

## Chapitre 2 - Formation des images

### Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>I. Généralités sur les systèmes optiques</b>	<b>2</b>
1. Objet et image . . . . .	2
2. Définitions des objets et images à l'infini . . . . .	2
3. Repérage . . . . .	3
<b>II. Miroir plan</b>	<b>3</b>
<b>III. Qualité de l'image</b>	<b>4</b>
1. Stigmatisme rigoureux . . . . .	4
2. Stigmatisme approché . . . . .	5
3. Conditions de Gauss . . . . .	6
<b>IV. Lentilles minces</b>	<b>6</b>
1. Différentes lentilles . . . . .	6
2. Points particuliers autour des lentilles . . . . .	7
3. Méthodes de construction . . . . .	9
4. Relations de conjugaison et de grandissement transversal . . . . .	14
5. Projection de l'image d'un objet réel . . . . .	15
<b>V. Exemples d'instrument d'optique</b>	<b>16</b>
1. L'œil . . . . .	16
2. Appareil photographique . . . . .	17

Guide de révision de chapitre 2	
<b>Avant le TD</b>	Savoir et Savoir faire de la leçon 2 + exercices du cours
<b>Avant la khôlle</b>	Savoir et Savoir faire de la leçon 2 + exercices du cours + TD : ex 1, 2, 3, 4
<b>Avant le DS</b>	Savoir et Savoir faire de la leçon 2 + exercices du cours + TD : ex 5, 6, 7

### Introduction

Les applications de l'optique géométrique sont les différents instruments d'optique : loupe, appareil photo, lunette astronomique... Dans cette leçon, nous allons étudier les constituants (lentilles, miroirs) des instruments d'optique ainsi que les conditions pour obtenir des images de bonne qualité. Enfin, nous étudierons quelques instruments d'optique.

# I. Généralités sur les systèmes optiques

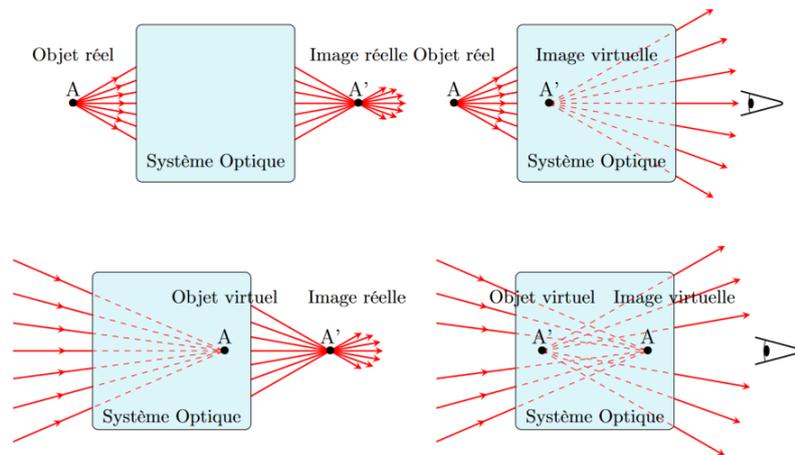
## 1. Objet et image

### . Définitions : objet

- Un **point objet** est un point où se croisent les droites qui portent les rayons lumineux incidents.
- On parle d'**objet réel** lorsque les rayons lumineux divergent depuis ce point, en particulier lorsqu'ils en sont effectivement issus. L'objet réel peut être « touché ».
- On parle d'**objet virtuel** lorsque les rayons lumineux convergent vers ce point. Ce sont alors les prolongements des rayons lumineux incidents qui passent par ce point.
- Un ensemble de points objet est souvent appelé **objet**, qui peut être une source lumineuse placée devant le système optique (source primaire) ou une diapositive éclairée par une source (source secondaire).
- La notion d'objet est relative au système optique étudié : ce qui constitue un point objet pour un élément du système optique peut constituer un point image pour un autre situé en amont.

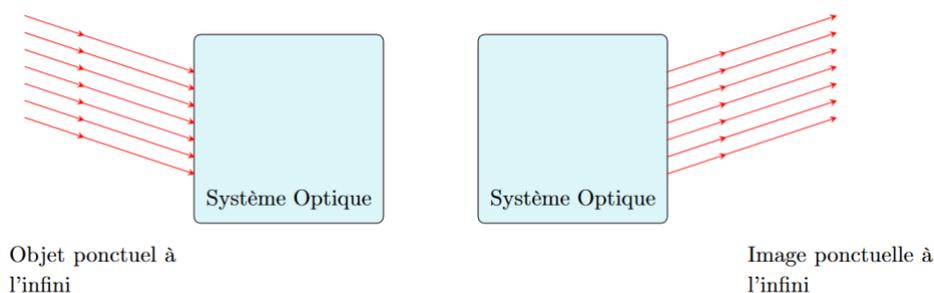
### . Définitions : image

- Un **point image** est un point où se croisent les droites qui portent les rayons lumineux émergents.
- On parle d'**image réelle** lorsque les rayons lumineux convergent en ce point, en particulier lorsqu'ils s'y dirigent effectivement. On obtient un point lumineux en y plaçant un écran, on peut la projeter.
- On parle d'**image virtuelle** lorsque les rayons lumineux divergent depuis ce point. Ce sont alors les prolongements des rayons lumineux émergents qui passent par ce point.
- Un ensemble de points image est souvent appelé **image**.
- La notion d'image est relative au système optique étudié : ce qui constitue un point image pour un élément du système optique pourra constituer un point objet pour un autre situé en aval.



## 2. Définitions des objets et images à l'infini

- Un **objet est à l'infini** lorsque tous les rayons lumineux arrivent parallèles entre eux sur le système optique
- Une **image est à l'infini** lorsque tous les rayons lumineux sortant d'un système optique sont parallèles entre eux.
- Une image (resp. un objet) sera dite à **l'infini sur l'axe optique** lorsque les rayons émergent (resp. arrivent) sur le système optique **parallèlement à l'axe optique**.



### 3. Repérage

**Définition : distances algébriques**

En optique, on utilise les **distances algébriques**, notées avec une barre au-dessus ( $\overline{OA}$ ) qui renseignent sur la distance (au sens habituel) qui sépare les deux points, et sur le sens dans lequel est mesurée la distance. Avant de parler d'utiliser les distances algébriques, il est nécessaire de définir un sens positif :

- Le long de l'axe optique, le **sens positif** est le **sens de la lumière incidente**.
- Perpendiculairement à l'axe optique, le sens positif est souvent choisi « vers le haut ».



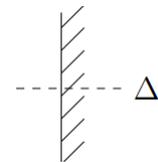
**Définition : angles orientés**

Les angles sont orientés : ils peuvent être positifs ou négatifs. En général, on choisit le sens trigonométrique comme le sens positif.



## II. Miroir plan

Un miroir plan est une surface plane réfléchissante (symbole ci-contre). Le système optique constitué du miroir plan possède un axe de révolution, qui est orthogonal au miroir : toute rotation autour de cet axe laisse inchangée la marche des rayons. Cet axe est l'**axe optique du système** ( $\Delta$ ).



**Savoir faire - Exercice 1**  
**Construire l'image d'un objet (réel) par un miroir plan**

**Énoncé :** Soit une source ponctuelle placée en un point A et un miroir plan.

1. Tracer la marche de trois rayons issus de A et frappant le miroir en trois points différents (la loi de Snell-Descartes pour la réflexion s'applique).

2. Tracer le prolongement en pointillés (ces rayons n'existent pas) des rayons réfléchis dans la partie arrière de (M). Commenter.
3. Ajouter un point B à la verticale de A. Déterminer son image B' à travers le miroir. Que dire de l'image A'B' de l'objet AB (position, taille, sens?)

**Correction :**

1. & 2. & 3. Les rayons en pointillés sont concourants en A', constituant l'**image virtuelle** de l'**objet réel** A à travers le miroir (M). L'image A'B' est virtuelle, de même taille et de même sens que l'objet réel AB.

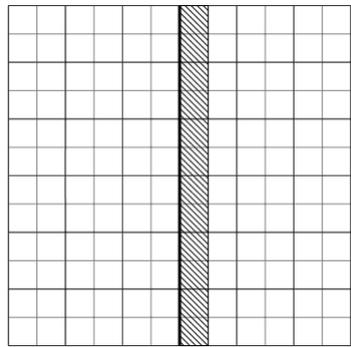
**questions 1 et 2**

**question 3**

**Savoir faire - Exercice 2**  
**Construire l'image d'un objet (virtuel) par un miroir plan**

**Enoncé :**

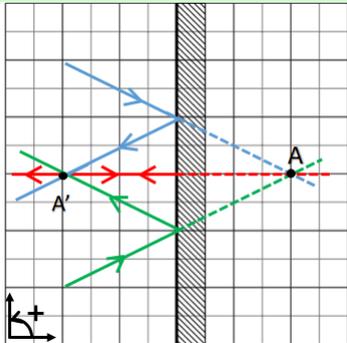
- Placer sur le schéma comportant un miroir plan, un objet virtuel A.



- Construire son image à travers le miroir. Commenter.

**Correction :**

- Les rayons en pointillés sont concourants en A, constituant le point objet virtuel A. Le point image A' est réel.



### III. Qualité de l'image

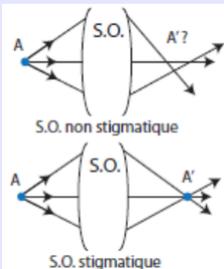
#### 1. Stigmatisme rigoureux

Le stigmatisme est une propriété des systèmes optiques nécessaires pour obtenir une image nette en sortie du système optique.

**Savoir - Notion de stigmatisme rigoureux / Stigmatisme rigoureux**

**Stigmatisme rigoureux :**

Un système optique est dit **rigoureusement stigmatique** s'il donne d'un objet ponctuel A un point image A' **unique**.  
 On dit que A' est l'image de A ou que A et A' sont **conjugués par le système optique**.  
 Dans ce cas, il existe une relation entre la position de l'image et celle de l'objet appelée **formule de conjugaison**.



**Stigmatisme rigoureux d'un miroir plan :** le miroir plan est le seul système rigoureusement stigmatique pour tout point objet.

## 2. Stigmatisme approché

Lorsque l'on prend en photo un paysage, on souhaite que l'image obtenue sur le capteur numérique soit la plus nette possible. Le système optique contenu dans l'objectif de l'appareil photo (lentilles minces) doit vérifier un certain nombre de propriétés, que l'on va énoncer.



Animation interactive sur le stigmatisme. Lien vers : [https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/lentilles/stigmatisme\\_lentille.php](https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/lentilles/stigmatisme_lentille.php)

Exercice 3
<p><b>Énoncé :</b> On considère un point source <math>A</math> placé à l'infini sur l'axe optique avant une lentille mince convergente.</p>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La lentille réalise-t-elle un stigmatisme rigoureux dans lorsqu'elle est entièrement éclairée ?</li> <li>2. Quel dispositif, placé à proximité de la lentille, permet de s'approcher du stigmatisme rigoureux ? Quel autre effet aurait-il sur l'image ?</li> </ol>
<p><b>Correction :</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Les rayons issus de <math>A</math> ne convergent pas vers un point image unique <math>A'</math> donc il n'y a pas stigmatisme rigoureux.</li> <li>2. Un diaphragme permet de s'approcher du stigmatisme rigoureux. L'image est moins moins lumineuse avec un diaphragme.</li> </ol>

**Le stigmatisme rigoureux est-il nécessaire pour avoir une image nette ?** Autrement dit, à quelle condition verra-t-on un point et non une tache ? Qu'il s'agisse de la rétine de l'œil ou d'un capteur d'appareil photo numérique, les capteurs sont constitués de cellules : les cônes/bâtonnets sur la rétine et les pixels pour l'appareil photo. Cela confère au capteur une **résolution maximale** : le récepteur ne peut pas distinguer des détails plus petits que le plus petit élément qui le constitue. Des rayons émergeant du système optique parvenant sur la même cellule photosensible du capteur peuvent être considérés comme confondus. L'observateur aura donc l'impression de voir un point.

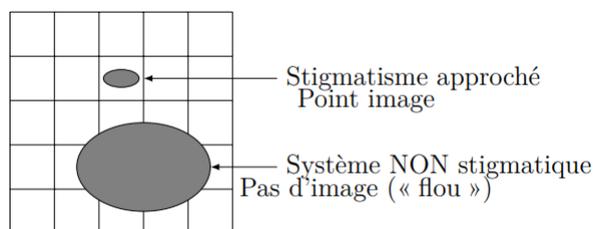


Illustration avec un capteur numérique :  $5 \times 5$  pixels

### Savoir - Relier le stigmatisme approché aux caractéristiques d'un détecteur

Un système optique réalise un **stigmatisme approché** si les rayons incidents issus d'un point objet  $A$  passent au voisinage de  $A'$  de dimension inférieure à la dimension caractéristique des cellules du capteur. Cette notion dépend donc du capteur utilisé.

*Remarque : Quelles sont les causes de non stigmatisme ? On les regroupe en deux catégories principales :*

- *Les aberrations géométriques : on considère une lumière monochromatique. L'image d'un point n'est alors pas exactement un point.*
- *Les aberrations chromatiques : la lumière blanche est composée de plusieurs longueurs d'onde  $\lambda$ . Or l'indice optique  $n$  du verre de la lentille dépend de  $\lambda$  (phénomène de dispersion), donc les différentes couleurs monochromatiques ne vont pas converger exactement au même point. Il en résulte des tâches colorées.*

### 3. Conditions de Gauss

#### Savoir - Énoncer les conditions de l'approximation de Gauss et ses conséquences

Le système optique est utilisé dans les **conditions de Gauss** si :

- les rayons sont peu inclinés par rapport à l'axe optique ;
- les rayons sont peu éloignés de l'axe optique ;

On parle de **rayons paraxiaux**.

Quand elles sont satisfaites, ces conditions impliquent :

- le système optique réalise un stigmatisme approché :  $A \xrightarrow{S.O.} A'$  ;
- le système optique réalise un aplanétisme approché : l'image d'un objet perpendiculaire à l'axe optique est également perpendiculaire à l'axe optique ( $AB \perp \text{axe optique} \xrightarrow{S.O.} A'B' \perp \text{axe optique}$ ).

Dans les **conditions de Gauss**, les angles  $\theta$  entre l'axe optique et les rayons lumineux **seront très petits devant 1 radian**, et on pourra alors écrire, avec  $\theta$  en radian :  $\sin(\theta) \simeq \theta$  ;  $\tan(\theta) \simeq \theta$  ;  $\cos(\theta) \simeq 1$  .

En TP, on accordera une grande importance à l'éclairage et à l'alignement du matériel pour observer des images de qualité. Lorsque l'on éclaire un système optique sans respecter les conditions de Gauss, l'image obtenue présente des « aberrations » . Concernant l'éventuel diaphragme délimitant le faisceau incident, on doit faire un compromis expérimental entre la netteté (petit diaphragme) et la luminosité (grand diaphragme) ou entre netteté et diffraction (absente pour un grand diaphragme).

## IV. Lentilles minces

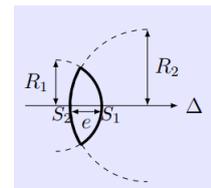
### 1. Différentes lentilles

#### . Définition d'une lentille

Une **lentille** est un matériau transparent, homogène et isotrope délimité par deux dioptries dont l'un au moins est sphérique.

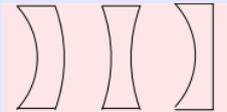
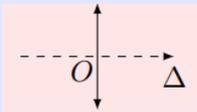
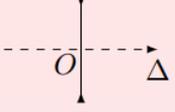
Une **lentille est mince** si la distance  $e$  entre les deux sommets est très inférieure aux rayons de courbure ( $R_1$  et  $R_2$ ), de sorte que l'on puisse les confondre en un même point appelé centre de la lentille, noté  $O$  ( $S_1 \simeq S_2 \equiv O$ ) des dioptries.

On note  $\Delta$  l'**axe optique** : c'est l'axe de révolution de la lentille.



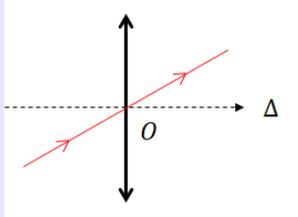
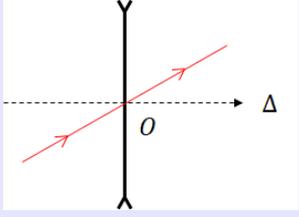
#### . Deux types de lentille mince

#### Savoir - Deux types de lentilles minces

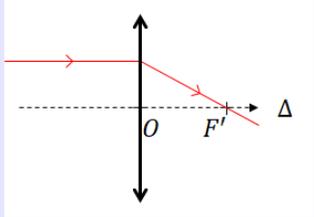
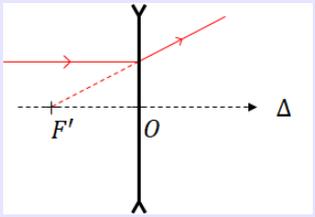
Lentilles convergentes	Lentilles divergentes
Bords minces (plus épaisse au centre qu'au bord)	Bords épais (plus épaisse au bord qu'au centre)
Formes : 	Formes : 
Symbole : 	Symbole : 

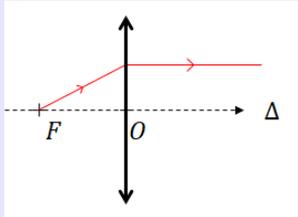
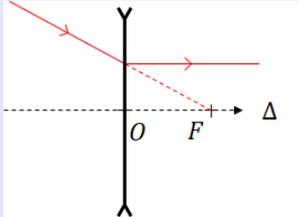
## 2. Points particuliers autour des lentilles

### . Centre optique

Savoir - Définir les propriétés du centre optique	
<p>Le centre optique est le point de la lentille mince sur l'axe optique.  <b>Un rayon passant par le centre optique d'une lentille mince n'est pas dévié.</b></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Lentille convergente</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Lentille divergente</b></p> 

### . Foyers principaux

Savoir - Définir les propriétés des foyers principaux	
<p>Le <b>foyer principal image</b>, noté <math>F'</math>, est le point image situé sur l'axe optique de la lentille, dont le point objet conjugué est situé à l'infini sur l'axe optique.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Lentille convergente</b></p> <p>Les rayons qui émergent par <math>F'</math> sont incidents parallèlement à l'axe optique.</p> 	<p style="text-align: center;"><b>Lentille divergente</b></p> <p>Les rayons incidents parallèles à l'axe optique donnent des rayons émergents dont les prolongements passent par <math>F'</math>.</p> 

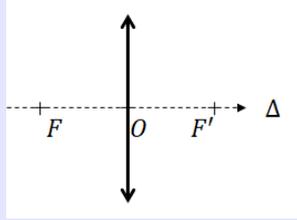
Savoir - Définir les propriétés des foyers principaux	
<p>Le <b>foyer principal objet</b>, noté <math>F</math>, est le point objet situé sur l'axe optique de la lentille, dont le point image conjugué est situé à l'infini sur l'axe optique.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Lentille convergente</b></p> <p>Les rayons issus de <math>F</math> émergent parallèlement à l'axe optique.</p> 	<p style="text-align: center;"><b>Lentille divergente</b></p> <p>Les rayons incidents dont les prolongements passent par <math>F</math> émergent parallèlement à l'axe optique.</p> 

**Savoir - Définir les propriétés des foyers principaux**

$F$  et  $F'$  sont symétriques par rapport à  $O$  pour une lentille mince.

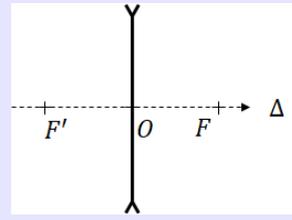
**Lentille convergente**

→ sens de propagation de la lumière.



**Lentille divergente**

→ sens de propagation de la lumière.



. Distance focale et vergence

**Savoir - Définir les propriétés de la distance focale et la vergence**

- La **distance focale image** est la distance algébrique  $f' = \overline{OF'}$  (en mètre) .
- La **distance focale objet** est la distance algébrique  $f = \overline{OF}$  (en mètre), avec  $f = -f'$  .
- La **vergence**  $V = \frac{1}{f'}$  (en dioptrie  $\delta = m^{-1}$ ) .
- La distance focale image  $f'$  et la vergence d'une **lentille convergente** sont **positives** .
- La distance focale image  $f'$  et la vergence d'une **lentille divergente** sont **négatives** .

. Foyers secondaires

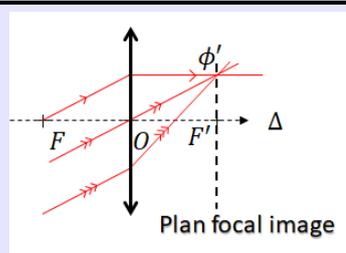
**Savoir- Définir les propriétés des foyers secondaires**

On appelle **plan focal image** le plan transverse passant par le foyer principal image  $F'$ .

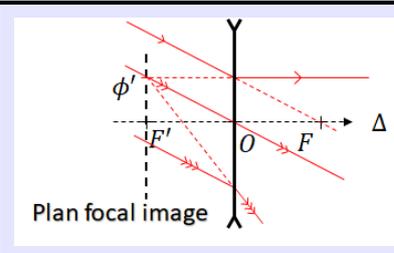
Les **foyers secondaires image**, notés  $\phi'$ , sont les points du plan focal image différents de  $F'$ .

Un foyer secondaire image est un point image dont le point objet conjugué est situé à l'infini hors de l'axe optique : les rayons incidents sont parallèles entre eux et inclinés par rapport à l'axe optique.

**Lentille convergente**



**Lentille divergente**



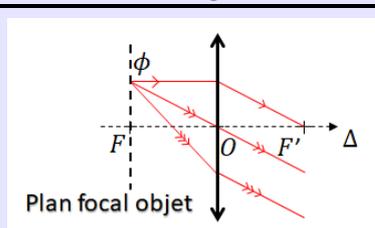
**Savoir- Définir les propriétés des foyers secondaires**

On appelle **plan focal objet** le plan transverse (perpendiculaire à l'axe optique) passant par le foyer principal objet  $F$ .

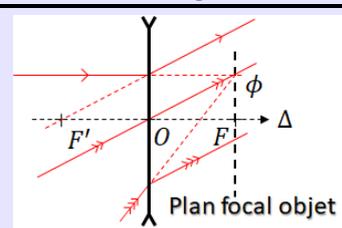
Les **foyers secondaires objet**, notés  $\phi$ , sont les points du plan focal objet différents de  $F$ .

L'image d'un foyer secondaire objet est située à l'infini hors de l'axe optique : les rayons émergents sont parallèles entre eux et inclinés par rapport à l'axe optique.

**Lentille convergente**



**Lentille divergente**



### 3. Méthodes de construction

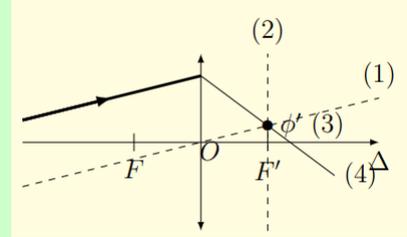
#### . Construction d'un rayon

##### Savoir faire - Construction du cheminement d'un rayon incident quelconque

Si on a un rayon incident dont on souhaite tracer le rayon émergent :

1. Tracer un rayon auxiliaire, en pointillés, parallèle au rayon incident inconnu, passant par  $O$ . Ce rayon auxiliaire n'est pas dévié.
2. Tracer en pointillés le plan focal image (plan transverse passant par  $F'$ ).
3. Repérer l'intersection entre le rayon auxiliaire et le plan focal image, ce point est un foyer image secondaire  $\phi'$ .
4. Le rayon incident inconnu et le rayon auxiliaire étant parallèle entre eux ils se croisent dans le plan focal image : au point  $\phi'$  repéré précédemment.

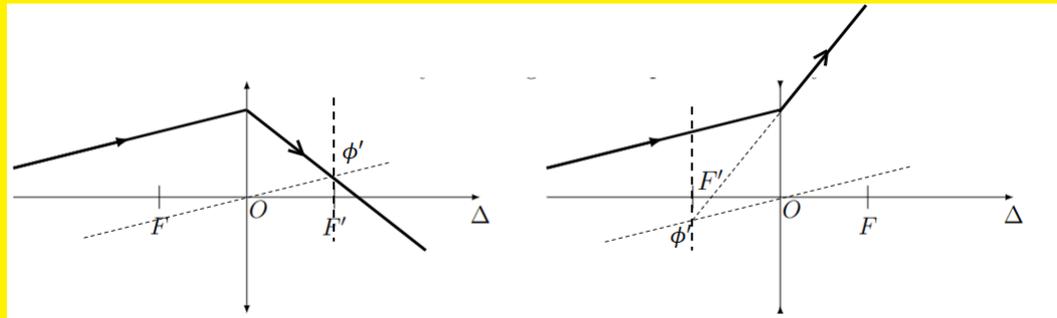
Il reste à tracer le rayon émergent issu du rayon incident passant par ce point  $\phi'$ .



#### Exercice 4

**Énoncé :** Tracer les rayons émergents correspondant aux rayons incidents.

**Correction :**

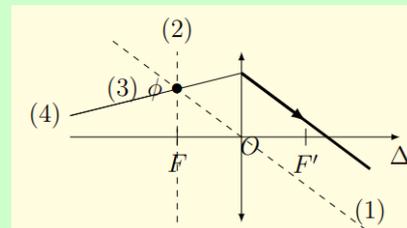


##### Savoir faire - Construction du cheminement d'un rayon émergent quelconque

Si on a un rayon émergent dont on souhaite tracer le rayon incident qui lui a donné naissance :

1. Tracer un rayon auxiliaire, en pointillés, parallèle au rayon émergent inconnu, passant par  $O$ . Ce rayon auxiliaire n'est pas dévié.
2. Tracer en pointillés le plan focal objet (plan transverse passant par  $F$ ).
3. Repérer l'intersection entre le rayon auxiliaire et le plan focal objet, ce point est un foyer objet secondaire  $\phi$ .
4. Le rayon émergent inconnu et le rayon auxiliaire émergent de la lentille parallèlement, donc ils proviennent d'un même plan focal objet : le foyer secondaire objet  $\phi$ .

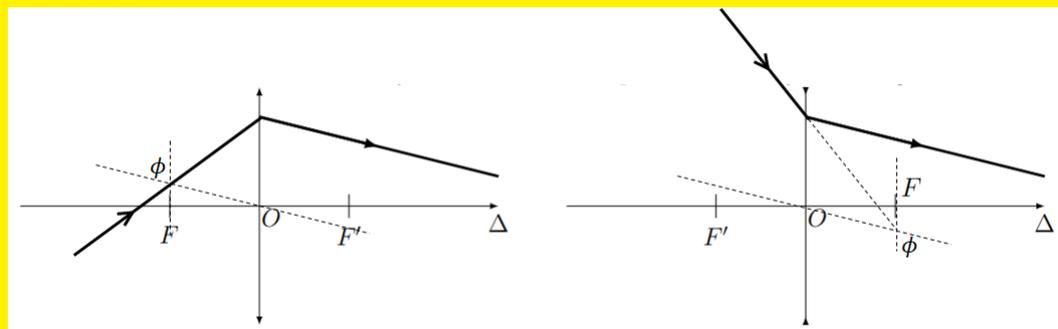
Il reste à tracer le rayon incident passant par ce point objet  $\phi$  qui donne le rayon émergent.



## Exercice 5

**Énoncé :** Tracer les rayons incidents correspondant aux rayons émergents.

**Correction :**



### . Précautions de tracés d'une image étendue

- ✓ Les rayons doivent être tracés à la règle, et chaque rayon avec un stylo (ou feutre fin) de couleur différente.
- ✓ Les rayons doivent être orientés par une flèche.
- ✓ Les rayons incidents (avant la lentille dans le sens de propagation) et les rayons émergents (après la lentille dans le sens de propagation) sont tracés en traits pleins, avec une flèche dessus.
- ✓ Les prolongements des rayons incidents (dans l'espace après la lentille) et les prolongements des rayons émergents (dans l'espace avant la lentille) sont tracés en traits pointillés.

Les tracés seront toujours effectués avec une échelle transversale plus grande que l'échelle longitudinale. Les rayons représentés ne seront pas « peu inclinés et peu éloignés de l'axe optique » mais les constructions tiennent compte des conditions de Gauss.

### . Règles de tracés d'une image étendue

Soit un objet  $AB$  perpendiculaire à l'axe optique ( $\Delta$ ) avec  $A$  sur ( $\Delta$ ) et  $B$  hors de ( $\Delta$ ). On souhaite déterminer son image  $A'B'$  par une lentille ( $\mathcal{L}$ ). En exploitant la propriété d'aplanétisme, on en déduit que  $A'B'$  est perpendiculaire à ( $\Delta$ ).

### Savoir faire - Construire une image étendue

Pour représenter l'image  $A'B'$  d'un objet  $AB$  perpendiculaire à l'axe optique ( $\Delta$ ) avec  $A$  sur ( $\Delta$ ) et  $B$  hors de ( $\Delta$ ), il faut tracer les trois rayons suivants issus de  $B$  afin de déterminer  $B'$  :

1. Le rayon passant par le centre optique  $O$  n'est pas dévié par la lentille.
2. Le rayon incident issu de  $B$  et parallèle à l'axe optique émerge en passant par  $F'$ .
3. Le rayon incident issu de  $B$  et passant par  $F$  émerge parallèlement à l'axe optique.

$B'$  est à l'intersection de ces trois rayons, et on en déduit  $A'$  qui est le projeté orthogonal de  $B'$  sur ( $\Delta$ ).



Animation interactive pour vous entraîner avec la méthode décrite pas à pas. Lien vers : [https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/lentilles/construction\\_lentille.php](https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/lentilles/construction_lentille.php)

. Construction des images avec une lentille convergente

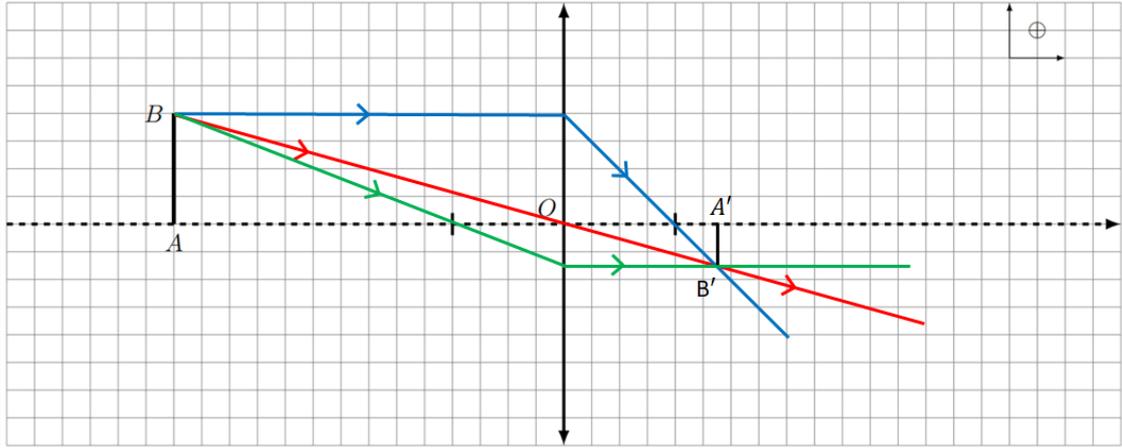
**Savoir faire - Exercice 6**  
**Application à la construction d'images avec une lentille convergente**

**Énoncé :** On s'intéresse au tracé d'une image avec une lentille convergente.

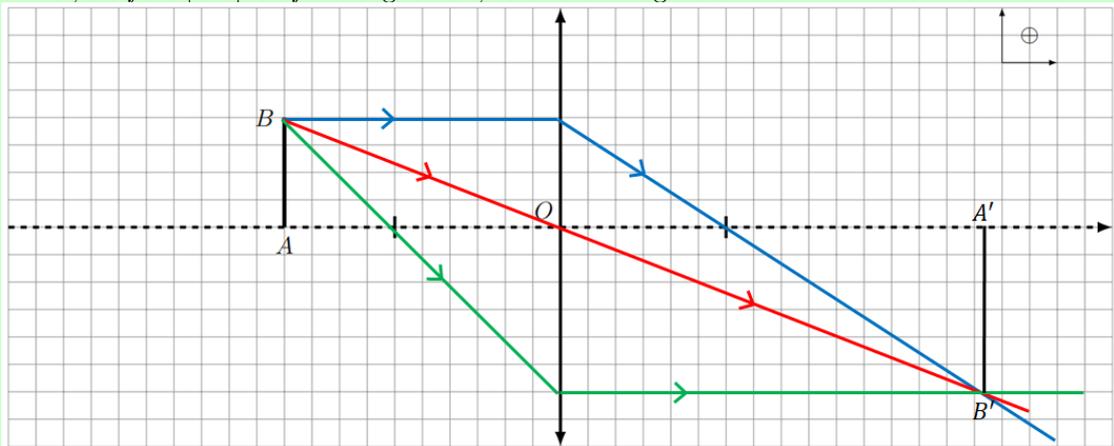
1. Réaliser les tracés ci-dessous.
2. Préciser pour chaque tracé la nature de l'objet (réel/virtuel) et la nature de l'image (réelle/virtuelle).
3. Préciser pour chaque tracé :  
 — image agrandie / image rétrécie / image de même taille /  $|\gamma| > 1$  /  $|\gamma| < 1$  /  $|\gamma| = 1$   
 — image droite (même sens que l'objet) / image renversée (sens opposé à l'objet) /  $\gamma > 0$  /  $\gamma < 0$ .

**Correction :**

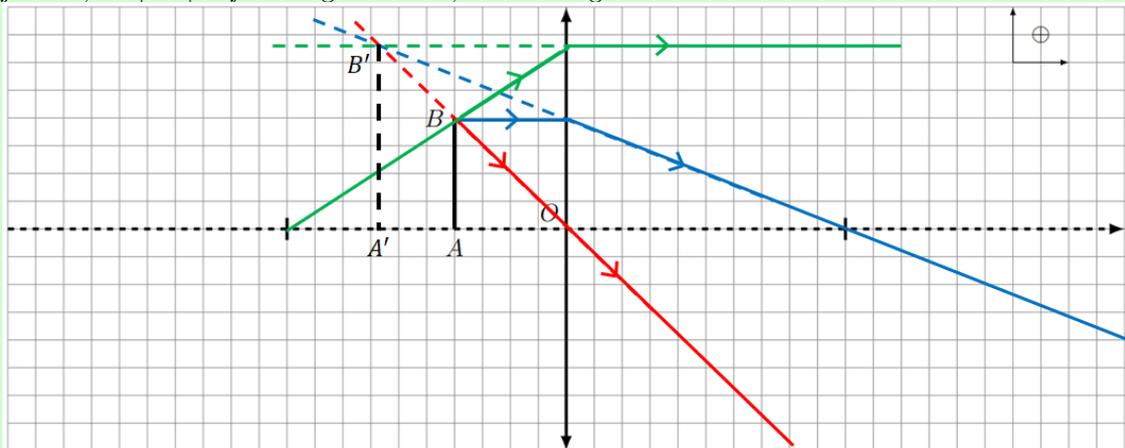
✓ Objet réel, tel  $|\overline{OA}| > 2f'$  : image réelle, rétrécie et renversée



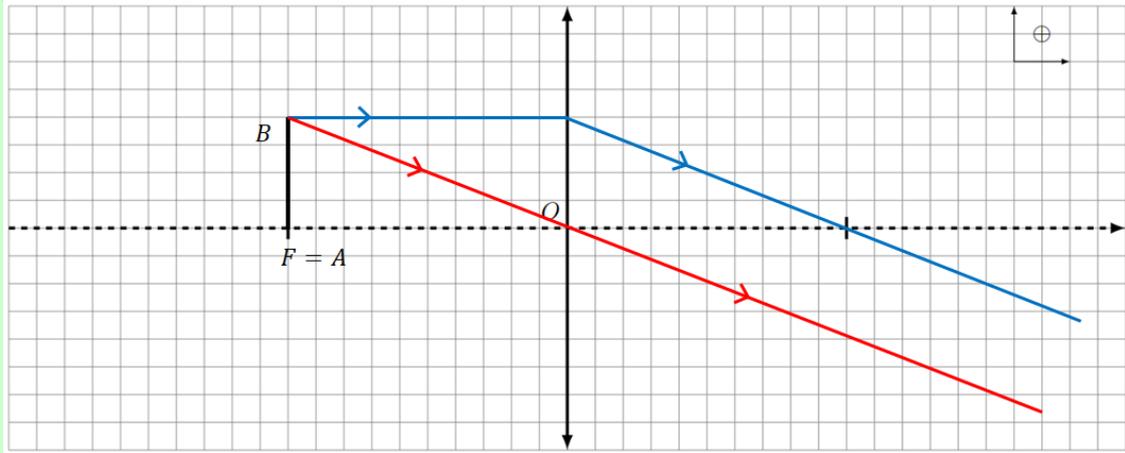
✓ Objet réel, tel  $f' < |\overline{OA}| < 2f'$  : image réelle, renversée et agrandie



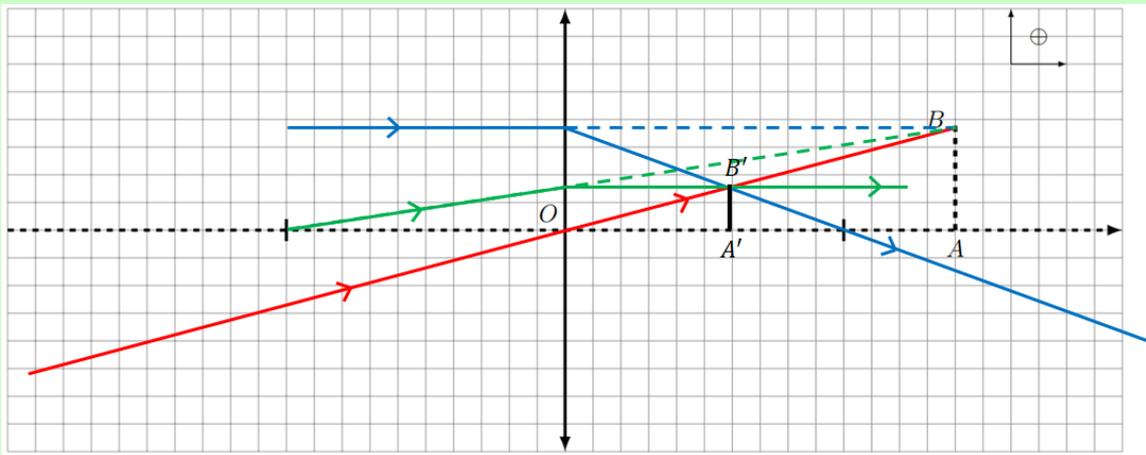
✓ Objet réel, tel  $|\overline{OA}| < f'$  : image virtuelle, droite et agrandie



✓ Objet réel dans le plan focal objet : image réelle, renversée et à l'infini.



✓ Objet virtuel : image réelle, droite et rétrécie



. Construction des images avec une lentille divergentes

Savoir faire - Exercice 7

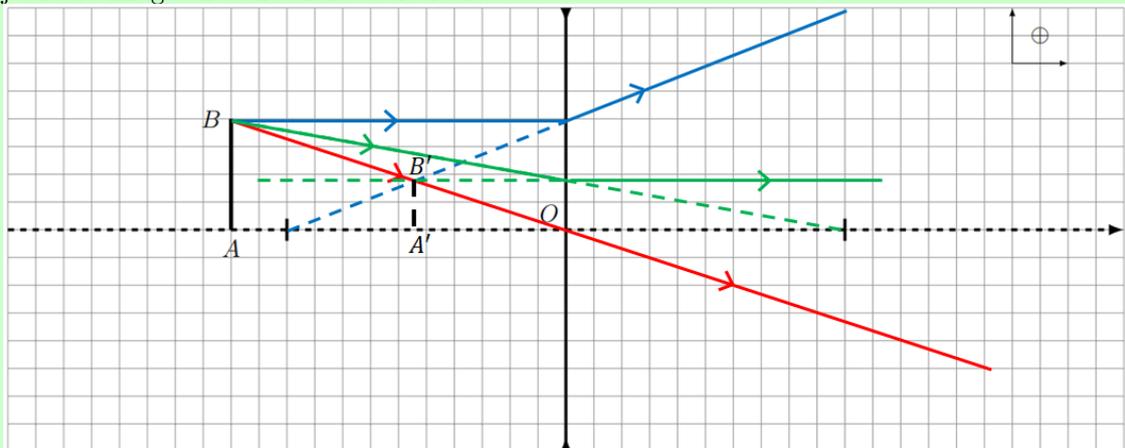
Application à la construction d'images avec une lentille divergente

Énoncé : On s'intéresse au tracé d'une image avec une lentille divergente.

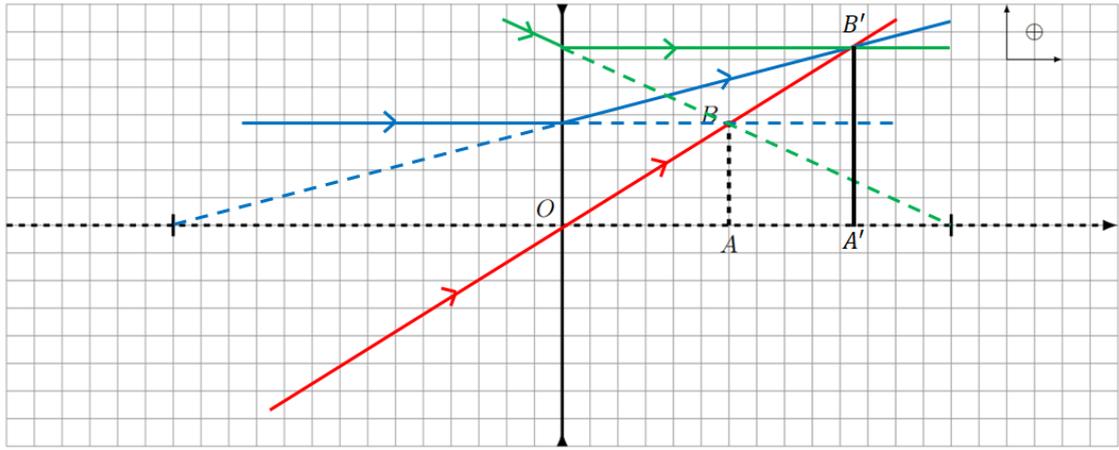
1. Réaliser les tracés ci-dessous.
2. Préciser pour chaque tracé la nature de l'objet (réel/virtuel) et la nature de l'image (réelle/virtuelle).
3. Préciser pour chaque tracé :  
 — image agrandie / image rétrécie / image de même taille /  $|\gamma| > 1$  /  $|\gamma| < 1$  /  $|\gamma| = 1$   
 — image droite (même sens que l'objet) / image renversée (sens opposé à l'objet) /  $\gamma > 0$  /  $\gamma < 0$  .

Correction :

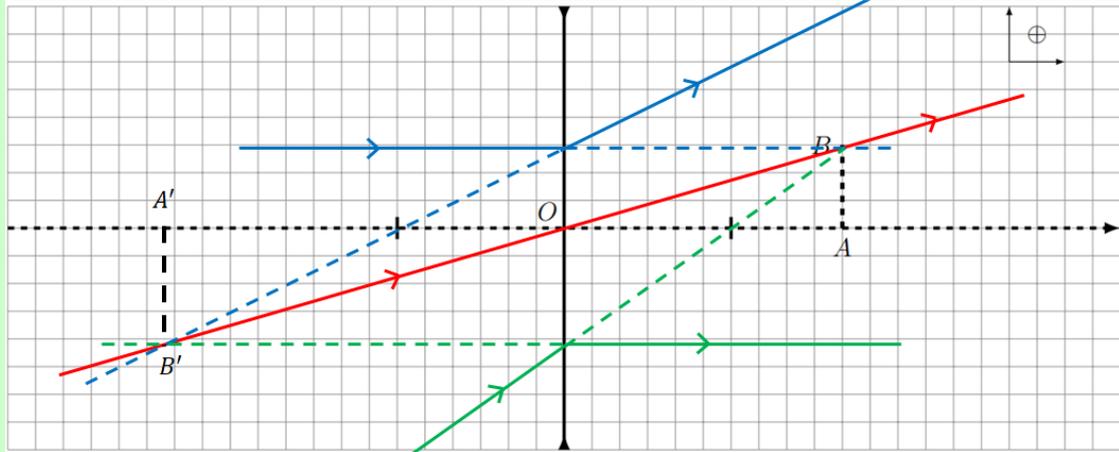
✓ Objet réel : image virtuelle droite et rétrécie.



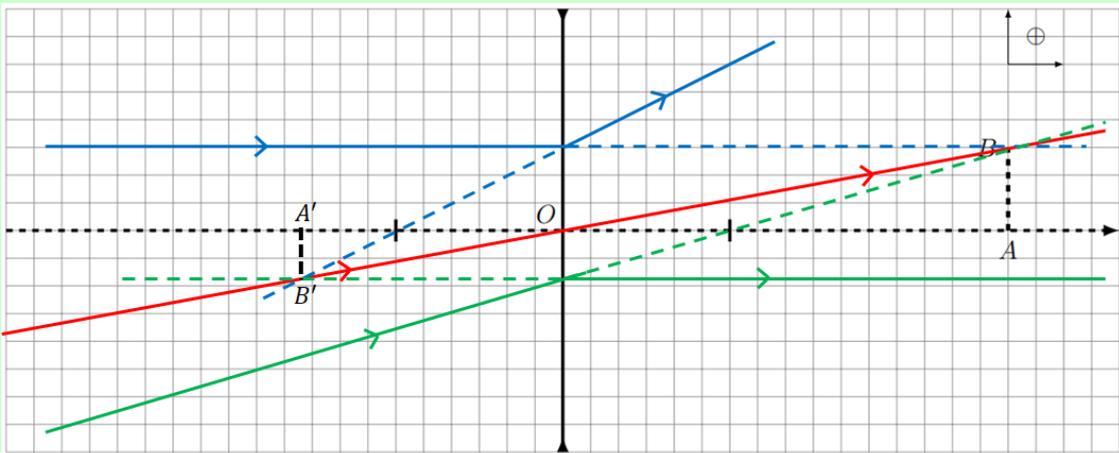
✓ Objet virtuel  $|\overline{OA}| < |f'|$  : image réelle, droite et agrandie.



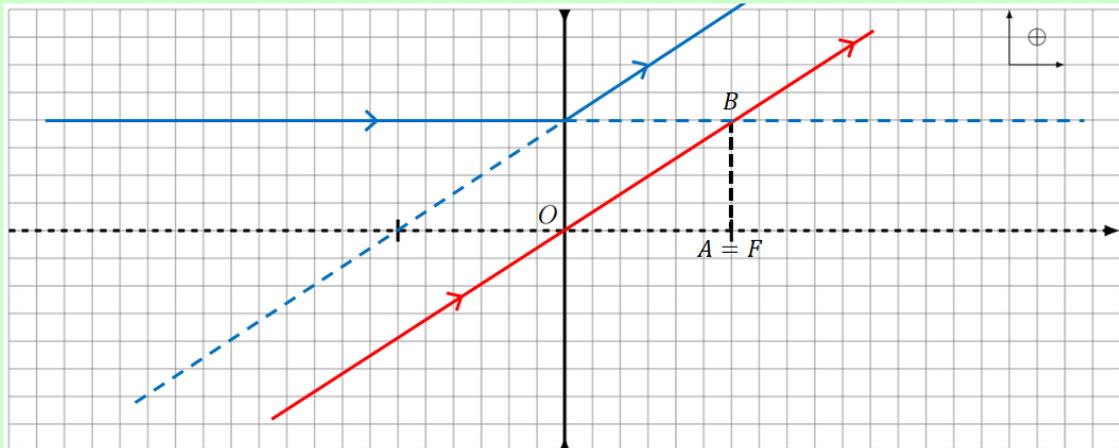
✓ Objet virtuel  $|f'| < |\overline{OA}| < 2|f'|$  : image virtuelle, agrandie et renversée



✓ Objet virtuel  $|\overline{OA}| > 2|f'|$  : image virtuelle, rétrécie et inversée.



✓ Objet virtuel dans le plan focal objet : image à l'infini, réelle et droite.



## 4. Relations de conjugaison et de grandissement transversal

### . Grandissement transversal

#### Savoir - Grandissement transversal

Le grandissement transversal est le rapport algébrique de la taille de l'image  $\overline{A'B'}$  à celle de l'objet  $\overline{AB}$ ,

celui-ci étant orthogonal à l'axe optique :  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$ .

C'est une grandeur algébrique (positive ou négative) sans dimension.

#### Exercice 8

##### Énoncé :

1. Que peut-on dire sur l'objet et l'image si  $\gamma > 0$ ? si  $\gamma < 0$ ?
2. Que peut-on dire sur l'objet et l'image si  $|\gamma| > 1$ ? si  $|\gamma| < 1$ ?

##### Correction :

1. Si  $\gamma > 0$ , l'image est droite et si  $\gamma < 0$ , l'image est renversée par rapport à l'objet.
2. si  $|\gamma| > 1$ , l'image est agrandie par rapport à l'objet et si  $|\gamma| < 1$ , l'image est rétrécie par rapport à l'objet.

### . Formules de conjugaison et de grandissement transversal

Les **relations de grandissement transversal** relient la taille de l'image à celle de l'objet. Les **relations de conjugaison** sont des relations mathématiques qui relient la position d'un point objet situé sur l'axe optique à la position du point image conjugué.

#### Savoir - Formules de conjugaison et de grandissement transversal

Pour un objet  $AB$  transverse avec  $A$  situé sur l'axe optique conjugué avec l'image  $A'B'$  par une lentille mince de centre optique  $O$ , de foyer principal objet  $F$ , de foyer principal image  $F'$  et de distance focale  $f'$  :  
 $A \xrightarrow{\mathcal{L}(O, f')} A'$ .

Relations	... de conjugaison	... de grandissement
... avec origine au centre (de Descartes)	$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$	$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$
... avec origine aux foyers (de Newton)	$\overline{F'A'} \times \overline{FA} = -f'^2$	$\gamma = \frac{\overline{F'A'}}{-f'} = \frac{f'}{\overline{FA}}$

*Remarque : toutes les grandeurs qui interviennent dans les relations de conjugaison sont des **grandeurs algébriques**. L'orientation choisie le long de l'axe optique est celle de la lumière incidente. Ainsi, il faut traduire « on photographie un objet à une distance de 5 m » par  $\overline{OA} = -5$  m, si l'axe optique est orienté dans le sens de la lumière incidente.*

#### Exercice 9

##### Énoncé :

1. Un objet  $AB$  de 0,5 cm est placé 30 cm avant une lentille convergente de distance focale 20 cm, perpendiculairement à son axe. Déterminer la position, la nature et la taille de l'image
2. Un objet virtuel est placé à 2 cm d'une lentille divergente de distance focale -3 cm. Déterminer la position de l'image et le grandissement transversal.

##### Correction :

1. On note que  $\overline{OA} = -30$  cm,  $f' = 20$  cm et  $\overline{AB} = 0,5$  cm.

D'après la relation de conjugaison au centre,  $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{f'}$  soit  $\overline{OA'} = \left( \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{f'} \right)^{-1}$

$$\text{A.N : } \overline{OA'} = \left( -\frac{1}{30} + \frac{1}{20} \right)^{-1} = 60 \text{ cm} \Rightarrow \text{l'image est réelle.}$$

D'après la formule du grandissement,  $\overline{A'B'} = \gamma \times \overline{AB} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \overline{AB} = \frac{60}{-30} \times 0,5 = -1 \text{ cm} \Rightarrow \text{L'image est agrandie et renvercée.}$

2. On note que  $\overline{OA} = 2 \text{ cm}$  et  $f' = -3 \text{ cm}$ .

D'après la relation de conjugaison au centre,  $\overline{OA'} = \left( \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{f'} \right)^{-1}$ .

$$\text{A.N : } \overline{OA'} = \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{3} \right)^{-1} = 6 \text{ cm} \Rightarrow \text{l'image est réelle.}$$

Le grandissement transversal est  $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{6}{2} = 3 \Rightarrow \text{l'image est droite et agrandie.}$

## 5. Projection de l'image d'un objet réel

On cherche à projeter l'image d'un objet éclairé sur un écran, que l'on souhaite agrandie, lumineuse et nette sur l'écran, les positions de l'objet et de l'écran sont souvent fixées et donc la distance  $D$  entre les deux.



Animation interactive pour former l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente. Lien vers : <https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr//optiqueGeo/focometrie/bessel.php>

### Savoir faire - Exercice 10

#### Établir et utiliser la condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente

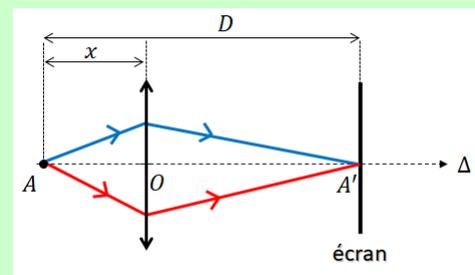
**Énoncé :** On souhaite déterminer une condition sur la distance  $D$  qui sépare un objet et l'écran sur lequel on souhaite projeter l'image de cet objet à l'aide d'une lentille convergente de distance focale  $f'$

1. Lors d'une projection, quelles sont les natures (réelle/virtuelle) de l'objet et de l'image ?
2. Quel type de lentille permet la réalisation d'une projection ?
3. En partant de la relation de conjugaison de Descartes, établir une équation du deuxième degré vérifiée par  $\overline{OA}$ , en fonction de  $D = \overline{AA'}$  et  $f'$ .
4. À quelle condition sur  $D$  et  $f'$  peut-on utiliser la lentille pour réaliser une projection ?
5. Combien existe-t-il de positions de la lentille par rapport à l'objet permettant la projection ?

**Correction :**

1. L'objet et l'image sont réels.
2. On doit donc utiliser une lentille nécessairement convergente.
- 3.

On note  $\overline{AA'} = D > 0$  et  $\overline{OA} = -x$ .  
 $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \Leftrightarrow \frac{1}{D-x} + \frac{1}{x} = \frac{1}{f'}$ . Ainsi :  $\frac{x}{D-x} + 1 = \frac{x}{f'}$   
 soit :  $x \times f' + (D-x) \times f' = x \times (D-x)$ . En réorganisant les termes, on aboutit à  $x^2 - x \times D + D \times f' = 0$



4. Cette équation n'a de solution que si son discriminant  $\Delta$  est positif, or :  $\Delta = D^2 - 4f' \times D = D(D - 4f')$ . On en déduit une condition sur la distance focale de la lentille :  $D \geq 4f'$ .

5. L'équation du second degré précédente a pour solutions :  $x_1 = \frac{1}{2} \left( D - \sqrt{D^2 - 4D \times f'} \right)$  et  $x_2 = \frac{1}{2} \left( D + \sqrt{D^2 - 4D \times f'} \right)$ .

Quand  $D > 4f'$ , il existe deux positions de lentilles par rapport à l'objet permettant la projection. Dans le cas où  $D = 4f'$ , une seule solution existe.

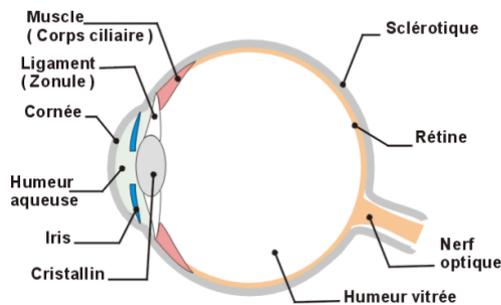
### Savoir - Condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente

Pour réaliser la projection d'un objet sur un écran à l'aide d'une lentille convergente de distance focale  $f'$ , il faut placer l'écran à une distance  $D$  de l'objet quatre fois supérieure à la distance focale :  $D \geq 4f'$

## V. Exemples d'instrument d'optique

### 1. L'œil

#### . Modélisation



L'œil possède une forme environ sphérique de rayon environ 15 mm.

#### Éléments principaux de l'œil :

- L'iris (partie colorée) est percé de la pupille dont le diamètre est variable (entre 2 mm et 8 mm) et qui joue le rôle de diaphragme en limitant l'intensité lumineuse pénétrant dans l'œil (la taille de la pupille s'adapte à la luminosité de l'objet observé).

- Le cristallin est un muscle, qui, avec la cornée, est assimilable à une lentille mince biconvexe dont la distance focale est variable selon sa contraction (la vergence est de l'ordre de  $+20 \delta$ ). Il donne d'un objet une image renversée sur la rétine.

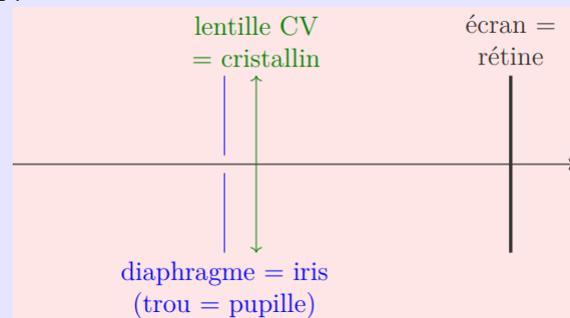
- La rétine est constituée de cellules sensibles à la lumière (les cônes et les bâtonnets). Elle joue le rôle d'un écran.

- Le corps vitreux (ou humeur vitreuse) est une substance gélatineuse d'indice de réfraction 1,336.

- L'ensemble {rétine-nerf optique} code l'image sous la forme d'influx nerveux et l'envoie au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique. Le cerveau interprète le message (retournement de l'image, correction de la distorsion, vision relief).

### Savoir - Modélisation optique de l'œil

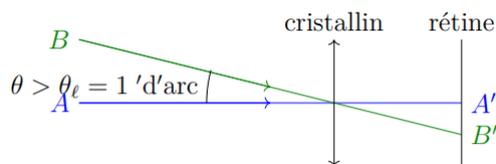
Modélisation optique de l'œil :



#### . Limite de résolution angulaire

Deux points objet  $A$  et  $B$  sont vus distinctement si  $A'$  et  $B'$ , leurs images respectives sur la rétine se forment sur deux cellules de la rétine différentes.

Il faut que  $A'B'$  soit supérieur à la taille d'une cellule de la rétine. Pour cela il faut que l'angle entre les rayons arrivant dans l'œil soit suffisamment grand (la taille de l'œil est fixée).



Résolution angulaire d'un objet lumineux

### Savoir - Citer l'ordre de grandeur de la limite de résolution angulaire de l'œil

On appelle **pouvoir séparateur angulaire de l'œil** l'angle limite sous lequel deux points lumineux peuvent être vus séparés. Il est de **l'ordre de 1' d'arc soit  $(1/60)^\circ$  environ  $3 \times 10^{-4}$  radian** dans de bonnes conditions d'éclairement (ni trop sombre, ni trop lumineux).

### Exercice 11

**Énoncé** : La muraille de Chine fait une épaisseur d'environ 10 m et la distance Terre-Lune est d'environ  $3,84 \times 10^5$  km. Est-ce que la muraille est visible depuis la Lune ?

**Correction** : Depuis la Lune, la grande muraille de Chine est vue avec un angle  $\theta \simeq \tan \theta = \frac{10}{3,84 \times 10^8} = 2,6 \cdot 10^{-8}$  rad, soit un angle plus petit que le pouvoir de résolution de l'œil.

### . Plage d'accommodation



Animation interactive autour de la plage d'accommodation d'un œil. Lien vers : <https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr//optiqueGeo/instruments/correction.php>

### Savoir - Citer l'ordre de grandeur de la plage d'accommodation de l'œil

- L'œil ne peut voir un objet net que si son image se forme sur la rétine.
- Un œil au repos voit net à une distance maximale, notée  $D_m$  correspondant au **punctum remotum (PR)**. Un œil emmétrype (« normal ») voit net sans accommoder à l'infini, son PR se trouve donc à l'infini.
- Pour voir des objets plus proches, **l'œil doit accommoder** : le cristallin se bombe, grâce aux muscles ciliaires, afin de diminuer sa distance focale (il augmente sa vergence). Le plan de mise au point s'avance.
- Le point le plus proche que l'œil peut voir net est le **punctum proximum (PP)**. Le PP correspond à la distance minimale de vision distincte (notée  $d_m$ ). Il vaut en moyenne 25 cm et tend à s'éloigner avec l'âge (presbytie).

## 2. Appareil photographique

### . Modélisation

L'appareil photographique est un instrument d'optique complexe comprenant plusieurs lentilles, miroirs et diaphragmes. Les deux éléments essentiels d'un appareil sont l'objectif et le capteur photosensible. Cependant, on peut comprendre les grands principes de la photographie (en tant que technique) à l'aide de la modélisation simplificatrice de la figure ci-dessous qui en permet une description dans le cadre de l'optique géométrique :

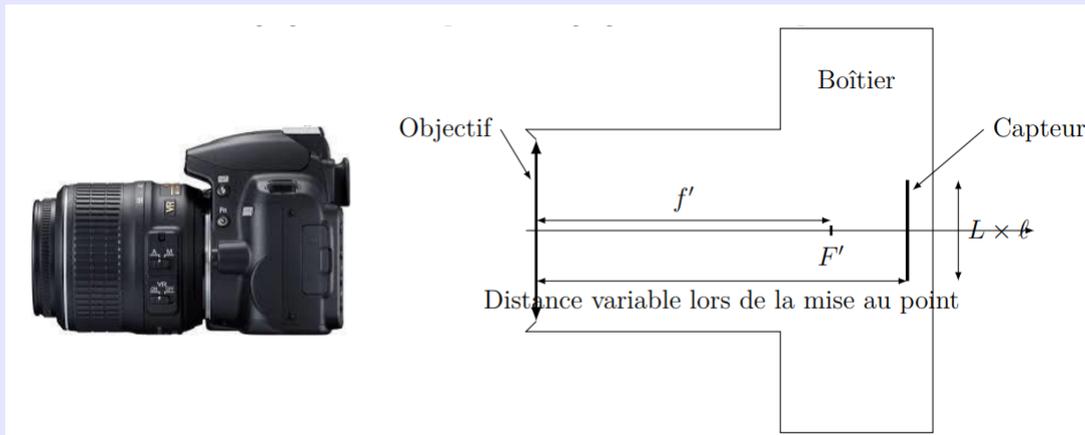
- L'objectif d'un appareil photographique est constitué de plusieurs lentilles et diaphragmes : nous le modélisons comme l'association d'un unique diaphragme circulaire et d'une unique lentille mince convergente. L'objectif est caractérisé par sa focale (c'est-à-dire distance focale)  $f'$  et par le diamètre d'ouverture du diaphragme  $D$ .

• Dans les appareils numériques, le capteur lumineux CCD (charge coupled device) est une matrice de cellules photosensibles : les pixels (picture element). Il est caractérisé par la taille des pixels, le grain noté  $g$  (en référence aux anciens appareils argentiques) et sa dimension  $L \times l$  en pixels. C'est le capteur numérique qui « capte » la lumière lorsque la photo est prise et transforme la lumière en signal électrique.

L'ensemble du dispositif ainsi schématisé admet un axe de révolution, il s'agit donc un système centré. La distance entre l'objectif et le capteur peut varier, entre  $f'$  et  $f' + \delta$ , avec  $\delta$  ce qu'on appelle le tirage de l'appareil photographique. Le réglage de  $d$  correspond au réglage de la mise au point.

### Savoir - Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur

Modélisation optique de l'appareil photo :



### . Profondeur de champ

Pour réaliser une image nette d'un objet situé à une certaine distance de l'objectif, il faut réaliser la mise au point. Avec le modèle du paragraphe précédent, cette opération revient à jouer sur la distance  $d$  entre le capteur et la lentille de l'objectif de sorte que l'image de l'objet soit située sur le capteur.

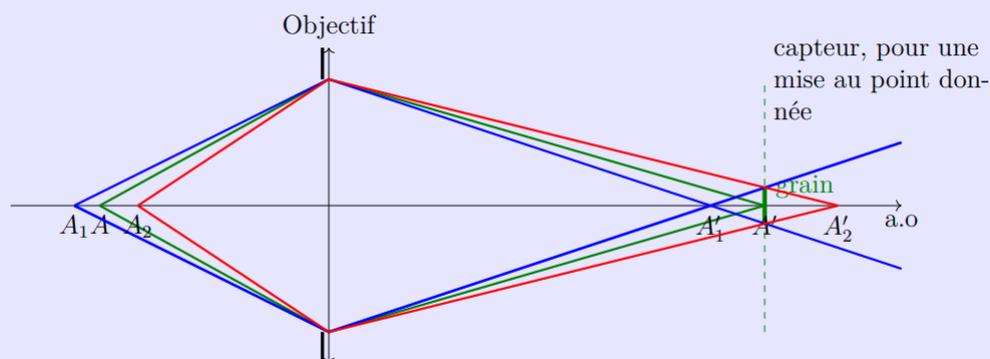
Or le capteur n'est pas ponctuel, mais est constitué de pixels ayant une certaine extension spatiale (le grain  $g$ ). Tant que l'image d'un point objet sur le capteur sera d'une taille inférieure au grain, si l'exposition est suffisante, tout se passera comme si l'image était ponctuelle. Pour une mise au point donnée, on définit la profondeur de champ comme la zone de l'espace dans laquelle tout objet photographié sera net.

### Savoir - Notion de profondeur de champ

On appelle **profondeur de champ (PDC)** la distance entre les deux points objet extrêmes de l'axe optique dont les images sont vues nettement sur le capteur de l'appareil photo, pour une mise au point donnée.

Sur le schéma ci-dessous, la mise au point est effectuée sur  $A$  : le capteur est placé au niveau de  $A'$ , image de  $A$  par l'objectif.

Les objets situés entre  $A_1$  et  $A_2$  sont nets, aux autres positions l'objet est flou, la profondeur de champ est la distance  $A_1A_2$ .

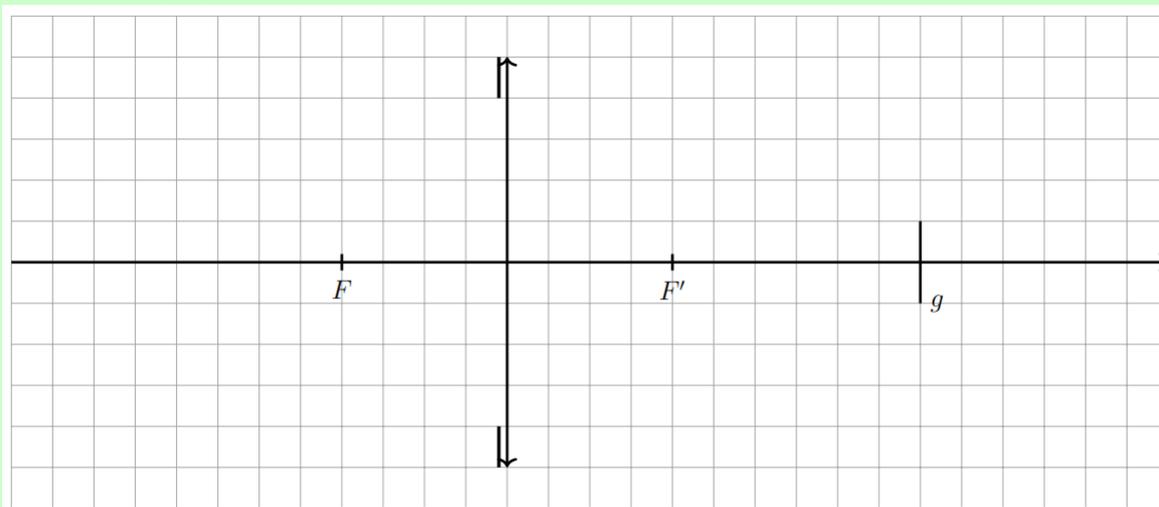


Savoir faire - Exercice 12

Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné d'un appareil photo

**Énoncé :** On souhaite déterminer graphiquement la profondeur de champ dans le cas où l'appareil photo est réglé pour photographier nettement le point  $A$ . On considère un capteur placé dans le plan de  $A'$ , et un pixel de hauteur  $g$  centré sur l'axe optique.

1. Déterminer graphiquement la position du point objet  $A$  conjugué du point image  $A'$  situé sur la cellule du capteur et l'axe optique.



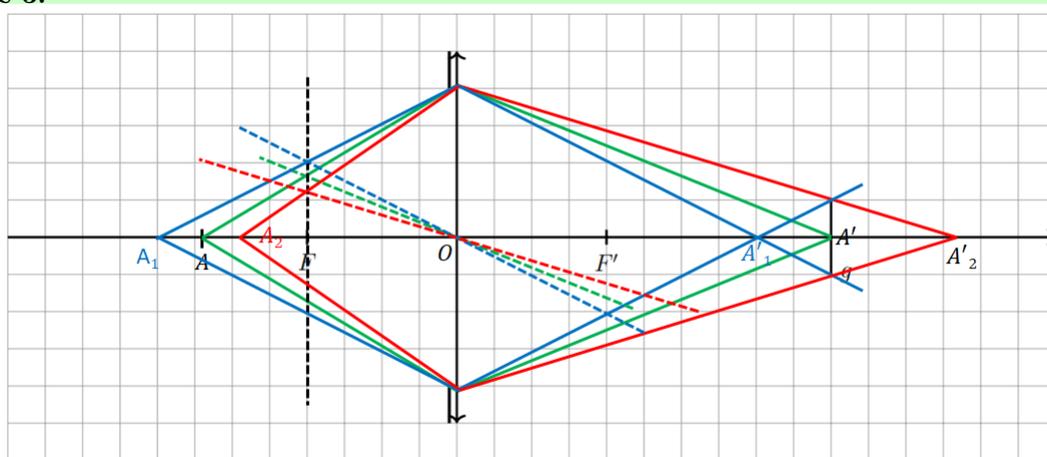
2. Déterminer graphiquement les positions des deux points image extrêmes,  $A'_1$  et  $A'_2$  qui apparaîtront nets sur l'écran.

3. Déterminer graphiquement les positions des deux points objets  $A_1$  et  $A_2$  conjugués par la lentille avec  $A'_1$  et  $A'_2$ .

4. Identifier la profondeur de champ.

**Correction :**

1. & 2. & 3.



4. On en déduit la profondeur de champ qui est la longueur  $A_1A_2 = \overline{A_1A_2} \simeq 2,3 \text{ cm}$

## . Paramètres influençant la formation d'une image (voir TP)

**Savoir - Paramètres influençant la formation d'une image (complément du TP)**

Concernant la **formation d'une image par un appareil photo**, trois paramètres importants peuvent être modifiés :

✓ La **durée d'exposition**  $\tau_{\text{exposition}}$  est la durée pendant laquelle la lumière arrive sur le capteur. L'énergie lumineuse reçue par les capteurs est proportionnelle à la durée d'exposition.

✓ L'ouverture du **diaphragme d'ouverture** est caractérisée par le **nombre d'ouverture**  $NO = \frac{f'}{D}$ , où  $D$  est le diamètre de l'ouverture.

- L'énergie lumineuse est proportionnelle au diamètre de l'ouverture au carré. Ainsi l'énergie reçue par le capteur CCD est d'autant plus élevée que le nombre d'ouverture est faible. L'énergie lumineuse reçue par le capteur CCD est donc proportionnelle à  $\tau_{\text{exposition}} \times D^2$ . La durée d'exposition et l'ouverture du diaphragme doivent être réglées simultanément pour que le capteur CCD reçoive une quantité de lumière convenable.

- La **profondeur de champ** est d'autant plus importante que le diamètre du diaphragme  $D$  est petit.

- Lorsque le diaphragme est « petit », la diffraction peut se produire. Elle aura un effet sur la qualité de l'image dès lors que la tache de diffraction sera de taille supérieure à un pixel du capteur CCD.

✓ La **distance focale** de l'objectif de l'appareil photo (lentille mince convergente) agit sur :

- le **champ angulaire** (champ de vision de la photo) qui est nettement plus large quand la distance focale est petite;

- la **profondeur de champ** qui est d'autant plus grande que la distance focale est petite.

<b>Chapitre 2 - Formation des images</b>		
<b>Savoir</b>	☺	☹
- Notion de stigmatisme rigoureux - Stigmatisme rigoureux (III.1)		
- Relier le stigmatisme approché aux caractéristiques d'un détecteur (III.2)		
- Énoncer les conditions de l'approximation de Gauss et ses conséquences (III.3)		
- Deux types de lentilles minces (IV.1)		
- Définir les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence (IV.2)		
- Grandissement transversal - Formules de conjugaison et de grandissement transversal (IV.4)		
- Condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente (IV.5)		
- Modélisation optique de l'œil (V.1)		
- Citer l'ordre de grandeur de la limite de résolution angulaire de l'œil (V.1)		
- Citer l'ordre de grandeur de la plage d'accommodation de l'œil (V.1)		
- Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur (V.2)		
- Notion de profondeur de champ (V.2)		
- Paramètres influençant la formation d'une image (voir TP) et (V.2)		
<b>Savoir faire</b>		
- Construire l'image d'un objet par un miroir plan (II : ex 1&2)		
- Construction du cheminement d'un rayon émergent ou d'un rayon incident quelconque, construire une image étendue (IV.3)		
- Application à la construction d'images avec une lentille convergente ou divergente (IV.3 : ex 6 & 7)		
- Établir et utiliser la condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente (IV.5 : ex 10)		
- Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné d'un appareil photo (V.2 : ex 12)		