
Co-conception d'un objectif chromatique pour l'extension de profondeur de champ - modèle géométrique

PEÑARANDA Yohan¹
GOSTIAUX Gabriel¹

We certify that this work is original, that we quote in reference all the sources used and that it does not contain plagiarism.

January, 2025

¹University of Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School

Contents

1	Partie 3	2
A	Code	6
A.1	Calcul du flou de défocalisation	6
A.2	Borne de la profondeur de champ	7
A.3	Calcul du flou de défocalisation chromatique	7
A.4	Borne de la profondeur de champ chromatique	8
A.5	Focale du doublet chromatique	9

1 Partie 3

L'objectif de cette partie est de modéliser l'imageur afin d'estimer le critère de performance en fonction des paramètres. Pour cela, on écrit les fonctions permettant de simuler les variations de flou de déconvolution pour une optique conventionnelle, puis une optique chromatique. Ensuite, on calcul la profondeur de champ généralisé, qui sera notre critère de performance. Enfin, on optimisera le rayon de courbure du doublet chromatique, puis le rayon de courbure et la mise au point de l'imageur.

Flou de défocalisation d'une optique conventionnelle On considère une caméra conventionnelle avec les paramètres suivants :

- Distance focale $f' = 25$ mm
- Nombre d'ouverture $N = 2,8$
- Taille des pixel $t_{px} = 5 \mu\text{m}$

L'objet est situé entre 1 et 5 mètres de la caméra. La formule caractérisant la taille du flou en fonction des paramètres du problèmes est :

$$\epsilon = Dx'_0 \left(\frac{1}{f'} + \frac{1}{x} + \frac{1}{x'_0} \right)$$

Avec D le diamètre du diaphragme, f' la focale du système, x la position de l'objet, x'_0 la position du capteur. En annexe [A.1](#), le code pour calculer le flou de défocalisation en pixel.

Position capteur Pour une mise au point à $x_0 = 2$, la position du capteur se calcul :

$$\frac{1}{x'_0} - \frac{1}{x_0} = \frac{1}{f'}$$
$$x'_0 = \frac{1}{\frac{1}{f'} + \frac{1}{x_0}} = 25,3 \text{ mm}$$

On peut ainsi connaître les bornes de la profondeur de champ

$$x_{min} = \frac{x'_0}{1 - \frac{x'_0}{f'} + \frac{t_{px}}{D}} = -2,0925$$
$$x_{max} = \frac{x'_0}{1 - \frac{x'_0}{f'} - \frac{t_{px}}{D}} = -1,9152$$

Ce qui donne une profondeur de champ de 0,1773 En annexe [A.2](#), le code pour automatiser ce calcul. La figure [1](#) représente le flou de défocalisation en fonction de la profondeur de l'objet.

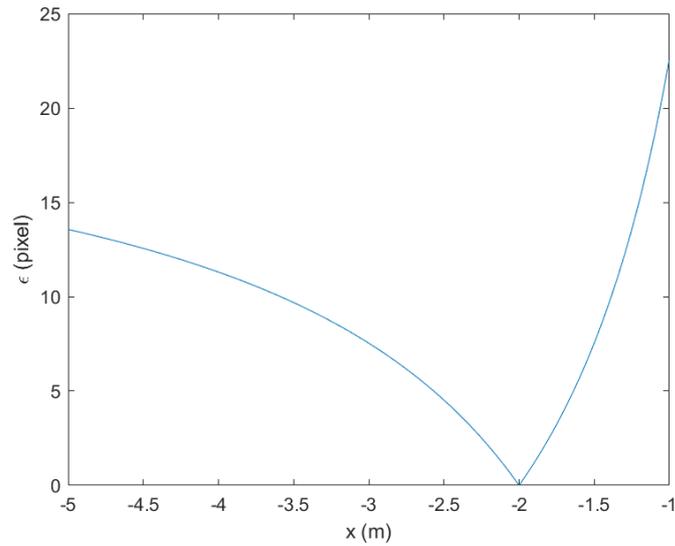


Figure 1: Simulation du flou de défocalisation pour une optique conventionnelle en fonction de la profondeur de l'objet.

Flou de défocalisation d'une optique chromatique On considère une optique chromatique avec les paramètres suivants, dépendants de la longueur d'onde :

- Distance focales :
 - $f'_R = 25,1$ mm
 - $f'_V = 25$ mm
 - $f'_B = 24,8$ mm
- Nombre d'ouverture $N = 2,8$
- Taille des pixel $t_{px} = 5 \mu\text{m}$

L'objet est toujours situé entre 1 et 5 mètres. On donne une fonction similaire à celle de l'optique conventionnelle, adapté au cas chromatique. Dans la suite, le capteur est placé tel que le plan de mise au point corresponde à celle du canal vert, (noté x_0^V). On trace les courbes de variations du flou de défocalisation des canaux RVB figure 2.

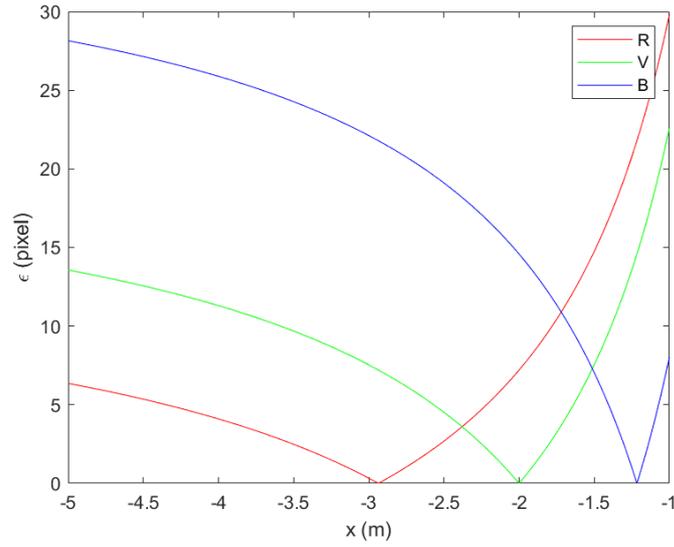


Figure 2: Simulation du flou de défocalisation pour une optique chromatique en fonction de la profondeur de l'objet.

La fonction donnée annexe A.4 permet de connaître les profondeurs de champ pour chaque longueur d'onde. Pour ce système, on a un résumé des calculs dans le tableau 1.

	Bornes (m)		
	Rouge	Vert	Bleu
Minimum	-3,139	-2,093	-1,250
Maximum	-2,757	-1,915	-1,184
Δx	0,381	0,177	0,066
Total	0,625		

Table 1: Détail de la profondeur de champ généralisée pour trois canaux. Les valeurs sont arrondies au millimètre.

Imageur chromatique L'imageur chromatique est constitué d'un doublet chromatique et d'une lentille idéale comme illustré dans la figure 3.

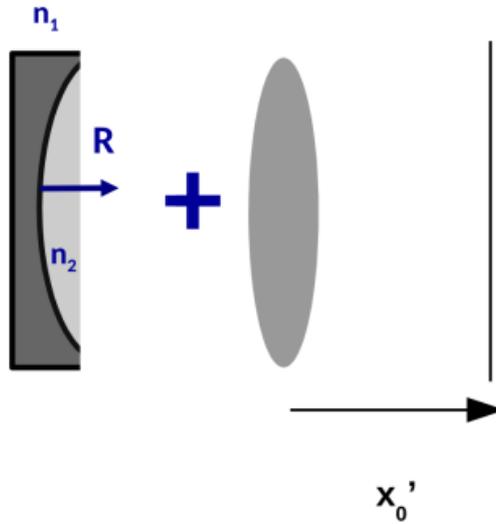


Figure 3: Imageur chromatique constitué d'un doublet chromatique et une lentille idéale.

On trace les indices de deux verres du doublet figure 4.

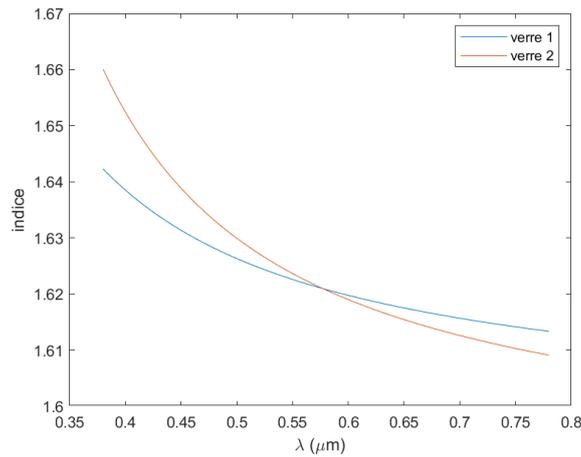


Figure 4: Indices des deux verres du doublet chromatique.

La focale du doublet s'écrit avec la formule d'une lentille mince et la formule de Gullstrand

:

$$f_1 = \frac{1 - n_1}{R} \quad f_2 = \frac{n_2 - 1}{R}$$

$$\frac{1}{f_{doublet}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

On montre figure 5 la focale du doublet en fonction du rayon de courbure des faces collées. Pour une certaine longueur d'onde ($\lambda = 577 \text{ nm}$), les deux indices sont égaux alors le doublet se transforme en une face à lames parallèles avec une focale infinie.

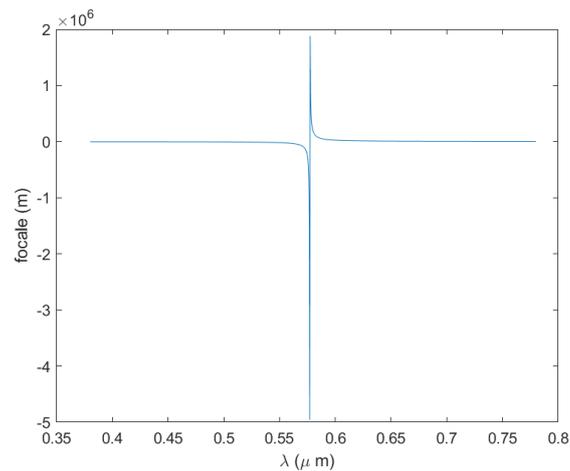


Figure 5: Focale du doublet en fonction du rayon de courbure.

A Code

A.1 Calcul du flou de défocalisation

```

%%% Calcul de la taille géométrique du flou de
%%% défocalisation en pixel pour un ensemble de
%%% profondeur et une caméra donnée
%%%
%%% usage : [epsilon]=CalculFlouDefocalisation(f,N,t_px,pos_capteur,prof_x)
%%%
%%% Entree:
%%% f : focale
%%% N : nombre d'ouverture
%%% t_px : taille du pixel
%%% pos_capteur : position du capteur (positive)
%%% prof_x : vecteur de profondeur x (négatif)
%%%
%%% Sortie:
%%% epsilon : flou de défocalisation en pixel
%%%

function [epsilon]=CalculFlouDefocalisation(f,N,t_px,pos_capteur,prof_x)
    %Diamètre pupille
    D=f/N;

    % Flou de défocalisation
    epsilon = abs((D*pos_capteur*(1/f + 1./prof_x - 1/pos_capteur))/t_px);
end

```

A.2 Borne de la profondeur de champ

```
%%% Calcul les bornes de la profondeur
%%% de champ pour une caméra donnée
%%%
%%% usage : [x_min,x_max]=IsInDoF(f,N,t_px,pos_capteur)
%%%
%%% Entree:
%%% f : focale
%%% N : nombre d'ouverture
%%% t_px : taille du pixel
%%% pos_capteur : position du capteur (positive)
%%%
%%% Sortie:
%%% [x_min,x_max] : bornes de profondeur de champ pour
%%% flou inférieur à 1 pixel
%%%

function [x_min,x_max]=IsInDoF(f,N,t_px,pos_capteur)
    %Diamètre pupille
    D=f/N;

    % profondeur de champ
    x_min = pos_capteur/(1 + t_px/D - pos_capteur/f);
    x_max = pos_capteur/(1 - t_px/D - pos_capteur/f);
end
```

A.3 Calcul du flou de défocalisation chromatique

```
%%% Calcul de la taille géométrique du flou de
%%% défocalisation en pixel pour un ensemble de
%%% profondeur et une caméra donnée
%%%
%%% usage : [epsilonR,epsilonV,epsilonB]=CalculFlouDefocalisationRVB(fr,
%%%                                     fv,fb,N,t_px,pos_capteur,prof_x)
%%%
%%% Entree:
%%% fr,fv,fb : focale dépendante de la couleur
%%% N : nombre d'ouverture
%%% t_px : taille du pixel
%%% pos_capteur : position du capteur (positive)
%%% prof_x : vecteur de profondeur x (négatif)
%%%
%%% Sortie:
%%% epsilon : flou de défocalisation en pixel
%%%
```

```

function [epsilonR,epsilonV,epsilonB]=CalculFlouDefocalisationRVB(fr,
                                                                    fv,fb,N,t_px,pos_capteur,prof_x)

    %Diamètre pupille
    D=fv/N;

    % Flou de défocalisation
    epsilonR = abs((D*pos_capteur*(1/fr + 1./prof_x - 1/pos_capteur))/t_px);
    epsilonV = abs((D*pos_capteur*(1/fv + 1./prof_x - 1/pos_capteur))/t_px);
    epsilonB = abs((D*pos_capteur*(1/fb + 1./prof_x - 1/pos_capteur))/t_px);
end

```

A.4 Borne de la profondeur de champ chromatique

```

%%% Calcul les bornes de la profondeur
%%% de champ pour une caméra donnée
%%%
%%% usage : [xR_min,xR_max,xV_min,xV_max,xB_min,xB_max]=
%%%         IsInDoFRVB(fr,fv,fb,N,t_px,pos_capteur)
%%%
%%% Entree:
%%% fr,fv,fb : focale dépendante de la couleur
%%% N : nombre d'ouverture
%%% t_px : taille du pixel
%%% pos_capteur : position du capteur (positive)
%%%
%%% Sortie:
%%% [xR_min,xR_max,xV_min,xV_max,xB_min,xB_max] : bornes
%%% de profondeur de champ pour flou inférieur à 1 pixel
%%%

function [xR_min,xR_max,xV_min,xV_max,xB_min,xB_max]=
    IsInDoFRVB(fr,fv,fb,N,t_px,pos_capteur)

    %Diamètre pupille
    Dr=fr/N;
    Dv=fv/N;
    Db=fb/N;

    % profondeur de champ
    xR_min = pos_capteur/(1 + t_px/Dr - pos_capteur/fr);
    xR_max = pos_capteur/(1 - t_px/Dr - pos_capteur/fr);

    xV_min = pos_capteur/(1 + t_px/Dv - pos_capteur/fv);
    xV_max = pos_capteur/(1 - t_px/Dv - pos_capteur/fv);

    xB_min = pos_capteur/(1 + t_px/Db - pos_capteur/fb);
    xB_max = pos_capteur/(1 - t_px/Db - pos_capteur/fb);

```

```
end
```

A.5 Focale du doublet chromatique

```
%%% Calcul de focale du doublet
%%%
%%% usage : [f_doublet]=FocaleDoublet(lambda,R)
%%%
%%% Entree:
%%% lambda : vecteur de longueur d'onde visible
%%% R : Rayon de courbure

%%% Sortie:
%%% f_doublet : focale du doublet
%%%

function [f_doublet]=FocaleDoublet(lambda,R)
    n_lambda = index_addon(lambda);

    f1=(1-n_lambda(1,:))/R;
    f2=(n_lambda(2,:)-1)/R;

    f_doublet=1./(1./f1 + 1./f2);
end
```