

# Restauration myope d'images pour l'inspection des ouvrages d'art par un système de vision embarqué sur drone \*

Benoit VOZEL<sup>1</sup>, Kacem CHEHDI<sup>1</sup>, Jean DUMOULIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IETR, UMR CNRS 6164, Equipe TSI2M, Université de RENNES I,  
BP 80518 - 22305 Lannion Cedex, France

<sup>2</sup>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
Route de Bouaye - BP 41291 - 44341 Bouguenais Cedex, France  
vozel@enssat.fr, chehdi@enssat.fr, Jean.Dumoulin@lcpc.fr

**Résumé** – Cet article présente les premiers résultats d'une étude de faisabilité du développement d'un système aérien de vision pour l'inspection des structures de génie civil telles que des ponts, tunnels. L'objectif final est d'effectuer l'inspection à l'aide d'un dispositif de vision embarqué sur un drone évoluant à l'extérieur, ou même à l'intérieur des ouvrages d'art. Les images acquises par un tel système de vision embarqué sont inévitablement dégradées. Les dégradations sont dues au comportement dynamique du drone ou aux conditions opérationnelles pendant l'inspection de la structure. Ils se traduisent essentiellement par un flou de mouvement qui peut être combiné avec un flou de défocalisation sur les images acquises. Dans la pratique, ils sont tous les deux inconnus. Nous simulons expérimentalement les dégradations qui peuvent affecter la qualité des images acquises par un tel système de vision embarqué sur drone. Nous considérons ensuite leur restauration numérique. La restauration est réalisée au moyen d'un système de traitement myope. Elle inclut deux modules de traitement, un pour identifier la PSF et un autre pour la restauration de l'image. L'identification et l'évaluation de la PSF est réalisée en utilisant le critère de la validation croisée généralisée et une contrainte de douceur sur l'image. L'étape de restauration utilise une régularisation de type Tikhonov-Miller. Les premiers résultats prouvent que ce système donne des résultats plutôt bons sur les diverses configurations (statique, dynamique) d'acquisition des images. Il est tout à fait efficace sur les images flouées et bruitées, sans connaissance *a priori* des caractéristiques de bruit ou de l'image.

**Abstract** – This paper presents the first results of a feasibility study focusing on the development of an aerial vision system for the inspection of civil engineering structures such as bridges, tunnels. The final goal is to carry out the inspection by using an onboard vision device on an UAV (Unmanned Aerial Vehicle) evolving outside, or even inside the structures. The images acquired by such an onboard vision system are unavoidably degraded. The degradations are either due to the dynamic behavior of the UAV or the operative conditions during the inspection of the structure. They essentially translate in a motion blur which may be combined with a defocusing blur on the acquired images. In practice, they are both unknown. We first experimentally simulate the degradations that can affect the quality of images acquired by such a vision system onboard an UAV and then consider their numerical restoration. The restoration is achieved by means of a myopic processing system. It includes two processing modules, one for identifying the blur PSF and another for image restoration. The blur PSF identification and estimation is achieved using the Generalized Cross-Validation Criterion and a smoothness constraint on the image. The deblurring step is based on a Tikhonov-Miller regularization technique. First results show that this system yields rather good results on various configuration (static, dynamic) of images acquisition. It is quite effective in restoring blurred and noise corrupted images, without prior knowledge of either the noise or image characteristics. It can also discriminate between the blurred (defocusing and/or motion blurs) and unblurred images.

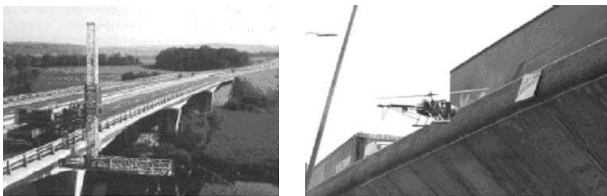
## 1 Introduction

La surveillance des ouvrages d'art est une opération nécessaire pour le maintien en état du patrimoine et pour satisfaire à la sécurité des usagers. Actuellement, celle-ci est principalement effectuée visuellement par des inspecteurs utilisant des moyens tels que des passerelles (Fig. 1), des nacelles pour accéder en tout point de l'ouvrage. Cette surveillance porte aussi bien sur le gros oeuvre, que sur la chaussée, les corniches, les gardes corps et les câbles dans le cas des ponts suspendus. Cette inspection détaillée à lieu tous les six ans, avec éventuellement un suivi plus

détaillé pour les ouvrages souffrant de désordres préoccupants. Cette méthode d'auscultation des ouvrages d'art entraîne quelques difficultés. En effet pour examiner certaines parties d'ouvrages, il faut pouvoir y accéder sans mettre en danger les intervenants. De plus la mise en place du système pour la surveillance de l'ouvrage impose l'installation de barrages sur les routes et entraîne donc un coût trop élevé. Il est donc envisagé d'automatiser certaines tâches et de réaliser ces contrôles à l'aide de dispositifs de vision embarqués sur un drone (appareil volant sans pilote) évoluant à l'extérieur (Fig. 2) voire à l'intérieur de l'ouvrage d'art [6],[8]. L'efficacité opérationnelle des contrôles réalisés par un drone devrait se traduire par une réduction des risques d'accidents en évitant une in-

---

\*Les auteurs remercient Christian GOURRAUD<sup>2</sup> pour sa contribution technique dans la mise en place des essais en laboratoire



Une passerelle automotrice Un drone en position d'acquisition

FIG. 1 – Inspection des ouvrages d'art

tervention humaine dans une zone à risque. Elle devrait aussi se traduire par une diminution du coût global des mesures en réduisant le nombre d'intervenant et en évitant l'utilisation d'une passerelle automotrice qui nécessite une fermeture partielle ou totale de l'ouvrage à la circulation. L'usage d'une plate-forme d'auscultation de type drone devrait autoriser une meilleure investigation, car il permettra l'inspection des zones impossibles d'accès. A terme, le suivi à long terme de l'ouvrage inspecté devrait en être facilité et la compréhension de son comportement améliorée. Lors des inspections sur ouvrages d'art, les inspecteurs s'intéressent notamment à des défauts de type fissure dont la largeur est inférieure au millimètre, c'est pourquoi il faudra être en mesure d'obtenir à partir du système de vision embarqué des images dont la qualité soit suffisante pour les détecter. Dans ce contexte, un travail de recherche portant sur la simulation expérimentale et numérique des dégradations pouvant affecter la qualité des images acquises par un système de vision embarqué sur un drone a été engagé. Ces perturbations peuvent être soit liées au comportement dynamique du drone et/ou aux conditions opératoires lors de l'auscultation de l'ouvrage d'art. Ces perturbations sur le dispositif de prise de vue embarqué se traduisent par l'apparition de flous de mouvement combinés ou pas à des flous de défocalisation sur les images acquises. Des expérimentations ont été développées et conduites en laboratoire mais également sur un plan numérique afin de générer deux types de flous sur les images acquises par un dispositif de prises de vues numériques. Ces essais ont fait et continu de faire l'objet d'amélioration en fonction de l'avancement des connaissances acquises au cours des travaux conduits sur la restauration de ces images floues.

## 2 Les essais en laboratoire

Lors des essais de mise au point d'un protocole expérimental pour l'évaluation d'algorithmes de restauration des images, deux types de flous ont été réalisés lors de l'acquisition. Les images ont été acquises avec une résolution spatiale d'environ 0.3 mm par pixel et une taille d'image 1280 par 1024 pixels (pleine résolution du capteur CMOS [7]).

Les flous de défocalisation ont été réalisés en statique en utilisant différentes bagues allongées (de 0.5, 1, 1.5 et 5 mm).

Dans un premier temps, les prises d'images en configuration dynamique ont été seulement affectées des déplacements générés par le pot vibrant [9] afin de provoquer des flous de mouvement sans déformation du champ de prise

de vue (axe optique de la caméra est perpendiculaire à la cible). Dans un second temps, il a été associé à ces flous de mouvement, un flou de défocalisation en ajoutant une bague allongée.

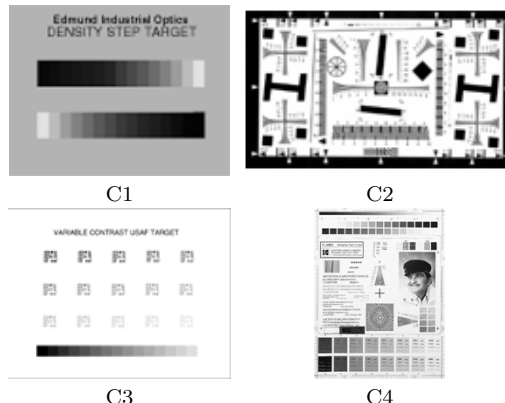


FIG. 2 – Les différentes cibles

## 3 La restauration numérique myope

Le but de la restauration myope d'image est d'estimer simultanément la PSF et l'image originale avec une connaissance partielle de leurs caractéristiques ou des caractéristiques du bruit. Nous considérons ici uniquement des PSF linéaires, invariantes spatialement, avec un bruit d'observation additif gaussien blanc indépendant de l'image originale. Bien que ceci puisse sembler tout à fait restrictif, les PSF des flous de défocalisation et de mouvement uniforme peuvent être facilement décrites par une fonction paramétrique avec peu de paramètres. Pour résoudre le problème inverse dans un cadre déterministe, on utilise le fait que le contenu des images est généralement basse-fréquence. L'imposition de cette contrainte de régularisation permet de réduire l'espace de recherche pour des solutions [3],[4].

### 3.1 Le modèle d'observation

Le modèle d'observation retenu est le suivant

$$g = H f + n \quad (1)$$

où  $f = \text{vec}(F)$ ,  $n = \text{vec}(N)$ , sont respectivement l'image originale et le bruit,  $g$  l'image observée, tous les trois de dimension  $N^2 \times 1$  et  $H$  est la matrice associée à la transformation linéaire construite à partir d'une version discrète de la PSF, de dimension  $N^2 \times N^2$ . Compte tenu du contexte expérimental décrit précédemment, nous utiliserons les deux modèles  $H_1$  (défocalisation),  $H_2$  (mouvement uniforme) et  $H_0$  (pas de flou), rassemblés ci-dessous, pour la phase de restauration numérique.

### 3.2 Identification de la PSF

Nous proposons l'utilisation de l'algorithme suivant pour l'identification de la PSF parmi les deux PSF possibles compte tenu de la génération expérimentale des images considérées dans cette étude : la première mono-paramétrique

(flou de défocalisation), la seconde bi-paramétrique (flou de mouvement uniforme). Les modèles retenus sont les suivants :

$H_0$  : Dirac

$$\begin{cases} h_{\Theta_\delta}(n, m) = \delta(n, m) \text{ pour } (n, m) \in S_G \\ \Theta_\delta^T = \{\emptyset\} \end{cases}$$

$H_1$  : Défocalisation

$$\begin{cases} h_{\Theta_D}(n, m) = \frac{4}{\pi d^2} \text{ si } \sqrt{n^2 + m^2} \leq \frac{d}{2} \\ 0 \text{ autrement} \\ \Theta_D^T = (d) \in S_D \end{cases}$$

$H_2$  : Mouvement uniforme

$$\begin{cases} h_{\Theta_M}(n, m) = \frac{1}{d} \text{ si } \sqrt{n^2 + m^2} \leq \frac{d}{2} \\ 0 \text{ autrement} \\ \tan(\phi) = \frac{n}{m} \\ \Theta_M^T = (d, \phi) \in S_M \end{cases}$$

La solution est donnée par [5] :

$$\Theta^* = [\lambda^*, \Theta_h^*]^T = \operatorname{argmin}_{\Theta \in \mathcal{H}} GCV(\Theta) \quad (2)$$

où  $\mathcal{H}$  est l'ensemble des PSF candidates  $\{H_0, H_1, H_2\}$  et où  $S_D, S_M$ , sont les intervalles de valeurs possibles pour les différents paramètres  $d, \phi$ . L'expression du critère de la validation croisée généralisée est donnée par :

$$GCV(\lambda, \Theta_h) = \frac{1}{\left( \sum_k \frac{\lambda |C_k|^2}{H(\Theta_h)_k^2 + \lambda |C_k|^2} \right)^2} \quad (3)$$

$$\sum_k \left( \frac{\lambda^2 |C_k|^4}{(H(\Theta_h)_k^2 + \lambda |C_k|^2)^2} |G_k|^2 \right) \quad (4)$$

où  $\lambda$  est le paramètre de régularisation,  $C_k, H_k(\Theta_h)$  les valeurs propres des matrices  $C, H(\Theta_h)$  obtenues par transformation de Fourier discrète et  $G_k$  est la  $k$ ième composante de la transformée de Fourier discrète de  $G$ .

Le vecteur de paramètres  $\Theta_h$  dépend du type de PSF choisi :  $\Theta_D^T = (d)$  pour le flou de défocalisation,  $\Theta_M^T = (d, \phi)$  pour le mouvement uniforme.

### 3.3 Restauration de l'image

La phase suivante de restauration est obtenue par régularisation de Tikhonov-Miller. Cette régularisation a été développée dans un contexte déterministe [1]. Elle consiste en une fonctionnelle stabilisatrice ajoutée aux moindres carrés liés à l'inversion du modèle (1) :

$$\hat{f}_{TM} = \operatorname{argmin}_f J(f) = \|g - H f\|^2 + \lambda \|C f\|^2 \quad (5)$$

où  $C$  traduit la connaissance a priori sur  $f$  et  $\lambda$  est le paramètre de régularisation. En pratique,  $C$  est un filtre passe-haut, par exemple un opérateur de différentiation d'ordre peu élevé (premier ordre).

Cet algorithme peut fournir de bonnes valeurs initiales pour une procédure plus précise à la suite.

## 4 Premiers résultats expérimentaux

Nous avons tout d'abord généré des images dégradées par simulation numérique afin de pouvoir évaluer proprement et vérifier l'efficacité de la méthode proposée d'identification de la PSF. En effet, dans ce cas précis, le modèle d'observation considéré est exactement celui ayant été utilisé pour la génération des données. Ces premiers résultats ne sont pas décrits ici. Ils sont semblables aux résultats obtenus dans [5]. Puis, nous avons considéré des images dégradées réelles (en configuration statique : addition d'une bague allongée de 0,5 millimètres, puis de 1,5 millimètres ; en configuration dynamique : fréquence de 15Hz), issues de l'acquisition en laboratoire au LCPC, de façon à appréhender la robustesse de la méthode à la non adéquation idéale du modèle d'observation aux données réelles. Les figures suivantes (Fig.3), (Fig.4) et (Fig.5) montrent les images restaurées.

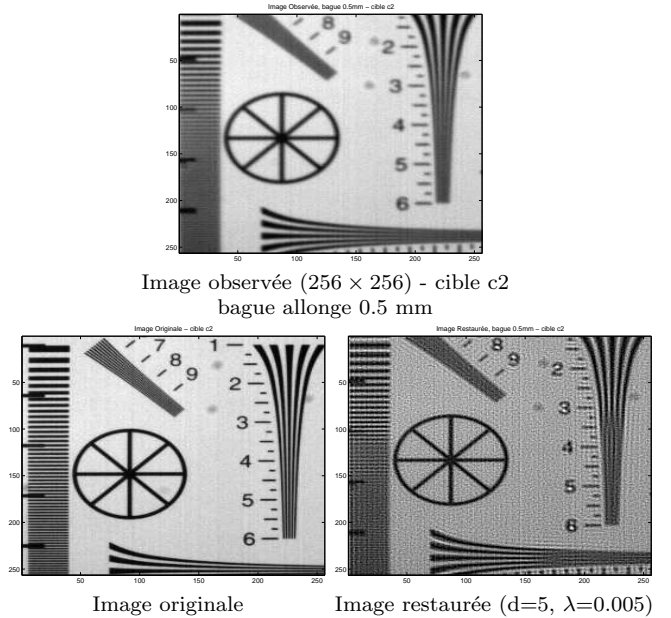


FIG. 3 – Restauration après identification du flou (bague allongée 0.5 mm) -  $S_D = [1 : 99]$

Ces résultats montrent que les modèles retenus de PSF dans (2) sont bien adaptés pour les étapes d'identification et de restauration. Les résultats obtenus en configuration dynamique sont plus contrastés, compte-tenu de la non stationnarité du flou sur l'image considérée (Fig.5). Les essais en configuration dynamique sont actuellement en phase de raffinement. Si la PSF réelle n'appartient pas à l'ensemble des PSF candidates, un module de restauration aveugle peut être considéré pour compenser la distance entre les deux PSF. Il utilise comme valeur initiale de PSF, la valeur obtenue lors de l'étape précédente d'identification et réalise l'estimation alternée de la PSF et de l'image originale [2]. Pour réduire les coûts de calcul, il est possible d'effectuer l'étape d'identification (2) sur une image de résolution suffisamment réduite ("binned image" de taille  $256 \times 256$ , voire  $128 \times 128$ ) sans altérer la qualité de l'identification, ni diminuer le taux de bonne identification (les profils des deux PSF candidates retenues étant

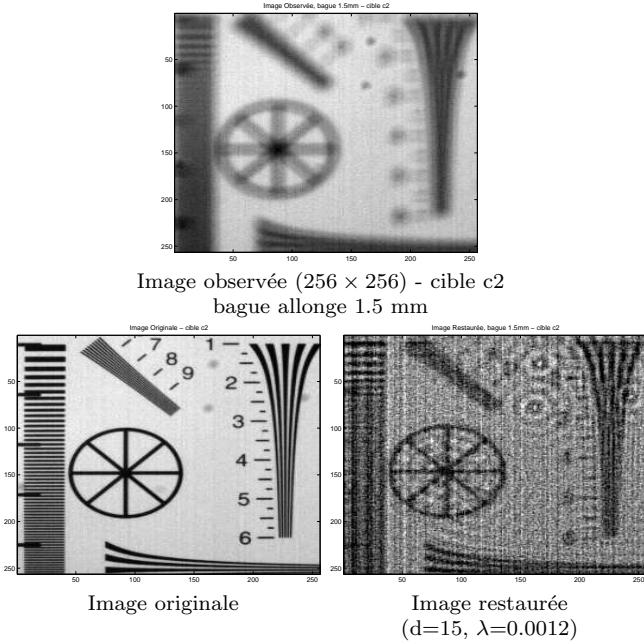


FIG. 4 – Restauration après identification du flou (bague allongée 1.5mm) -  $S_D = ([1 : 99])$

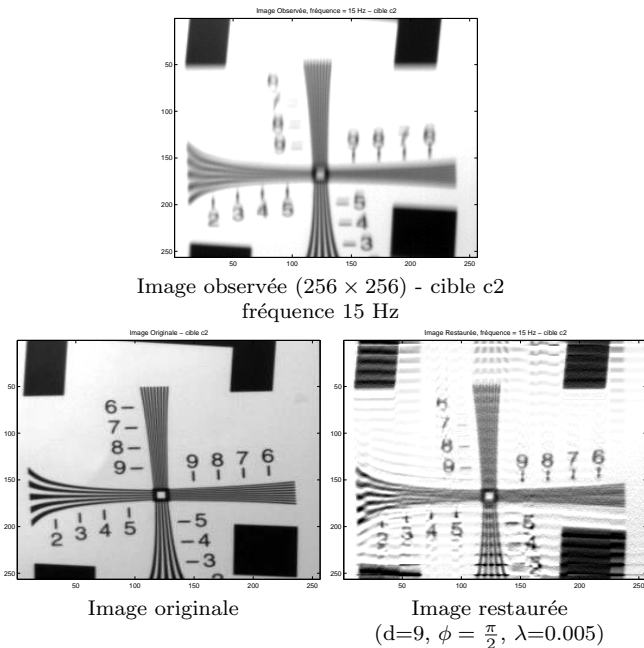


FIG. 5 – Restauration après identification du flou (fréquence 15 Hz) -  $S_M = ([1 : 99], [0.8\frac{\pi}{2} : 1.2\frac{\pi}{2}])$

suffisamment distincts).

D'autres méthodes de restauration [10], [11], [12], peuvent également être utilisées, notamment afin de palier les inconvénients bien connus des méthodes d'inversion fréquentielle (oscillations observées (Fig.4)). Elles induisent néanmoins un coût de calcul plus important. Le choix définitif dépend surtout des traitements en aval (caractérisation et reconnaissance des fissures).

La méthode proposée et testée ici permet donc d'obtenir une première estimation de la PSF (sa nature : défocalisation, mouvement, et son support : valeur de  $d$ ,  $\phi$ ). Cette estimation est ensuite utilisée pour définir la résolution d'une fenêtre glissante de restauration. Après réécriture de la PSF, le traitement des fenêtres successives de l'image dégradée de pleine résolution ( $1024 \times 1280$ ) donne finalement l'image restaurée.

## 5 Conclusion

La restauration numérique des images expérimentales obtenues en configuration statique et dynamique avec différents réglages des paramètres d'acquisition, montrent le potentiel du système global. Les travaux futurs incluent la détermination du taux d'identification sur la population complète d'images expérimentales ainsi que la restauration d'images expérimentales dégradées par une combinaison de flous de type défocalisation et mouvement uniforme.

## Références

- [1] Andrews H.C., Hunt B.R. " Digital Image Restoration ". Prentice-Hall, 1977.
- [2] Y.-L. You, M. Kaveh. "A Regularization Approach to Joint Blur Identification and Image Restoration". IEEE Transactions on Image Processing, 5(3) :416-428, March 1996.
- [3] R.L Lagendijk, J. Biemond, D.E. Boeke. "Regularized iterative image restoration with ringing reduction" IEEE Tr. ASSP, 36(12), 1874-1888, December 1988.
- [4] Galatsanos N.P., Katsaggelos A.K. " Methods for Choosing the Regularization Parameter and Estimating the Noise Variance in Image Restoration and Their Relation " IEEE Tr. IP, July 1992, Vol. 1, No. 3, pp. 322-336.
- [5] B. Vozel, K. Chehdi, M.-P. Vandecandelaere. "A Blind Restoration System of Blurred and Noisy Numerical Images". ICIP 2000, Vancouver, Canada, 10-13 September 2000.
- [6] F Derkx, J. Dumoulin, J-L Sorin et V. Legeay, "Inspection of the Civil Engineering Structures : Interest of the UAV". Revue Essais Industriels, pp 23-27, mars 2003.
- [7] Vitana Corporation. " Pixelink : Megapixel Firewire camera developer's manual". release 3.0, 121 pages, 2002.
- [8] J-M Moliard. "New User's Guide of the PICTURE Image Processing Software ". août 2004.
- [9] Dactron Inc. " Premier shaker control manual V5.0 ". 509 pages, janvier 2003 ;
- [10] T.F. Chan and C.K. Wong, "Total variation blind deconvolution", IEEE Tr. IP, vol. 7(3), pp 370-375, mar 1998
- [11] S. Teboul and L. Blanc-Féraud and G. Aubert and M. Barlaud "Variational approach for edge preserving regularization using coupled PDE's", IEEE Tr. IP, vol. 7(3), pp 387-397, mar 1998
- [12] G. Aubert and P. Kornprobst, "Mathematical problems in image processing (Partial differential equations and the calculus of variations)", Springer, 2002