

## **ETALONNAGE D'UN SYSTEME STEREOSCOPIQUE DE SCHEIMPFLUG PAR AJUSTEMENT DE FAISCEAUX**

Hamrouni Salha \*<sup>1</sup>, Louhichi Hannene<sup>1</sup>, Habib Ben Aissia<sup>1</sup> et Thierry Fournel<sup>2</sup>  
1Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Tunisie  
<sup>2</sup>Laboratoire Hubert Curien de Saint-Etienne, France  
hamrouni\_salha@yahoo.fr

### **RESUME**

L'objectif de cette communication est de quantifier par simulation le taux de distorsions nécessaire à l'ajustement d'un modèle de Scheimpflug pour l'auto-étalonnage d'un système stéréoscopique à visée oblique et à grande ouverture. Ce type de dispositif à configuration angulaire se rencontre en Stéréo Vélométrie par Images de Particules. L'optimisation du modèle est alors réalisé en un nombre réduit d'itérations qui dépend des valeurs initiales des paramètres du modèle. La qualité de l'étalonnage doit être suffisante pour permettre la reconstruction d'un objet de dimension caractéristique quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ .

### **1. INTRODUCTION**

La mesure de champs de vitesse au sein d'un écoulement est aujourd'hui couramment effectuée par stéréovélocimétrie par images de particules (SPIV) [1]. Une chronophotographie des traceurs permet le calcul des champs de déplacement bidimensionnels suivant chacun des points de vue. Ces champs sont alors mis en correspondance pour reconstruire les trois composantes du champ de déplacement dans le volume de la nappe laser (éclairant les particules). Cette reconstruction requiert une phase préalable d'étalonnage de la tête stéréo en position[-déplacement] [2].

L'étalonnage des systèmes de Stéréo PIV est usuellement réalisé par le déplacement contrôlé d'une mire plane. Ceci demeure une contrainte forte dans le cas d'expérimentations à accès difficile. L'auto-étalonnage permet de s'affranchir de cette contrainte [3]. En effet, dans ce type d'étalonnage, les points de la mire sont estimés en même temps que les paramètres des caméras [4]. L'auto-étalonnage doit cependant être adapté pour fonctionner en visée oblique dans les conditions de la SPIV : mise au point sur la nappe laser en configuration de Scheimpflug [5].

La configuration de Scheimpflug est obtenue par rotation du capteur de façon à réaliser la conjugaison des plan objet et image alors que la visée est oblique. Dans une approche photogrammétrique, cette rotation est introduite dans le modèle de caméra. Il s'agit ici de cerner, au moyen de simulations, les conditions nécessaires à l'ajustement du modèle de Scheimpflug en configuration standard de SPIV.

### **2. AUTO-ETALONNAGE SPIV**

#### **2.1 Principe de l'auto-étalonnage par ajustement de faisceaux**

Dans son principe l'ajustement de faisceaux permet de déterminer par moindres carrés non linéaires, à partir d'un ensemble de vues de la mire, les paramètres du modèle de prises de vues (figure 1). Dans le cadre de la SPIV, une deuxième étape permet de déterminer la position du plan laser qui servira de référence lors des mesures. L'équation du plan laser peut être obtenue en cherchant la transformation qui permet à partir d'une paire d'images simultanées redressées de particules, de passer de l'image gauche à l'image droite.

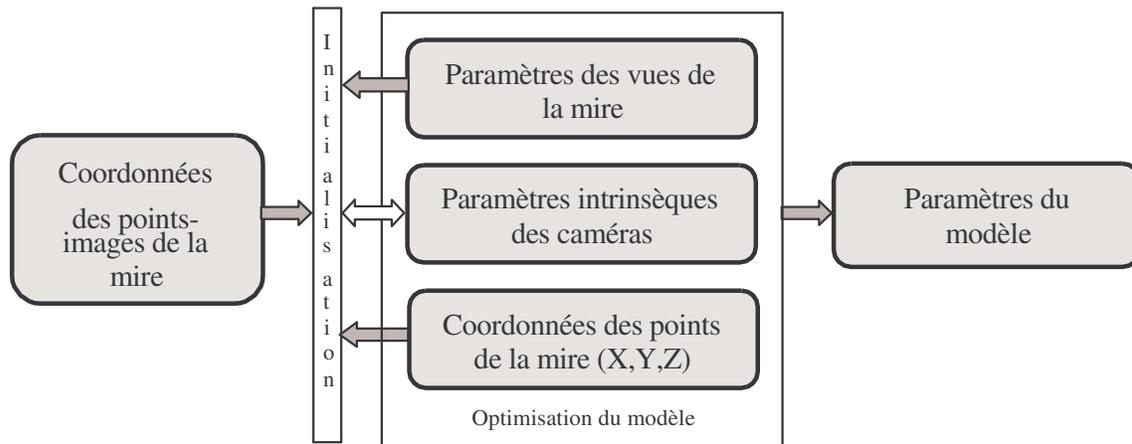


Figure 1 : Synoptique de la détermination des paramètres du modèle de prises de vues par auto-étalonnage par ajustement de faisceaux.

## 2.2 Modèle de Scheimpflug

La configuration stéréoscopique angulaire permet un angle de triangulation supérieure vis à vis d'une configuration en translation pour laquelle les axes optiques des caméras sont perpendiculaires au plan de mise au point. Fonctionnant à grande ouverture, la mise au point est obtenue en basculant l'objectif ou le capteur de chacune des caméras selon la condition de Scheimpflug. Cette condition est réalisée pour une caméra lorsque le plan objet, le plan de la lentille et le plan image s'intersectent en une droite (figure 2 où le plan image a été placé en amont du centre de projection).

La caméra peut être représentée par un modèle sténopé modifié de façon à prendre en compte la rotation  $R_S$  de Scheimpflug du capteur. Les paramètres intrinsèques à la caméra sont :

- la distance image  $f$  rapportée à la largeur  $dx$  du pixel (resp. la hauteur  $dy$ ) soit  $f_x$  (respectivement  $f_y$ ),
- les coordonnées  $(u_0, v_0)$  de l'intersection de l'axe optique avec le plan image,
- le coefficient de distorsions radiales  $a_1$ ,
- les angles d'Euler de la rotation de Scheimpflug  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ .

Les paramètres extrinsèques correspondent aux localisations des vues. En configuration stéréoscopique, pour chaque vue, la transformation de passage  $(R_2, T_2)$  du repère objet au repère de la caméra  $C_2$  peut être exprimé en fonction de la transformation de passage  $(R_1, T_1)$  du repère objet au repère de la caméra  $C_1$  et de la matrice de transformation rigide de la tête stéréoscopique  $M=(R_M, T_M)$  :

$$\begin{pmatrix} R_1 & T_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} R_2 & T_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ainsi seule les localisations des  $m$  vues  $(R_{1j}, T_{1j})$  depuis la caméra 1 et la transformation rigide de la tête stéréo  $M=(R_M, T_M)$  sont nécessaires. Comme précédemment les rotations seront paramétrées au moyen de leurs angles d'Euler.

Conformément à ce qui a été décrit au § 2.1, il reste à inclure comme paramètres les coordonnées objet  $(X_i, Y_i, Z_i)$  des  $n$  points de la mire.

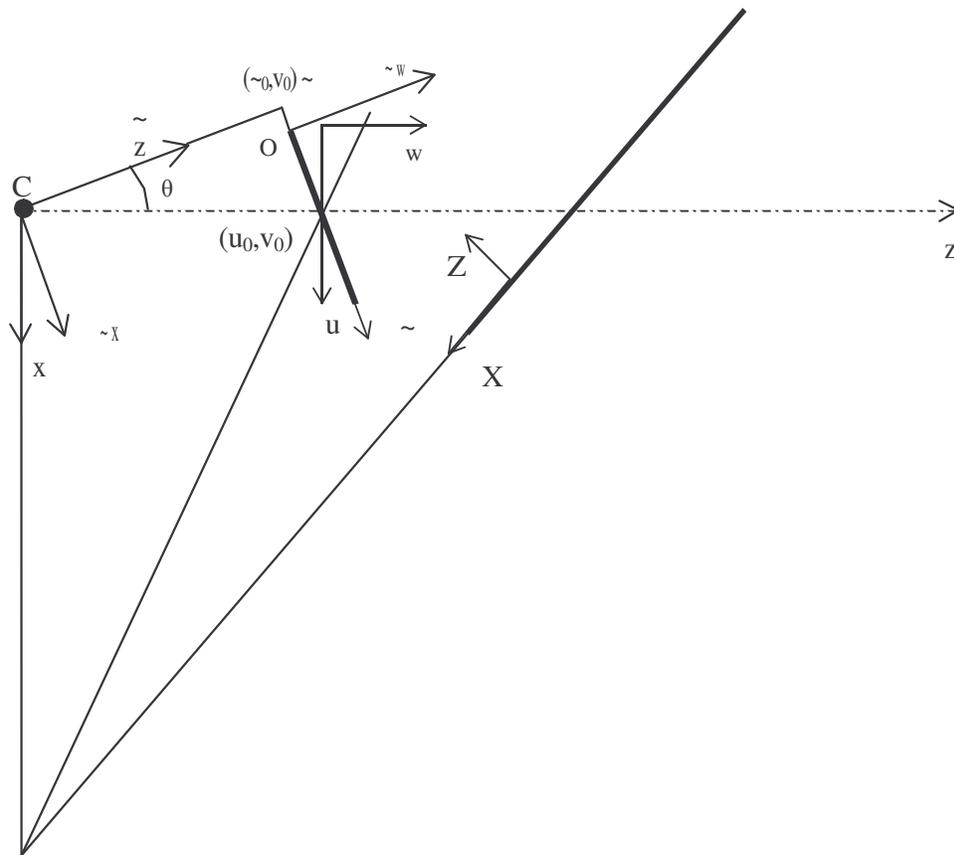


Figure 2: Caméra en condition de Scheimpflug et systèmes de coordonnées associés.

Dans ce cas, le vecteur  $\Phi$  des paramètres à estimer prend la forme suivante :

$$\Phi = [ (f_x, f_y, u_o, v_o, a_1, \theta_1, \theta_2, \theta_3)_1, (f_x, f_y, u_o, v_o, a_1, \theta_1, \theta_2, \theta_3)_2, (T_{x1}, T_{y1}, T_{z1}, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1)_1, \dots, (T_{xm}, T_{ym}, T_{zm}, \alpha^m, \beta^m, \gamma^m)_1, T_{xM}, T_{yM}, T_{zM}, \alpha^M, \beta^M, \gamma^M, X_1, Y_1, Z_1, \dots, X_n, Y_n, Z_n ]_{\Gamma}$$

La fonction coût du vecteur de paramètres  $\Phi$  est la somme  $\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{i,u}^2 + \varepsilon_{i,v}^2)$  où les  $\varepsilon_{i,u}$  (respectivement les  $\varepsilon_{i,v}$ ) désignent les écarts entre la composante mesurée et la composante issue du modèle pour le point  $i$ .

### 3. RESULTATS D'AUTO-ETALONNAGE

Une simulation a été réalisée pour cerner l'influence de différents facteurs sur l'optimisation des paramètres de prises de vues. La tête stéréoscopique considérée est constituée de deux caméras  $C_1$  et  $C_2$  de distance focale  $f = 50\text{mm}$  en conditions de Scheimpflug. Chaque caméra a une distance de travail de 1 m et fait un angle  $45^\circ$  avec la normale au plan de mise au point dans un plan horizontal. Dans cette configuration, les angles de Scheimpflug ont la valeur suivante :

$$(\theta_2)_1 = (\theta_2)_2 = 2.8624^\circ$$

Les capteurs des caméras sont supposés composés de  $512 \times 512$  pixels de  $10\mu\text{m}^2$  et centrés :  $f_x = f_y = 5000$  pixel,  $u_0 = v_0 = 256$  pixel. La mire considérée est plane et composée de 15 amers.

Une séquence de 10 vues est calculée de manière à permettre l'observation de la mire sous des points de vue fortement distincts.

Les influences du taux de distorsions et de la précision de détection des images d'amers vont être examinés séparément. Dans la suite, les angles de Scheimpflug sont initialisés avec des écarts respectivement de  $0.55^\circ$  et  $-0.31^\circ$  à la valeur simulée  $(\theta_2)_1=(\theta_2)_2=2.8624^\circ$  soit plus précisément :

$$(\theta_2)_{1(0)}=3.41^\circ \quad , \quad (\theta_2)_{2(0)}=2.55^\circ$$

Il est clair que l'écart entre les valeurs à l'initialisation et les valeurs de la simulation va influencer la convergence de la procédure d'optimisation (non linéaire) et en cas de convergence, le nombre d'itérations nécessaires. La figure 3.a indique une vingtaine d'itérations nécessaires pour atteindre l'angle de Scheimpflug de la première caméra contre une douzaine pour la deuxième caméra dont l'écart à l'initialisation est plus faible. La figure 3.b illustre un comportement analogue sur la distance focale : une vingtaine d'itérations pour un écart de 5 mm sur la distance focale contre 5 itérations pour un écart de 2 mm.

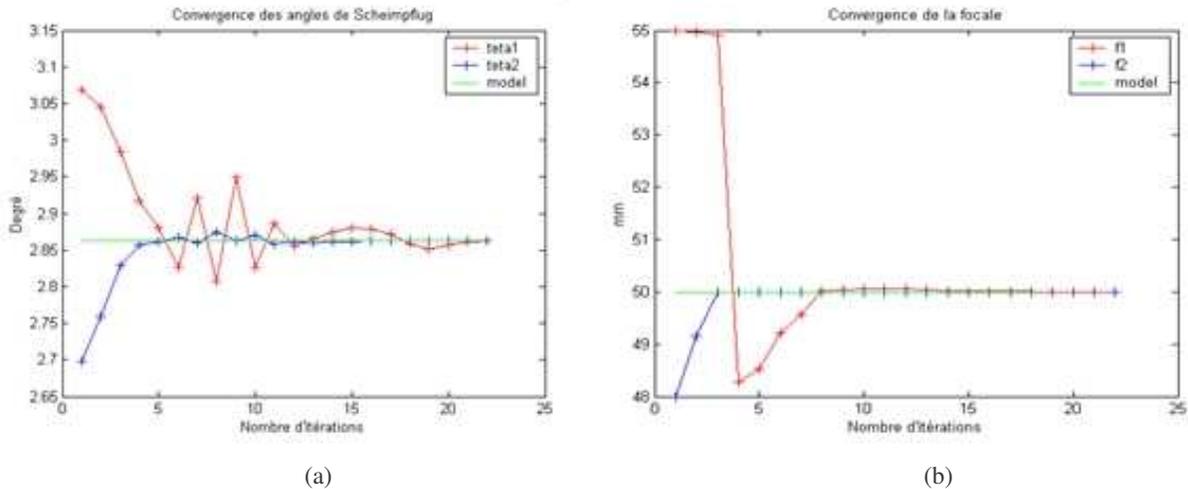


Figure 3. Influence d'un écart à l'initialisation.

### 3.1 Influence du taux de distorsions

Sans distorsions, la rotation de Scheimpflug n'est pas contrainte et le modèle a trop de degrés de liberté. Cela est illustré par la figure 4.a. Afin de quantifier un taux de distorsions minimal nécessaire à l'optimisation du modèle de Scheimpflug (dans les conditions de la simulation), différents taux de distorsions ont été successivement considérés de façon croissante. Les coordonnées  $(X_i, Y_i, Z_i)$  des amers sont ici supposées parfaitement déterminées et les coordonnées de leurs images  $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$  affectées d'un bruit de détection d'amplitude 0.01 pixel.

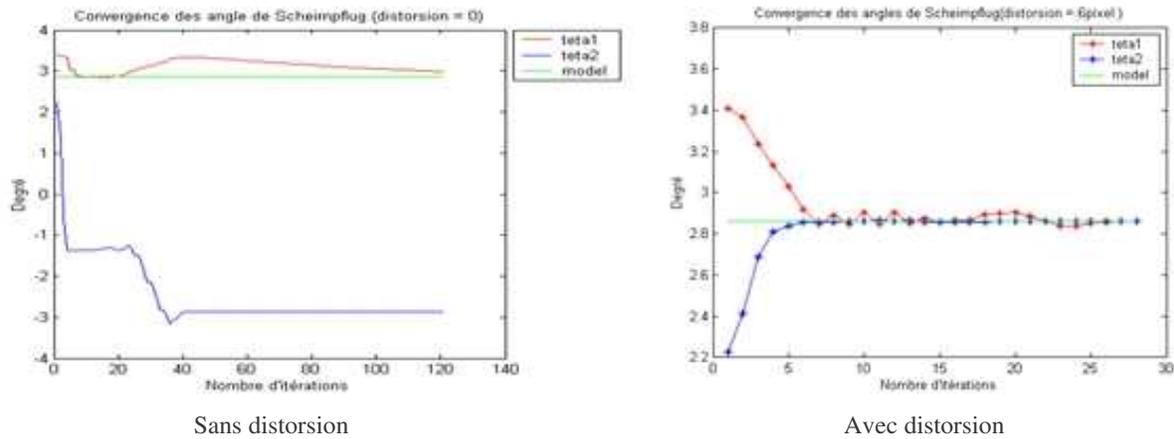


Figure 4. Influence des distorsions.

Le tableau 1 montre que la convergence du modèle de Scheimpflug n'est obtenue qu'à partir de distorsions voisines de 3 pixels en bord d'image.

Table 1. Valeurs estimées des angles de Scheimpflug par auto-étalonnage pour différents taux de distorsions.

$a1$ ( $mm^{-2}$ )	$\theta_{(1)}$ (degré)	$\sigma_{\theta(1)}$ (degré)	$\theta_{(2)}$ (degré)	$\sigma_{\theta(2)}$ (degré)	Nombre d'itérations
0	Divergence				
$4.10^{-5}$	Divergence				
$2.10^{-4}$	2.8624	$5.33 \cdot 10^{-14}$	2.8624	$2.54 \cdot 10^{-13}$	74
$4.10^{-4}$	2.8624	$1.44 \cdot 10^{-13}$	2.8624	$2.24 \cdot 10^{-13}$	52
$2.10^{-3}$	2.8624	$3.46 \cdot 10^{-14}$	2.8624	$2.81 \cdot 10^{-14}$	38
$4.10^{-3}$	2.8624	$6.61 \cdot 10^{-14}$	2.8624	$4.29 \cdot 10^{-14}$	33

### 3.2 Influence de la précision de détection des images d'amers

Le protocole reste similaire. L'amplitude du bruit de détection des images d'amers est fixés successivement à différentes valeurs de façon croissante. Les amers sont encore supposés parfaitement déterminés. Conformément aux résultats précédents, les distorsions sont là fixés à un taux conduisant à des distorsions de 3 pixel en bord d'images.

Au vu des résultats figurant au tableau 2, il apparaît nécessaire d'effectuer une détection subpixelique des images d'amers, de l'ordre du centième de pixel (dans les conditions de la simulation), pour assurer la convergence vers la configuration simulée.

Table 2. Valeurs estimées des angles de Scheimpflug par auto-étalonnage pour différentes amplitudes de bruit de détection.

Ecart-type du bruit sur u et v (pixel)	$\theta_{(1)}$ (degré)	$\sigma_{\theta(1)}$ (degré)	$\theta_{(2)}$ (degré)	$\sigma_{\theta(2)}$ (degré)	Nombre d'itérations
0.00	2.8624	$6.61 \cdot 10^{-14}$	2.8624	$4.29 \cdot 10^{-14}$	33
0.01	2.8624	$1.44 \cdot 10^{-13}$	2.8624	$5.83 \cdot 10^{-9}$	33
0.02	2.8231	0.0002	2.8104	0.0013	39
0.50	2.6982	0.32	2.6982	0.79	45
1.00	2.6030	4.1	2.4251	2.03	57

La reconstruction d'un cube de 50 $\mu$ m de côté après auto-étalonnage (figure 5) indique que la détection doit rester proche du centième de pixel pour être correcte à une échelle micronique. Une erreur de détection d'amplitude 0.01 pixel conduit à une erreur de reconstruction inférieure à 3  $\mu$ m.

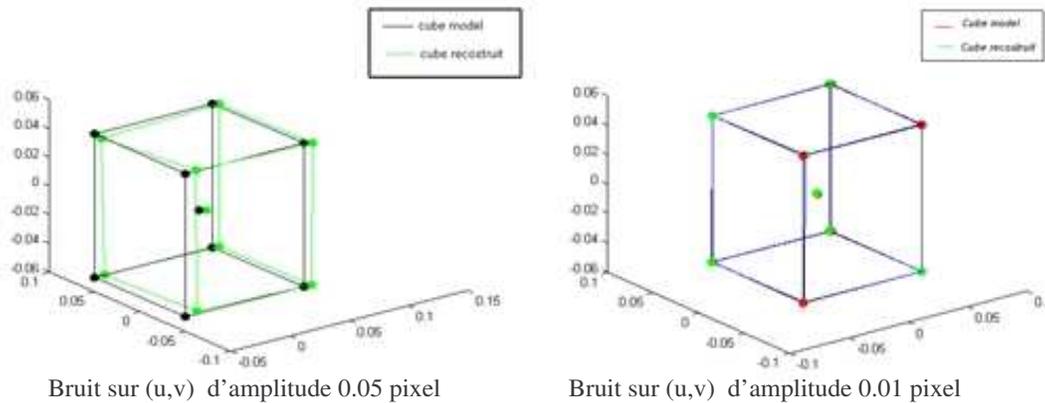


Figure 5. Influence de la précision de détection sur la reconstruction

#### 4. CONCLUSION

L'auto-étalonnage de caméras par ajustement de faisceaux permet un étalonnage moins contraignant que les étalonnages classiques, en terme de précision voire de maniement de la mire. Cela apporte une souplesse qui revêt un intérêt tout particulier en cas d'expérimentation à accès difficile. En condition de Scheimpflug, ce procédé est suffisamment performant pour permettre la reconstruction d'un cube de quelques micromètres de côté. La précision requise pour la détection des images d'amers est du même ordre de grandeur qu'en conditions standards, c'est à dire voisine du centième de pixel. La simulation réalisée a par ailleurs permis de cerner le taux de distorsions minimal. Plusieurs pixels de distorsions en bord de champ sont nécessaires pour ajuster un modèle de Scheimpflug en conditions de Stéréo Vélométrie par Images de Particules. Des auto-étalonnages en conditions réelles sont actuellement en cours de réalisation pour confirmer ces résultats.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. A. K. Prasad, K. Jensen, 1995, Scheimpflug stereo camera for particle image velocimetry in liquid flows. *Appl Opt.*34:7092-7099.
2. S. SOLOFF, R. ADRIAN, Z.C. LIU, 1997, Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry. *Meas. Sci. and Technol.* 8 :1441-1454
3. T. FOURNEL, J.M. LAVEST, S. COUDERT and F. COLLANGE, 2004, Self-calibration of PIV video-cameras in Scheimpflug condition in Particle Image Velocimetry. Recent Improvements, *Proc. of the EUROPIV 2 workshop held in Zaragoza, Spain, March 31-April 1.*
4. J.M. LAVEST, M. VIALA, M. DHOME, 1998, Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera calibration. *Proc. of ECCV98, Freiburg, Germany, 158-174.*
5. H. Hinrich, A. Roshop, F. Dresesen, 1993, Holographic and stereoscopic advances in 3-D PIV. Holographic Image Velocimetry. *Proc of Fluids Engineering Division, American Society of Mechanical Engineers, ed, E.P.Rood 148 :33-36.*