

Appareil photo numérique

L'objectif de ce dossier documentaire est d'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. Une version couleur du dossier est en ligne sur le site de la classe dans la rubrique consacrée aux DM. Comme toujours, vous êtes invités à porter une attention particulière à la rédaction et **au soin de votre copie**. C'est particulièrement critique concernant les constructions géométriques. Les numéros des questions doivent être mis en évidence et les résultats encadrés.

Travailler avec cours et TD ouverts est **chaudement recommandé** : il s'agit d'un entraînement, pas d'une évaluation. Utiliser votre calculatrice, Geogebra ou encore Python est **possible**, et peut parfois vous aider.

Travailler en groupe est **autorisé** mais le travail de rédaction doit être individuel. En cas de besoin, **n'hésitez pas à me poser des questions**, à la fin d'un cours ou par mail. Je rappelle également qu'un travail de groupe est un travail à plusieurs, et pas le travail d'une personne recopié plusieurs fois.

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.

Questions

- 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 optiques soignés illustrant l'influence de la focale sur le champ angulaire, toutes choses égales par ailleurs.
 - 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 - Réaliser **deux** schémas optiques soignés illustrant l'influence de l'ouverture D sur la profondeur de champ, toutes choses égales par ailleurs (notamment la focale).
 - 7 - Quel est le principal problème qui se pose lorsque l'on prend une photo de nuit plutôt que de jour ? Lister les trois solutions techniques permettant de le contourner. Quel impact non souhaitable ces solutions ont-elles sur la qualité de l'image ?
 - 8 - **Question de synthèse.** Construire un tableau récapitulatif dans lequel vous indiquerez l'influence des trois paramètres focale, durée d'exposition et ouverture du diaphragme sur les caractéristiques de l'image que sont le champ angulaire, l'exposition et la profondeur de champ. *Les définitions des différents termes apparaissant dans la question et le tableau réponse constituent le paragraphe IV.3 du cours O4.*
- Les dernières questions ne sont obligatoires que pour les étudiants ayant une note supérieure à 10 au DS 2.** Elles abordent l'importance de la diffraction dans la formation des images.
- 9 - Quelle partie de l'appareil photo pourrait diffracter la lumière ?
 - 10 - Estimer la taille g d'un pixel de l'appareil dont la notice figure document 6. À quelle condition la diffraction intervient-elle dans la limite de résolution ?

On indique que la figure de diffraction par un trou circulaire de diamètre D à une distance d du trou a pour rayon $r \simeq 1,22 \lambda d/D$.

- 11 - Est-il utile de réduire la taille des pixels du capteur ?

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.

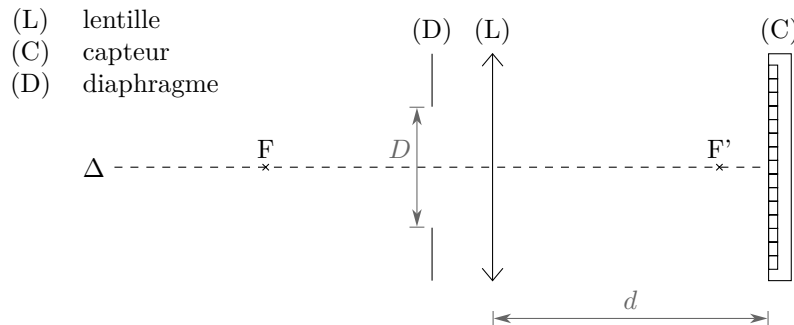


Figure 1 – Schéma de principe d'un appareil photographique numérique. Un appareil photo se modélise comme l'association d'un diaphragme de diamètre D , c'est-à-dire une ouverture circulaire, d'une lentille convergente de distance focale image f' , et d'un capteur CCD.

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.

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.

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.

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** $f'_{\text{éq}}$, 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 $f'_{\text{éq}} = 1,53 f'$.

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

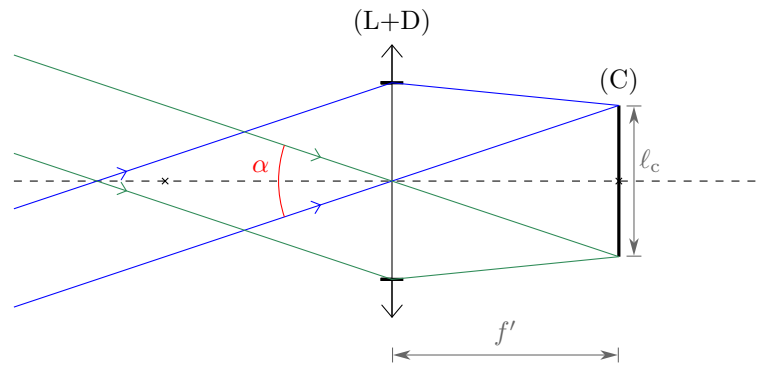


Figure 2 – Champ angulaire pour une mise au point à l'infini. Tous les points objets situés dans le cône d'angle au sommet α auront une image sur le capteur. Ce cône se construit à partir des rayons les plus inclinés pouvant converger sur le capteur.

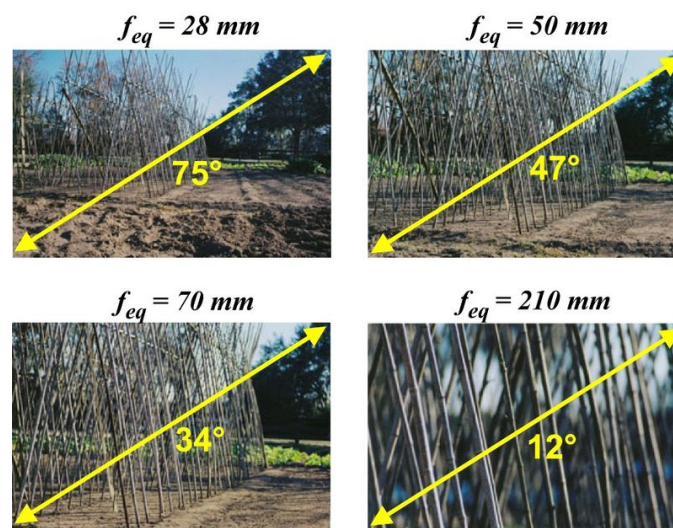


Figure 3 – Champ angulaire et distance focale. Ces photographies sont prises avec des réglages identiques, si ce n'est la distance focale. Plus la focale (ici la focale équivalente) est courte, plus le champ angulaire est large. Extrait du site <http://physiquelumiere.canalblog.com/>.

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.

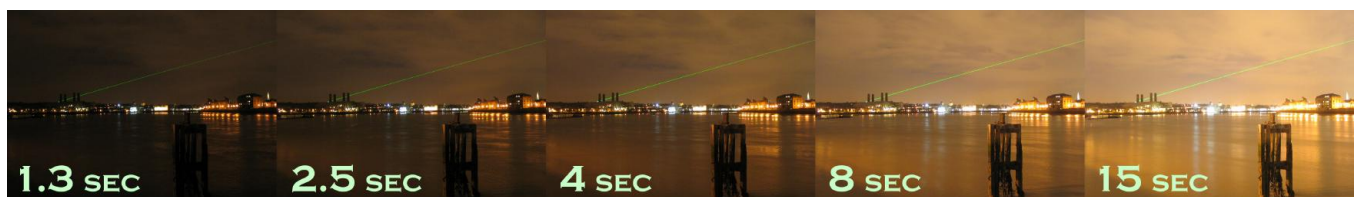


Figure 4 – Influence du temps de pose sur la luminosité globale. Photographies de nuit de Greenwich, à Londres, avec différentes durées d'exposition. Extrait de Wikipedia.



Figure 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



Figure 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 représentés 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
-----	---	-----	---	-----	---	-----	---	----	----	----	----



Figure 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.

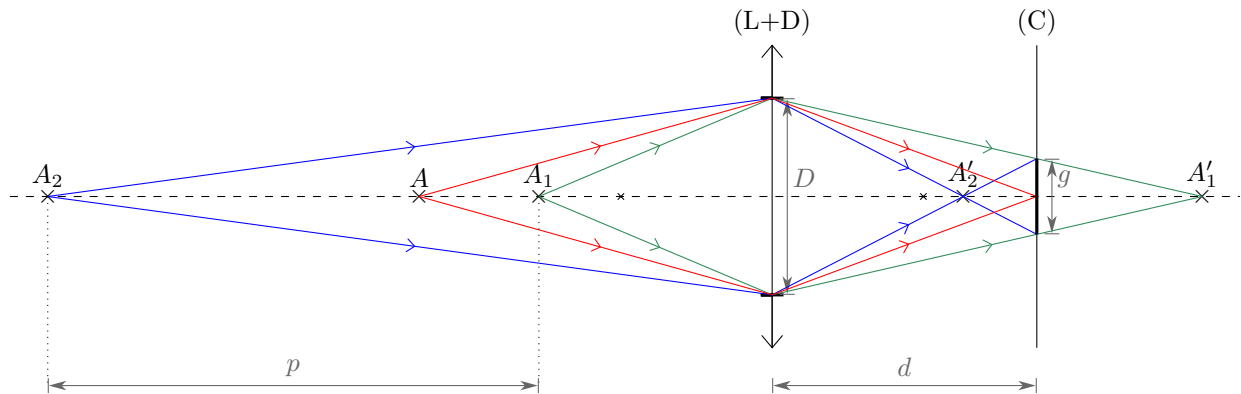


Figure 8 – Mise au point et profondeur de champ. Le diaphragme et la lentille sont supposés dans le même plan. La mise au point d est réalisée pour l'objet A situé à la distance L de l'objectif. Tous les objets situés entre A_1 et A_2 auront une image sur le pixel représenté de taille inférieure ou égale 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.



Focale 50mm, Ouverture f/6.4

Focale 50mm, Ouverture f/4

Focale 50mm, Ouverture f/1.8

Figure 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

Appareil photo numérique

1 Cherchons les positions possibles de l'image A' d'un objet réel A qu'on prend pour simplifier sur l'axe optique. D'après la relation de conjugaison de Descartes,

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \quad \text{soit} \quad \frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{\overline{OA}}$$

Comme l'objet est réel, alors $\overline{OA} < 0$, et donc

$$\frac{1}{\overline{OA'}} < \frac{1}{f'}$$

ce qui permet de conclure que

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

On en déduit que l'image A' se trouve nécessairement derrière le plan focal image de la lentille. Il n'y a donc **aucun intérêt à placer le capteur devant le plan focal image**.

2 Voir figure 10. Pour simplifier, la mise au point est supposée faite sur un objet à l'infini. On trace deux rayons, issus des deux points de l'objet dont l'image se forme sur les bords du capteur. Une couleur de rayon est associée à un point de l'objet. Le capteur est identique dans les deux cas, mais modifier la focale implique nécessairement de modifier la distance entre la lentille et le capteur. On constate sur les figures que l'angle α entre les points de l'objet visibles sur la photo les plus écartés est plus faible dans le cas 1 que dans le cas 2. Ainsi, lorsqu'on diminue f' on voit sur la photo des points plus écartés sur l'objet : **diminuer la focale augmente le champ angulaire**.

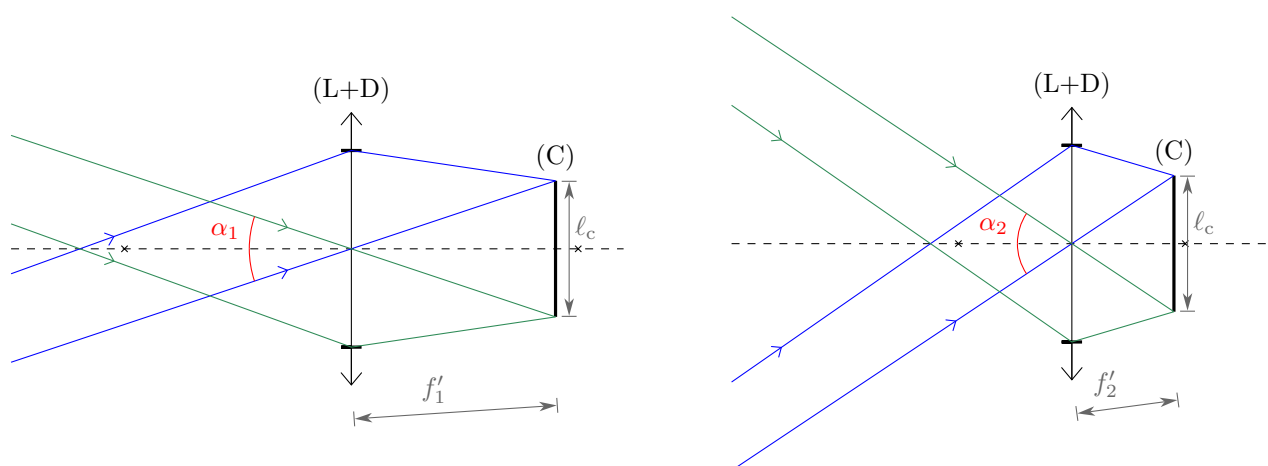


Figure 10 – Influence de la focale sur le champ angulaire.

3 Par définition donnée le document, la focale équivalente est la focale qui donnerait le même champ angulaire mais pour une pellicule argentique de taille 24×36 mm, et donc de diagonale $d_{\text{pell}} = \sqrt{24^2 + 36^2} = 43,2$ mm. Dans le cas du capteur cité dans le document, $d = 28,3$ mm, et donc

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{d}{2f'} = \frac{d_{\text{pell}}}{2f'_{\text{éq}}} \quad \text{d'où} \quad \boxed{f'_{\text{éq}} = \frac{d_{\text{pell}}}{d} f' = 1,53 f' .}$$

4 Raisonnons à focale f' fixée. L'ouverture de l'appareil photo, c'est-à-dire le diamètre D du diaphragme modèle, est inversement proportionnelle au nombre d'ouverture N puisque $D = f'/N$. De plus, comme le diaphragme est circulaire, alors sa surface S vaut

$$S = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi f'^2}{4N^2} .$$

Choisir les valeurs de N comme une suite géométrique de raison $\sqrt{2}$ permet donc de **diviser par deux la surface de l'ouverture, donc la quantité de lumière, à chaque fois que N est augmenté d'un cran**.

5 D'après le document 3, l'exposition est la quantité totale de lumière perçue par le capteur. Lorsque le temps de pose est doublé et si rien ne change par ailleurs, deux fois plus de lumière arrive sur le capteur pendant la prise de

la photo. Pour conserver la même exposition, **il faut diminuer cette quantité de lumière d'un facteur 2 en jouant sur l'ouverture**. D'après la question précédente, cela se fait en augmentant N d'un cran.

6 Question pas évidente ... Voir figures 11 et 12.

Démarche rigoureuse de construction de ces figures :

- ▷ placer l'objectif et ses foyers, placer le point A sur l'axe optique ;
 - ▷ en introduisant un point B tel que AB soit dans un plan de front, construire son image A' par la lentille : cela définit la position du capteur (je ne le fais pas sur le corrigé pour ne pas alourdir la figure) ;
 - ▷ tracer les rayons passant par les extrémités d'un pixel du capteur et de la lentille (rayons bleus et vert), en déduire la position des points A'_1 et A'_2 ;
 - ▷ par retour inverse de la lumière, construire les antécédents A_1 et A_2 en introduisant une image $A_1B'_1$ et $A_2B'_2$.
- Pour que la comparaison ait un sens, attention à bien laisser l'objet, la lentille et le capteur au même endroit des deux figures.

Une construction plus qualitative (et plus simple) est possible, représentée figure 13 : prendre le diaphragme plus grand et conserver les points A_1 et A_2 construits précédemment. En construisant les rayons extrêmes issus de A_1 et passant par les extrémités de la lentille, on constate qu'ils couvrent au niveau du capteur une hauteur plus grande que g , signe que l'image issue de A_1 apparaît cette fois floue car recouvrant plus d'un pixel. On procède de même pour A_2 . On conclut donc que ces points qui délimitaient la plage de netteté dans le cas précédent n'apparaissent plus nets : augmenter le diamètre D du diaphragme a pour effet de diminuer la profondeur de champ.

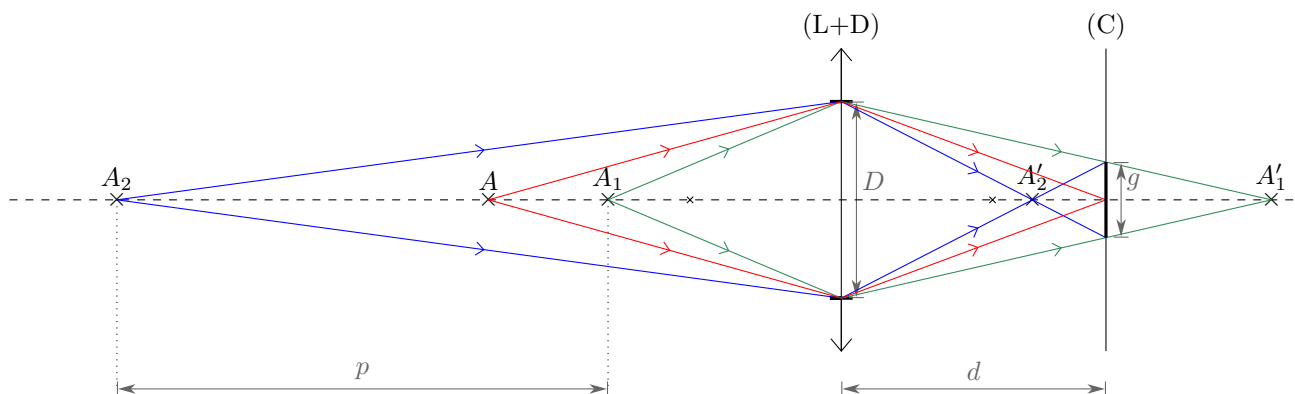


Figure 11 – Profondeur de champ et ouverture du diaphragme, première situation.

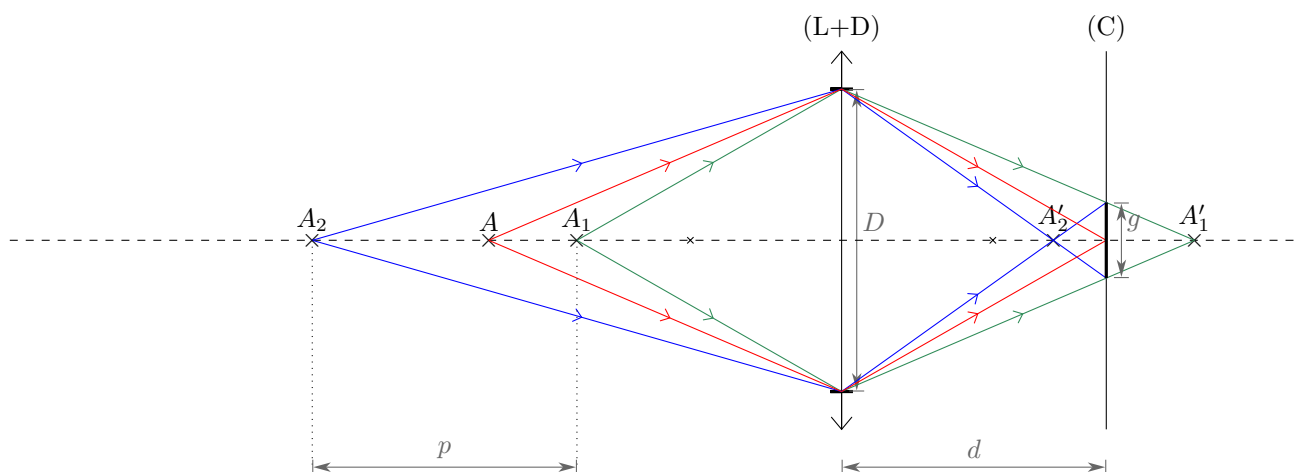


Figure 12 – Profondeur de champ et ouverture du diaphragme, deuxième situation.

7 Le fond du problème de la photographie de nuit est le manque de luminosité. Pour y remédier, plusieurs solutions sont possibles :

- ▷ augmenter la sensibilité ISO, mais sans excès car cela peut dégrader la qualité de l'image, comme on le voit sur la couverture de livre figure 6 ;
- ▷ diminuer le nombre d'ouverture N , mais alors cela diminue aussi la profondeur de champ et n'est pas forcément souhaitable ;
- ▷ augmenter le temps de pose, mais alors les mouvements sont rendus floutés comme le montre la figure 5.

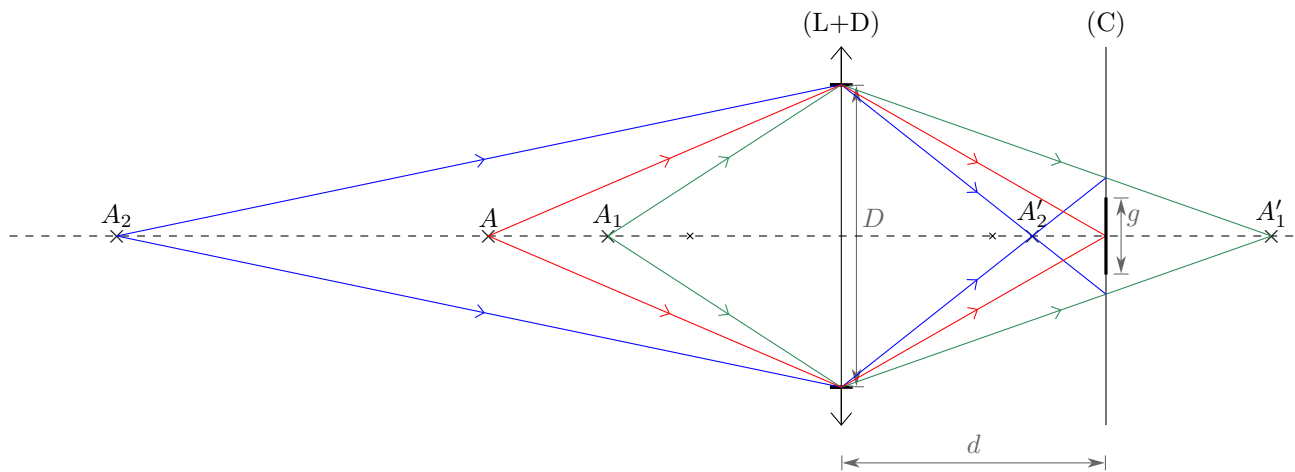


Figure 13 – Profondeur de champ et ouverture du diaphragme, deuxième situation (bis).

8 Tableau récapitulatif :

	Focale f'	Temps d'exposition τ	Ouverture du diaphragme D
Champ angulaire	Diminuer f' augmente le champ angulaire.	Aucune.	Aucune.
Exposition	Aucune.	Augmenter τ augmente l'exposition.	Augmenter D augmente l'exposition.
Profondeur de champ	Augmenter f' diminue la profondeur de champ.	Aucune.	Augmenter D diminue la profondeur de champ.

9 L'**objectif** (c'est-à-dire le diaphragme) est une pupille circulaire, qui peut diffracter la lumière.

10 Le document 6 indique que le capteur d'image a pour nom 1/2.33", et en comparant avec le document 5 on en déduit qu'il a pour dimensions $4,62 \times 6,16$ mm. Cela fait donc une surface totale $S = 28,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ à répartir en $n = 1,07 \cdot 10^7$ pixels. On en déduit que la surface occupée par un seul des pixels vaut

$$s_{\text{pix}} = \frac{S}{n} = 2,66 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$$

En assimilant les pixels à des carrés de côté g tous identiques, on en déduit

$$g = \sqrt{s_{\text{pix}}} = 1,6 \text{ } \mu\text{m}.$$

La diffraction limite la résolution de l'appareil si le **diamètre de la tâche de diffraction par l'objectif est supérieur à g** .

11 Estimons l'effet de la diffraction dans le cas le plus défavorable, celui où l'ouverture D est petite et donc le nombre d'ouverture N est grand. Raisonnons pour simplifier sur le cas d'un objet photographié situé à l'infini : on a alors $d = f'$. La tâche de diffraction a donc pour rayon

$$r \simeq 1,22 \frac{\lambda d}{D} = 1,22 \frac{\lambda f'}{f'/N} = 1,22 N \lambda.$$

Numériquement, prenons $N = 32$ (valeur maximale donnée dans le document 3) et $\lambda = 800$ nm (cas le plus défavorable pour une longueur d'onde visible). On trouve alors

$$r = 31 \text{ } \mu\text{m}.$$

Dans le cas considéré, on voit que la diffraction est un facteur qui limite davantage la qualité de l'image que la taille d'un pixel. En raisonnant sur des valeurs moins extrêmes, on arrive à la conclusion que la taille des pixels est adaptée pour être toujours moins contraignante que la diffraction. En corollaire, cela indique qu'il est **vain d'espérer obtenir une meilleure photo en choisissant un capteur contenant des pixels plus petits**. Il faut également augmenter la taille de l'objectif.