Airy	- Résolution

mardi 29 janvier 13

L'optique

... Ce que perçoit l'œil

Ce qui intéressait les Grecs n'était pas la lumière mais la vision: d'où le mot optique, du grec *optikos* « relatif à la vue ».

La vision était un sens comme le toucher.

Pythagore (~580-495 av. JC) : L'œil envoie des « rayons visuels ». Ils tombent sur les objets et les « tâtent ».

Atomistes, Démocrite (460-370 av. JC) : La surface de tout objet émet des répliques minuscules de l'objet (*eidola*, *simulacres*), qui se propagent dans l'espace jusqu'à l'œil.

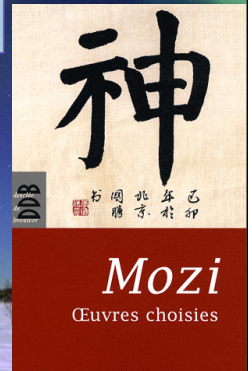
La lumière et l'obscurité étaient deux réalités indépendantes.

3

mardi 29 janvier 13

Mozi (~470-390 av. JC) : philosophe chinois

1^{ère} document optique du monde
Propagation rectiligne de la lumière
Chambre noire (sténopé)
Relation entre l'objet et l'image inversée.



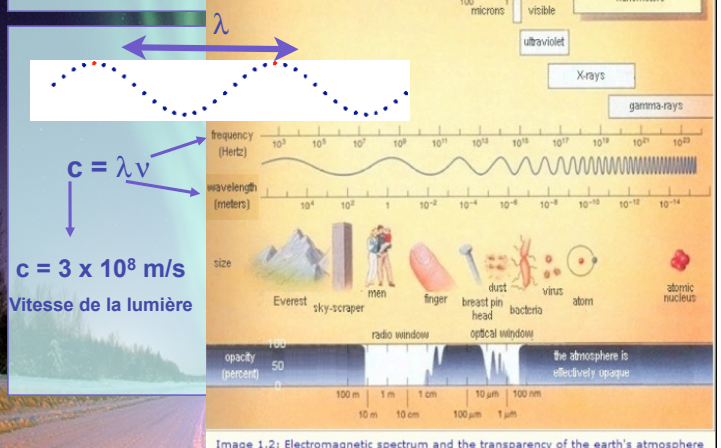
mardi 29 janvier 13

Et depuis 2000 ans...

- Grecs:**
 - Aristote (384-322 av JC) : éther (pas de vide)
 - Euclide (325-265 av JC) : loi de la réflexion, rayon lumineux
 - Ptolémée (100-170 ap JC) : étude de la réfraction (pas la loi)
 - Héron d'Alexandrie (100 ap. J.-C.) : trajet le plus court
- Arabes:**
 - Ibn Al-Haytham (965-1039) : concept d'image, formation des images /l'œil
- 13^{ème} siècle:** miroirs, besicles, arc-en-ciel
- 17^{ème} siècle :** débat sur la nature ondulatoire/corpusculaire de la lumière
 - 1609 : Galilée: lunette, microscope (1624)
 - 1611 : Description de la lunette astronomique par Kepler (*Dioptricae*)
 - 1621 : Loi de la réfraction (trouvée par Willebrordus Snellius qui ne la publie pas)
 - 1637 : *Dioptrique* de Descartes: formulation mathématique des lois de l'optique
- 20^{ème} siècle :** développements → optique physique
mécanique quantique, électromagnétisme

mardi 29 janvier 13

L'optique



mardi 29 janvier 13

Approximations et omissions de l'optique géométrique

- Fondements
- Principe de Fermat
- Interférences et diffraction
- Stigmatisme et conditions de Gauss
- Les 3 lois de Snell-Descartes

mardi 29 janvier 13

L'optique géométrique est une approximation... 1: ce que l'on suppose

$\lambda \rightarrow 0$; propagation rectiligne dans milieu homogène
i.e. λ petit par rapport aux instruments de mesure

- ✓ \Rightarrow des rayons lumineux indépendants les uns des autres
- ✓ Dans un milieu homogène, transparent et isotrope, les rayons lumineux sont des lignes droites.
- ✓ A la surface de séparation de deux milieux, les rayons lumineux obéissent aux lois de Snell-Descartes.
- ✓ Principe du retour inverse de la lumière

mardi 29 janvier 13



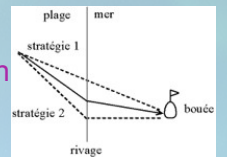
mardi 29 janvier 13

L'optique géométrique est une approximation... 1: ce que l'on suppose

Fondements de l'optique géométrique déduits du **Principe de Fermat**

= principe du moindre temps selon lequel la lumière suit le **trajet de plus courte durée**

[utilise chemin optique défini par la théorie ondulatoire de la lumière...]

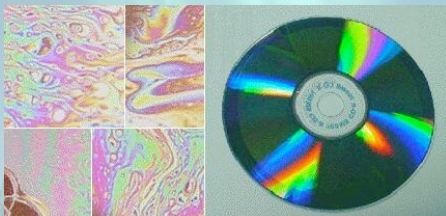


= **chemin optique** $\delta L = n(l)\delta l$ **extrémal** (minimal/maximal)

mardi 29 janvier 13

L'optique géométrique est une approximation... 2: ce que l'on néglige

- **Interférences et diffraction** (phénomènes liés à la nature ondulatoire de la lumière)



Bulles de savon : couleurs interférentielles

Diffraction de la lumière sur un CD

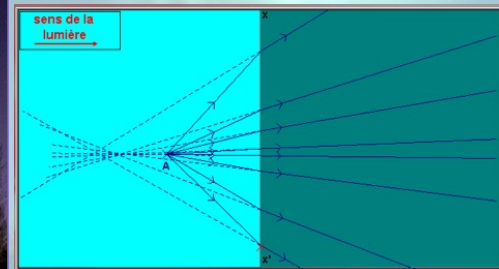
Source :

<http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/>

mardi 29 janvier 13

L'optique géométrique est une approximation... 2: ce que l'on néglige

- **Stigmatisme** : 1 objet \rightarrow système optique \rightarrow 1 image



Système non stigmatique

<http://www.uel.education.fr/consultation/referenc/reference/physique/optigeo>

mardi 29 janvier 13

Les trois lois de Snell-Descartes

- 1^{ère} loi :

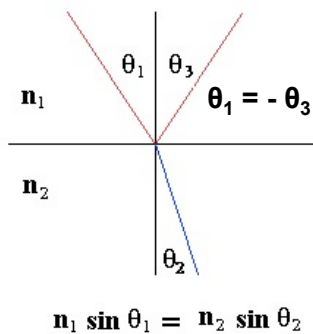
Les rayons réfléchi et réfracté sont dans le **plan d'incidence**.

- 2^{ème} loi :

Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux et de sens contraire : $\theta_1 = -\theta_3$

- 3^{ème} loi :

Pour un rayon lumineux monochromatique, on a :
 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



mardi 29 janvier 13

Les trois lois de Snell-Descartes

- 1^{ère} loi :

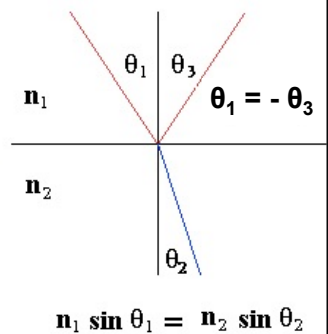
Les rayons réfléchi et réfracté sont dans le **plan d'incidence**.

- 2^{ème} loi :

Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux et de sens contraire : $\theta_1 = -\theta_3$

- 3^{ème} loi :

Pour un rayon lumineux monochromatique, on a :
 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



Indice de réfraction d'un milieu: $n_i = c / v_i$, v_i vitesse de propagation de l'onde lumineuse dans le milieu.

mardi 29 janvier 13

Les trois lois de Snell-Descartes

- 3^{ème} loi : $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

Si θ_1 (et θ_2) est petit, alors :

$\sin \theta_1 \approx \theta_1$ & $\sin \theta_2 \approx \theta_2 \rightarrow$

$n_1 \theta_1 \approx n_2 \theta_2$ (approx. Képler)

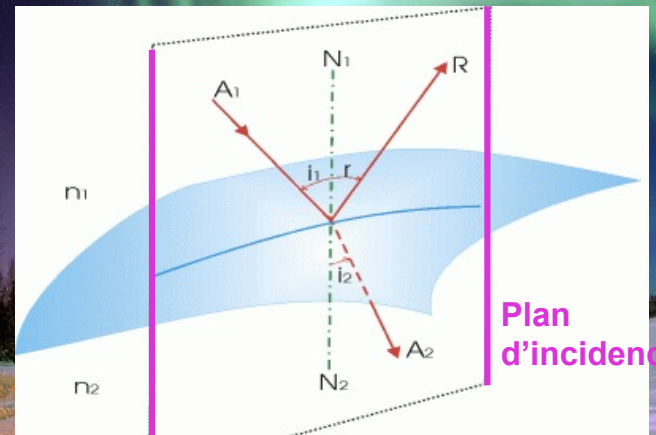
\rightarrow L'indice de réfraction n_i dépend de la longueur d'onde

Indice de réfraction d'un milieu: $n_i = c / v_i$, v_i vitesse de propagation de l'onde lumineuse dans le milieu.



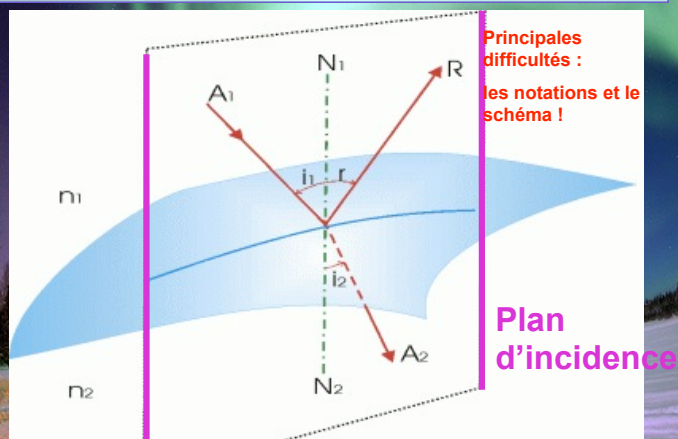
mardi 29 janvier 13

Les trois lois de Snell-Descartes



mardi 29 janvier 13

Les trois lois de Snell-Descartes



mardi 29 janvier 13

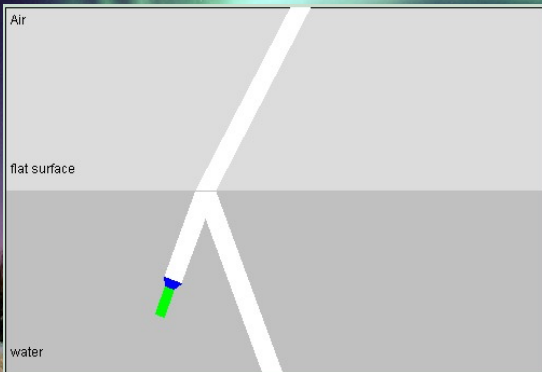
Les trois lois de Snell-Descartes



Applet java : <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnjava/index.php?topic=49.0>

mardi 29 janvier 13

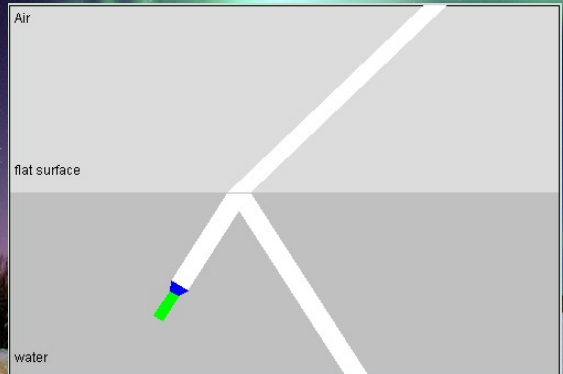
Les trois lois de Snell-Descartes



Applet java : <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=49.0>

mardi 29 janvier 13

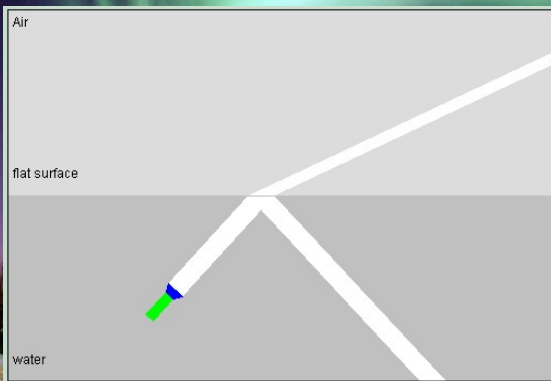
Les trois lois de Snell-Descartes



Applet java : <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=49.0>

mardi 29 janvier 13

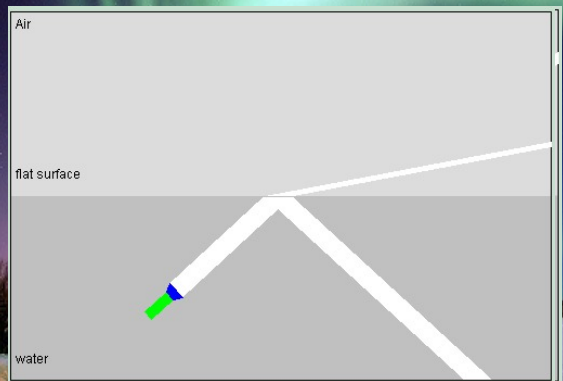
Les trois lois de Snell-Descartes



Applet java : <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=49.0>

mardi 29 janvier 13

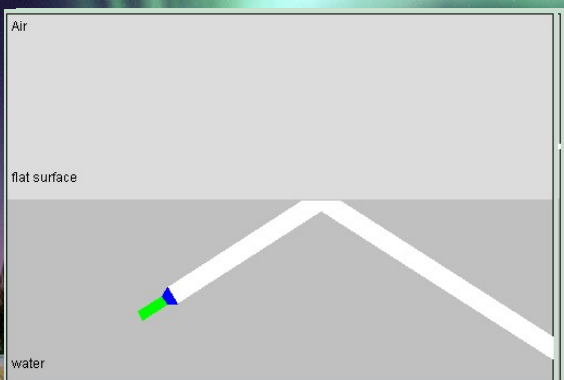
Les trois lois de Snell-Descartes



Applet java : <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=49.0>

mardi 29 janvier 13

Les trois lois de Snell-Descartes



Applet java : <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=49.0>

mardi 29 janvier 13

Deux des trois lois de Snell-Descartes

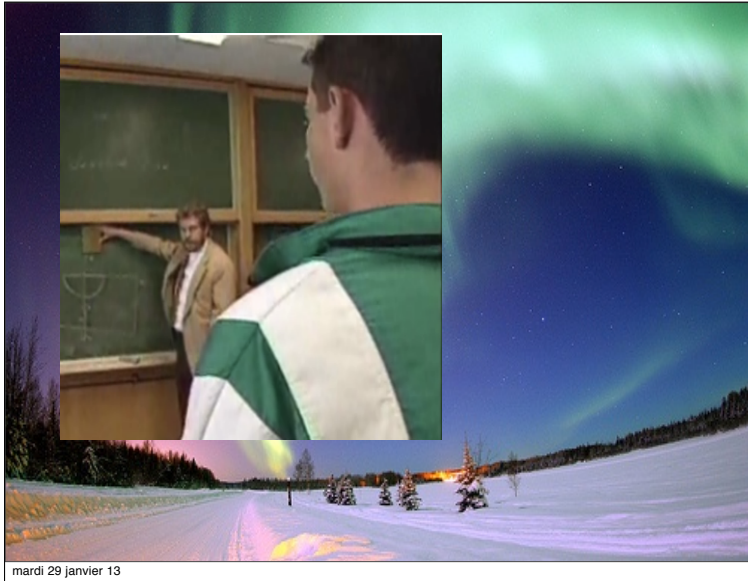


Réflexion (2^{ème} loi)

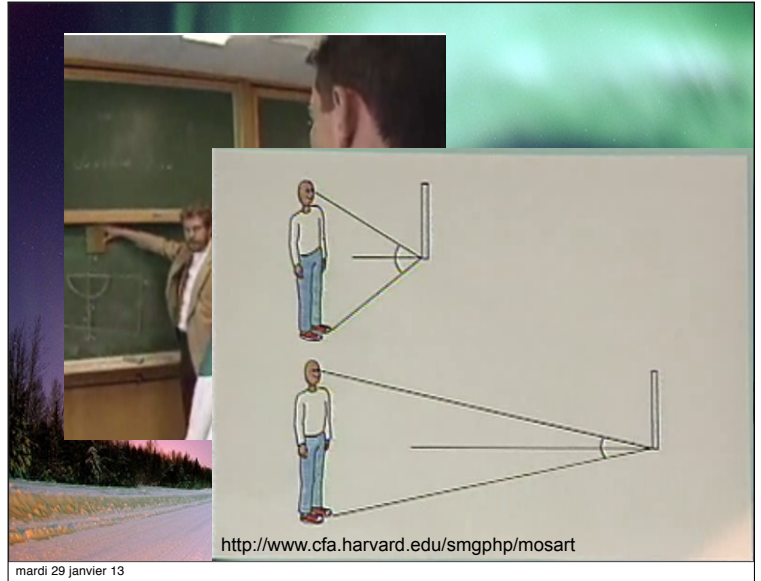
Réfraction (3^{ème} loi)

<http://fr.wikipedia.org/wiki>

mardi 29 janvier 13



mardi 29 janvier 13



mardi 29 janvier 13

<http://www.cfa.harvard.edu/smgphp/mosart>

Systèmes optiques

- Dioptrés et miroirs plans
- Lentilles minces (constructions et formules)
- Dioptrés et miroirs sphériques
- Autres qualités des instruments d'optique
- Lentilles épaisses

mardi 29 janvier 13

Miroir plan et dioptré plan

Objet : A -- réel
Image : A' -- virtuelle

Objet : A₁ -- réel
Image : A₂ -- virtuelle

$\frac{n_1}{HA_1} = \frac{n_2}{HA_2}$

<http://www.uel.education.fr/consultation/reference/physique/optigeo>

mardi 29 janvier 13

Miroir sphérique et dioptré sphérique

Miroir convexe

Miroir concave

<http://www.uel.education.fr/consultation/reference/physique/optigeo>

mardi 29 janvier 13

Miroir sphérique et dioptré sphérique

Miroir convexe

Miroir concave

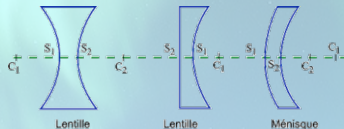
<http://www.uel.education.fr/consultation/reference/physique/optigeo>

mardi 29 janvier 13

Lentilles épaisses

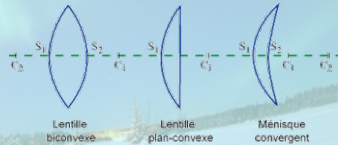
Association de :

- 2 dioptries sphériques



Ou

- 1 dioptrie sphérique +
1 dioptrie plan



<http://www.uel.education.fr/consultation/referance/physique/optigeo>

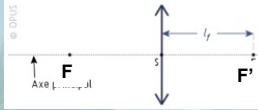
mardi 29 janvier 13

Lentilles minces : les approximations

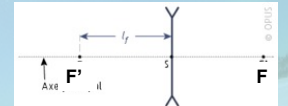
• Epaisseur axiale négligeable comparée aux rayons de courbures des deux faces et la distance de leurs centres

$$e = S_1S_2 \ll S_1C_1; e \ll S_2C_2; e \ll C_1C_2$$

F: foyer objet; F': foyer image



F: foyer objet; F': foyer image



mardi 29 janvier 13

Lentilles minces: constructions géométriques

Lentille convergente

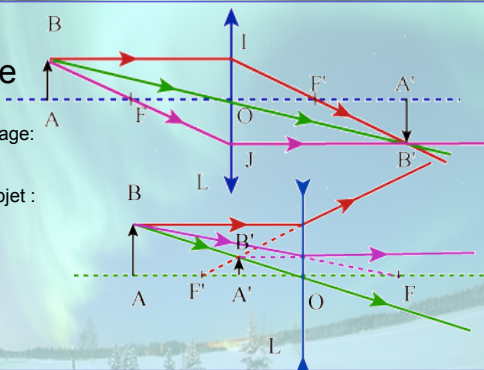
Distance focale image:

$$f' = \overline{OF'}$$

Distance focale objet :

$$f = \overline{OF} = -f'$$

Lentille divergente



<http://www.uel.education.fr/consultation/referance/physique/optigeo>

mardi 29 janvier 13

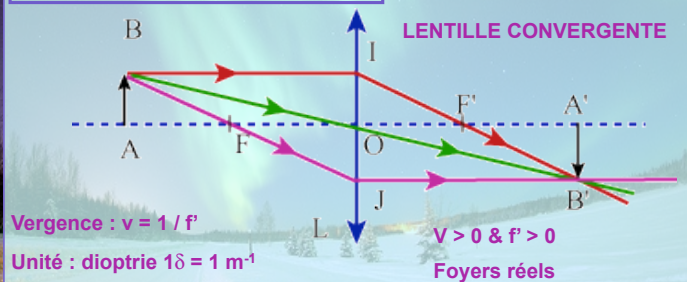
Lentilles minces : les formules

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$$

Formule de conjugaison

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{p'}{p}$$

Grandissement



mardi 29 janvier 13

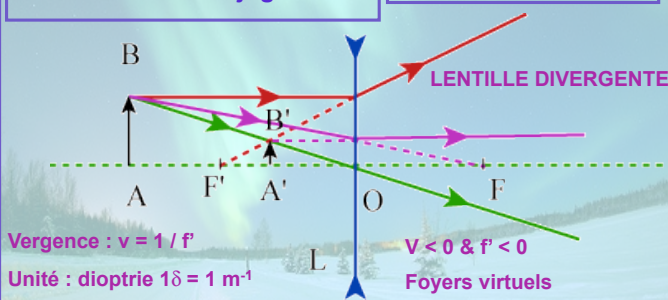
Lentilles minces : les formules

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$$

Formule de conjugaison

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{p'}{p}$$

Grandissement



mardi 29 janvier 13

Association de lentilles minces accolées

Théorème des vergences :

$$V_{\text{tot}} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

1 système de N lentilles minces accolées
~ 1 lentille mince unique

mardi 29 janvier 13

Autres qualités des instruments d'optique

- Configurations où l'instrument donne une image virtuelle d'un objet réel à distance finie (loupe, oculaires positifs, microscope...).

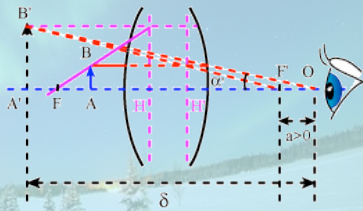
Puissance optique (en dioptries)

α' exprimé en radians

AB est exprimé en m.

$$P = \frac{\alpha'}{AB}$$

$$\alpha' \sim \tan \alpha' = A'B'/\delta$$



mardi 29 janvier 13

Autres qualités des instruments d'optique

- Grossissement optique** (grandeur sans dimension)
= rapport de l'angle sous lequel est vu l'objet observé à travers l'instrument d'optique par rapport à celui sous lequel il est vu à l'œil nu.

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

mardi 29 janvier 13

Autres qualités des instruments d'optique

Grossissement commercial =

valeur standardisée du grossissement pour laquelle on fixe la distance à laquelle est vu l'objet à l'œil nu à 0,25 m (valeur moyenne minimum de vision distincte d'un œil sain). Il sert à caractériser un oculaire ou une loupe par exemple.

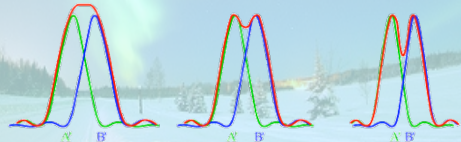
$$G_c = \frac{P}{4}$$

mardi 29 janvier 13

Autres qualités des instruments d'optique

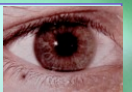
- Pouvoir séparateur = aptitude d'un instrument d'optique à séparer des détails rapprochés angulairement ou linéairement.**

→ Définition d'une limite angulaire ou linéaire de séparation (ou de résolution) dont l'inverse sera appelé pouvoir séparateur ou pouvoir de résolution angulaire ou linéaire.

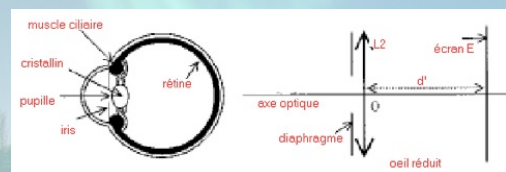


mardi 29 janvier 13

Application : modèle simplifié de l'œil



- distance minimale de vision distincte pour l'œil normal : 25 cm (accommodation)
- Distance maximale : ∞ (au repos)



<http://www.chimix.com/>

mardi 29 janvier 13

Instruments d'optique

- Modèle simplifié de l'œil
- La loupe
- L'oculaire
- Le microscope

mardi 29 janvier 13

Application : modèle simplifié de l'œil

Point de vue simplifié de l'œil au repos (L_c) écarté

$f'_1 = OF'_1 = d = 1,66 \text{ cm}$

Cristallin Rétine

Point de vue simplifié de l'œil accommodé au maximum (L_c) écarté

$D = 25 \text{ cm}$

$f'_2 = OF'_2 = 1,56 \text{ cm}$

Cristallin Rétine

mardi 29 janvier 13

Application : la loupe

Objets $> 100 \mu\text{m} \rightarrow$ Œil nu

$100 \mu\text{m} >$ Objets $> 3 \mu\text{m} \rightarrow$ Loupe

Extrait de « Optique géométrique. Imagerie et instruments » de Bernard Balland

mardi 29 janvier 13

Application : la loupe

Latitude de mise au point

Cas d'un œil « normal » :

$A_R = F = A_1 \rightarrow$ [Loupe] $\rightarrow P_R = \infty \rightarrow$ [Œil au repos] \rightarrow Rétine

$A_P = A_2 \rightarrow$ [Loupe] $\rightarrow P_P = 25 \text{ cm} \rightarrow$ [Œil accommodé] \rightarrow Rétine

Cas d'un œil non « normal » (myope, hypermétrope) :

P_R et P_P sont différents

Extrait de « Optique géométrique. Imagerie et instruments » de Bernard Balland

mardi 29 janvier 13

Application : l'oculaire

- Similaire à la loupe, mais corrige des aberrations géométriques et chromatiques
- Association de deux lentilles minces non accolées (lentille de champ + lentille d'œil)
- Oculaires de Huygens et de Ramsden

\rightarrow Équivalent à un système centré

mardi 29 janvier 13

Application : le microscope

$L1 : f = 2 \text{ cm}$

$L2 : f = 4 \text{ cm}$

Objectif

Oculaire

Comment l'œil peut-il accommoder ? - Intérêt? / γ

<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/doublets.html>

mardi 29 janvier 13

Application : le microscope

$L1 : f = 2 \text{ cm}$

$L2 : f = 4 \text{ cm}$

Objectif

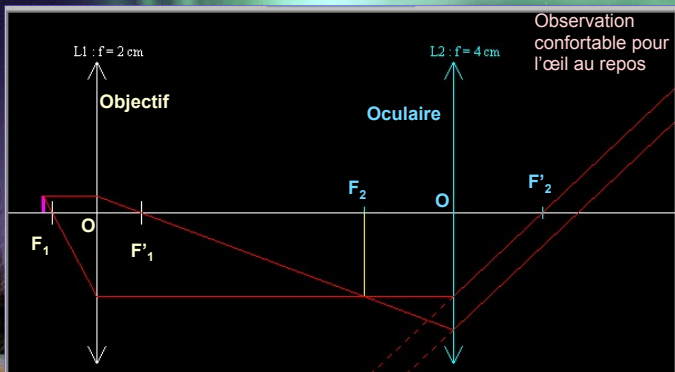
Oculaire

Comment l'œil peut-il accommoder ?

<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/doublets.html>

mardi 29 janvier 13

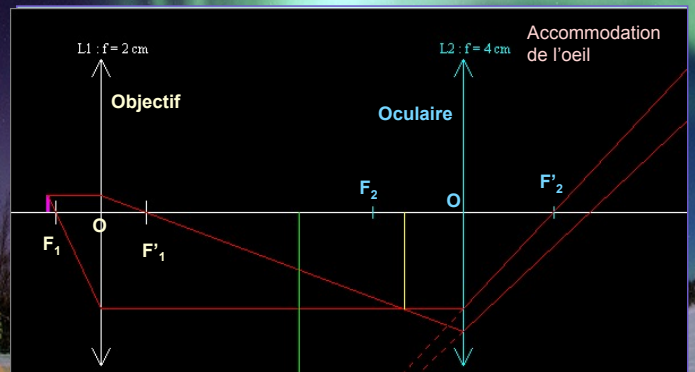
Application : le microscope



<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/doublets.html>

mardi 29 janvier 13

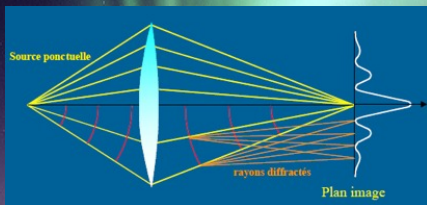
Application : le microscope



<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/doublets.html>

mardi 29 janvier 13

Fonction de transfert (PSF) et diffraction



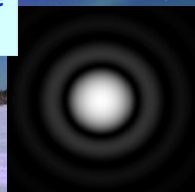
L'image d'un point n'est pas un point...

Limite de diffraction d'une source ponctuelle
→ fonction d'Airy

$$\theta \sim \sin \theta = 1,22 \text{ rad } \lambda/D \quad [=70 \text{ deg } \lambda/D]$$

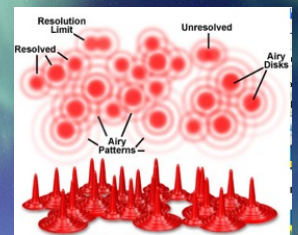
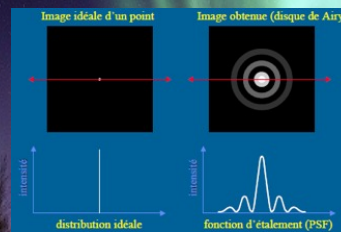
$$\lambda = 0,5 \mu\text{m}; D = 1 \text{ cm} \rightarrow \theta = 6 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

$$\theta = 12 \text{ secondes d'arc}$$



mardi 29 janvier 13

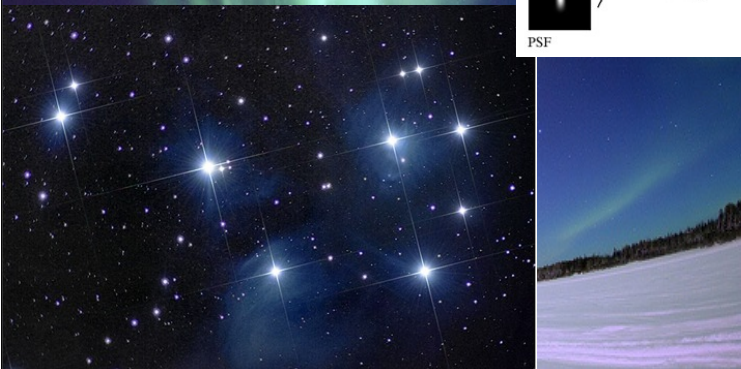
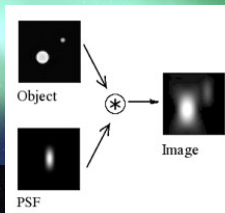
Fonction de transfert (PSF) et diffraction



Attention: cela suppose un instrument « parfait », atteignant la « limite de diffraction ».

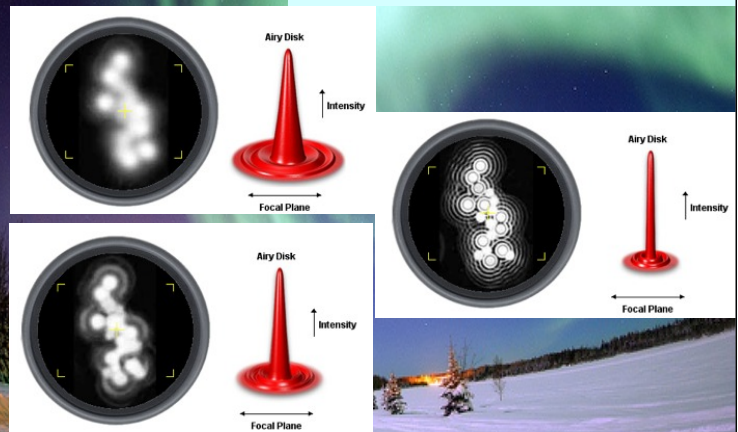
mardi 29 janvier 13

Exemple en astronomie



mardi 29 janvier 13

Effet de la résolution



mardi 29 janvier 13

Bibliographie

- **Ouvrages:**

- « Optique géométrique. Imagerie et instruments » de Bernard Balland, Presses polytechniques de universitaires romandes, 2007

- **Sites web et animations :**

- **Université du Mans : simulation de doublets**
<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/doublets.html>
- **Université en ligne – Physique/Optique géométrique**
<http://www.uel.education.fr/consultation/reference/physique/optigeo/>
- **Microscopy resource center**
<http://www.olympusmicro.com/>