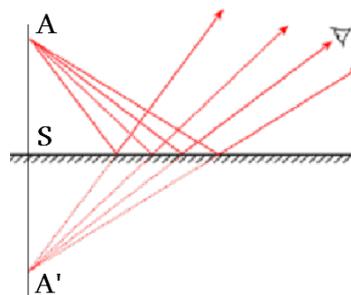
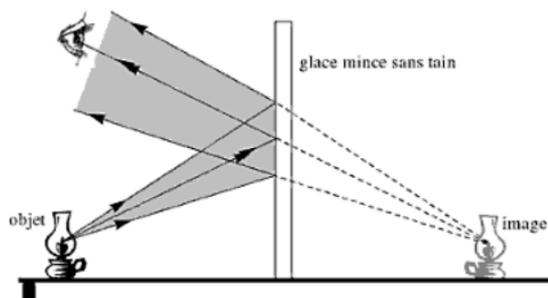


Miroirs



1- Miroir plan

Simulation



Repliement du $\frac{1}{2}$ espace image
sur le $\frac{1}{2}$ espace objet

Objet réel A \rightarrow Image virtuelle A'
symétrique par rapport au plan

Tout se passe comme si $n' = -n$

$n \sin i = n' \sin i'$ et $n' = -n$
 $\rightarrow i = i'$

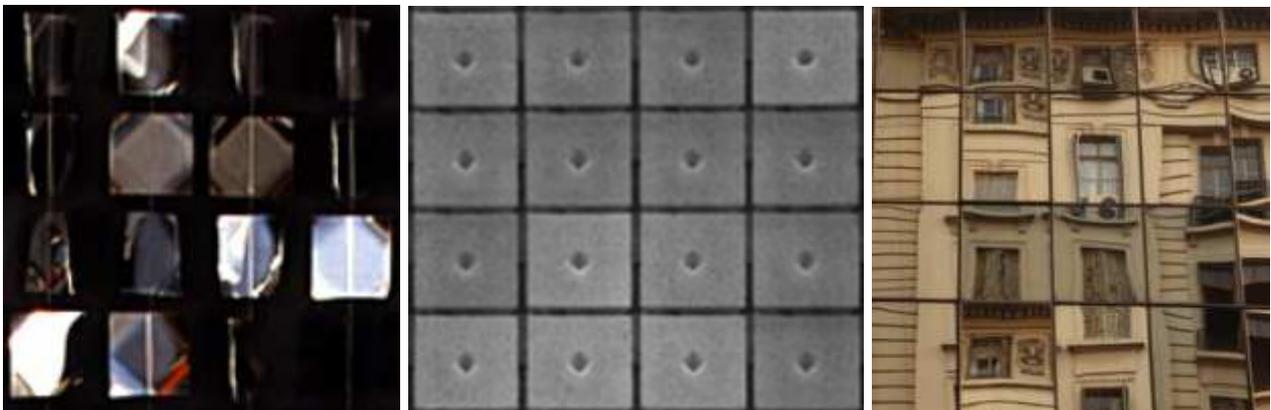
- Le miroir plan est rigoureusement stigmatique : l'image d'un point est un point.
- Plan = sphère de rayon $R \rightarrow +\infty$ avec $1/R \rightarrow 0$

$$\frac{n'}{SA'} - \frac{n}{SA} = \frac{n' - n}{SC} = \frac{-n}{SA'} - \frac{n}{SA} = \frac{-n - n}{R} \rightarrow 0 \quad \rightarrow \overline{SA'} = -\overline{SA}$$

A et A' sont symétriques par rapport au plan du miroir

- $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{n'}{n} \frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}} = \frac{-n}{n} \frac{-\overline{SA}}{\overline{SA}} = +1$

Objet et image étendue ont même taille et même orientation
(le haut reste en haut !).



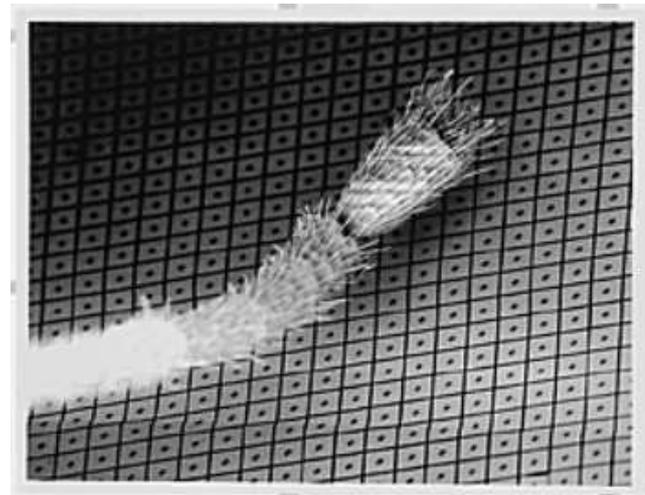
Qu'est-ce- que c'est ?



Julio Le Parc – Continuels Mobiles (RMN - Centre Georges Pompidou – Paris)
Mobile lumaline sur noir 160 x 160 x 12 Cm 1962

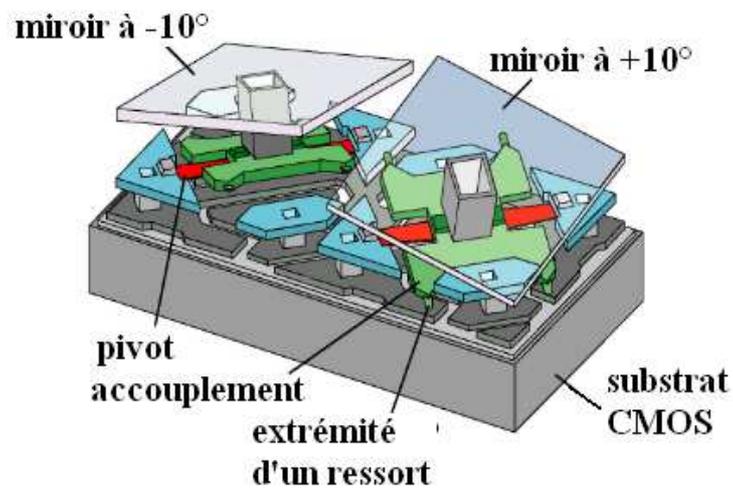


Reflet dans la façade d'un immeuble
(situé à Buenos Aires © twotravellingbirds.blogspot.fr)



Digital Micromirror Device (DMD) for Digital Light Processing (DLP) par Texas Instruments

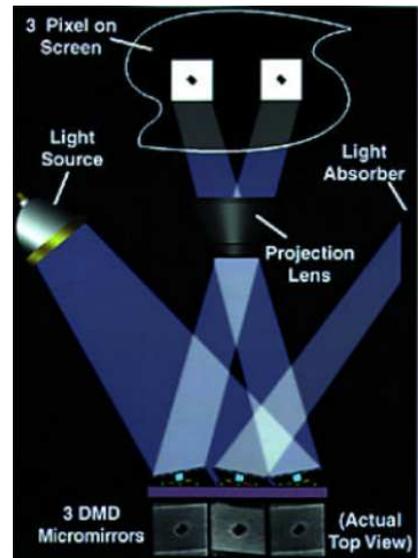
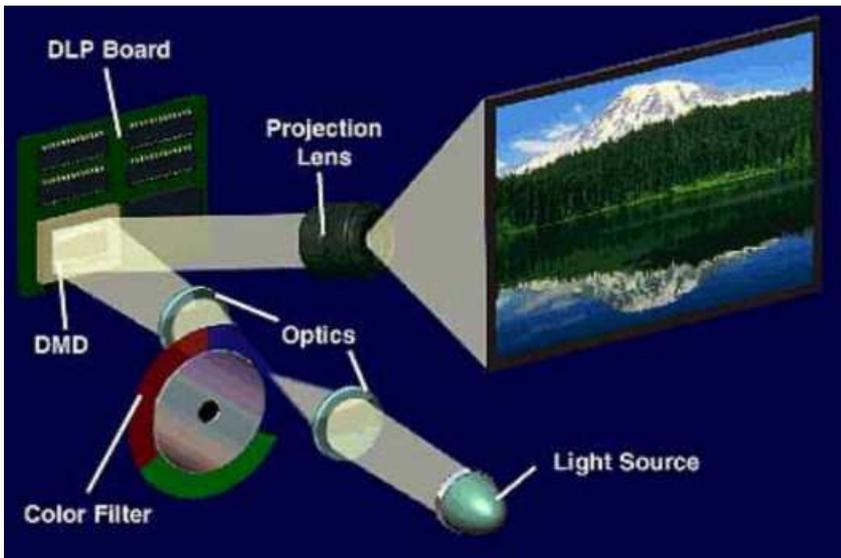
Détails d'une matrice de 1024×768 micro-miroirs de $16 \mu\text{m}$ de coté (patte d'acarien)
(786432 micro-miroirs respectant le rapport $4/3 = 1024 / 768 = 1,33$)



le micro-miroir ne peut prendre que deux positions : \approx **commutateur optique**

orienté à $+10^\circ$: miroir brillant
le miroir renvoie la lumière dans le faisceau utile (pixel à 1)

orienté à -10° : miroir sombre
le miroir ne renvoie pas la lumière dans le faisceau utile (pixel à 0)



Digital Micromirror Device (DMD) for Digital Light Processing (DLP)

le DMD est le composant principal des **vidéo projecteurs** récents
c'est un MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems)

Remarque : la couleur est gérée soit par un filtre rotatif RVB (et une synchronisation des miroirs sur trois images successives) soit par un ensemble de trois DMD et des prismes.

2- Miroirs sphériques

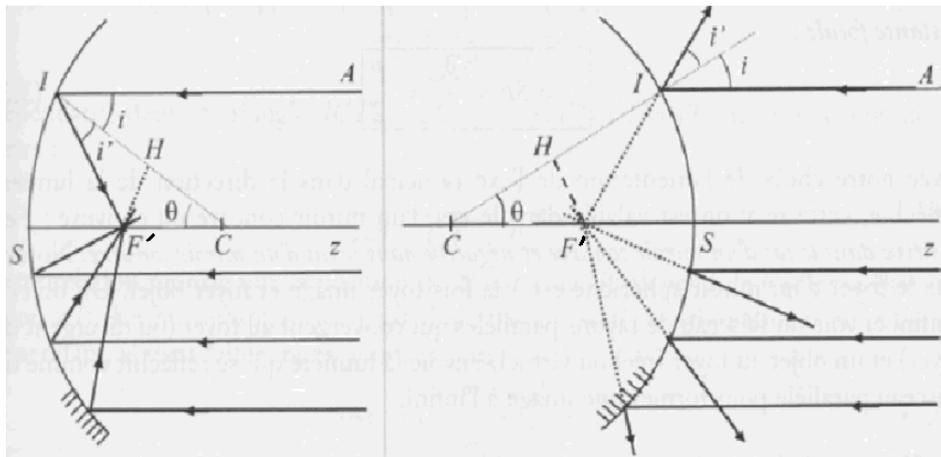


Le miroir **convexe** d'un rétroviseur améliore la visibilité par un **champ visuel élargi**



Miroir sphérique **concave** pour améliorer la visibilité par une **image agrandie**

Foyers objet et image, distance focale



Miroir concave

Miroir convexe

$$f = \overline{SF} = \frac{n}{n-n'} \overline{SC} \quad \text{et} \quad f' = \overline{SF'} = \frac{n'}{n'-n} \overline{SC} \quad \text{avec } n' = -n$$

$$\boxed{\rightarrow f = \overline{SF} = f' = \overline{SF'} = \frac{1}{2} \overline{SC}} \quad \text{distance focale du miroir :}$$

Remarque : les miroirs sphériques ne sont quasi stigmatiques que dans les conditions de Gauss.

Formule de conjugaison $\frac{n'}{SA'} - \frac{n}{SA} = \frac{n'-n}{SC} \rightarrow \boxed{\frac{1}{SA'} + \frac{1}{SA} = \frac{2}{SC}}$

Grandissement transversal

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{n'}{n} \frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}} = - \frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}}$$

Grandissement angulaire

$$G = \frac{u'}{u} = \frac{\overline{SA}}{\overline{SA'}} \quad \text{avec} \quad \gamma G = \frac{n'}{n} = -1$$

	Objet	Image
Réel	placé devant le miroir	formée en avant du miroir
Virtuel	placé derrière le miroir (par l'intermédiaire d'un autre composant optique !)	formée derrière le miroir



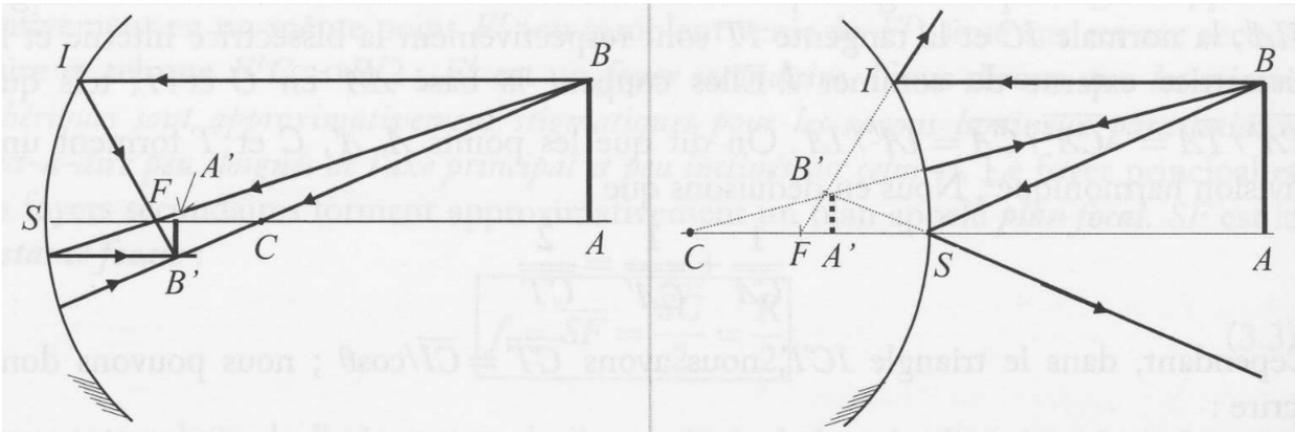
?



?

The bean par Kapoor à Chicago et *La fontaine* par Pol Bury au Palais Royal à Paris

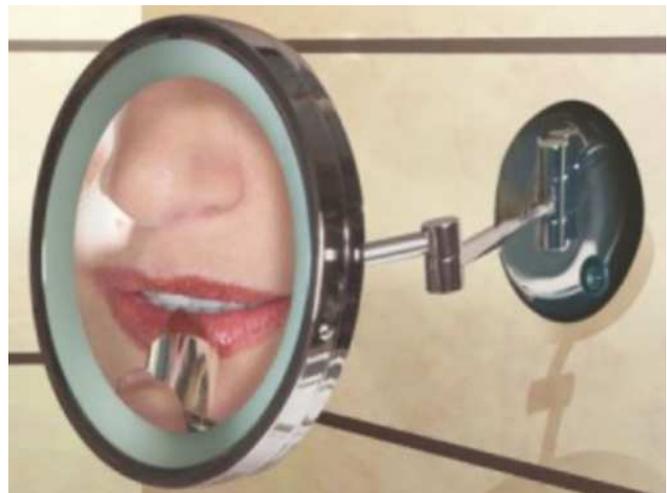
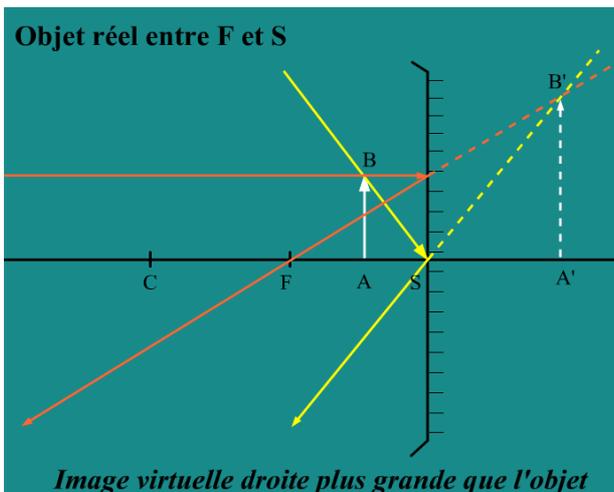
Construction graphique de la position d'une image



Utilisation de rayons particuliers pour déterminer B' image de B

- rayon passant par C non dévié
- rayon incident horizontal \rightarrow réfléchi passe par F (situé à $R/2$)
- rayon incident passant par F \rightarrow réfléchi horizontalement

Exemple : miroir sphérique concave avec l'objet entre S et F



- Miroir concave $0 > \overline{SC} = -R$
- Objet réel $\overline{SA} < 0$ et image virtuelle $\overline{SA'} > 0$ (\approx « derrière le miroir »)
 $\rightarrow \gamma = -\frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}} > 0$ et $\overline{SA'} = -\gamma \overline{SA}$ Image virtuelle droite
- Relation de conjugaison $\frac{1}{\overline{SA'}} + \frac{1}{\overline{SA}} = \frac{2}{\overline{SC}} \rightarrow \frac{1}{\overline{SA}} \left\{ \frac{-1}{\gamma} + 1 \right\} = \frac{2}{-R}$

on en tire :

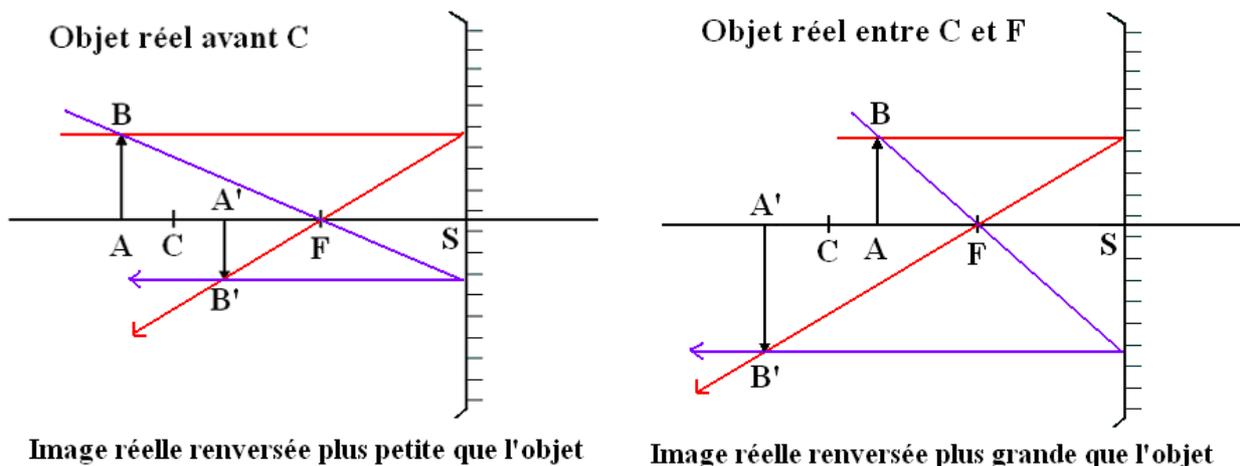
$$R = -2\overline{SA} \frac{\gamma}{\gamma-1} \quad \text{si } \gamma=5 \text{ et } \overline{SA}=-0.2\text{ m alors } R=+0.5\text{ m et } \overline{SA}'=-\gamma\overline{SA}=1\text{ m}$$

ou

$$\gamma = \frac{R}{R + 2\overline{SA}} \quad \text{si } R = +0.5 \text{ m et } \overline{SA} = -0.2\text{ m alors } \gamma = +5 \text{ et } \overline{SA}' = -\gamma\overline{SA} = 1\text{ m}$$

Placé à 20 cm devant un miroir concave de 50 cm de rayon de courbure, on voit une image droite, grandie 5 fois et positionnée à 1 m derrière le miroir.

Exemple : méthode d'autocollimation pour un miroir sphérique concave



Régler la position de l'objet de sorte que les plans objet et image soient superposés :

$$A \equiv A' \rightarrow \frac{1}{\overline{SA}'} + \frac{1}{\overline{SA}} = \frac{2}{\overline{SA}'} = \frac{2}{\overline{SA}} = \frac{2}{\overline{SC}} \rightarrow A \equiv A' \equiv C$$

$\rightarrow \overline{SA}' = \overline{SA} = \overline{SC} = -R$ avec $R > 0$ alors l'image est au centre C

Mesurer R, c'est mesurer la distance focale $f = \overline{SF} = f' = \overline{SF}' = \frac{1}{2} \overline{SC} = -\frac{R}{2}$

Remarque : méthode de mesure du rayon R du miroir concave équivalente à la méthode d'**autocollimation** pour les lentilles convergentes

Les différents cas pour un objet réel

Miroir :	Objet réel Placé devant le miroir	Image ?
convexe	Axe \longrightarrow A S F C	virtuelle (en arrière du miroir) droite, taille \downarrow quand éloignement objet \uparrow
concave	A C F S	image réelle (en avant du miroir) inversée, diminuée
	C A F S	image réelle (en avant du miroir) inversée, agrandie
	C F A S	image virtuelle (en arrière du miroir) droite, agrandie

Exemple : miroir sphérique concave dans les vieux Traités

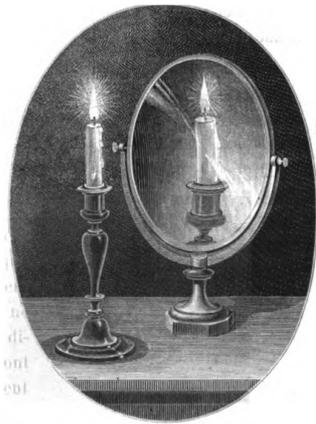


image virtuelle droite agrandie
pour un objet réel entre le
foyer et le sommet...

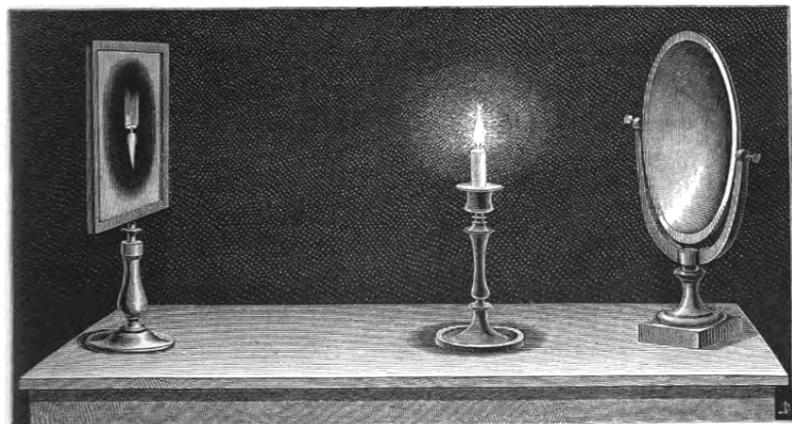


Image réelle inversée agrandie
pour un objet réel entre le foyer et le centre.

Traité élémentaire de Physique A. Privat-Deschanel 1869



tuba & trombone...

3- Télescopes pour l'astronomie



Au contraire des lunettes à lentilles,
la solution « miroirs » permet l'augmentation de la clarté et du grandissement :

- longueur focale $f' \uparrow \rightarrow$ encombrement moindre
- diamètre d'ouverture $D \uparrow$
 - \rightarrow masse moindre
 - \rightarrow peu de perte de lumière
 - \rightarrow coût de fabrication moindre

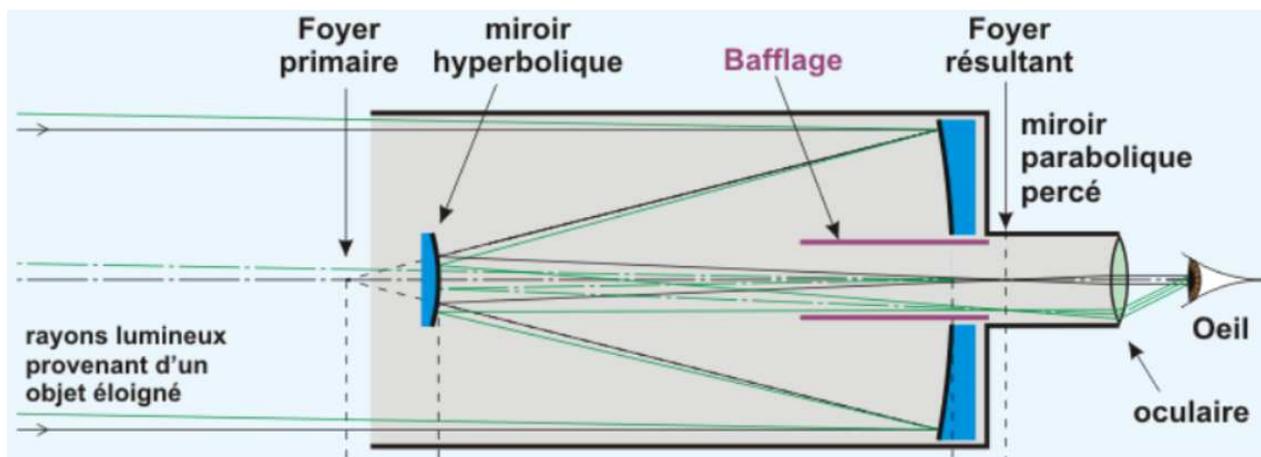
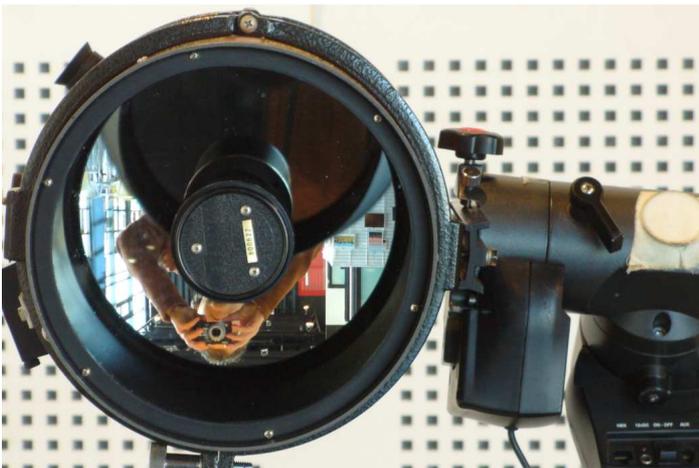


Schéma d'un télescope en configuration Cassegrain (invention 1672)

© schéma S. Bertorello



Comment prouver que le miroir primaire est concave ?



concave : vue de loin ($L > R$)
l'image est renversée



mais vu de près ($L < R$)
l'image est droite !



Fabrication du miroir parabolique
primaire de 3.5 m du télescope spatial
européen Herschel (2009)

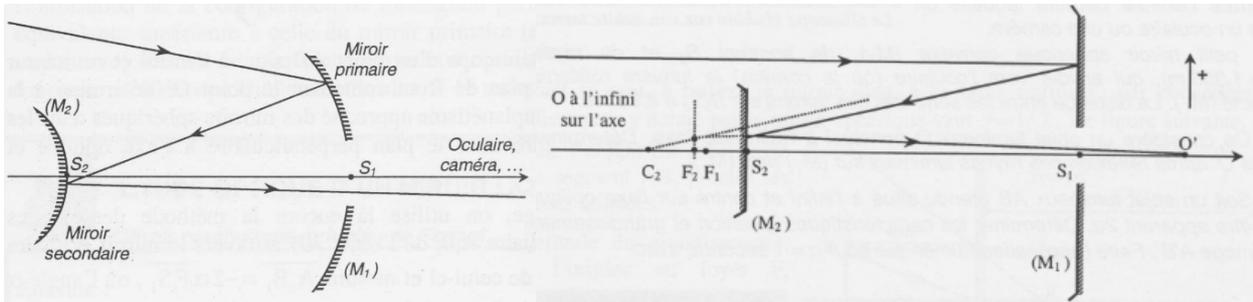


Hubble Space Telescope (**HST**)
(1990)

Télescope Hubble

- mise en œuvre 04/1990
- masse $\approx 11\,000$ kg, longueur 13,2 m, diamètre max 2,4 m, coût global ≈ 1 milliard de \$.
- télescope réflecteur à deux miroirs : diamètre du miroir primaire 2,4 m pour un coût de 350 millions de \$ (d'après Wikipedia)

Modélisation du télescope Hubble



Caractéristiques des miroirs sphériques équivalents :

- Miroir primaire M_1 : sommet S_1 , rayon $R_1 = 11.025$ m et diamètre $D_1 = 2.40$ m
- Miroir secondaire M_2 : sommet S_2 , rayon $R_2 = 1.355$ m
- Distance entre les deux sommets $S_1 S_2 = 4.90$ m

Position de l'image O'

- L'image intermédiaire O'_1 d'un objet à l'infini O est située au foyer de M_1 :

$$O'_1 \equiv F'_1 \quad \text{donc} \quad \overline{O'_1 S_1} = \overline{F'_1 S_1} = R_1 / 2 = 5.513 \text{ m}$$

- Relation de conjugaison pour M_2 :
$$\frac{1}{\overline{S_2 O'_1}} + \frac{1}{\overline{S_2 O'}} = \frac{2}{\overline{S_2 C_2}}$$

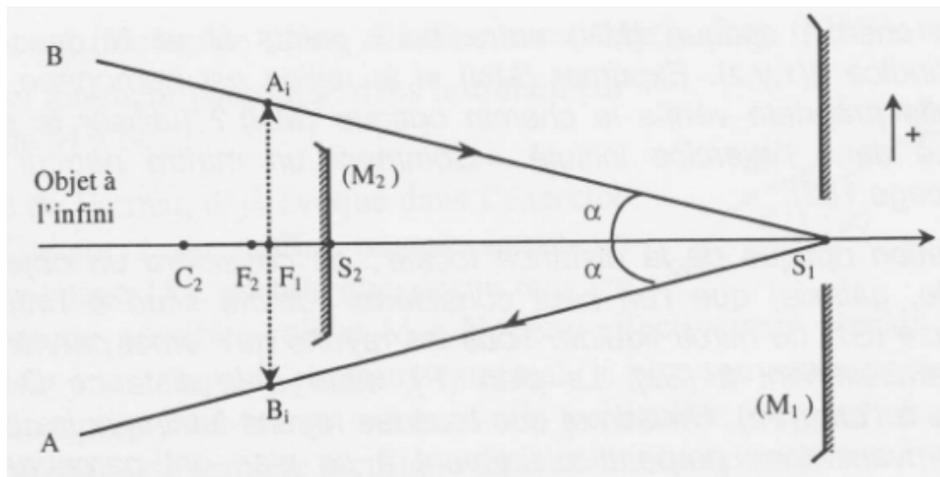
$$\text{avec} \quad \overline{S_2 F'_1} = \overline{S_2 S_1} + \overline{S_1 F'_1} = 4,900 - 5,513 = -0.613 \text{ m} \quad \text{et}$$

$$\overline{S_2 C_2} = -1.355 \text{ m}$$

- On calcule $\overline{S_2 O'} = 6,384 \text{ m}$ et $\overline{S_1 O'} = 1,485 \text{ m}$

L'image se forme pratiquement à 1.50 m derrière le miroir primaire M_1 .

Taille de l'image d'un objet à l'infini de diamètre angulaire α



- Exemple : $\alpha = 1'' = (1 / 3600) \times (\pi / 180) = 4.85 \mu\text{rad}$
- L'image intermédiaire A_iB_i d'un objet AB situé à l'infini se forme dans le plan focal de M_1 avec la taille $\overline{A_i B_i} = -2 \alpha F'_1 S_1$ où l'angle α est très petit ($\approx \tan \alpha$) et en radian.

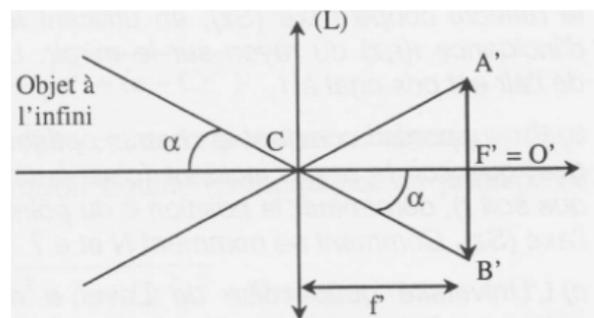
- Grandissement transversal $\gamma_2 = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A_i B_i}} = -\frac{\overline{S_2 A'_2}}{\overline{S_2 A_2}} = -\frac{\overline{S_2 O'}}{\overline{S_2 F'_1}} = -\frac{6,384}{-0,613} = 10,4$

- Taille de l'image $\overline{A'B'} = -2 \alpha F'_1 S_1 \times \gamma_2$
 $\overline{A'B'} = -2 \times 4,8510^{-6} \times 5,513 \times 10,4 = -0,56\text{mm}$

Compacité comparée télescope / lunette

- Pour l'objectif convergent équivalent :
- si $\alpha = 1'' = (1 / 3600) \times (\pi / 180) = 4.85 \mu\text{rad}$ et $\overline{A'B'} = -5,6 \cdot 10^{-4} = -0,56\text{mm}$
- Longueur focale

$$f' = -\frac{\overline{A'B'}}{2\alpha} = \frac{-5,6 \cdot 10^{-4}}{-2 \times 4,8510^{-6}} = 57,7\text{m}$$



→ **Un télescope est bien plus compact qu'une lunette :**

la longueur totale du satellite Hubble est 13.2 m bien inférieure aux 58 m minimum du simple objectif équivalents.



M51 (ou galaxie du Tourbillon ; *Whirlpool Galaxy*)

Image prise en janvier 2005 par le télescope spatial Hubble.

4- Utilisation de miroirs courbes en éclairage

Simulation : comparaison miroirs sphérique et parabolique



Réflecteur parabolique
avec cache « anti-éblouissement »



Réflecteur sphérique

Réflecteurs de phares automobiles pour améliorer la puissance et la directivité
du faisceau de lumière



Gyrophare
 ≈ sphérique



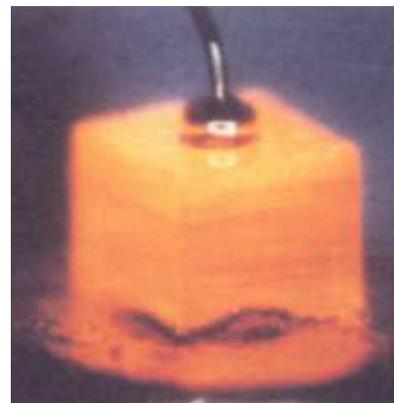
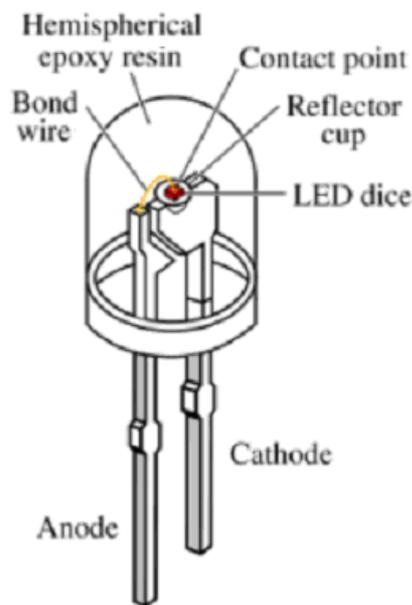
Réflecteur de phare de mer
 ≈ cylindrique



Réflecteur alu
 ≈ parabolique

Remarque :

- phare à fonctionnement automatique sans présence humaine (Nobska, MA USA)
- lampe halogène de 1 kW au foyer d'une lentille de Fresnel
- 4 lampes montées sur barillet pour remise en service immédiate en cas de défaillance.

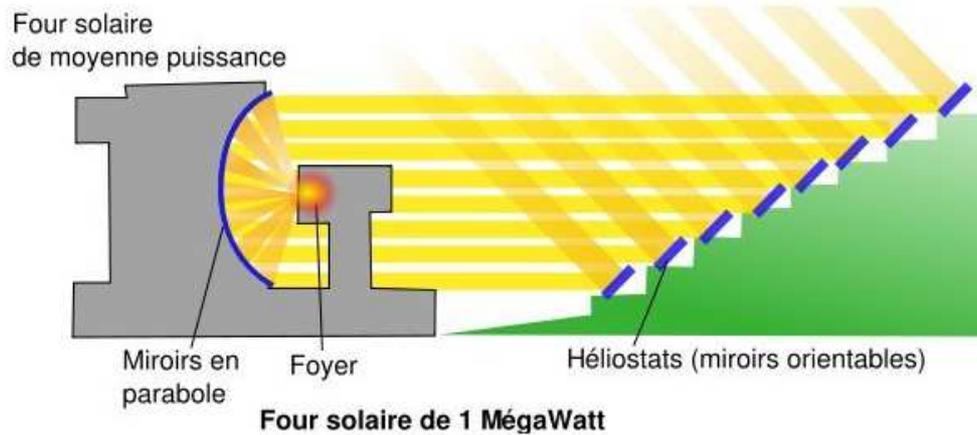


Structure d'une LED usuelle
 (noter la **coupelle réflective** pour collecter l'émission latérale)

5- Utilisation de miroirs en conversion d'énergie solaire



four solaire d'Odeillo France 1 MW (1970)
63 miroirs plans et miroir composé \approx parabolique



Installation développée comme outil de recherche en chimie des matériaux



champ de concentrateurs cylindriques
centrale solaire de Harper Lake Californie
 \approx 100 ha, 160 MW en production d'électricité



four solaire parabolique
pour usage domestique
1 L d'eau à 100° en 13 mn...

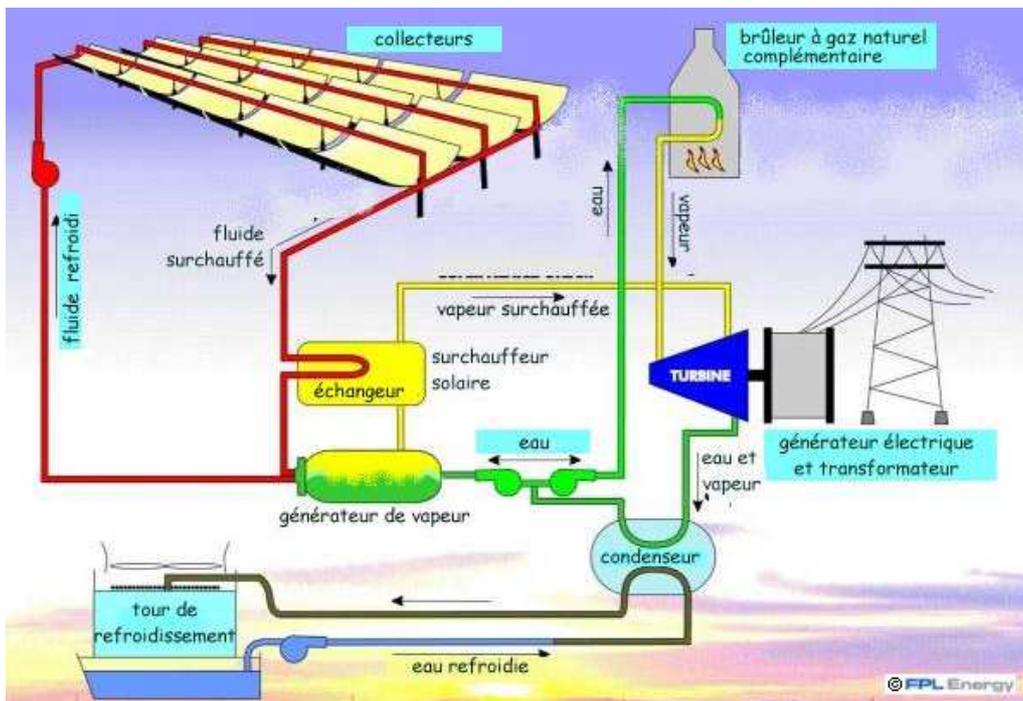


Schéma de fonctionnement de la centrale solaire de Harper Lake



Centrale solaire Gemasolar à Ecija (Espagne)

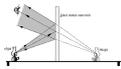
En service depuis 10/2011. 2650 héliostats installés sur 185 ha. Puissance moyenne 20 MW en production d'électricité. Un système de stockage d'énergie thermique important (utilisant 6,25 tonnes de sels fondus) permet de fournir pendant 15 heures sans soleil : la centrale « solaire » produit donc de l'électricité pendant la nuit !

[voir <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/gemasolar-plant/en> pour tous les détails]

Record actuel : Ivanpah Solar Electric Generating System (à 64 km de Las Vegas USA). En service depuis 02/2014. 173 500 héliostats installés sur 1600 ha, puissance moyenne prévue 392 MW en production d'électricité ($\approx 1/3$ d'un réacteur récent de centrale nucléaire). Investissement 2.2 milliards de \$.

[voir http://en.wikipedia.org/wiki/Ivanpah_Solar_Power_Facility pour tous les détails].

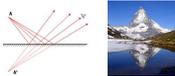
Sources des figures et des images :



Optique géométrique B. Balland PPUR 2007



<http://twotravellingbirds.blogspot.fr/>



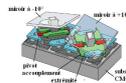
http://fr.wikiversity.org/wiki/Miroirs_en_optique_géométrique/Miroir_plan (le Mont Cervin est en Suisse)



http://www.julioleparc.org/fr/artwork.php?aw_cat_id=4



http://focus.ti.com/pdfs/dlpdmd/135_Myth.pdf

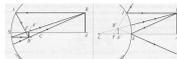


<http://blogs.epfl.ch/document/13733>

<http://ebookbrowse.com/to/toshiyoshi-projection-based-displays-pdf>



www.rose-hulman.edu/~ahmed/DLP&DMD.pdf



Optique géométrique T. Bécherrawy De Boeck 2006



Crédit personnel

<http://www.idees-nouvelles.com/spotmirror.php>



<http://www.kiria.com/6625-3023-large/miroir-mural-grossissant.jpg>



The bean by Kappor (Chicago)
<http://blogs.openaccesscentral.com/blogs/ccblog/entry/20070403>



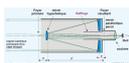
Traité élémentaire de Physique A. Privat-Deschanel 1869



http://www.funsci.com/fun3_fr/lunette/lunette_01.jpg



<http://www.astrosurf.com/lecleire/2007/telescope2.jpg>



<http://serge.bertorello.free.fr/optique/instrum/instrum.html>



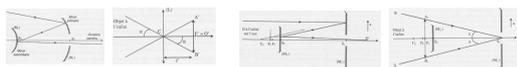
Crédit personnel (Club Astro de la Presqu'île)

<http://smc.cnes.fr/ICHERSCHEL/miroir.png>



<http://www.planet-techno-science.com/wp-content/uploads/hubble.jpg>





Exercices de Physique à thèmes O. Granier Ellipses 2001



http://www.astronoo.com/images/images_galaxies/galaxieM51Hubble.jpg



<http://ecx.images-amazon.com/images/I/51CFOC7chtL.jpg>



http://www.daf.com/dafrpcatalogus/trp/Image/TRP_F0875500.jpg



<http://dspt.perso.sfr.fr/Heve.htm>



<http://img4.cherchons.com/400x400/7845650/Ampoule-Spot-halogene-dichroique-culot-2-broches-12V-20W.jpg>



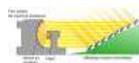
http://www.hacknmod.com/store/images/uploads/green_led.jpg



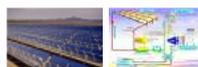
<http://www.led-fr.net/caracteristiques-led.htm>



<http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/LED-slide-show.pdf>



http://raymond.rodriquez1.free.fr/Documents/Terre-ext/four_odeillo_principe.jpg



<http://michel.hubin.pagesperso-orange.fr/ecologie/solaire.htm#lineaire>



http://www.ecosources.info/dossiers/Cuiseur_four_solaire_domestique



<http://es.wikipedia.org/wiki/Gemasolar>

Données et Simulation

fonctionnement DMD (voir de la date 4.32 mn à 5.39 mn

www.youtube.com/watch?v=3VCRfm-lq74&feature=related

simulation : voir la page du Ch2 sur le site mpsn.free

Sommaire

MIROIRS	1
1- Miroir plan.....	1
2- Miroirs sphériques.....	6
3- Télescopes pour l'astronomie	13
4- Utilisation de miroirs courbes en éclairage	17
5- Utilisation de miroirs en conversion d'énergie solaire	19
Sources des figures et des images :.....	21
Données	22
Sommaire	22