

Lois de l'optique géométrique

Capacités exigibles :

- Caractériser une source lumineuse par son spectre.
- Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.
- Définir le modèle de l'optique géométrique et indiquer ses limites.
- Etablir la condition de réflexion totale.
- Etablir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.
- Construire l'image d'un objet par un miroir plan.
- Enoncer les conditions de l'approximation de Gauss et ses conséquences.
- Relier le stigmatisme approche aux caractéristiques d'un détecteur.

I. Nature de la lumière

• Lumière

- Anciennement : c'est le phénomène responsable de la sensation visible par l'œil.
- Actuellement : désigne les **ondes électromagnétiques** dont la fréquence appartient au domaine visible (→ spectre visible)
- **Photon** : particule quantique, de masse et charge électrique nulles, associée au champ électromagnétique.
- Son énergie est proportionnelle à la fréquence de l'onde (→ relation de Planck).

• Source lumineuse primaire

C'est un objet ou un corps qui émet sa propre lumière.

Exemples : *Soleil, laser, ampoule...*

• Source lumineuse secondaire

C'est un objet qui est perceptible parce qu'il réfléchit ou diffuse la lumière d'une source primaire. Il n'émet pas sa propre lumière, il renvoie une partie de celle qu'il a reçu.

Exemples : *Lune, miroir, mer...*

• Modèle de la source ponctuelle

- Source lumineuse assimilable à un point.

En pratique : dimension angulaire faible (donc source lointaine et/ou petite)

- Acuité visuelle : $\Delta\theta \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$ pour l'œil normal. Cette valeur donne un critère pratique : le diamètre angulaire α de la source doit être tel que $\alpha < \Delta\theta$.

• Propagation de la lumière

La lumière n'est pas un phénomène instantané. Elle voyage depuis la source jusqu'à un objet ou un détecteur en voyageant dans le vide ou bien dans un milieu matériel transparent (air, eau, verre).

• Vitesse de la lumière dans le vide

- La lumière se propage dans le vide à la vitesse $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Aucune vitesse ayant un sens physique n'est plus élevée que c

• Propagation dans un milieu homogène et isotrope

- Un milieu est dit **isotrope** si ses propriétés (indice de réfraction ...) sont les mêmes dans toutes les directions de l'espace.
- Il est dit **homogène** s'il possède la même composition en tout point.

➤ De nombreuses observations (ombres projetées, par exemple) conduisent à penser, et nous l'admettons, que la lumière se propage de façon rectiligne dans un milieu homogène et isotrope.

• Diffraction

➤ Propagation au voisinage d'un obstacle

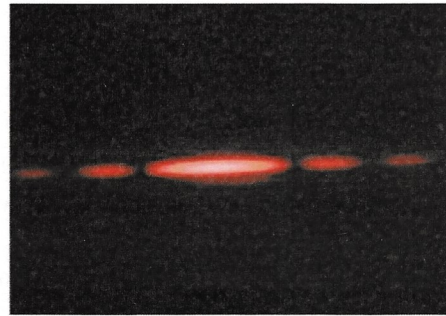
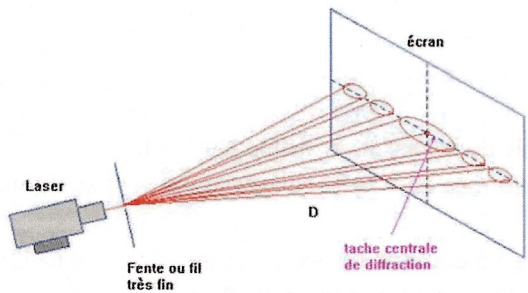
Dans un milieu linéaire homogène et isotrope une onde se propage en ligne droite. Mais que se passe-t-il lorsqu'elle rencontre un obstacle au cours de sa propagation ?

➤ Cas des ondes sonores

On entend les personnes parlant à l'intérieur d'une pièce alors que l'on se trouve à l'extérieur et qu'on ne les voit pas. L'onde a donc dû être déviée à la traversée de l'obstacle.

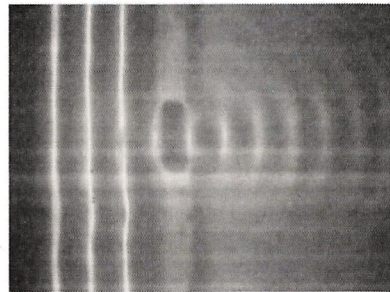
➤ Cas des ondes lumineuses

Un faisceau laser est dirigé sur une fente. On observe un ensemble de taches lumineuses sur un écran.

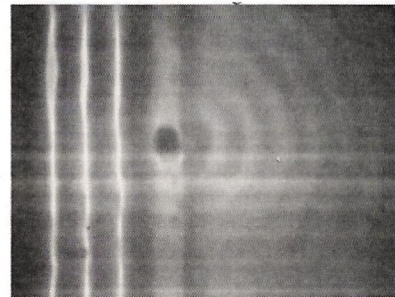


➤ Observations sur une cuve à ondes

On génère une onde plane et on interpose une fente : plus la fente est étroite, plus le phénomène est important.



Fente large



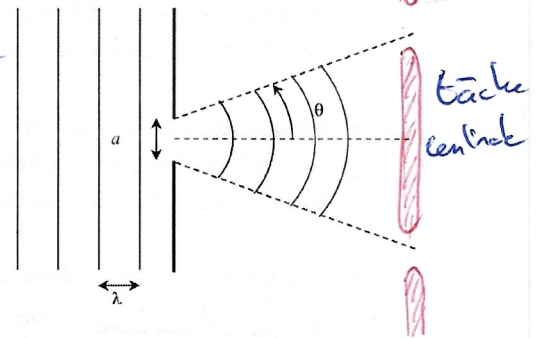
Fente étroite

figure de diffraction avec un laser

➤ Loi de diffraction par une fente

lorsqu'une onde traverse une ouverture de taille comparable à la longueur d'onde, elle est diffractée - cela se manifeste par un étalement angulaire du faisceau après l'ouverture -

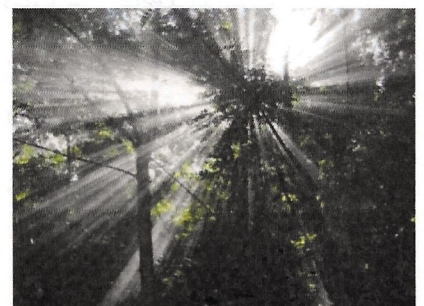
$$\sin \theta \approx \frac{\lambda}{a}$$



• Rayon lumineux

➤ La notion de rayon lumineux est inspirée d'observations de la vie quotidienne (voir photo ci-contre)

➤ L'idée la plus simple pour obtenir un rayon lumineux semble être de diriger un faisceau lumineux sur un diaphragme dont on réduit l'ouverture pour ne laisser passer qu'un rayon. Que se passe-t-il dans ce cas-là ?

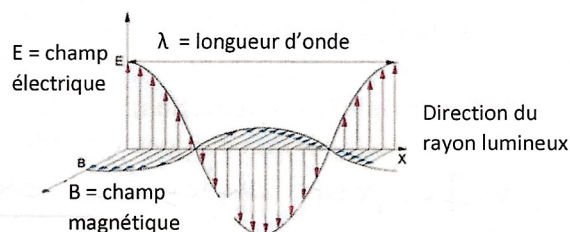


➤ Principe du retour inverse de la lumière : dans un milieu transparent et isotrope, le trajet de la lumière est indépendant du sens du parcours.

II. Éléments de spectroscopie

- **Longueur d'onde**

Plus petite distance entre deux motifs de l'onde lumineuse.



- **Domaine visible de longueurs d'onde**

Il s'étend de 400 nm à 800 nm. En dessous de 400 nm, c'est le domaine ultraviolet, au-dessus de 800 nm, c'est le domaine infrarouge.

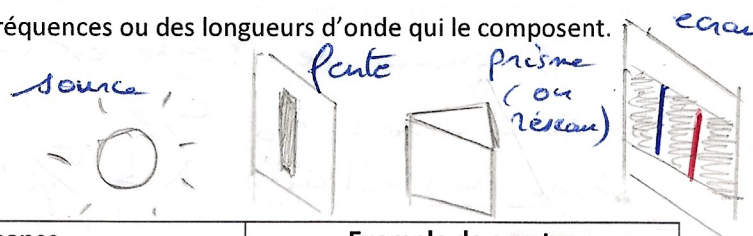
λ (nm)	Couleur perçue
380 – 455	violet
455 – 492	bleu
492 – 577	vert
577 – 597	jaune
597 – 622	orange
622 – 780	rouge

- **Spectre**

Description d'un signal, d'une onde, en fonction des fréquences ou des longueurs d'onde qui le composent.

- **Spectre d'émission**

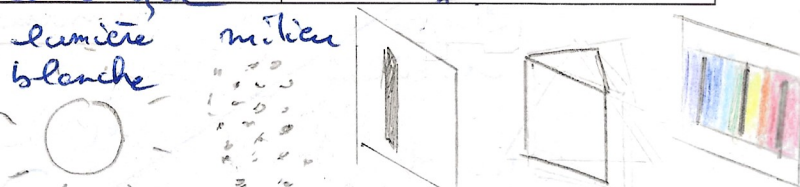
Spectre de la lumière émise par une source primaire



Spectre	Caractéristiques	Provenance	Exemple de spectre
Continu	Pas de séparation d'une couleur à l'autre	Origine <u>thermique</u> : corps à température élevée (étoile, métal chauffé)	
Discret	Raies séparées	Origine <u>atomique</u> : radiations émises par des atomes lors de la désactivation de leur cortège électronique	

- **Spectre d'absorption**

Spectre de la lumière transmise par un milieu capable d'en absorber une partie



Spectre	Caractéristiques	Provenance	Exemple de spectre
Continu	Certaines bandes sont manquantes.	Des molécules ou ions présents dans un solvant peuvent absorber tout un intervalle de longueurs d'onde	
Discret	Seules certaines raies sont manquantes.	Certains atomes n'absorbent que des longueurs d'onde précises	

Propriétés : les spectres d'émission et d'absorption sont complémentaires.
Ils renseignent sur la composition chimique de la source ou du milieu.

III. Réflexion et réfraction

1. Lois de l'optique

- **Indice optique (ou de réfraction)**

- Il caractérise la manière dont une onde se propage dans un milieu
- Il peut dépendre de la fréquence de l'onde ($\rightarrow$ dispersion)

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

$\rightarrow$ vitesse de la lumière dans le milieu

- **Quelques valeurs d'indice optique**

Milieu	vide	air	eau	verre crown	verre flint	diamant
n	1	1,000 29	1,333	1,52	1,65	2,4

$$n \geq 1$$

- **Traversée d'un milieu**

La modification de la célérité de la lumière dans un milieu d'indice optique n engendre une modification de la longueur d'onde. Soit λ_0 (respectivement λ_n) la longueur d'onde de la lumière dans le vide (respectivement dans le milieu d'indice optique n).

La fréquence de l'onde est inchangée lorsqu'on change de milieu.

Dans le vide : $\lambda_0 = \frac{c}{f}$
 Dans le milieu : $\lambda = \frac{v}{f} \Rightarrow \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \Rightarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$

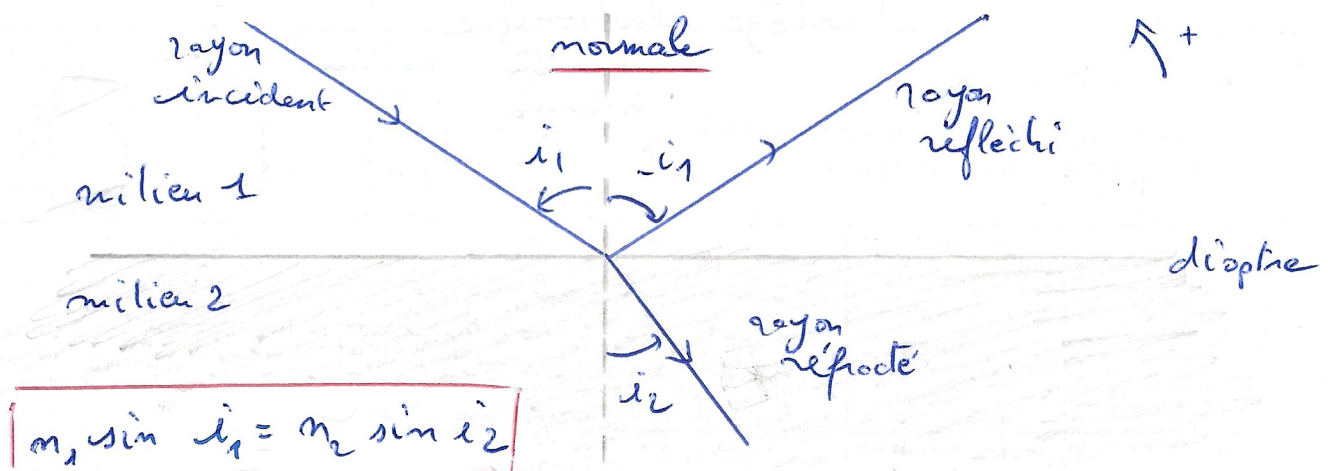
- **Dioptr**

Surface de séparation entre 2 milieux transparents.

- **Lois de Snell-Descartes**

Soit un rayon lumineux qui arrive à l'interface entre deux milieux différents :

- Le phénomène se déroule intégralement dans le plan d'incidence, qui contient le rayon incident et la normale au dioptr.
- Le rayon est nécessairement réfléchi : l'angle de réflexion est opposé à celui d'incidence.
- Le rayon peut être réfracté : l'angle du rayon par rapport à la normale au dioptr est modifié.
- L'angle de réfraction est donné par la loi de Snell-Descartes (admise).



$n_1 < n_2$ (passage d'un milieu moins réfringent à plus réfringent) $\Rightarrow \sin i_1 > \sin i_2$
 $\Rightarrow i_1 > i_2$ (cas de la figure)

$n_1 > n_2 \Rightarrow \sin i_1 < \sin i_2 \Rightarrow i_1 < i_2$: il existe un angle limite i_{lim} tel que $i_2 = 90^\circ$, d'où

$$\sin i_{\text{lim}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Pour $i_1 > i_{\text{lim}}$, il y a réflexion totale

Indice des milieux	Réflexion	Réfraction
$n_1 < n_2$	oui	oui
$n_1 > n_2$	oui	si $i < i_{\text{lim}}$

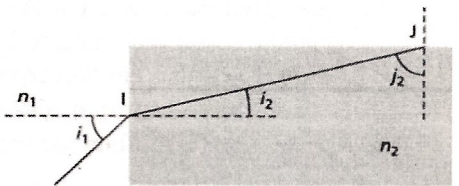
Application 1 Traversée d'un prisme

Un prisme formant un triangle équilatéral (ABC) épais, en verre transparent d'indice $n = 1,50$ est plongé dans l'air d'indice 1,00. Un rayon le traverse parallèlement à la base (B, C).

1. Faire un schéma de la situation
2. Calculer l'angle d'incidence i , l'angle de sortie i' et l'angle de déviation D entre le rayon incident et le rayon sortant du prisme.

Application 2 Rayon dans une lame

Dans le dispositif ci-contre, un rayon incident fait un angle $i_1 = 45^\circ$ avec la normale au dioptre en I. Calculer les angles i_2 et j_2 . Le rayon ressort-il en J ? On donne $n_1 = 1,00$ et $n_2 = 1,50$.



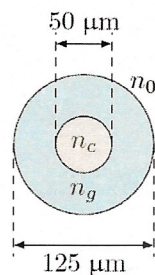
2. Fibre optique à saut d'indice

• Fibre optique

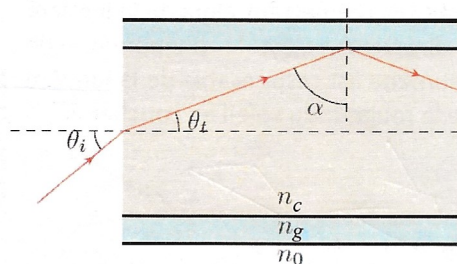
- Constituée d'un cœur cylindrique de petit diamètre en verre ou en quartz de d'indice n_c .
- Pour protéger le cœur des poussières et des pertes, une gaine d'indice $n_g < n_c$ entoure le cœur.

➢ La propagation d'un signal exploite le phénomène de réflexion totale

• Fibre optique à saut d'indice



COUPE TRANSVERSALE

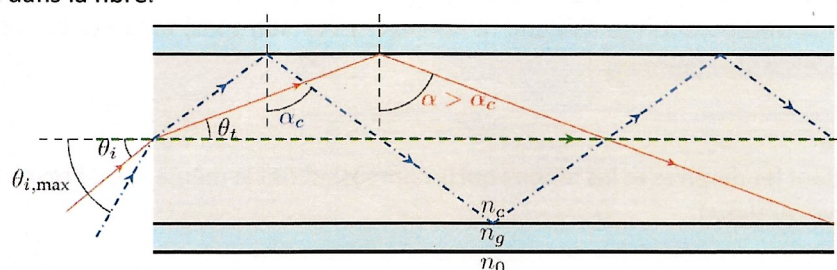


COUPE LONGITUDINALE

Pour que la réflexion totale ait lieu, il faut que l'angle d'incidence à l'entrée de la fibre soit assez petit pour que l'angle α à l'interface cœur/gaine soit assez grand.

• Angle d'acceptance

Valeur maximale de l'angle d'incidence sur la face d'entrée de la fibre pour laquelle la propagation guidée de la lumière se produit dans la fibre.



- **Modes de la fibre**

Mode axial : $\theta_i = 0$. Une valeur faible de θ_i correspond à un mode faible (peu de rebonds). Une valeur élevée de θ_i correspond à un mode élevé (nombreux rebonds).

- **Dispersion intermodale**

Pour chaque valeur de θ_i , un rayon met un temps différent pour se propager dans la fibre. Les modes d'ordre élevé se propagent moins vite et un signal peut s'en trouver dégradé en sortie de fibre.

Application 3 Bande passante d'une fibre optique

1. Déterminer la condition sur α pour qu'il y ait réflexion totale à l'interface entre la gaine et le cœur.
2. Exprimer $\sin \alpha$ en fonction de θ_t puis en fonction θ_i , n_0 et n_c .
3. En déduire, en fonction de n_0 , n_c et n_g la condition que doit satisfaire θ_i pour que le rayon réfracté ait une propagation guidée dans le cœur. Donner l'expression de l'angle d'acceptance θ_a .
4. On envoie dans la fibre un faisceau lumineux avec tous les angles d'incidence θ_i compris entre 0 et θ_a . Déterminer la différence ΔL entre la distance maximale et la distance minimale parcouru par un rayon lumineux d'un bout à l'autre de cette fibre de longueur L .
5. En déduire la différence Δt entre la durée maximale et la durée minimale de propagation le long de cette fibre.
6. Faire l'application numérique avec $n_c = 1,456$, $n_g = 1,410$ et $L = 1,00$ km.
7. Le signal transporté par la fibre est constitué d'impulsions lumineuses d'une durée T_1 à intervalle régulier T . Quelle valeur minimale de T faut-il choisir pour que les impulsions soient distinctes à la sortie de la fibre ?
8. Proposer une définition de la bande passante en bits (ou nombre d'impulsions par seconde). Comparer la valeur de la bande passante obtenue ici avec celle d'un téléphone Numéris (64 kbits par seconde) et celle de la télévision (100 Mbits par seconde).

IV. Autres phénomènes affectant la lumière

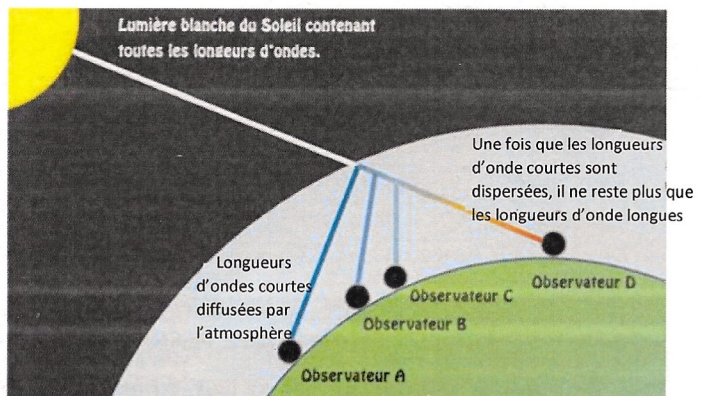
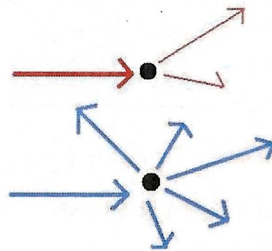
- **Dispersion**

Dans un milieu comme le verre, l'eau ou le plexiglas, l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde de la lumière qui le traverse. Les différentes composantes spectrales d'une lumière polychromatique sont donc déviées différemment, d'où leur séparation sous la forme de différentes couleurs (exemple : arc-en-ciel).

- **Diffusion**

Certains objets n'émettent de la lumière qu'à condition qu'ils soient éclairés : ils réémettent alors de la lumière dans toutes les directions, c'est le phénomène de diffusion. Ce phénomène est responsable de la lumière bleue du ciel et de la rougeur du soleil au coucher.

Les molécules présentes dans l'atmosphère (O_2 , N_2 ...) diffusent davantage le bleu que le rouge.



V. Stigmatisme et aplanétisme

- **Système optique**

Ensemble de milieux transparents (généralement homogènes et isotropes) séparés par des surfaces réfractantes (dioptries) ou réfléchissantes (miroirs).

- **Système centré**

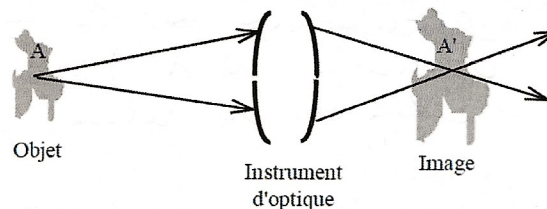
Système optique dont les dioptries et les miroirs qui le composent ont le même axe de révolution. Cet axe est appelé axe principal (ou axe optique).

- **Point objet**

Tout point dont la lumière est issue.

- **Point image**

Point vers lequel la lumière converge à partir du point objet.



- **Espace objet – espace image**

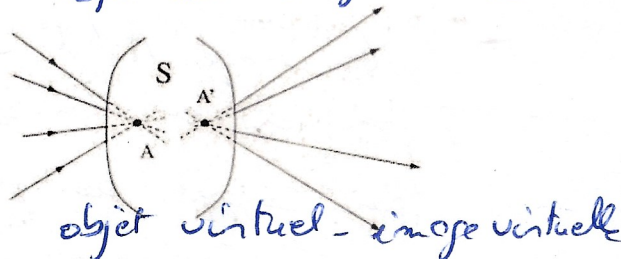
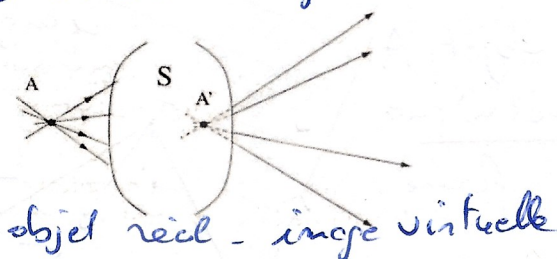
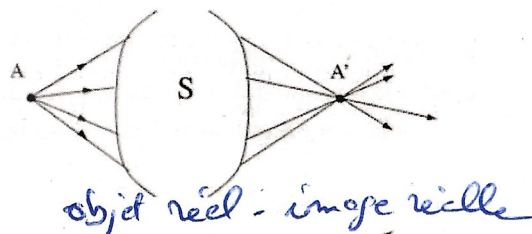
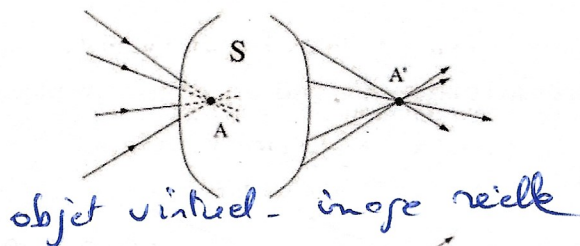
L'instrument d'optique sépare l'espace en deux régions : l'**espace objet réel et virtuel** (ou **espace image réel et virtuel**).

espace objet réel / espace objet virtuel / espace image virtuel / espace image réel

Espace objet réel	Les rayons lumineux proviennent véritablement des points objets qui y sont situés.
Espace objet virtuel	Les points objets sont déduits de prolongement des rayons lumineux.

Espace image réel	Les rayons lumineux convergent véritablement vers les points image qui s'y trouvent.
Espace image virtuel	Les points image sont déduits de prolongement des rayons lumineux.

Sous chacune représentations ci-dessous, caractériser l'objet et l'image :



- **Stigmatisme rigoureux**

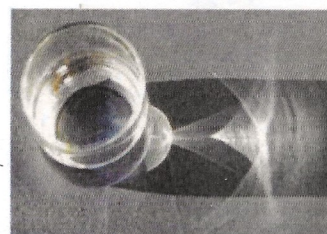
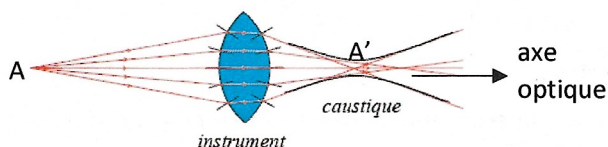
Un système est rigoureusement stigmatique si tout rayon issu d'un point A quelconque passe par un unique point A' après traversée du système.

système optique



- **Stigmatisme approché**

D'une façon générale pour les instruments d'optique, tous les rayons issus d'un point objet émergent de l'instrument en étant tangents à une surface appelée caustique, d'où la formation d'une tâche sur l'écran placé dans l'espace image objet réel. Un exemple de caustique obtenue dans la vie courante est visible sur la photo ci-dessous :



Si on considère des rayons issus de A faiblement inclinés par rapport à l'axe optique, on peut considérer la région où la caustique présente une section minimale comme étant l'image de A, appelée A'.

Cette approximation ne pose pas de problème tant que la déviation de la tâche (section de la caustique au voisinage de A') ne dépasse celle d'un récepteur élémentaire (cellule de la rétine, pixel...). Dans ce cas, on parle de stigmatisme approché et on forme des images correctes.

- **Astigmatisme**

Les rayons issus d'un même point ne convergent pas en un point unique.

- **Aplanétisme**

Un objet AB situé dans le plan perpendiculaire à l'axe optique donne une image $A'B'$ dans le plan perpendiculaire à l'axe optique.

- **Conditions de Gauss**

- Les rayons sont peu inclinés ($< 10^\circ$) par rapport à l'axe optique (ou à la normale du dioptrique)
 - Les rayons frappent le système à proximité de son centre optique.
- Les rayons respectant ces 2 conditions sont dits paraxiaux.

VI. Relations de conjugaison

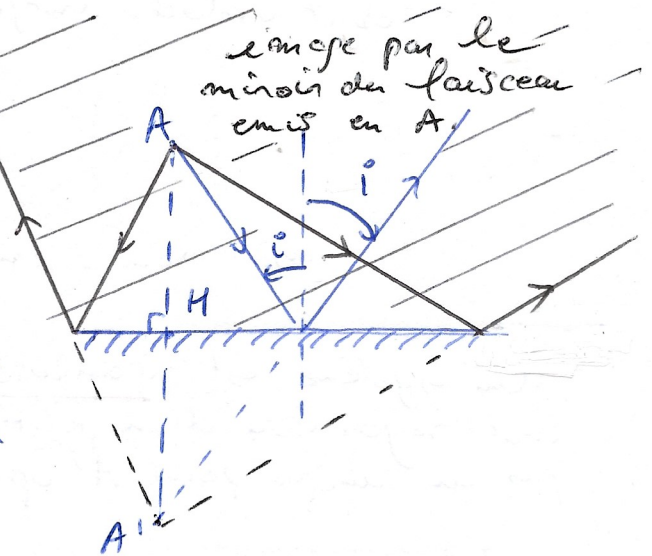
- **Relation de conjugaison**

C'est une relation qui lie la position de l'objet à celle de son image par un système optique stigmatique. On dit que les points objet A et image A' sont conjugués.

- **Exemple du miroir plan**

- L'image A' d'un objet A ponctuel est son symétrique par rapport au plan formé par le miroir.

- La zone hachurée correspond au champ du miroir = région visible par A dans le miroir.



- L'image A' est virtuelle.

- $\overline{HA} + \overline{HA'} = 0$ avec H projeté de A sur le miroir.

- le système miroir plan est rigoureusement stigmatique.

Application 4 Champ de vision dans un miroir

1. Montrer que l'on voit un point A dans un miroir si et seulement si la droite $O'A$, où O' est le symétrique du point O où se trouve l'œil, coupe la surface du miroir.
2. En déduire la taille minimale d'un miroir dans lequel un homme de taille h peut se voir en entier. On assimilera le corps à un segment rectiligne vertical TP contenant la position O de l'œil. Comment ce miroir doit-il être placé ?