

Appareil photo numérique

Par groupe de trois ou exceptionnellement quatre, vous exploiterez les documents proposés dans ce dossier pour expliquer l'influence de la focale, de la durée d'exposition et du diaphragme sur la formation de l'image obtenue par un appareil photo numérique. Vous pouvez compléter ces documents si vous le souhaitez, que ce soit par des recherches personnelles ou par vos propres photos si vous êtes expert en la matière. Pour vous guider dans votre travail, des questions sont proposées en dernière page de ce dossier, mais l'objectif **n'est pas** d'apporter une réponse question par question comme pour un exercice.

La présentation de votre travail se fera par oral pendant une durée d'environ 10 minutes par groupe. Vous vous appuyerez sur une présentation informatique de type Power Point ou Google Slides. L'ensemble des figures proposées dans les documents sont disponibles sous forme d'une archive zip sur le site de la classe. Pour toute formule mathématique, merci d'utiliser un éditeur d'équation.

Le dossier se compose de six documents. Le premier présente la modélisation de l'appareil photo sur laquelle s'appuient tous les autres documents. Les documents 2, 3 et 4 présentent diverses notions de photographie en les reliant au modèle du document 1. Les documents 5 et 6 s'apparentent quant à eux à des extraits de fiches techniques d'appareils photo.

Document 1 : Modélisation d'un appareil photographique numérique

L'appareil photographique est un instrument d'optique complexe comprenant plusieurs lentilles, miroirs et diaphragmes. En dépit de cette complexité, les grands principes techniques régissant la prise d'une belle photo peuvent se comprendre à l'aide de la modélisation simplifiée de la figure 1. Les deux éléments essentiels d'un appareil photo sont l'objectif et le capteur photosensible.

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

Dans les appareils numériques modernes, le capteur lumineux CCD¹ (« charge coupled device ») est une matrice de cellules photosensibles : les pixels (« picture element »). Il est caractérisé par ses dimensions $L \times \ell$ et la taille des pixels g , appelée le **grain** en référence aux anciens appareils argentiques.

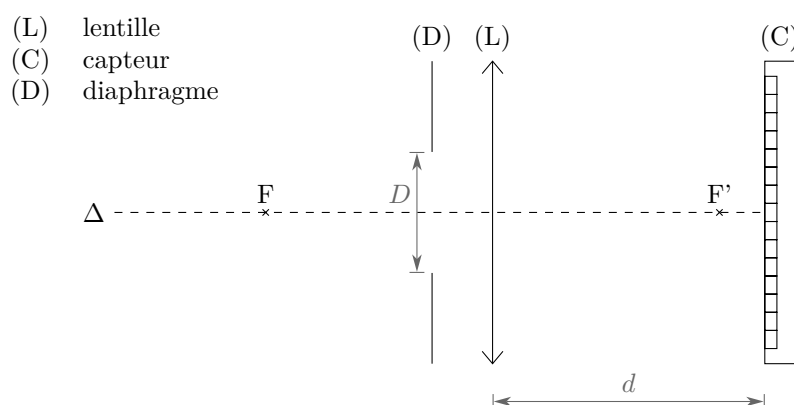


Fig. 1 – Schéma de principe d'un appareil photographique numérique. Un appareil photo se modélise comme l'association d'un diaphragme de diamètre D , c'est-à-dire une ouverture circulaire, d'une lentille convergente de distance focale image f' , et d'un capteur CCD.

L'appareil photographique ainsi modélisé est un système centré d'axe optique Δ . Notons que la distance objectif-capteur, notée d , peut varier entre f' et $f' + \delta$. Cette distance δ est appelée **tirage** de l'appareil photographique. En terme de photographie, régler la mise au point de l'appareil (voir document 4) revient à régler cette distance d , bien que dans un véritable objectif, la mise au point se fasse par déplacement d'un jeu de lentilles.

1. Un capteur CCD est un transducteur produisant un courant électrique dont l'intensité est une fonction connue de l'énergie lumineuse reçue.

Document 2 : Champ angulaire

Le premier des choix lors de la prise d'une photo est celui ... de ce qui est photographié ! Plus précisément, il s'agit de choisir la fraction de l'espace dont l'image sera formée sur le capteur CCD, ce qui se décrit par le **champ angulaire**, noté α .

Pour le définir simplement, considérons la mise au point faite sur l'infini : dans le modèle représenté figure 1, cela signifie que la distance d entre la lentille et le capteur est égale à la focale f' de la lentille. Le champ angulaire est défini comme l'écart d'inclinaison entre les rayons les plus inclinés issus de points objets ayant une image sur le capteur, ce qui est représenté figure 2.

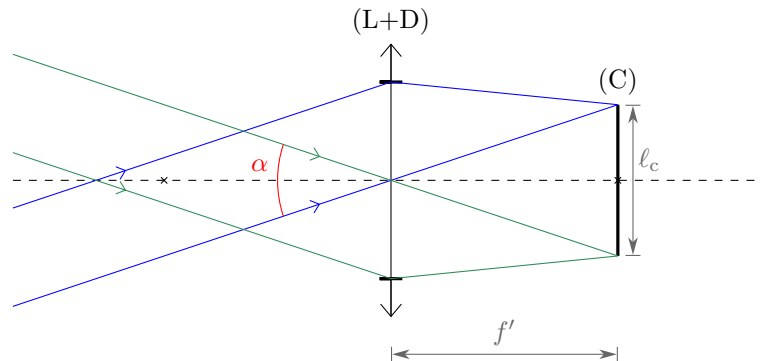


Fig. 2 – Champ angulaire pour une mise au point à l'infini. Tous les points objets situés dans le cône d'angle au sommet α auront une image sur le capteur. Ce cône se construit à partir des rayons les plus inclinés pouvant converger sur le capteur.

Le champ angulaire dépend de la focale f' et de la taille totale du capteur, décrite par une longueur ℓ_c , en général sa diagonale, par

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{\ell_c}{2f'}.$$

Dans un appareil photo standard, la taille ℓ_c du capteur est fixée mais il est possible de changer la focale de l'objectif. En modifiant ainsi le champ angulaire, on réalise un zoom optique, comme le montre la série de photographies 3.

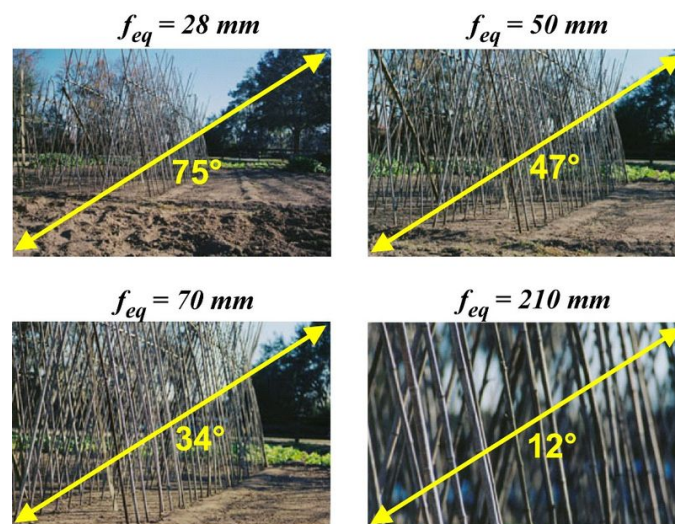


Fig. 3 – Champ angulaire et distance focale. Ces photographies sont prises avec des réglages identiques, si ce n'est la distance focale. Plus la focale (ici la focale équivalente) est courte, plus le champ angulaire est large. Extrait du site <http://physiquelumiere.canalblog.com/>.

Néanmoins, la taille de la matrice CCD varie en fonction des appareils et il est d'usage de caractériser le champ angulaire par une **focale équivalente** f'_{eq} , qui correspond à la focale qui donnerait le même champ angulaire pour une matrice CCD de taille 24×36 mm, celle des pellicules argentiques. À l'exception de quelques appareils reflex haut de gamme, les capteurs sont de taille inférieure à cette référence. Il en résulte que la focale équivalente est plus grande que la vraie focale f' affichée sur l'appareil. De même, le rapport d'aspect des matrices CCD dépend de l'appareil photo considéré, si bien que les comparaisons privilégient la longueur diagonale de la matrice à sa hauteur ou sa largeur. Ainsi, une matrice de format $15,6 \times 23,6$ mm, et donc de diagonale 28,3 mm aura une focale équivalente $f'_{eq} = 1,53 f'$.

Document 3 : Exposition d'une photographie

L'**exposition** désigne la « quantité » totale de lumière, c'est-à-dire l'énergie lumineuse, reçue par le capteur pendant la prise de vue. Elle dépend du temps de pose, de la sensibilité ISO et de l'ouverture qui sont présentés dans ce document. Obtenir une photographie bien exposée demande d'optimiser le réglage combiné de ces trois paramètres.

Temps de pose

Le temps de pose τ , appelé aussi durée d'exposition ou vitesse d'obturation, est le temps durant lequel l'obturateur du diaphragme est ouvert et laisse passer la lumière. C'est donc la durée pendant laquelle le capteur va recevoir de la lumière. En photographie, ce temps s'exprime généralement en secondes ou fractions de secondes. Les deux figures qui suivent permettent de comprendre l'influence du temps de pose sur une photographie.

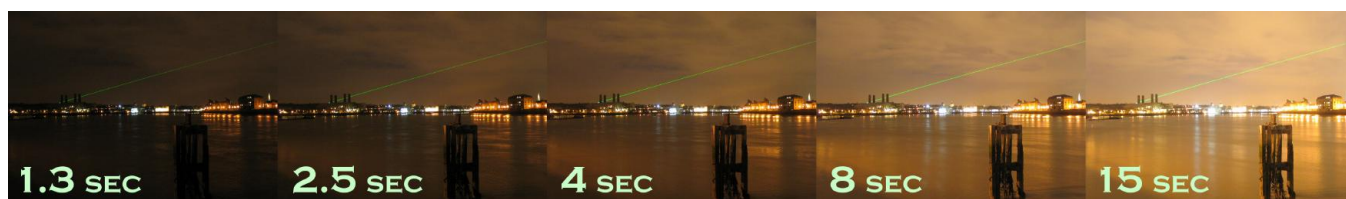


Fig. 4 – Influence du temps de pose sur la luminosité globale. Photographies de nuit de Greenwich, à Londres, avec différentes durées d'exposition. Extrait de Wikipedia.



Fig. 5 – Influence du temps de pose sur le rendu des mouvements. Photographies d'une rivière pour différentes durées d'exposition. Les temps de pose exprimés en secondes valent respectivement 1, 1/3, 1/30, 1/200 et 1/800. Extrait de Wikipedia.

La sensibilité ISO

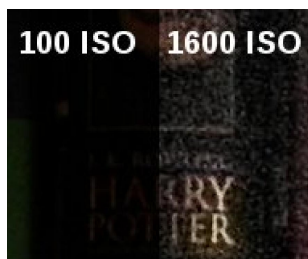


Fig. 6 – Influence de la sensibilité ISO. Les deux photos sont prises dans les mêmes conditions, et avec tous les réglages identiques, si ce n'est la sensibilité. Extrait du site <http://www.lesnumeriques.com/>.

La **sensibilité ISO** mesure la sensibilité à la lumière des capteurs numériques, c'est-à-dire l'amplitude du signal que ceux-ci délivrent pour une quantité de lumière reçue fixée. Plus le capteur est sensible, plus le signal qu'il délivre est grand alors même qu'il reçoit peu de lumière. Un capteur très sensible permet donc de prendre une photo avec des détails dans un contexte sombre, mais sature et donne une photo surexposée dans un contexte plus lumineux. Deux exemples de photos d'un même objet prises dans les mêmes conditions mais avec une sensibilité différentes sont représentées la figure 6.

L'échelle ISO doit son nom à l'Organisation Internationale de Normalisation (« International Organization for Standardization ») qui publie les normes la définissant. Plus le nombre ISO est élevé, plus la sensibilité de la surface est grande ce qui permet des photographies de très basse luminosité. Les valeurs classiques de sensibilité ISO sont 50, 100, 200, 400, 800, 1600 et 3200.

Dans les anciens appareils argentiques, la sensibilité dépendait de la pellicule photographique. Pour un appareil numérique, elle résulte de l'amplification du signal électrique recueilli, ce qui peut générer du bruit et dégrader l'image. L'effet est souvent visible sur des photos de nuit lorsque le réglage de l'appareil est automatique.

Ouverture du diaphragme

L'ouverture D est traditionnellement exprimée à l'aide du **nombre d'ouverture de l'objectif** N , défini comme le rapport entre la focale et l'ouverture de l'appareil photo, $N = f'/D$, soit $D = f'/N$.

À focale fixée, le diaphragme est d'autant plus fermé que le nombre d'ouverture est grand. Les nombres d'ouverture utilisés couramment sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

N	1	1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22	32
-----	---	-----	---	-----	---	-----	---	----	----	----	----



Fig. 7 – Exemples d'ouverture. Extrait du site <http://www.tutos-photo.com/>

Pour passer d'une valeur de N à celle qui lui est supérieure, on multiplie sa valeur par $\sqrt{2}$. Ainsi, lorsqu'on double le temps d'exposition, il faut augmenter N d'un cran pour retrouver les mêmes conditions d'exposition. L'indication qui s'affiche sur l'écran de l'appareil photo est généralement de la forme f/N , f signifiant « focale ». Des exemples sont donnés sur la figure 7.

Document 4 : Mise au point et profondeur de champ

Prendre une photo nette d'un objet situé à une certaine distance de l'appareil exige de réaliser la **mise au point** de l'objectif. Dans le modèle du document 1, 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. Néanmoins, la mise au point permet d'obtenir la netteté pas seulement sur un seul plan de front mais pour tout plan de front se trouvant dans une zone de l'espace de profondeur p appelée **profondeur de champ**.

L'existence d'une profondeur de champ est due au fait que les pixels ne sont pas ponctuels, mais ont une certaine extension spatiale appelée grain g . Tant que l'image d'un point objet A_1 sur un pixel est d'une taille inférieure au grain (et si l'exposition est suffisante), le pixel n'est pas en mesure de la distinguer d'une image ponctuelle. Ainsi, le plan de front dans lequel se trouve le point objet A_1 apparaîtra net sur la photo. Cette explication est illustrée sur la figure 8.

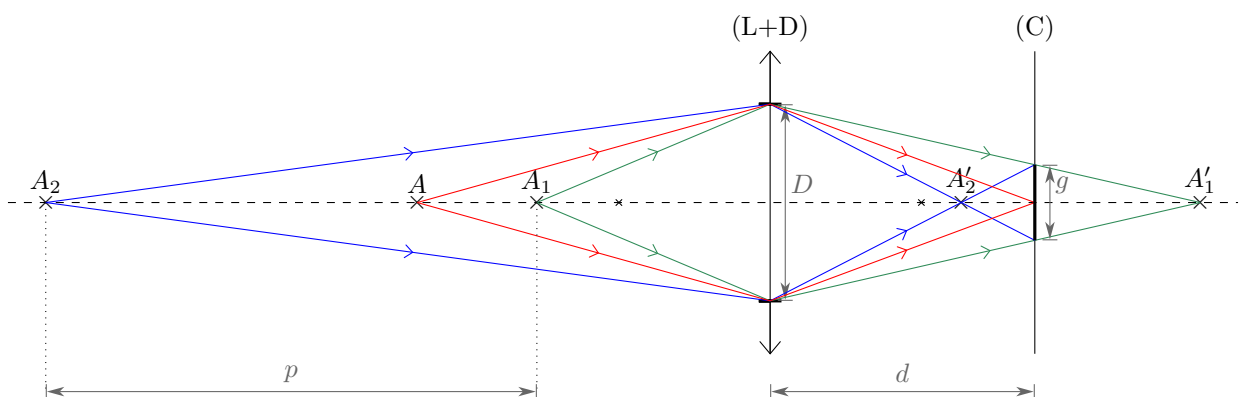


Fig. 8 – Mise au point et profondeur de champ. Le diaphragme et la lentille sont supposés dans le même plan. La mise au point d est réalisée pour l'objet A situé à la distance L de l'objectif. Tous les objets situés entre A_1 et A_2 auront une image sur le pixel représenté de taille inférieure ou égale au grain g , si bien que toutes ces images apparaîtront nettes sur la photo. La profondeur de champ p est la distance entre ces deux points.

Une étude quantitative permet de montrer que

$$p \simeq 2gN \frac{L^2}{f'^2}$$

où L est la distance de mise au point, c'est-à-dire la distance entre le centre optique de l'objectif et le point A sur lequel est fait la mise au point. Il est important de remarquer qu'à focale et distance de mise au point fixées (donc à taille de l'image sur le capteur CCD fixée), c'est le nombre d'ouverture qui détermine complètement la profondeur de champ. Plus le diaphragme est ouvert, plus la profondeur de champ est faible, ce dont on peut se rendre compte à partir de la figure 8. Cet effet est illustré sur la figure 9.



Fig. 9 – Ouverture et profondeur de champ. Les photos sont prises dans les mêmes conditions, en faisant la mise au point sur le Playmobil central. Tous les réglages sont identiques, seule l'ouverture du diaphragme change. Extrait du site <http://www.emmanuelgeorjon.com/>.

Document 5 : Taille des matrices CCD

La façon dont la taille des capteurs CCD est exprimée est particulièrement compliquée pour une chose aussi simple. Par une habitude héritée de la télévision à tube, on note en effet la taille du cercle d'image en fractions de pouces, le capteur occupant une partie de ce cercle d'image. Pour une fois, nous ne chercherons pas à comprendre et nous nous contenterons répertorier ci-dessous les tailles de matrices CCD les plus courantes.

Nom standard	Diagonale	Dimensions	Nom standard	Diagonale	Dimensions
1/2,5"	7,18 mm	4,29 × 5,76 mm	4/3"	21,6 mm	13,0 × 17,3 mm
1/2,3"	7,7 mm	4,62 × 6,16 mm		24,8 mm	13,8 × 20,7 mm
1/2"	8 mm	4,80 × 6,40 mm	APS	à	à
1/1,7"	9,5 mm	5,70 × 7,60 mm		28,4 mm	15,8 × 23,6 mm
1/1,6"	10 mm	6,00 × 8,00 mm	24 × 36	43,3 mm	24,0 × 36,0 mm

Document 6 : Extrait d'une notice d'appareil photo

Pixels efficaces de l'appareil : 10 100 000 pixels

Capteur d'image : 1/2.33" DCC, nombre total de pixels 10 700 000, filtre couleur primaire

Objectif : Zoom optique 18×, $f = 4,8 \text{ mm}$ à $86,4 \text{ mm}$
équivalent pour une pellicule photo de 35 mm : 27 mm à 486 mm

Pistes pour construire votre présentation

- 1 - Dans le modèle présenté figure 1, est-il utile de pouvoir mettre le capteur devant le plan focal image, c'est-à-dire prendre $d < f'$?
- 2 - Réaliser deux schémas pour montrer que le champ angulaire augmente lorsque la focale diminue.
- 3 - Expliquer le calcul donné en exemple de la focale équivalente à la fin du document 2.
- 4 - Sachant que la quantité de lumière qui pénètre dans l'appareil est proportionnelle à la surface de l'ouverture, expliquer pourquoi les nombres d'ouvertures sont choisis comme une suite géométrique de raison $\sqrt{2}$.
- 5 - Justifier la phrase du document 2 indiquant que « lorsqu'on double le temps d'exposition, il faut augmenter N d'un cran pour retrouver les mêmes conditions d'exposition ».
- 6 - Expliquer en quelques phrases pourquoi il est plus difficile d'obtenir une photographie nette de nuit que de jour.
- 7 - Pourquoi mieux vaut-il éviter d'utiliser le zoom numérique ?
- 8 - Réaliser deux schémas pour montrer que la profondeur de champ augmente lorsque la focale diminue.
- 9 - Estimer la taille d'un pixel de l'appareil dont la notice figure document 6.
- 10 - On suppose que cet appareil a sa mise au point réglé à l'infini. Comparer la limite de résolution due à la diffraction pour une valeur de N donnée et celle due à la taille du pixel. On indique que la figure de diffraction par un trou circulaire de diamètre D à une distance d du trou a pour rayon $r \simeq 1,22 \lambda d/D$. À quelle condition la diffraction intervient-elle dans la limite de résolution ? En déduire les valeurs de N pour lesquelles la diffraction deviendrait le facteur limitant. Conclure.