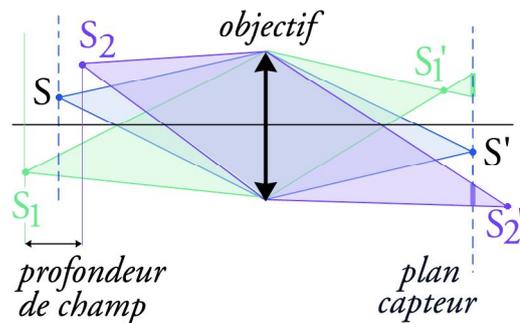


Profondeur de champ dans une photographie

Charles Vassallo

La profondeur de champ dans une photo correspond à la zone de netteté de l'image, en avant et en arrière du sujet sur lequel on a fait la mise au point. Le but de document est de montrer comment arriver aux principaux résultats avec les calculs les plus simples possibles.

La problématique est illustrée dans la figure ci-contre, qui représente ce qui se passe quand on a mis au point sur un sujet ponctuel « S ». Tous les rayons issus de S et captés par l'objectif convergent vers un point S' du capteur et il en est de même pour tous les points situés dans le même plan que S (en pointillé à gauche) : ce plan est le plan de netteté maximum. Par contre, les rayons issus des points S1 ou S2 en dehors de ce plan convergent vers des points situés en avant ou en arrière du capteur, et l'image de ces points, telle que l'enregistre le capteur, n'est pas un point mais une petite tache circulaire. Cependant, on ne saura pas faire la différence avec un vrai point si cette tache est suffisamment petite et on considérera alors que l'image est toujours nette, ou, en d'autres termes, on ne percevra du flou que si cette tache est suffisamment grande. La tache correspondant à la frontière entre ce qui est net et ce qui ne l'est plus est désignée sous le nom de *cercle de confusion* et son diamètre est le *diamètre de confusion*.



La figure a été construite dans un cas où les taches correspondant aux points S1 et S2 ont le même diamètre. S'il s'agit du diamètre de confusion, on considère que les images enregistrées pour ces deux points sont nettes et il en sera de même pour tous les points entre les deux plans perpendiculaires à l'axe optique et passant par S1 et S2. La distance entre ces deux plans est ce qu'on appelle la *profondeur de champ*.

Il y a un cas particulier remarquable, celui où le point S1 va à l'infini, son image S1' étant alors dans le plan focal image. La zone de netteté va alors de S2 à l'infini et elle est la plus grande possible. La distance entre l'objectif et le point S correspondant est appelée la *distance hyperfocale* de l'objectif (on verra que S2 est alors deux fois plus rapproché que S).

Bien entendu, quand on va vouloir mettre des chiffres par dessus ces considérations, on va se heurter au fait que le diamètre de confusion n'est pas une quantité très bien définie et il ne faudra donc pas attacher trop d'importance aux résultats numériques délivrés par les formules qui vont suivre.

Les calculs

On passe généralement par un calcul exact des images dans la figure précédente. Il ne relève que de la géométrie élémentaire ; il est détaillé dans de nombreux sites (par exemple dans

<http://www.photo-lovers.org/fdof.html.fr>) et... il est passablement fastidieux. On peut arriver bien plus vite aux résultats essentiels avec un peu de calcul différentiel — un bien grand mot, toutefois !—, en partant de la formule classique

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

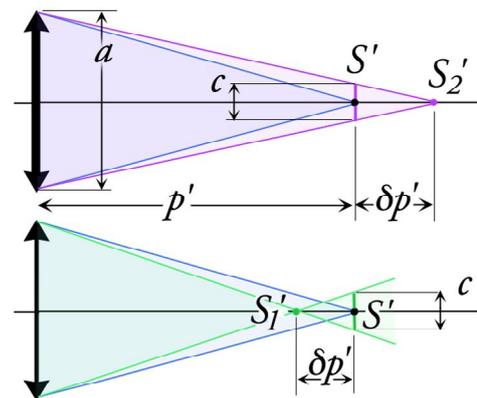
où p est la distance objet-objectif, p' la distance image-objectif et f la distance focale de l'objectif. A noter que si on introduit le *grandissement* $G = p' / p$, c.à.d. le rapport de la taille de l'image sur le capteur et de la taille de l'objet, on peut réécrire (1) sous la forme

$$p' = (1 + G)f. \quad (2)$$

La clé pour simplifier les calculs consiste à observer que les distances entre les plans images S' , S_1' et S_2' sont toujours petites devant f ou p' .

Le détail de l'image pour les points S' , S_1' et S_2' est représenté ci-contre quand ces points sont tous ramenés sur l'axe optique. Comme les écarts $\delta p'$ sont très petits par rapport à p' , il s'ensuit que l'angle des rayons arrivent en S' , S_1' ou S_2' est le même à un infiniment petit près et, par suite, qu'il n'y a (quasiment) qu'un seul écart $\delta p'$ en jeu, donné par

$$\delta p' = c \frac{p'}{a}, \quad (3)$$



où c est le diamètre de confusion et a le diamètre de l'objectif. En remplaçant p' par sa forme (2), on voit apparaître l'ouverture numérique de l'objectif $ON = f / a$ — autrement dit, les chiffres dans l'expression $f/5.6$, $f/11$, etc —, et on peut réécrire (3) sous la forme

$$\delta p' = c \cdot ON (1 + G) \quad (4)$$

Ce raisonnement demande qu'on ait bien $\delta p' \ll p'$, mais c'est automatiquement le cas si $c \ll a$

Hyperfocale

Dans la figure correspondant à l'hyperfocale, comme le point S_1' doit être placé dans le plan focal, le point S' est à la distance $p' = f + \delta p'$ et le point S correspondant est à la distance p telle que

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f + \delta p'} = \frac{\delta p'}{f^2}$$

Cette distance p est précisément l'hyperfocale, d'où, compte tenu de (4) et du fait que le grandissement est alors négligeable devant 1 :

$$\boxed{\text{hyperfocale} = \frac{af}{c} = \frac{f^2}{c \cdot ON}} \quad (5)$$

Pour le point S2' délimitant la zone de netteté, on a $p_2' = p' + \delta p' = f + 2\delta p'$, et le calcul analogue de la distance objet p_2 conduit à

$$p_2 = \text{hyper focale} / 2 \quad (6)$$

Profondeur de champ en photographie rapprochée

En photographie rapprochée ou en macrophotographie, c.à.d. *quand le sujet est bien plus près que l'hyper focale*, on va avoir une profondeur de champ petite devant p . Quand p' varie de $\pm \delta p'$, la distance objet varie d'une quantité $\pm \delta p$ qu'on peut obtenir simplement en différentiant l'équation (1) ; par conséquent, compte tenu des équations et définitions précédentes, la profondeur de champ est

$$PDC = 2 \delta p = 2 \delta p' \frac{p^2}{p'^2} = 2c \frac{(1+G) \cdot ON}{G^2} \quad (7)$$

Ainsi, la profondeur de champ est proportionnelle à l'ouverture numérique. On peut donc l'augmenter simplement en fermant le diaphragme, mais on ne peut pas le faire indéfiniment sans se heurter à un effet de diffraction qui va faire chuter la netteté de l'image. On y reviendra plus loin.

On voit aussi qu'à grandissement égal, la profondeur de champ ne dépend pas de la focale. Toutefois, l'effet de la focale réapparaît si on opère à distance sujet-objectif p constante, puisqu'on doit alors remplacer G par $f / (p-f)$ dans (7).

La formule (7) se simplifie si $G \ll 1$. De surcroit, comme on a alors forcément $p' \approx f$ et donc $G \approx f / p$, on obtient alors :

$$PDC = 2c(p/f)^2 ON = 2p (p/\text{hyper focale}) \quad (8)$$

Bien évidemment, la validité de ces formules demande qu'on ait bien $\delta p \ll p$ et $\delta p' \ll p'$, mais on peut prendre de grandes libertés avec cette condition puisque tous ces calculs sont forcément assez approximatifs à cause du flou dans la définition du cercle de confusion. En passant, l'équation (8) montre bien que $\delta p \ll p$ équivaut à $p \ll \text{hyper focale}$.

Si on est loin de l'hyper focale, la zone de netteté est répartie pour moitié en avant et pour moitié en arrière du sujet visé. Bien entendu, si on se rapproche de l'hyper focale, la zone en arrière augmente plus fortement que la zone en avant.

Evaluations du cercle de confusion

On avance souvent que les graduations de profondeur de champ des objectifs traditionnels, (c.à.d. avant l'irruption des appareils numériques), sont basées sur un diamètre de confusion qui serait la diagonale du film utilisé divisée par 1730. On verra plus loin que ce n'est pas vraiment le cas, du moins pas sur les échelles de profondeur de champ de certains objectifs 24x36 argentiques, et puis, on ne sait pas trop bien d'où vient ce chiffre — bien qu'on avance généralement les noms de Zeiss et Sinar comme pères putatifs —, et on s'est bel et bien

parfois servi d'autres valeurs (1500, voire 1000) à en croire la petite enquête sur le sujet de l'auteur de http://en.wikipedia.org/wiki/Zeiss_formula . On trouvera aussi d'autres références historiques connexes fort anciennes dans http://en.wikipedia.org/wiki/Hyperfocal_distance.

De toute manière, nous avons dit d'emblée que la notion de cercle de confusion en tant que frontière entre le flou et le net ne pouvait pas donner lieu à une évaluation très précise ; par conséquent, donner un nombre aussi précis que « 1730 » est assez discutable. On peut néanmoins se demander d'où un tel chiffre peut venir. D'après un autre article de wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Circle_of_confusion ou son équivalent français http://fr.wikipedia.org/wiki/Cercle_de_confusion , ce serait lié à l'impression de netteté ressentie en regardant un tirage « standard » dans des conditions « standard » — l'article français évoque un 8,5 x 13 cm à 30 cm de distance. Le pouvoir séparateur de l'œil étant de 0,0003 radians, on peut alors séparer des points distants de 0,009 cm, soit 1726 points sur la diagonale. Inutile de chercher plus loin ! Bien entendu, on aurait aussi bien pu parler de tirage 10 x 15 examiné lui aussi à 30 cm, mais cela aurait alors demandé 2000 points sur la diagonale.

Je préfère pour ma part me rapporter à la grande dimension du tirage. Cela correspond à 1400 points sur 13 cm ou bien 1700 points sur 15 cm — disons 1500 points sur le grand côté. *Dans ce type de raisonnement, le diamètre de confusion serait donc le grand côté du capteur divisé par 1500 — à peu près.*

Cependant, ce type d'examen ne convient pas aux amateurs de grand format. Dans son livre *Way beyond monochrome*, Ralph Lambrecht préconise l'observation d'un tirage depuis une distance égale à la diagonale du tirage. Pour ma part, je suis étonné qu'un tirage 40x40 doive être examiné d'un peu plus loin qu'un 30x40 et je persiste à trouver plus logique de rapporter le cercle de confusion au grand côté de l'image. Par exemple, on pourrait se placer à 1,25 fois le grand côté (cela reviendrait au même pour un format 4/3) et le diamètre de confusion deviendrait alors le grand côté divisé par 2400. Cette évaluation est évidemment beaucoup plus sévère que l'évaluation précédente.

On pourrait considérer des cercles de confusion encore plus petits en décidant d'examiner les tirages d'encore plus près, mais il est clair qu'on ne peut aller pas indéfiniment dans cette voie. L'image a une netteté intrinsèque finie, en ce qu'un « point » parfaitement focalisé n'est pas un point, mais forcément une petite tache dont les dimensions sont déterminées par trois facteurs :

- (i) la structure du capteur fait qu'un pixel occupe un espace fini et il paraît raisonnable de considérer un *cercle de confusion minimal* ayant la taille de ce pixel. Dans ces conditions, le diamètre de confusion minimal d'un capteur de 6Mpx (3000 x 2000) serait le grand côté divisé par 3000.
- (ii) Les aberrations optiques de l'objectif font qu'on n'a pas une focalisation parfaite. Il est malheureusement assez difficile d'obtenir une information pertinente sur le cercle de confusion correspondant (chercher dans les pages web analysant les performances optiques des objectifs)
- (iii) Si on diaphragme trop fort, la diffraction de la lumière fait que l'image d'un point lumineux s'étale nécessairement selon ce qu'on appelle la tache d'Airy, dont le

diamètre ne dépend que de l'ouverture numérique réelle et de la longueur d'onde de la lumière, soit, dans le vert ($0,52 \mu\text{m}$) :

$$c_A = 1,22 \lambda \times (p'/a) \approx 0,6 \text{ ON} (1 + G) \text{ (microns)} \quad (9)$$

On prendra la plus grande des trois valeurs pour faire les calculs. Le tableau suivant indique pour différents types de capteurs à quelle ouverture la tache de diffraction devient plus grande que le pixel. Pour les petits capteurs, la diffraction devient très vite prédominante :

Type de capteur	Mpx	Format image	L(mm)	H(mm)	taille pixel (microns)	ON - seuil de diffraction
1/2,5"	8	4/3	5,8	4,3	1,8	2,9
1/1,8"	10,5	4/3	7,1	5,3	1,9	3,2
2/3"	8	4/3	8,8	6,6	2,7	4,5
« 4/3 »	10	4/3	17,8	13,4	4,9	8,1
APS	12	3/2	23,4	15,7	5,5	9,2
Plein 24x36	12	3/2	36	24	8,5	14,1

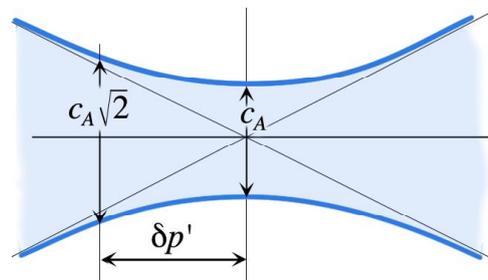
Notas :

1 – Les *ON* limites ci-dessus ont été calculés pour une tache d'Airy *inscrite* dans le pixel. On peut estimer que c'est trop sévère et qu'il vaut mieux prendre une tache d'Airy *circonscrite* au pixel ; dans ce cas, il faut multiplier tous ces seuils par 1,4. Ou bien couper la poire en deux ? Ne pas oublier que toutes ces considérations sont très approximatives...

2 – Dans son évaluation traditionnelle (le grand côté divisé par un nombre de 1500 à 2500), le cercle de confusion est généralement bien plus grand que le pixel. Il s'ensuit que la limitation de la netteté apparente par la diffraction interviendra pour des diaphragmes bien plus fermés que ce qu'indique le tableau précédent.

Evaluations en régime de diffraction

A priori, l'intervention de la diffraction a l'air de compliquer sensiblement les choses car il faudrait revoir le calcul de $\delta p'$ dans (3). En effet, la focalisation sur un point ne se représente plus par des rayons convergeant en ce point, mais par un faisceau lumineux dont le diamètre diminue quand on se rapproche de ce point, mais qui ne s'y annule pas (on a simplement un minimum égal à c_A), puis qui recroît ensuite, comme indiqué dans la figure ci-contre.



Cependant, si on accorde que la largeur du faisceau a une variation hyperbolique (ce qui serait vrai si on avait affaire à un faisceau gaussien, mais ce n'est pas le cas ici) avec des asymptotes correspondant aux rayons passant par le bord de l'objectif, on voit facilement qu'un déplacement $\delta p' = (c_A/a) p'$ — c.à.d. une application naïve de (3) en remplaçant c par c_A — se traduit par une multiplication par $\sqrt{2}$ du diamètre du faisceau, ce qui paraît acceptable pour délimiter la zone où la netteté de l'image n'est pas trop dégradée par rapport à ce qu'elle est dans le plan de focalisation.

Comme le reste du calcul relève de l'optique classique, on pourra donc garder les mêmes formules pour l'hyperfocale et la profondeur de champ, en y faisant simplement $c = c_A$. On en déduit, en exprimant f en millimètres :

$$\text{hyperfocale (m)} = f^2 / c_A / ON = 1,7 f_{\text{mm}}^2 / ON^2 \quad (10)$$

et

$$\begin{aligned} PDC &= 2c_A ON (1+G)/G^2 \\ &= 2,44 \lambda ON^2(1+1/G)^2 \\ &\approx 1,2 \cdot 10^{-3} ON^2(1+1/G)^2 \quad (\text{mm}) \end{aligned} \quad (11)$$

ou encore, si $G \ll 1$:

$$PDC \approx 1,2 \cdot 10^{-3} (ON/G)^2 \quad (\text{mm}) \quad (12)$$

Comparaison des appareils argentiques 24 x 36 et des numériques

Quand on compare un appareil numérique à un 24x36, on introduit souvent le « coefficient multiplicatif » k par lequel on passe de la focale réelle de l'APN à la focale équivalente, c.à.d. le quotient 36 mm/longueur du capteur, et on écrit $f_{eq} = kf$. Ce coefficient est proche de 7 pour les capteurs 1/2,5", de 2 pour les capteurs 4/3, ou encore de 1,6 pour les APS.

Ce principe vaut aussi pour le grandissement ; ce qui figure dans les descriptions commerciales des objectifs est généralement le grandissement équivalent $G_{eq} = kG$ (autrement dit, affirmer qu'un objectif atteint le « rapport 1:1 » ne signifie plus que l'image sur le capteur a la même taille que l'objet, mais qu'un objet de 36mm remplit la grande dimension du capteur). Attention, toutefois, ce grandissement équivalent n'est pas le grandissement qu'on aurait avec le 24x36 équivalent, c.à.d. avec la même valeur de p et la focale f_{eq} .

La comparaison est plus simple quand on exprime le diamètre de confusion comme la fraction $1/N_c$ du grand côté du capteur, où, comme nous l'avons vu, N_c peut valoir 1500 à 2500 selon le type d'examen de l'image finale. En introduisant les 36 mm du « capteur » du 24x36 équivalent, on peut écrire

$$c = 36/(k N_c) \quad (\text{mm}), \quad (13)$$

puis réécrire les différentes formules précédentes sous les formes du tableau ci-après :

		Diffraction non sensible	Netteté limitée par la diffraction (lorsque $(k + G_{eq}) \cdot ON > 60000 / N_c$)
<i>hyperfocale</i> (en mètres, avec f_{eq} en mm)		$\frac{1}{k} \frac{N_c f_{eq}^2}{36000 ON}$	$\frac{1}{k^2} \frac{1,7 f_{eq}^2}{ON^2}$
<i>PDC</i> (en mm, lorsque $p \ll \text{hyperfocale}$, avec f_{eq} en mm)	G quelconque	$\frac{72}{N_c} \frac{k + G_{eq}}{G_{eq}^2} ON$	$10^{-3} ON^2 \frac{(k + G_{eq})^2}{G_{eq}^2}$
	$G \ll 1$	$k \frac{72}{N_c} \frac{p^2}{f_{eq}^2} ON$	$k^2 \cdot 10^{-3} ON^2 \frac{p^2}{f_{eq}^2}$

(14)

La comparaison APN/24x36 est simple quand le grandissement est négligeable : d'après la dernière ligne du tableau, *l'appareil numérique a davantage de profondeur de champ* que l'appareil « équivalent », dans le rapport $k : 1$ (ou bien $k^2 : 1$ si la diffraction intervient). En même temps, l'hyperfocale est divisée par k ou k^2 , ce qui augmente également la plage de netteté. Cette variation diminue un peu quand on augmente G_{eq} .

Cette comparaison simple ne tient plus quand on doit rapporter le cercle de confusion aux pixels du capteurs, mais aussi bien, du côté du film argentique, il conviendrait de rapprocher c des limites de résolution physique du film, bref, tout se complique.

Fiabilité des formules approchées

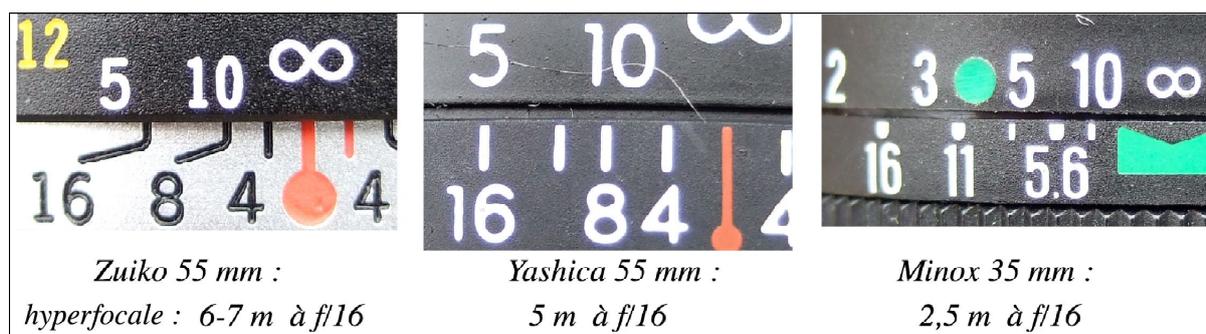
Toutes les formules précédentes sont approximatives, l'ordre de grandeur de l'erreur étant le rapport $p / \text{hyperfocale}$. Toutefois, étant donné les incertitudes fondamentales tournant autour de la bonne valeur à donner au cercle de confusion, les chiffres obtenus devraient rester utiles même avec une erreur estimée de l'ordre de 50%. Cela dit, il n'est pas très difficile de programmer une feuille de calcul avec les formules exactes, mais on perd ainsi de vue le sens physique et la compréhension de ce qui se passe.

La page-calculateur sur notre site web présente à la fois le calcul exact et le calcul approché et permet de se faire une idée de la fiabilité de celui-ci (à noter qu'elle répond $PDC = \text{infini}$ dès que $p > \text{hyperfocale}$).

Exercices d'application

1 – A quel cercle de confusion correspondent les hyperfocales lues sur les objectifs traditionnels pour 24x36 ?

On lit cette hyperfocale en mettant au point sur l'infini et en lisant l'échelle de profondeur de champ. La figure ci-dessous indique trois lectures pour $f/16$ pour trois objectifs différents.



On constate tout d'abord que les chiffres de Zuiko et Yashica pour la même focale ne sont pas tout à fait les mêmes, ce qui renforce bien notre avertissement qu'il ne faut pas chercher trop d'exactitude dans les indications de profondeur de champ. Maintenant, si nous essayons

diverses valeurs de N_C dans le calcul de l'hyperfocale pour les deux focales de la figure, nous obtenons les résultats ci-dessous :

f (mm)	N_C	c (μm)	Hyperfocale(m)	Commentaires
55	1500	24	7,9	Ma valeur favorite
	1440	25	7,6	Si on préfère 1730 points sur la diagonale
	1200	30	6,3	Bon accord avec le Zuiko
	960	37,5	5,0	Bon accord avec le Yashica
35	1500	24	3,2	Ma valeur favorite
	1200	30	2,6	Bon accord avec le Minox

Autrement dit, le Zuiko et le Minox utilisent tous deux un diamètre de confusion $c = 30 \mu\text{m}$ et pas du tout la fameuse fraction $1/1730$ de la diagonale du format ; le Yashica utilise un cercle encore plus grand. La valeur de $30 \mu\text{m}$ correspond à un tirage de 13 cm examiné à 36 cm. Déjà un peu loin pour juger de la netteté, non ?

2 – *Quelle est la profondeur de champ quand on prend un oiseau à 5 m à $f/8$ avec une focale équivalente de 300 mm ?*

On prendra $N_C = 1500$ dans la perspective d'un tirage 10x15.

Tout d'abord, l'hyperfocale est bien plus grande que les 5 m de visée. Même avec un capteur 1/2,5" où interviendrait la diffraction (le seuil $k.ON = 6000/ N_C = 40$ est alors franchi), l'hyperfocale est à 49 m et elle serait encore plus loin pour des capteurs plus grands. On est donc bien dans le domaine d'application des expressions (14) pour la profondeur de champ.

Dans tous les cas, le grandissement réel G est sensiblement $300/5000/k$, soit $0,06/k$. C'est très petit devant 1 et on peut prendre les formules de la dernière ligne du tableau, ce qui conduit à

$$PDC \text{ (mm)} = 106 k \text{ ou bien } 17 k^2 \text{ (si diffraction),}$$

ce qui va de 10 cm pour un capteur 24x36 ou 21 cm pour un capteur 4/3 (l'oiseau n'a qu'à bien se tenir !) jusqu'à 90 cm pour un petit capteur 1/2,5" — avec intervention de la diffraction pour ce dernier.

3 – *Quelle profondeur de champ peut-on espérer avec un grandissement équivalent de 1, toujours avec $N_C = 1500$?*

Le tableau (14) donne directement

$$PDC \text{ (mm)} = \text{Max} \{ 0,05 \times (k+1) \times ON ; 0,001 \times (k+1)^2 \times ON^2 \}$$

le seuil de diffraction étant maintenant $(1+k)ON = 40$, un peu plus bas que dans l'exercice précédent .

Avec un capteur $1/2,5''$, on a $k = 7$. Les objectifs correspondants ferment au moins à $f/8$, et on est alors en régime de diffraction. La profondeur de champ est alors de 4 mm, mais la netteté est diminuée du facteur $40/(1+k)/ON = 0,6$ — c.à.d. qu'on n'a plus 1500 cercles de confusion sur le grand côté, mais seulement 940 ; autrement dit, l'image est légèrement floue. Certains appareils permettent de fermer d'un diaphragme de plus, mais la netteté serait encore réduite de 30%.

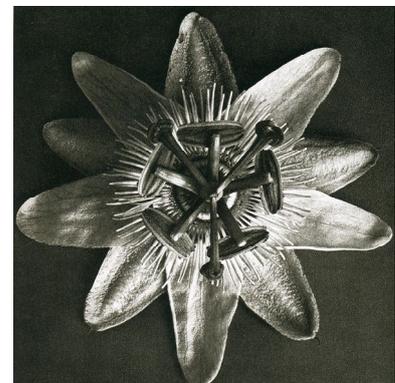
Avec un capteur $4/3$ ($k=2$), on dépasse tout juste le seuil de diffraction en fermant à $f/16$, c.à.d. qu'on garde 1250 points nets sur le grand côté. La profondeur de champ est de 2,3 mm. Là encore, on peut fermer d'un diaphragme de plus avec les objectifs macro, mais on pénètre alors résolument dans le domaine de la diffraction : certes, on multiplie la profondeur de champ par 1,4 mais en réduisant d'autant la netteté...

4 – Comment alors obtenir une profondeur de champ de plus d'un cm avec un grandissement réel (et non pas équivalent) de 1 ou plus ?

Dans l'exercice précédent, la profondeur de champ pour $G = 1$ s'exprimait toujours en mm. Comment diable peut-on passer au cm et au-delà ?



En fait, cet exercice est une réflexion sur ces deux photos de passiflore. Il s'agit d'une fleur qui peut atteindre dans les 7-8 cm de diamètre et 3-4 cm de haut. L'image de gauche vient du web (www.jeantosti.com) et on devine qu'elle a sans doute été retournée dans un cliché numérique pris à une cinquantaine de cm de la fleur, avec un grandissement



faible. Par contre l'image de droite est un cliché historique de Karl Blossfeldt vers 1930 qui a été réalisée sur une chambre photographique de grandes dimensions, très probablement avec un grandissement supérieur à 1 ; cette photo a été reprise dans l'ouvrage *Karl Blossfeldt* par Hans Christian Adam (éditions Taschen, 2004, page 144), elle a l'air bien nette. La légende précise même « 4x » ce qui impliquerait que la photo originale a été prise avec un grandissement $G = 4$. Rien dans le livre ne confirme cette interprétation, mais on la retrouve dans le site http://www.vintagesmith.com/photos_details.asp?id=14&Photo_ID=103 qui en propose des exemplaires à la vente sous forme de photogravures 8"×10". Comme il s'agit d'un procédé de reproduction par contact, on peut donc penser que la plaque originale avait ces dimensions et donc que la fleur faisait 2" de diamètre, soit 5cm si le $G=4$ est bien exact.

Tout d'abord, réglons le cas de l'image de gauche. L'image originale prise sur Internet fait 450 px de large. Comme on ne sait pas avec quel appareil elle a été prise, nous supposons qu'il s'agissait d'un capteur de 6Mpx avec 3000 px sur le grand côté $36(\text{mm})/k$ (où nous gardons k inconnu pour le moment). En accordant un diamètre de 8 cm à la fleur, on déduit le grandissement réel $G = (36/k) \times (450/3000) / 80 = 0,0675 / k$. Comme on voit directement les pixels de l'image, le cercle de confusion correspond au pixel, d'où $c = (36/k) / 3000$ en mm. En reportant ces valeurs de c et G dans la formule (7), on obtient

$$PDC = 0,5 \times (k + 0,07) \times ON \text{ (en cm)}$$

Même avec un capteur plein format ($k=1$), on peut obtenir les quelques cm nécessaires à la netteté de toute l'image en fermant à $f/8$ ou $f/16$; c'est encore plus facile avec un capteur plus petit.

L'image de Karl Blossfeldt est beaucoup plus délicate à analyser. Comme il travaillait certainement avec des objectifs extrêmement fermés (jusqu'à $f/128$), il est probable qu'il se trouvait en régime de diffraction, mais encore faut-il le confirmer.

Nous allons introduire plusieurs inconnues en plus de l'ouverture ON et du grandissement G :

D = diamètre de la fleur — en principe 50 mm si G est vraiment 4

H = hauteur de la fleur — de l'ordre de 15 à 25 mm

n = nombre de cercles de confusion (ou de « points de netteté », si l'on préfère) dans l'image. On peut l'estimer à environ $n = 1000$ points. En effet, quand on scanne l'image du bouquin en haute définition, qu'on réduit la taille et qu'on imprime, on retrouve la même impression de netteté avec 1000 px, mais pas avec 600 px.

On en déduit que le diamètre de confusion est $c = D G / n$, mais la suite du raisonnement dépend de l'intervention ou non de la diffraction. Dans les deux cas, on va écrire que H donne la profondeur de champ.

Sans intervention de la diffraction ?	Netteté limitée par la diffraction
On reste avec $c = D G / n$	Le diamètre de confusion est également donné par (9), d'où $D G / n = 1,2 \lambda ON (1+G)$
D'après (7), la profondeur de champ est $H = 2c ON(1+G)/G^2 = (2D/n) ON (1+ G)/G$	D'après (11), la profondeur de champ est $H = 2,4 \lambda [ON (1+G) / G]^2$
On arrive à une évaluation unique $ON (1+1/G) = 0,5 n (H/D)$ La formule (9) évalue le diamètre de diffraction correspondant à $c_A = 0,6 \lambda n (H/D) G$ mais on doit avoir $c_A < c$, ce qui revient à $D > 0,6 \lambda n^2 (H/D)$ L'égalité correspond au seuil de diffraction et elle donne évidemment la même relation que ci-contre à droite. Avec $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, $n = 1000$ et $H/D = 0,3$ on arrive à $D > 90$ mm, ce qui est beaucoup trop grand, du moins incompatible avec le $G=4$ supposé. On est obligé de diminuer cette valeur, ce qui revient à nous placer dans le régime de diffraction et à adopter les valeurs ci-contre.	On a donc deux évaluations de $ON (1+1/G)$ qui doivent être les mêmes, d'où $(D/1,2n)^2 = H \lambda / 2,4$ soit encore $D = 0,6 \lambda n^2 (H/D)$ Cette relation est satisfaite avec $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, $D=50\text{mm}$, $n = 800$ (raisonablement proche du 1000 estimé) et $H/D = 0,2$. Cette dernière valeur est peut-être un peu faible pour ce type de fleur, mais il y a de nombreuses variétés et il ne faut pas oublier le caractère approximatif de toute la théorie. Si la fleur était plus grande et G plus faible, on aurait un rapport H/D plus grand. On a alors $ON (1+G)/G = D / (1,2 \lambda n) = 104$ soit $ON = 83$ avec $G=4$ (comme annoncé) ou bien $ON = 75$ avec $G=3$.