

TP n°1

Formation d'images et focométrie

PCSI₂ 2025 – 2026

I Reconnaître les différentes lentilles

Expérience

- 🔧 Distinguer les deux types de lentille grâce à l'indication numérique inscrite sur la lentille.
- 🔧 Constater, par le toucher, que géométriquement les lentilles divergentes et convergentes n'ont pas la même courbure.
- 🔧 Observer, à travers une lentille, un objet situé « proche » de la lentille.

Observations : Noter précisément dans votre cahier de manip vos observations effectuées pour les deux types de lentilles.

Indications de rédaction, à compléter, et à illustrer par des schémas.

- ✍ Les lentilles avec l'indication numérique positive sont ...
- ✍ Les lentilles convergentes sont plus épaisses/moins épaisses au bord/au centre ...
- ✍ Quand on observe un texte à travers une lentille convergente, l'image est ...

II Comment obtenir une image de qualité ?

Lorsque l'on cherche à projeter l'image d'un objet par un système optique (ici une simple lentille), on souhaite obtenir l'image la plus belle possible.

Expérience

- 🔧 À l'aide d'une lentille convergente $+3\delta$, réaliser la projection de la diapositive sur l'écran, c'est-à-dire obtenir une image (nette et bien éclairée) sur l'écran.
- 🔧 Successivement, modifier les paramètres suivants et noter vos observations :
 - 🔧 Éclairage de l'objet. Au départ en éclairant uniquement avec la lampe de bureau muni d'un diaphragme, puis en ajoutant un condenseur.
 - 🔧 Hauteur des systèmes optiques les uns par rapport aux autres ;
 - 🔧 Rotation de la lentille autour de l'axe vertical ;

Observations

Pour chaque modification effectuée, noter vos observations précisément et clairement : qualité de l'image, qualité de l'éclairage...

À retenir : Pour obtenir une image de bonne qualité...

- ✎ l'objet doit être éclairé de façon à l'aide d'un ;
- ✎ les hauteurs des différents éléments (lampe, objet, lentilles) doivent ;
- ✎ le plan de la lentille doit être parfaitement à l'axe optique (au banc d'optique).

III Comment réaliser une projection ?

On cherche à déterminer ici les conditions permettant de réaliser la projection d'un objet sur un écran.

1. Quel type de lentille utiliser ?

Expérience

- 🔧 À l'aide d'une lentille convergente, projeter l'image de la diapositive sur l'écran. Attention, une image est toujours nette !
- 🔧 Partir d'une situation où la lentille est loin de l'objet, et l'approcher au fur et à mesure. Bien évidemment, on cherchera toujours à obtenir une image sur l'écran, donc il faudra déplacer l'écran également !

Observations

- 🔧 / ✎ Qu'observez-vous ? Comment évolue la taille de l'image ?
- 🔧 / ✎ Que se passe-t-il lorsque la lentille est « trop proche » de l'objet ?
- 🔧 / ✎ Quelle est la distance limite en-dessous de laquelle la projection est impossible ?
- 🔧 / ✎ Ajouter un filtre violet contre la lentille et regarder à travers celle-ci, que voyez-vous ?

Expériences et observations

- 🔧 / ✎ Reprendre l'expérience avec une lentille divergente.
- 🔧 / ✎ Parvenez-vous à obtenir une image (c'est-à-dire nette) sur l'écran ?
- 🔧 / ✎ Où pouvez-vous observer l'image ?

Conclusion

- ✎ Les deux types de lentilles permettent-ils d'observer une image sur l'écran ? Préciser.
- ✎ Quand la projection sur l'écran n'est pas possible, où se situe l'image ? Quelle est sa nature ?

2. Condition sur la distance objet/écran

On utilise une lentille convergente de distance focale f' connue, par exemple celle de $+3 \delta$. On souhaite déterminer une condition sur la distance objet-écran, notée D , pour qu'il soit possible d'observer une image sur l'écran avec la lentille convergente choisie.

Expérience

- ✚ Placer l'objet et l'écran à chacune des deux extrémités du banc.
- ✚ Déplacer la lentille convergente de sorte à obtenir une image nette sur l'écran. Deux positions existent pour la lentille : les trouver et qualifier les deux images obtenues.
- ✚ Approcher l'écran petit à petit de l'objet et déplacer la lentille à chaque fois afin d'obtenir une image nette sur l'écran.
- ✚ En dessous d'une certaine distance entre l'écran et l'objet, il vous sera impossible d'observer une image sur l'écran (quelle que soit la position de la lentille). Déterminer cette distance $D_{\min}$ minimale entre l'objet et l'écran pour qu'il soit possible de réaliser une projection sur l'écran.
- ✚ Si vous avez le temps, refaites l'expérience avec une autre lentille convergente.

Observations et conclusion

- ✚ Noter vos observations : images ? combien ? où ? quelles caractéristiques ?
- ✚ Noter la distance $D_{\min}$ minimale entre l'objet et l'écran pour qu'il soit possible de réaliser une projection sur l'écran.

À retenir :

Pour projeter sur un écran l'image d'un objet réel à l'aide d'une lentille, il faut :

- ✚ utiliser une lentille ;
- ✚ placer la lentille à une distance de l'objet supérieure à de la lentille utilisée ;
- ✚ placer l'écran de projection à une distance de l'objet supérieure à de la lentille utilisée.

IV Position de l'image

Préparation théorique et graphique : On illustrera chacune des expériences suivantes par une construction des images, afin d'interpréter les observations expérimentales.

On appelle x la distance en cm, par rapport à l'extrémité du banc, des différents éléments placés sur le banc. On placera l'objet en $x = 15$ cm.

1. formation de l'image réelle d'un objet réel avec une lentille convergente.

Expérience On placera la lentille $+3\delta$ en $x = 85$ cm sur l'axe optique .

✚ Déterminer à partir de la relation de conjugaison de Descartes $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f}$ la position de l'image, $\overline{OA'}$.

✚ Réaliser l'expérience, relever la position de l'image et calculer $\overline{OA'}$. Est-ce compatible avec la valeur donnée par la relation de Descartes ? Y a-t-il vraiment une seule position de l'écran où l'on puisse voir une image nette ?

Comment comparer les valeurs expérimentales et théoriques ? Rappelons qu'en science, chaque expérience est un processus souvent complexe qui fait s'entremêler plusieurs processus. De cette complexité résulte une variabilité des résultats. Cette variabilité est naturelle et fait partie de la mesure. Il ne faut pas chercher à la supprimer car elle contient beaucoup d'informations sur les processus physiques.

Définitions : La quantification de la variabilité d'une mesure x d'une grandeur est appelée incertitude-type et notée $u(x)$. Par définition, l'incertitude-type correspond à l'écart-type de la distribution des données issues d'une répétition de la mesure.

Soit un ensemble de N mesures notées x_i avec i allant de 1 à N .

Définition : On définit la moyenne $\bar{x}$ de l'ensemble, qui nous permet de définir l'écart-type, et

donc l'incertitude-type, grâce aux relations : $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ et $u(x) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$

On fera à ce stade deux remarques :

- Pour estimer l'incertitude-type du résultat d'une unique mesure, il faut répéter un grand nombre de fois le processus de mesure. Cette répétition et les valeurs supplémentaires servent uniquement à estimer la variabilité du processus de mesure.
- L'incertitude-type est l'estimation d'une variabilité qui est unique à chaque processus de mesure. Il est donc naturel que deux personnes réalisant exactement la même expérience aient une variabilité, et donc une incertitude-type, différente.

Certaines expériences n'ont pas de variabilité observée. C'est par exemple le cas lorsque l'on mesure la taille d'un objet avec la même règle graduée. Logiquement, reproduire la mesure n'apporte pas d'information. Cette absence de variabilité observée n'implique pas une absence de variabilité. Cela signifie juste qu'à l'échelle de cette expérience, avec l'appareil de mesure choisi, la variabilité est plus faible que la précision de la mesure. Ce phénomène n'est pas uniquement lié à l'appareil de mesure. En effet, selon les conditions expérimentales, il n'est parfois pas matériellement possible (ou souhaité) de reproduire le processus de mesure. Dans ce cas, une seule valeur est accessible et il faut tout de même estimer son incertitude-type. Il faut donc estimer théoriquement la variabilité de la mesure sans l'observer. Nécessairement, cela est possible sous certaines hypothèses qui ne seront pas forcément adaptées à toutes les expériences.

Propriété : Lors d'une mesure sans variabilité observée, on estime la plus petite plage dans laquelle l'expérimentateur est certain de trouver la valeur recherchée. On note $\bar{x}$ la valeur centrale de cette plage et Δ sa demi-largeur. Autrement dit, l'expérimentateur est certain de trouver la valeur recherchée dans l'intervalle $[\bar{x} - \Delta, \bar{x} + \Delta]$. Dans ce cas, le résultat de la mesure est $\bar{x}$ et $u(\bar{x}) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$.

Remarques :

- L'intervalle Δ doit être pris le plus faible possible selon les critères personnels de l'expérimentateur et selon les conditions de l'expérience. Il ne doit pas y avoir de règle générale.
- Nous verrons plus tard dans l'année pourquoi $u(x) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$.

✎ Ici, dans quelle plage de position est-vous certains que se trouve l'image ?

✎ Quelle est l'incertitude-type sur la mesure de $\overline{OA'}$, notée $u(\overline{OA'})$?

Dans la suite, pour plus de clareté, nous noterons $\overline{OA'_{\text{exp}}}$ la valeur de $\overline{OA'}$ mesurée sur le banc optique et $\overline{OA'_{\text{th}}}$ la valeur de $\overline{OA'}$ calculée à l'aide de la relation de conjugaison. Pour comparer ces deux valeurs on utilise l'écart-normalisé (ou z-score) :

$$E.N. = \frac{|\overline{OA'_{\text{exp}}} - \overline{OA'_{\text{th}}}|}{u(\overline{OA})}$$

Par convention, on qualifie souvent deux résultats de compatibles si leur écart normalisé vérifie la propriété $E_N \leq 2$.

Remarques : L'écart normalisé s'appelle aussi parfois « z-score ». Ce seuil à 2 est d'origine historique. On le retrouve dans de nombreux champs scientifiques, comme la médecine, la pharmacie, la biologie, la psychologie, l'économie, l'écologie, etc. Ce seuil peut différer selon le domaine : par exemple, pour démontrer l'existence d'une nouvelle particule en physique subatomique, il faut atteindre un seuil de 5.

✎ Calculer l'écart-normalisé et conclure quant à la validité du modèle.

V Focométrie

But et matériel : vous disposez d'une lentille convergente inconnue (+? de distance focale image f'_C) dont on cherche à déterminer la distance focale.

Un banc optique, une lanterne munie d'un objet, un diaphragme, un miroir plan (M) et un écran sont également à votre disposition.

1. Méthode d'auto collimation

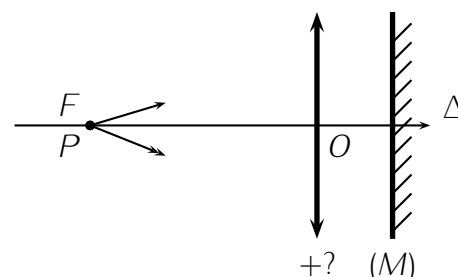
Complétez la figure ci-contre où F est le foyer objet de la lentille convergente inconnue.

On remarque que si l'objet P (plaque trouée) est en F , son image par le système optique apparaît également sur la plaque (on peut montrer que le grandissement est alors -1).

On peut alors mesurer directement $f'_C = \overline{OF'} = \overline{FO}$ sur le banc optique, c'est la méthode d'autocollimation.

✎ Utilisez cette méthode pour mesurer la distance focale image f'_C de la lentille convergente.

✎ Estimer l'incertitude-type sur la distance focale.



2. À partir de la méthode de conjugaison

La relation de conjugaison des lentilles minces lie la position de l'objet à celle de l'image et la distance focale f'_C : $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'_C}$.

✎ À partir du montage précédent, éloigner au maximum l'écran de la lanterne, déplacer la lentille sur le banc pour déterminer les deux positions pour lesquelles on obtient une image nette sur l'écran.

✎ Approchez l'écran de quelques centimètres et recommencez jusqu'à obtenir une vingtaine de mesures.

✎ On pourra compléter le tableau suivant :

$\overline{OA}$			
$\overline{OA'}$			
f'			

➤ À partir de vos mesures, estimer la valeur moyenne de f' et l'écart-type de sa distribution, on rappelle :

$$\sigma(f') = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (f'_i - \bar{f}')^2}$$

Ici, l'expérience n'est plus « mesurer un point à l'aide d'un protocole » mais « mesurer la moyenne de N points effectués avec le même protocole ».

Après avoir effectué une première série de N mesures on a calculé la valeur moyenne $\bar{f}'$ et l'écart-type $\sigma(f')$. Si l'on reproduit cette série de N mesures on trouvera une nouvelle valeur moyenne, proche de la précédente mais différente. Si l'on refait une troisième série de N mesure on trouvera encore une valeur moyenne différente. Et ainsi de suite pour n série de N mesures.

La dispersion des n moyennes sera forcément plus faible que la dispersion d'une unique série de N mesures. Cependant, on comprend bien que cette opération peut vite être chronophage.

Heureusement, il existe une formule mathématique permettant d'estimer l'incertitude-type sur la moyenne.

Définition : On réalise N fois le même protocole pour obtenir l'ensemble des points expérimentaux $\{x_i\}$. On note l'incertitude-type $u(x)$ de cet ensemble de mesures qui est évaluée en calculant son écart-type. Le résultat de l'expérience est

$$\bar{x} \pm u(\bar{x})$$

avec $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ la moyenne de la distribution et avec $u(\bar{x}) = \frac{\sigma(x)}{\sqrt{N}}$.

Ainsi, en une série de mesure, on obtient les points expérimentaux, leur incertitude-type, la moyenne de ces points et grâce à cette formule, l'incertitude-type sur la moyenne. On obtient ainsi une estimation plus précise de la grandeur à mesurer en modérant la variabilité de chaque prise de mesure unique.

➤ En déduire l'incertitude-type sur la moyenne de f' .

3. Cohérences des deux mesures

Pour comparer les deux mesures entre elles, on utilise l'écart-normalisé :

$$E_N = \frac{|f'_1 - f'_2|}{\sqrt{u(f'_1)^2 + u(f'_2)^2}}$$

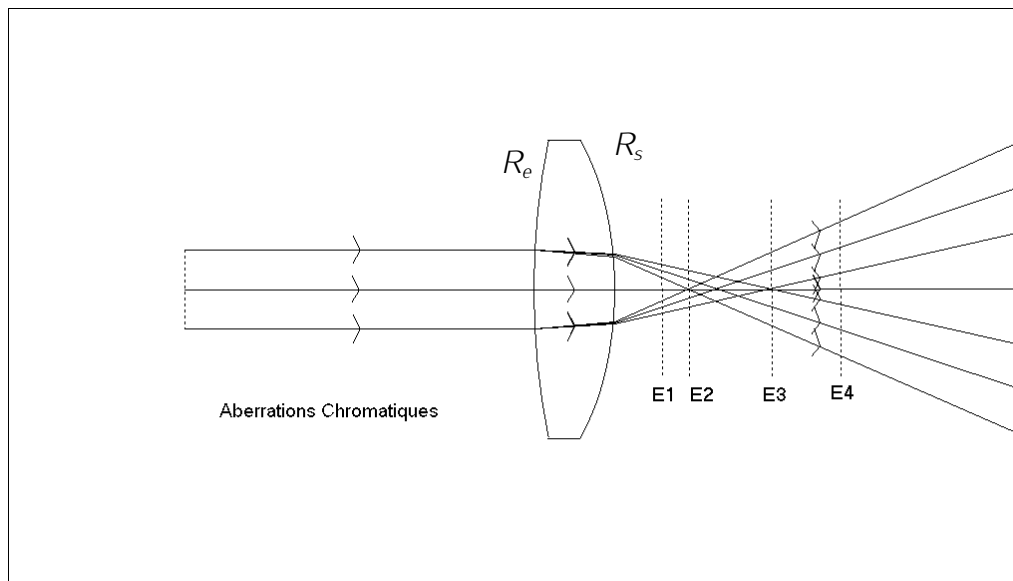
Si cet écart est inférieur à 2, on convient que les deux mesures sont compatibles entre elles.

➤ Conclure quant à la compatibilité des deux mesures.

VI Aberrations

1. Aberrations chromatiques (ou chromatisme)

Simulation :



Au lieu de converger en un point (foyer principal de la lentille), on observe un "foyer bleu" (au niveau de E_2) plus proche de la lentille que le "foyer rouge" (au niveau de E_3).

Origine : l'indice d'un verre dépend de la longueur d'onde ; c'est le phénomène de **dispersion** (on dit que le verre est un milieu dispersif) : $n(\lambda)$.

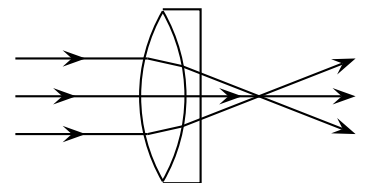
Mise en évidence expérimentale : selon la place de l'écran, la tache change de couleur :

- En E_1 , image **bleutée entourée d'un halo rouge**.
- En E_3 , image **rougeâtre entourée d'un halo bleu**.

On peut également incliner l'écran de façon à visualiser les différentes focales.

La distance entre les positions E_2 et E_3 de l'écran sur l'axe de la lentille (**axe optique**) forme l'aberration chromatique longitudinale, elle est d'autant plus importante que le verre est **dispersif**.

Correction : les achromats sont des systèmes corrigés des aberrations chromatiques : ils sont obtenus en accolant des lentilles en verre de nature différente (crown – flint) de façon à ce que les pouvoirs dispersifs se compensent.



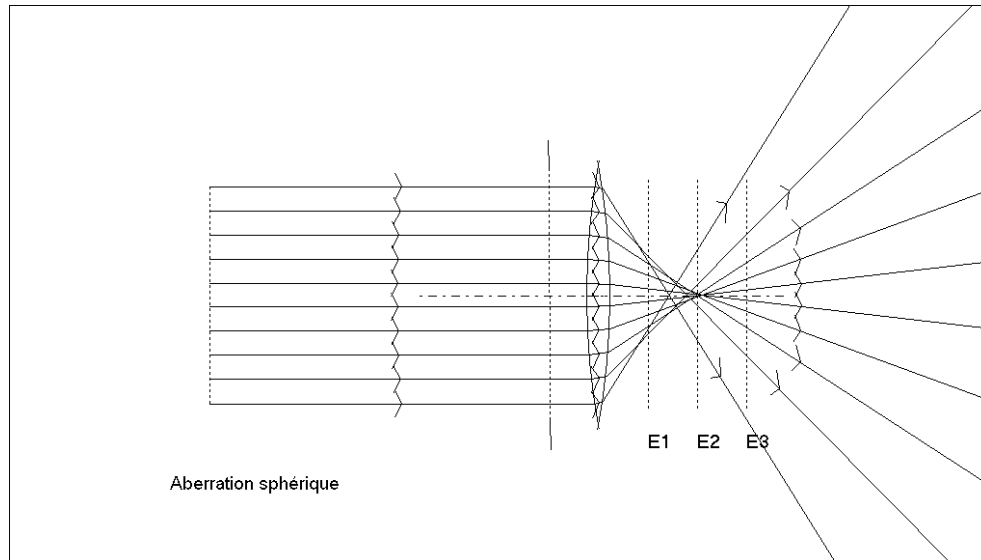
2. Aberrations géométriques

Les aberrations géométriques dépendent de la géométrie du système (forme des dioptries et miroirs qui composent le système optique) et également de la position de l'objet par rapport au système optique (distance à l'axe optique ou étendue de l'objet et ouverture du faisceau qui en est issu).

2.a. Aberration de sphéricité

Origine : elle est due au fait que les rayons éloignés de l'axe optique sont plus convergents que les rayons plus proches de l'axe optique. Elle apparaît donc lorsque l'ouverture du faisceau est **grande**. C'est la plus importante des aberrations géométriques.

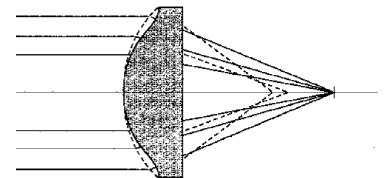
Simulation :



Mise en évidence expérimentale : on montre, en utilisant une lentille que les rayons lumineux sont tous tangents à une surface appelée caustique (qui n'est pas un cône).

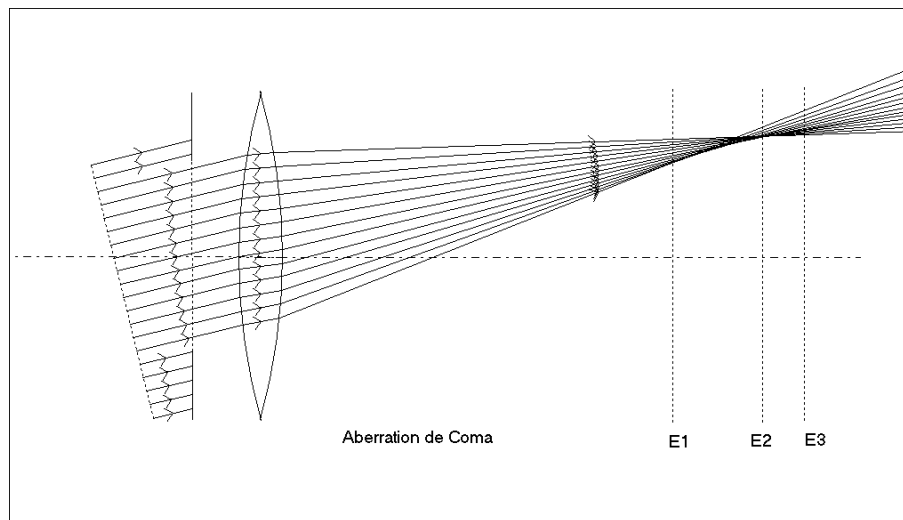
Correction : pour limiter l'aberration de sphéricité, il faut :

- réduire l'ouverture du faisceau en **diaphragmant** la lentille mais cela a pour inconvénient de limiter **la luminosité**.
- placer le côté le plus bombé de la lentille du côté des rayons les moins inclinés sur l'axe optique selon la règle des 4P (Plus Plat Plus Près).
- On peut également utiliser une lentille asphérique.



2.b. Coma

Simulation : si les rayons issus d'une source ponctuelle arrivent trop inclinés par rapport à l'axe optique d'une lentille, l'image quasiponctuelle au départ se déplace et prend la forme d'une queue de comète (d'où le nom de coma).



Remarque : les rayons qui passent par le centre de la lentilles ne changent pas (ou peu) de direction.