LE MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DE LA LUMIÈRE.

I. Ce que vous ne pouvez pas deviner.

1°) Les lois de Snell - Descartes.

➢ **Fondement de l'optique géométrique : le rayon lumineux.**

Un milieu transparent est caractérisé par son ***indice de réfraction***, défini comme: $\boxed{n = \dfrac{c}{v}}$, où c est la célérité de la lumière dans le vide et v celle dans le milieu.

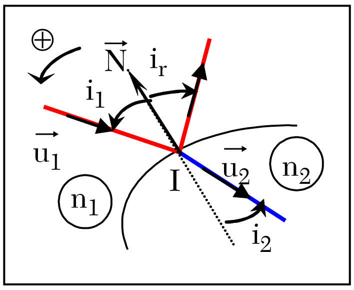
On rappelle que $\boxed{c = 299\,792\,458{,}0 \text{ m/s exactement}}$ (depuis 1987).

Pour tout milieu matériel transparent, $n > 1$ (***Cas de l'air n ≈ 1,000 293***).

➢ **Deux propriétés fondamentales du rayon lumineux.**

> ***Principe du retour inverse de la lumière*** : le trajet décrit par le rayon lumineux ne dépend pas du sens de parcours.
> Dans un milieu ***homogène*** (n = cste), la lumière se propage en ***ligne droite***.

➢ **Les lois de Snell Descartes.**



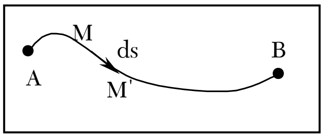
Les lois de l'optique géométrique exprimant le changement de direction par réflexion ou par réfraction, d'un rayon lumineux rectiligne, à la traversée d'une surface séparant deux milieux transparents, ont été énoncées par le Hollandais W. SNELL en 1621 et retrouvées par R. DESCARTES en 1637.

On appelle **dioptre** une surface séparant deux milieux d'indices n_1 et n_2. Soit un rayon lumineux tombant sur le dioptre au point I.

> ① Les rayons réfléchis et réfractés appartiennent au plan d'incidence, défini par le rayon incident et la normale au dioptre au point de contact $(I,\vec{N})$.
> ② Les angles d'incidence et de réflexion sont **égaux** en valeur absolue (angles comptés par rapport à la **normale au dioptre**) : $\boxed{i_r = -i_1}$.
> ③ Les rayons incident et réfractés sont tels que: $\boxed{n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)}$ ou en formulation vectorielle : $\boxed{n_2\vec{u}_2 - n_1\vec{u}_1 = \alpha\vec{N}}$ (angles comptés par rapport à $(I,\vec{N})$).

2°) Notion de chemin optique :

a) Définition.



On appelle **chemin optique** élémentaire de M à M' voisin distant de ds la quantité: $\boxed{dL = n.ds}$, où n est l'indice du milieu en M.

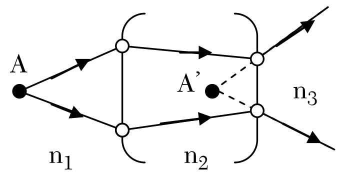
Pour une trajectoire AB finie, le chemin optique s'écrit : $\boxed{L_{A\to B} = \int_A^B n\, ds}$, encore noté **(AB)**.

➢ **Signification physique de L.**

> L_{AB} représente la distance que parcourrait la lumière dans le vide pendant sa durée réelle de trajet AB dans le milieu considéré.

➢ **Conventions de signe pour les calculs de chemin optique.**

> Pour un rayon ***réel*** : L est compté ***positivement***.
> Pour un rayon ***virtuel*** : L est compté ***négativement***, en prenant l'indice du milieu dans lequel se propage le ***prolongement réel*** du rayon virtuel.



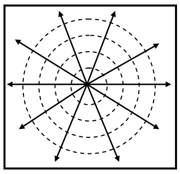
✍ Exprimer le chemin optique de A à A' de la figure ci-dessus : $\underset{A\to A'}{L} =$

b) Lieu des points M à chemin optique donné d'un point A.

☞ Pour exprimer correctement un chemin optique, se rappeler qu'il faut toujours **le calculer le long du rayon suivi par la lumière**.

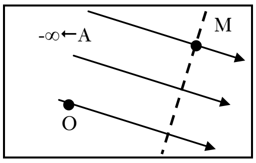
➢ **Faisceau de rayons divergents d'un point A (ou convergents vers B).**

> Le lieu des points M tel que L_{AM} = cste (ou L_{MB} = cste) est une **sphère** de centre A (ou centre B).



➢ **Faisceau de rayons parallèles.**

> Le lieu des points M tel que L_{AM} = Cste est un plan ⊥ aux rayons.



Des rayons parallèles entre eux proviennent d'un point rejeté à l'infini. Il en découle que le chemin optique de la source à un point M est infini et que son calcul est impossible. Toutefois, nous verrons par la suite que ce qui importe ce sont des **différences de chemins optiques**, qui eux, valeurs tout à fait calculables.

Il suffit pour cela, de **fixer une origine arbitraire O** sur le rayon issu du point source à l'infini et de ne prendre en compte dans les calculs que **les chemins optiques à partir du point O**.

3°) Le problème de la formation des images.

➢ **Définitions:**

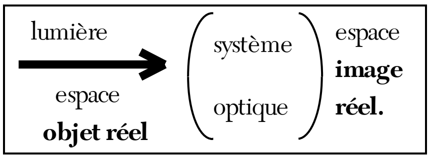
Dans un système **dioptrique**, les rayons ne subissent que des **réfractions**.

Dans un système **catadioptrique**, les rayons subissent des **réflexions** et des **réfractions**.

Dans un système **optique centré**, il existe un **axe de symétrie commun** aux différents dioptres ou miroirs du système.

➢ **Sens conventionnel de propagation de la lumière.**

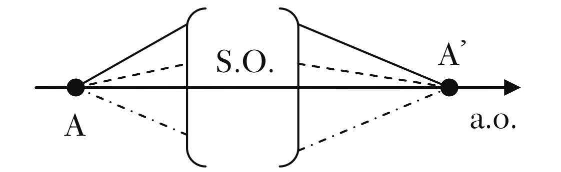
Par convention (et sauf exceptions bien sûr !), la lumière se propage de gauche à droite à travers le système optique.



➢ **2 conditions sont à réaliser pour former une image par un système optique donné :**

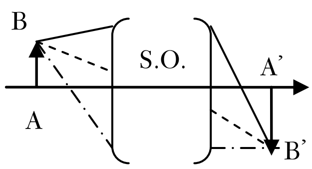
1. **La condition de stigmatisme.**

> On parle de ***stigmatisme (rigoureux)*** entre deux points A et A', dits ***points conjugués***, si ***tout*** rayon issu de A passe (réellement ou virtuellement) par A' après la traversée du système optique.



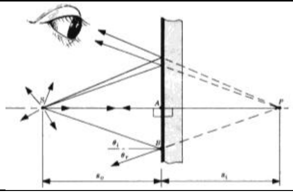
2. **La condition d'aplanétisme (définie pour les systèmes centrés).**

> Le système est dit ***aplanétique*** si l'image A'B' d'un objet AB plan situé dans un plan de front (plan ⊥ à l'axe optique Δ) est elle aussi ***plane perpendiculaire à Δ***.

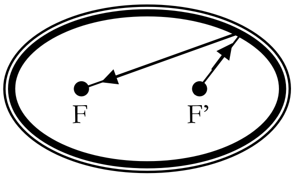
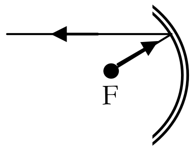


II. Ce qu'il faut retenir.

1°) Les conditions de Gauss.

La réalisation ***simultanée*** des conditions de stigmatisme rigoureux et d'aplanétisme est ***très sévère*** et n'est en fait obtenue pour tout point que par un seul instrument : ***le miroir plan***.	

D'autres systèmes optiques sont stigmatiques pour ***certains couples particuliers de points*** :

pour un *miroir elliptique*: les deux foyers,	pour un *miroir parabolique* : le foyer du paraboloïde avec un point à l'infini sur l'axe…
	

- De plus, le stigmatisme rigoureux n'a ***aucun intérêt physique*** du fait de la structure même des détecteurs (constitués de cellules unitaires, de dimensions finies). On se contente alors d'un ***stigmatisme approché***, à condition que tout rayon issu de A tombe, après traversée du système optique, sur une seule cellule réceptrice, définissant ainsi le point image A'.
- La réalisation simultanée, de façon approchée, des conditions de stigmatisme et d'aplanétisme définit ***l'approximation de Gauss***. Ces conditions de Gauss supposent :

> ① de prendre des rayons peu inclinés sur l'axe optique, (typiquement moins de 15°), pour pouvoir écrire : $\boxed{\alpha \approx \sin(\alpha) \approx \tan(\alpha)}$, à condition d'exprimer les angles en radians !.
>
> ② de prendre des hauteurs des objets (perpendiculaires à l'axe optique) faibles devant les rayons de courbure des dioptres (cette limitation pouvant être réalisée à l'aide de diaphragmes).

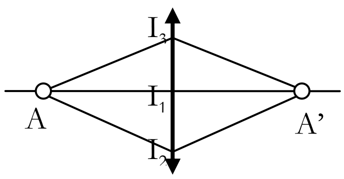
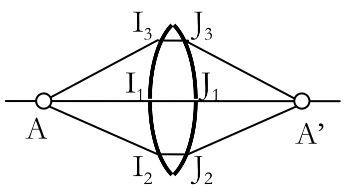
☞ C'est pourquoi on dit que les conditions de Gauss définissent le domaine de ***l'optique paraxiale*** (rayons peu inclinés sur l'axe optique et peu écartés de l'axe optique).

- L'utilisation de l'approximation de Gauss permet d'établir des ***relations de conjugaison*** et des ***formules de grandissement transversal***, propres à chaque système optique.

Expression mathématique de la condition de stigmatisme.

> A et A' sont conjugués si et seulement si $\boxed{\underset{A\to A'}{L} = Cste}$ pour tout rayon allant de A vers A' (***stigmatisme rigoureux***), ou si et seulement si $\boxed{\underset{A\to A'}{L} \approx Cste}$, à des infiniment petits du 4ème ordre près (***stigmatisme approché***).

Interprétation de la condition de stigmatisme dans le cas d'une lentille mince :

Pour A et A' conjugués on a : $\underset{A\to A'}{L} = AI_1A' = AI_2A' = AI_3A'$. Cela peut paraître surprenant en considérant le schéma de la figure *a*, car les chemins « géométriques » sont visiblement différents. Mais le chemin optique prend en compte l'indice du milieu traversé et les rayons plus proches de l'axe traversent aussi une épaisseur plus importante de verre (cf figure *b*).	 *Figure (a).*	 *Figure (b).*

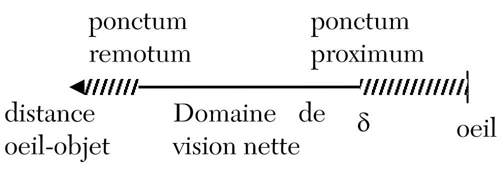
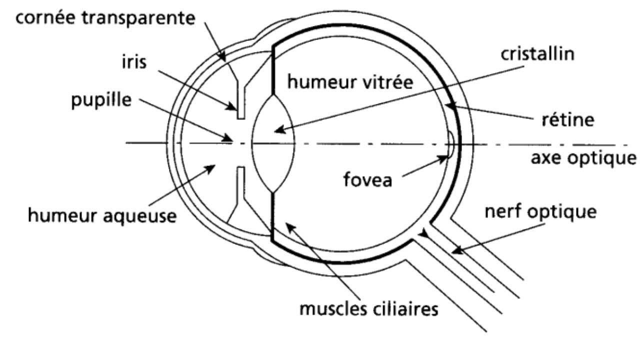
2°) Un détecteur naturel : l'œil humain :

En première approximation, les éléments principaux de l'oeil sont :

- la *pupille* (joue le rôle de diaphragme pour limiter la lumière pénétrant dans l'œil).
- le *cristallin* (assimilable à une lentille mince de focale variable par sa déformation).
- la *rétine* (la surface photosensible), constituée de cônes au centre, responsables de la vision en couleur et de bâtonnets à la périphérie, responsables de la vision noir et blanc.

Le nerf optique transmet l'image sous forme d'influx nerveux qui l'interprète :

- retournement de l'image rétinienne,
- correction de la distorsion,
- impression de relief grâce à la vision binoculaire.

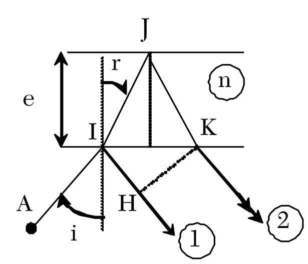
Le domaine de vision.	Schématisation de l'œil.
 Pour un œil dit « normal », on a : $\boxed{\delta = 25\ cm}$ et $\boxed{p.r. \to \infty}$	

3°) Notion de différence de marche : calcul dans 2 cas importants.

➤ **Définition :**

Soit deux rayons issus de A_1 et A_2 qui convergent en un point M. On appelle ***différence de marche*** en M la quantité $\boxed{\delta(M) = L_{A_2 \to M} - L_{A_1 \to M}}$.

➤ **Réflexion sur les 2 faces d'une lame à faces parallèles.**



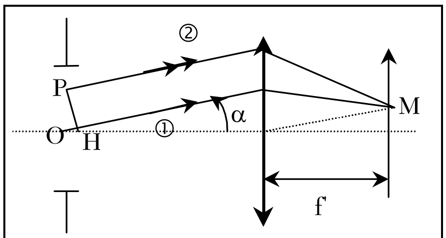
Un rayon issu d'un point A tombant sous l'incidence *i* en I est réfléchi par les faces avant et arrière d'une lame à faces parallèles d'épaisseur *e*, taillée dans un milieu d'indice *n*.

Les rayons ① et ② émergents de la lame sont parallèles entre eux. Cherchons à exprimer la différence de marche entre les rayons ① et ② en un point M rejeté à l'infini.

On a : $\delta_{2/1} = L_{A \to \infty(rayon\,2)} - L_{A \to \infty(rayon\,1)} = AIJK\infty_{\,2} - AIH\infty_{\,1}$.

✍ Montrer que : $\boxed{\delta_{2/1} = 2ne\cos(r)}$.

Cas de deux rayons parallèles avec observation dans le plan focal image d'une lentille.



On cherche $\delta(M) = L_{O \to M} - L_{P \to M}$.

✍ En supposant la lentille stigmatique, utilisée dans les conditions de Gauss, montrer que : $\boxed{\delta(M) = n_{air}.OP.\sin(\alpha)}$.

☞ Prendre garde au fait qu'en présence de lentilles, le calcul de chemins optiques ne se réduit pas à une mesure de longueurs de segments : il faut tenir compte du milieu traversé, et de l'épaisseur non nulle de la lentille ; c'est ce que prend en compte la condition de stigmatisme entre un objet et son image.

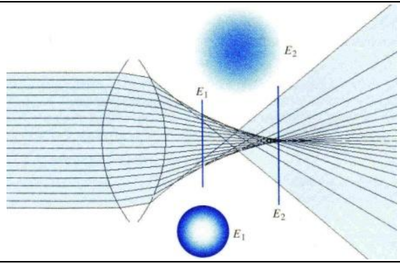
III. Pour en savoir plus : les limites de l'approximation géométrique.

1°) Les aberrations géométriques.

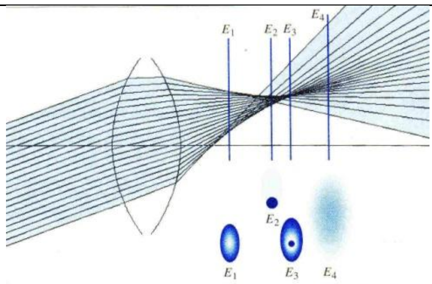
Ces défauts sont internes à l'optique géométrique et sont à prendre en compte dès que l'on se place hors des conditions de Gauss. On distingue 4 défauts :

① ***aberration sphérique*** (pour des rayons // à l'axe et assez éloignés de l'axe).

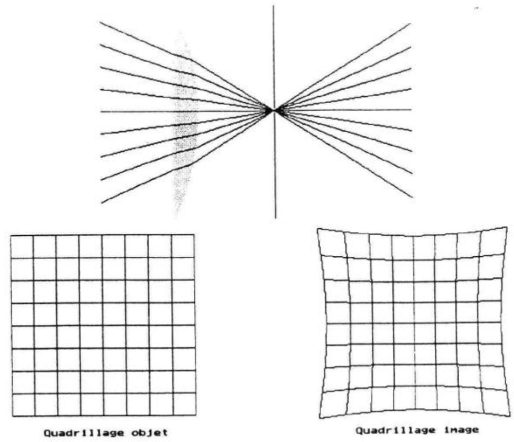
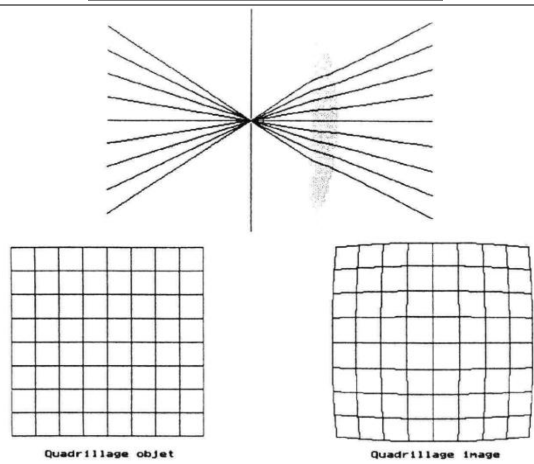
Ce défaut implique qu'une lentille a un sens d'utilisation. En particulier, on retient la règle dite des « ***4 P*** » : ***Plus Plat Plus Près***.



② ***aberration de coma*** (pour des rayons obliques sur l'axe),



③ ***aberration de distorsion*** (défaut dépendant de la taille de l'objet).

Distorsion en croissant ou coussinet.	*Distorsion en tonneau ou barillet.*
	

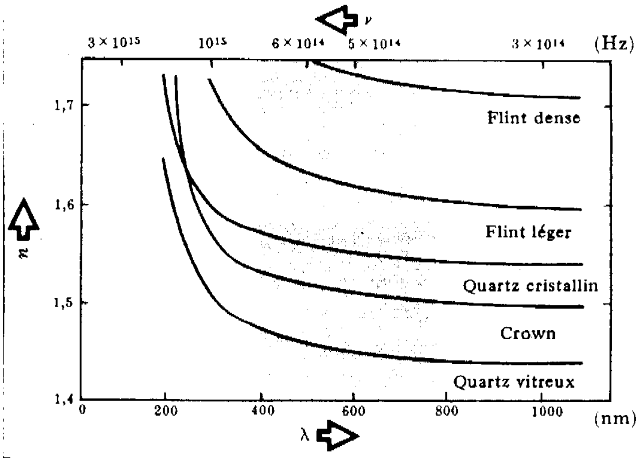
④ ***astigmatisme et courbure de champ*** (donne des images non planes d'objets plans).

2°) Les aberrations chromatiques.

Ce défaut vient de ***l'indice du milieu***, qui dépend de la "couleur" de la lumière utilisée. Les milieux pour lesquels n dépend de λ sont dits **dispersifs**.

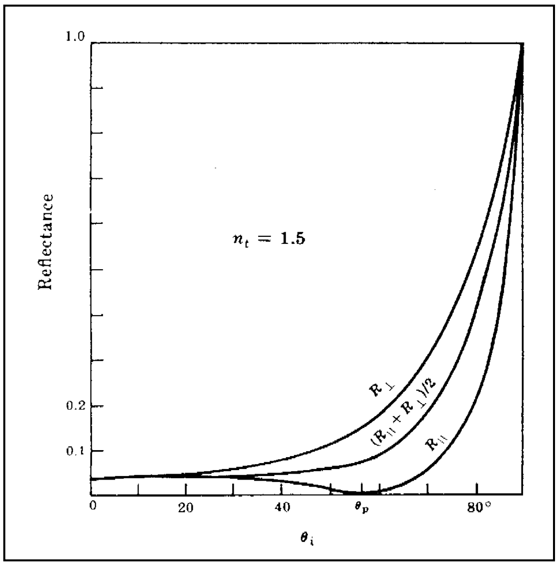
Citons par exemple la loi empirique de Cauchy : $\boxed{n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}}$.

☞ C'est cette dispersion chromatique, alliée avec les lois de Descartes qui permet d'interpréter par exemple le phénomène de l'arc en ciel.



3°) L'absence d'informations sur la nature de la lumière.

- L'optique géométrique ne permet pas de calculer les ***énergies relatives des rayons réfléchis et transmis***: seule une interprétation ondulatoire permettra de rendre compte de la variation des coefficients de réflexion R (réflectance) et de transmission T (pour l'énergie) avec l'angle d'incidence θ_i.



Remarque : en l'absence d'absorption dans le matériau, on a $\boxed{R + T = 1}$.

($R_{//}$ correspond à une lumière polarisée parallèlement au plan d'incidence, $R_\perp$ à une polarisation perpendiculaire à ce plan et $\left(R_{//}+R_\perp\right)/2$ à la lumière naturelle.

☞ Sous incidence normale, on a : $R = \left(\dfrac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$

- L'optique géométrique n'est pas capable d'interpréter le ***phénomène de biréfringence*** qui apparaît dans les milieux anisotropes,

- ni le phénomène de ***polarisation de la lumière***.

- L'optique géométrique ne peut pas expliquer les ***phénomènes de diffraction et d'interférences lumineuses.***

- L'optique géométrique ne peut pas expliquer ***l'effet photoélectrique***.

> Ce phénomène ne sera expliqué qu'en 1905 par Einstein dans le cadre d'un modèle corpusculaire de la lumière, avec le concept des ***photons***, corpuscules de masse nulle et d'énergie $\boxed{E = h\upsilon = \dfrac{hc}{\lambda}}$. (où *h* est la constante de Planck).

On rappelle que $\boxed{h \approx 6,63\,.10^{-34}\ J.s}$.

On appelle ***constante de Planck réduite*** la quantité notée $\boxed{\hbar = \dfrac{h}{2\pi}}$, avec $\boxed{\hbar \approx 10^{-34}\ J.s}$