

**IMAGES PHOTOGRAPHIQUES**

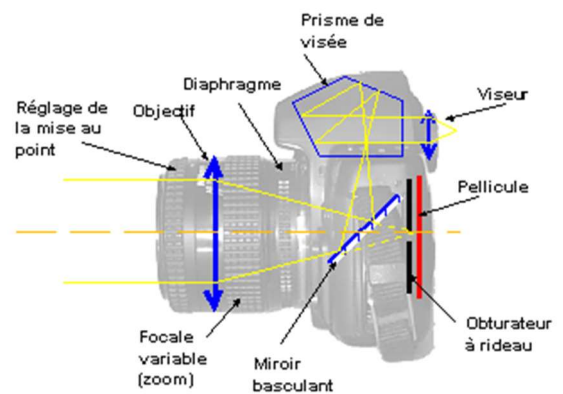
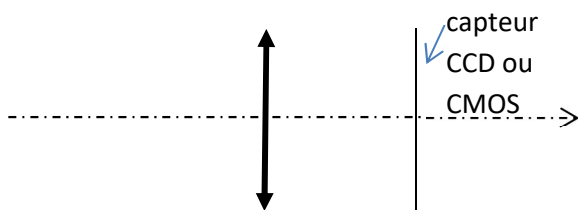
**Extrait du programme PCSI : Approche documentaire :** en comparant des images produites par un appareil photographique numérique, discuter l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image.

**1. Appareil photographique, focale de l'objectif.**

Dans un modèle simple, un appareil photographique doté d'un objectif à focale fixe pourra être représenté par une lentille mince, unique, caractérisée par sa focale  $f'$ , associé à un plan figurant la position du capteur optoélectronique enregistrant les images (CCD ou CMOS). Ce capteur sera caractérisé par sa taille (longueur x largeur) et par le nombre de pixels qu'il comporte (en Mégapixels usuellement).

Les appareils argentiques répondent à la même représentation, si ce n'est que le capteur est remplacé par une pellicule photosensible.

**Schéma de principe d'un appareil photo à visée reflex.**



La mise au point de l'appareil est obtenue en déplaçant l'objectif par rapport au plan du capteur.

Les objets photographiés étant relativement éloignés de l'objectif (par rapport à la distance focale  $f'$ ), les images se formeront dans des plans situés à proximité du plan focal image de l'objectif.

Dans toute la suite, ce document n'aborde pas les questions relatives à l'emploi d'objectif plus élaborés (macrophotographie, zoom téléobjectifs) demandant une modélisation avec plusieurs lentilles (au moins deux).

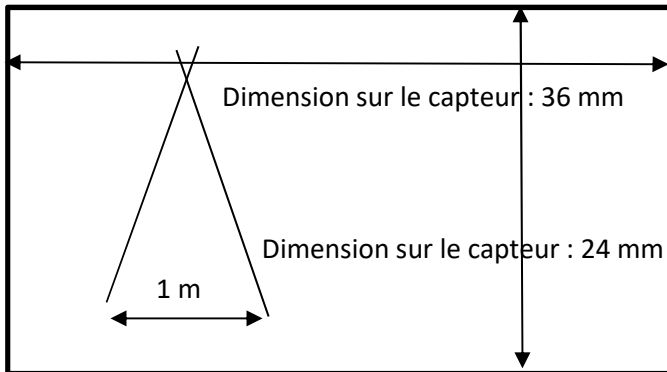
La valeur de focale  $f'$  va notamment conditionner la taille de l'image formée sur le capteur, pour une taille donnée de l'objet. La formule de grandissement :  $\gamma = f' / \overline{FA}$  montre que pour une position donnée la taille de l'image sera proportionnelle à la focale.

**Activité 1 :**



Les deux photographies ci-dessus ont été réalisées à la même distance du sujet, avec des focales respectivement de 28 mm et de 70 mm. En expliquant votre démarche, vérifier le rapport des deux focales et estimer la distance à laquelle la photographie a été prise.

Indications :



la distance entre les rangs de tuteurs est d'environ 1 m, le capteur de l'appareil est de format 24 mm x 36 mm).

## 2. Ouverture et nombre d'ouverture.

L'ouverture d'un objectif photographique est le réglage qui permet d'ajuster le diamètre d'ouverture du diaphragme. Elle est caractérisée par le nombre d'ouverture ou ouverture géométrique, plus fréquemment notée «  $f / N$  ». Ce nombre sans dimension est défini comme le rapport de la focale  $f'$  au diamètre  $d$  de la pupille d'entrée :

$$N = \frac{f'}{D}$$

À focale constante, l'augmentation du nombre d'ouverture est la conséquence de la fermeture du diaphragme : elle a pour effets la réduction de l'éclairement du capteur ou de la pellicule, l'augmentation de la profondeur de champ et, dans une moindre mesure, la réduction des aberrations géométriques et chromatiques, l'augmentation de l'influence de la diffraction. Ces diverses questions seront abordées dans la suite du document.



Les fabricants indiquent toujours l'ouverture utile ou pleine ouverture de l'objectif : elle est fréquemment gravée sur la partie frontale de l'objectif et indique le nombre d'ouverture pour une ouverture maximale du diaphragme ; plus ce nombre est petit, plus l'objectif est lumineux.

## 3. Exposition. vitesse d'obturation.

Les surfaces sensibles, qu'il s'agisse de pellicules argentiques ou de capteurs électroniques, réagissent selon l'exposition lumineuse  $\phi$ , produit de l'éclairement reçu  $E$  et du temps de pose  $\tau$  (défini par la vitesse d'obturation ou durée d'exposition) :  $\phi = E \cdot \tau$ .

Le diaphragme arrête une partie de la lumière quand on le ferme. Il permet de modifier l'éclairement reçu par la surface sensible. Pour une mise au point à l'infini, l'éclairement reçu par le capteur ou la pellicule est proportionnel à la section d'ouverture, donc au carré de diamètre d'ouverture  $d$ .

L'éclairement de la surface sensible est donc inversement proportionnel au carré du nombre d'ouverture  $N$ . L'exposition peut ainsi être modifiée soit par modification de l'ouverture, soit par modification du temps de pose.

- Quand on **augmente l'ouverture**, plus de lumière peut rentrer. Le diaphragme sera ouvert à un plus grand diamètre au déclenchement.

- Quand on **augmente la durée d'ouverture**, **plus de lumière** peut rentrer (donc on *diminue la vitesse d'obturation*, car plus la vitesse est faible, plus le temps est long).

L'**augmentation** de l'*ouverture* ou du *temps d'ouverture* fait rentrer **plus de lumière**, et donc **augmente l'exposition**.

### La vitesse d'obturation

La vitesse d'obturation, définit la **durée pendant lequel l'obturateur s'ouvre** au déclenchement, c'est-à-dire le temps pendant lequel votre capteur est exposé à la lumière.

Mais ce paramètre a aussi d'autres incidences, en particulier sur la netteté de la photographie.

### Le flou de bougé :

il est dû **aux mouvements du photographe**. Le déplacement de l'appareil lors de la prise de vue amène l'image géométrique d'un point donné à se déplacer sur la surface du capteur. Le phénomène est d'autant plus important que la focale est grande.

### Le flou de sujet :

À l'inverse, quand votre appareil est relativement stable mais que votre **sujet bouge**, le sujet pourra être flou sur le cliché. Ce **flou de sujet** est influencé par 2 facteurs :

- la **vitesse de mouvement de votre sujet** : plus il bouge vite, plus vous aurez de flou de sujet et inversement
- la **vitesse d'obturation** : plus elle est faible, plus vous obtiendrez de flou de sujet et inversement.

C'est au photographe de choisir quelle vitesse d'obturation utiliser, selon la photo souhaitée. Tout dépend si l'on veut figer un sujet rapide, comme par exemple ce kayakiste en pleine descente (prise à 1/4000<sup>ème</sup> de seconde),



Notons que la quantité de lumière a donc été fortement réduite, et que le photographe a dû pousser l'ouverture à 2.8 et les ISO à 800 pour avoir une photo suffisamment lumineuse !

ou donner une impression de mouvement comme c'est le cas avec les bras de ce batteur (photo prise à 1/50<sup>ème</sup> de seconde).

Prise à 1/50<sup>ème</sup>, cette photo permet de garder la scène relativement nette tout en créant un flou de sujet sur les bras du batteur qui retranscrit l'impression de mouvement rapide de ses bras.



### Activité 2 :

Deux photographies (1) et (2) sont prises avec la même focale  $f'$ , et des nombres d'ouverture  $N$  de valeurs respectives 2,8 et 16.  $N$  est défini comme le rapport  $N = f'/D$  où  $D$  est le diamètre d'ouverture de l'appareil. Les deux photos sont identiquement exposées pour des durées d'exposition  $\tau$  respectives 1/125 s et 1/4 s.

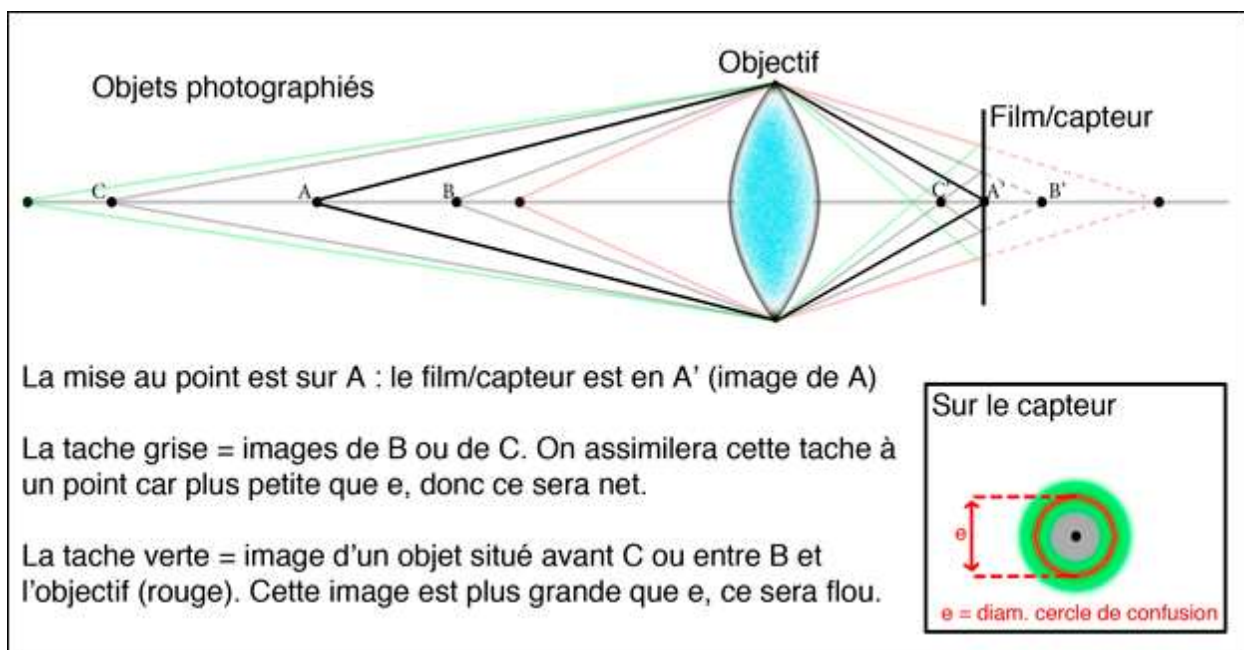
Quelle est la relation entre  $\tau$  et le diamètre d'ouverture  $D$  ? En déduire que la quantité  $\tau/N^2$  gardera ici une valeur quasiment constante. Vérifier numériquement.

#### 4. Profondeur de champ

La profondeur de champ est la proportion du cliché qui va être nette. Si la profondeur de champ est **grande**, la **majorité** (voire la totalité) de l'image sera **nette**, si la profondeur de champ est **faible**, seule une **petite partie** de l'image sera **nette**.

Quand on fait la mise au point de l'appareil sur un point de l'objet, son image se forme sur le capteur. Chaque élément ponctuel de l'objet est restitué par un point image. L'image d'un point situé hors du plan conjugué du capteur est une tache qui, si elle est suffisamment petite, sera perçue comme quasi-ponctuelle. Elle doit avoir une taille inférieure à celle du **cercle de confusion** (dont le diamètre, noté  $e$ , dépend du format du capteur).

Des objets, placés un peu devant ou derrière le plan de mise au point situé en A (comme les points B et C sur le schéma ci-dessous) formeront des images nettes sur le capteur dans la mesure où leurs taches resteront plus petites que  $e$  (diamètre du cercle de confusion). La netteté s'étendra alors devant et derrière le plan de netteté : c'est la profondeur de champ.



Des objets plus éloignés du plan de netteté (placés au-delà de l'intervalle [CB]) sur l'axe optique donneront des images trop grandes sur le capteur (comme on peut le constater sur le schéma), elles ne seront donc pas nettes : on dit qu'elles sont hors profondeur de champ.

En réalité, les rayons parvenant jusqu'au capteur sont limités par la présence d'un diaphragme d'ouverture (et non par le diamètre de l'objectif). Quand on ferme le diaphragme, les rayons lumineux s'inclinent davantage, et forment donc des taches plus petites, suffisamment pour être perçue comme nette. C'est pourquoi la profondeur de champ est donc plus étendue quand on ferme le diaphragme...



### 5. Diffraction.

La diffraction est constitutive de la nature ondulatoire de la lumière. La lumière passant par l'ouverture du diaphragme est diffractée. Plus l'ouverture est faible, plus le phénomène sera sensible.

En photographie, la diffraction influe sur la netteté de l'image, si le diamètre de la tache produite est supérieur au cercle de confusion admissible elle devient perceptible et nuit à la netteté. Si dans un premier temps la fermeture du diaphragme compense les aberrations optiques, une ouverture trop petite générera une diffraction trop importante. L'ouverture est généralement limitée à f/16 ou f/22.



ouverture f/5.6



ouverture f/22

#### Activité 3 :

Le diaphragme est un élément essentiel dans la maîtrise de la prise de vue. Son réglage agit directement sur la profondeur de champ. À focale et distance de mise au point identiques, la fermeture du diaphragme augmente la profondeur de champ et contribue à la netteté de la photographie. Ceci reste vrai jusqu'à l'apparition des phénomènes de diffraction.

Les deux premières photographies montrent l'influence du diaphragme sur l'étendue de la zone de netteté. La première a été prise avec une grande ouverture, la seconde avec une petite ouverture. La vitesse d'obturation a été ajustée en conséquence mais tous les autres paramètres sont restés identiques.



Diaphragme ouvert    Diaphragme fermé

1. Expliquer ce résultat par un schéma, en considérant un point objet A sur lequel la mise au point est parfaite et un point-objet B situé derrière A (c'est à dire plus éloigné de l'appareil). On note  $\delta$  le diamètre de la tache-image formée par B et l'on note  $e$  le diamètre du cercle de confusion.

2. A quelle condition l'image B' de B pourrait-elle apparaître nette ? Où se forme l'image A' de A ? La photographie a été prise à une distance de 3,0 m avec une focale  $f' = 70$  mm. Montrer que l'on peut considérer que  $OA' \approx f'$ . Evaluer précisément  $\overline{F'A'}$ .
3. Expliquer qualitativement ce qui se passe si B s'éloigne de A (en s'éloignant de l'objectif). Comment B' se déplace-t-il ? Quelle conséquence visible cela donne-t-il sur les photos ?
4. Etablir la relation reliant  $\delta$ , D et les distances B'A' et OB', O étant le centre optique de l'objectif. Commenter le résultat, en particulier la relation existant entre D et  $\delta$ . Comment D influencera-t-il la profondeur de champ ?  
Calculer numériquement la distance FB en limite de champ pour  $N = 2,8$  et  $N = 16$ .  
On donne  $e = 25 \mu\text{m}$  et l'on pourra considérer que  $OB' \approx OA' \approx f'$ . Conclure.

#### Activité 4 :

Le phénomène de diffraction est-il susceptible de limiter la netteté de l'image pour une faible ouverture du diaphragme ( $N = 16$ ) dans le cas de la seconde image proposée dans l'activité précédente ?

*Indications : focale  $f'$  de l'objectif = 70 mm ; longueur d'onde moyenne du visible :  $\lambda = 550$  nm ; une pupille circulaire met en jeu un angle caractéristique de diffraction  $\vartheta \approx 1,22\lambda / D$ . Le capteur CCD est un rectangle de 24 mm x 36 mm comportant 15 Mpixels. Evaluer un ordre de grandeur de la taille des pixels du capteur CCD.*

#### Activité 5 :

Deux photos d'une même scène sont prises toutes les deux du même endroit en faisant la mise au point sur le personnage, respectivement avec un objectif grand angle  $f' = 28$  mm et avec un téléobjectif de focale  $f' = 200$  mm. Le nombre d'ouverture est identique pour les deux.



Courte focale (28 mm)  
Grande profondeur de champ



Longue focale (200 mm)  
Peu de profondeur de champ

Photos prises avec la même valeur de diaphragme et du même point de vue.

1. Quel constat fait-on quant aux champs angulaires des deux clichés ?
2. On envisage, pour simplifier le problème, le cas d'une mise au point sur l'infini (sur les photos, cette mise au point était à une distance relativement grande, mais pas à l'infini). Evaluer **l'angle d'ouverture du champ de vision**  $\alpha$ , dans un plan horizontal, sur le cas des deux objectifs étudiés. *Le capteur CCD est un rectangle de 36 mm x 24 mm.*
3. La mise au point étant à distance finie, expliquer qualitativement, par un schéma, pourquoi la profondeur de champ est plus grande pour la focale de 28 mm que pour la focale de 200 mm.

### 5. Distance hyperfocale.

- En faisant la mise au point sur l'infini, le premier plan net correspond à la distance hyperfocale  $h$ .
- En faisant la mise au point sur la distance hyperfocale, le photographe obtient une profondeur de champ s'étalant de la moitié de cette distance à l'infini.

Cette dernière propriété permet de concevoir des appareils très simples sans mise au point : ils prendront des photographies nettes dans l'intervalle situé de  $h/2$  à l'infini.

L'ouverture du diaphragme joue sur la valeur de l'hyperfocale  $h$  :

$$h = \frac{f'^2}{N \cdot e}$$

où  $f'$  est la distance focale de l'objectif,  $e$  le diamètre du cercle de confusion admissible, et  $N$  le nombre d'ouverture.

### Activité 6 :

#### Prise de vue en hyperfocale

La mise au point est faite à l'infini. On cherche la position d'un point objet  $H$  de l'axe optique produisant sur le capteur une tache de diamètre  $\delta_{\max}$  acceptable ( $\delta_{\max} = e$ , diamètre du cercle de confusion).

1. Faire un schéma de la situation.
2. Exprimer la relation liant  $\delta_{\max}$ , le diamètre  $D$  du diaphragme et les positions  $\overline{F'H'}$  et  $\overline{OH'}$  de l'image géométrique de  $H$  par rapport au foyer  $F'$  et au centre  $O$  de l'objectif.  
En déduire la **distance hyperfocale**  $h$ , définie comme la distance minimale à laquelle des objets situés devant l'objectif vont avoir une image nette.  
*Indication : Penser au théorème de Thalès ! On pourra employer la relation de conjugaison selon Newton, et l'on tiendra compte de l'approximation  $h \gg f'$ .*  
Calculer cette distance hyperfocale  $h$  pour  $f' = 3,85$  mm avec  $N = 2,8$  et  $\delta_{\max} = 15$   $\mu\text{m}$  (smartphone).
3. L'appareil est mis au point sur l'hyperfocale. Par un schéma, montrer que l'intervalle des positions pour lequel on aura une image nette s'étend jusqu'à l'infini.
4. On note  $K$  le point de l'axe optique le plus proche de l'objectif conduisant à une image nette lorsque l'appareil est mis au point sur la distance hyperfocale. On notera  $p = \overline{OH}$  ;  $p' = \overline{OH'}$   
 $q = \overline{OK}$  ;  $q' = \overline{OK'}$  ( $K'$  étant l'image géométrique de  $K$ ). Etablir que  $q' = p' \cdot (1 + e/D)$
5. En combinant les relations de conjugaison écrites pour les conjugaisons  $H \rightarrow H'$  et  $K \rightarrow K'$ , montrer qu'en réglage hyperfocal, le point le plus proche de l'objectif conduisant à une image nette est de position  $K$  telle que  $OK = h/2$ .

*Indication : Ecrire les relations de conjugaison selon Descartes pour les points  $H$  et  $K$ . Utiliser l'approximation  $h \gg f'$  et donc  $p'$  proche de  $f'$ .*

*Remarque : sur des appareils plus perfectionnés, la mise au point sur la distance hyperfocale, préalablement située par l'opérateur à l'aide d'une mise au point à l'infini, permet d'optimiser ensuite la profondeur de champ sur le cliché.*