

# Estimation aveugle de la variance d'un bruit dépendant du signal\*

MYKHAILO USS<sup>1</sup>, BENOIT VOZEL<sup>2</sup>, VLADIMIR LUKIN<sup>3</sup>, KACEM CHEHDI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dept of Aerospace Radioelectronic Systems Design, National Aerospace University  
17 Chkalova Street, 61070, Kharkov, Ukraine

<sup>2</sup> IETR-TSI2M, Université de Rennes 1, ENSSAT

6 rue de Kerampont, CS 80518, 22305 Lannion cedex, France

<sup>3</sup> Dept of Receivers, Transmitters and Signal Processing, National Aerospace University  
17 Chkalova Street, 61070, Kharkov, Ukraine

[uss@xai.edu.ua](mailto:uss@xai.edu.ua), [benoit.vozel@univ-rennes1.fr](mailto:benoit.vozel@univ-rennes1.fr), [lukin@ai.kharkov.com](mailto:lukin@ai.kharkov.com), [kacem.chehdi@univ-rennes1.fr](mailto:kacem.chehdi@univ-rennes1.fr)

**Résumé** - Dans ce papier, nous analysons la robustesse d'un algorithme récent d'estimation aveugle des paramètres d'un modèle de bruit dépendant du signal dans les images numériques. L'analyse est conduite par rapport au nombre de fenêtres d'une image détectées comme étant informatives sur les paramètres du modèle au sens de l'Information de Fisher. L'impact du nombre de ces fenêtres sur la précision finale d'estimation est mesuré en termes de biais, de variance d'erreur d'estimation, d'efficacité statistique pour chacune des composantes présentes de bruit. L'efficacité de l'algorithme proposé est prouvée à partir d'une évaluation objective conduite sur les 25 images couleur de la base d'images de scènes naturelles NED 2012 (composée d'images bruitées délivrées en sortie directe d'un capteur CCD, et donc sans ajout de bruit artificiel).

**Abstract** - In this paper, we analyze the robustness of a recently proposed blind method for estimating parameters of a mixed signal-dependent noise model in digital images. Analysis is carried out with respect to the number of scanning windows detected as informative in the Fisher Information sense on the noise parameters. The influence of such a number on the final estimation accuracy is measured according to bias, estimation error variance, and statistical efficiency for each of the two components of the retained noise model. The proposed method efficiency is demonstrated on the 25 color images of the recently introduced NED 2012 database (only composed of noisy images obtained at the output of a CCD sensor, and thus without artificial noise added).

## 1 Introduction

La prise en compte des caractéristiques et des paramètres du bruit d'observation, irrémédiablement présent dans toute capture d'images au moment de l'acquisition, est une étape importante dans toute chaîne de traitement de l'image. Qu'elle soit effectuée explicitement ou implicitement, la prise en considération de ces informations sur le bruit est nécessaire pour garantir notamment un minimum de nuisance ou un maximum de robustesse dans l'efficacité des traitements postérieurs [1,2,3,4], tels que le filtrage, la compression, la classification, l'estimation de paramètres liés au domaine d'application (environnemental, médical). Lorsque ces informations ne sont pas disponibles *a priori*, ou uniquement partiellement, voire encore non fiables, il s'agit de développer des méthodes automatiques ou semi-automatiques permettant d'identifier et d'estimer avec un niveau de précision acceptable, la nature et les paramètres du bruit.

La présence d'un bruit dépendant du signal et donc non stationnaire, tel qu'il a été mis en évidence dans plusieurs travaux récents [5,6], notamment avec les dernières générations de

capteurs, requiert l'estimation des paramètres d'un modèle de variance locale du bruit, composé de deux termes:  $\sigma_n^2(I) = \sigma_{n,SI}^2 + I \cdot \sigma_{n,SD}^2$ . Le premier,  $\sigma_{n,SI}^2$ , a vocation à traduire la contribution des composantes du bruit indépendantes du contenu de l'image, le second,  $\sigma_{n,SD}^2$ , celle des composantes fortement dépendantes de l'intensité  $I$  de l'image.

## 2 Description de la méthode proposée

Les résultats obtenus très récemment [7,8] reposent sur l'hypothèse que les deux problèmes d'estimation (celui des paramètres de la texture locale de l'image et celui des paramètres de la variance du bruit) sont interdépendants. Un modèle de mouvement brownien fractionnaire (fBm) est retenu pour décrire localement la texture de l'image. Par définition,  $B_H(t, s)$ ,  $H \in [0,1]$ , est un processus Gaussien à accroissement stationnaire (dont l'origine est en  $(0,0)$ :  $B_H(0,0) = 0$ ) de covariance donnée par [9]:

$$\langle B_H(t, s) \cdot B_H(t_1, s_1) \rangle = 0.5\sigma_x^2 \left( (t^2 + s^2)^H + (t_1^2 + s_1^2)^H - ((t-t_1)^2 + (s-s_1)^2)^H \right).$$

L'exposant de Hurst  $H$  décrit le caractère plus ou moins « rugueux » de la texture fBm ( $H \rightarrow 0$  pour un processus à courte mémoire,  $H \rightarrow 1$  pour un processus à longue mémoire), et  $\sigma_x$  en décrit l'amplitude fBm [9].

Par ailleurs, un modèle polynomial peut être proposé pour expliciter la dépendance de la variance du bruit dépendant du signal par rapport à l'intensité locale de l'image:  $\sigma_n^2(I, \mathbf{c}) = \mathbf{c} \cdot [1, I, I^2, \dots, I^{n_p}]$ , où  $\mathbf{c}$  de dimension  $n_p \times 1$  est le vecteur des coefficients du modèle polynomial retenu, et  $n_p$  son degré. Dans le cas des capteurs CCD récents, le bruit peut être considéré composé essentiellement de deux termes: le premier est indépendant du signal, de variance  $\sigma_{n.SI}^2$ , le second est dépendant du signal de variance  $\sigma_{n.SD}^2 \cdot I$  (de type quasi poissonien). Cela correspond à un modèle du premier ordre:  $n_p = 1$  et  $\mathbf{c} = (\sigma_{n.SI}^2, \sigma_{n.SD}^2)$ :  $\sigma_n^2(I) = \sigma_{n.SI}^2 + \sigma_{n.SD}^2 \cdot I$ .

Ces modèles étant posés, une approche au sens du Maximum de Vraisemblance, permet de conduire l'estimation locale des paramètres du modèle fBm et de ceux du bruit. L'information de Fisher sur le vecteur des paramètres  $\theta = (\sigma_x, H, \sigma_n)$  comprenant les paramètres de la texture ( $\sigma_x, H$ ) et l'écart-type du bruit ( $\sigma_n$ ), calculée sur une seule fenêtre d'observation ( $N_{sw} = 1$ ), a été introduite dans [7] comme étant  $\mathbf{I}_\theta = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{fBm} & \mathbf{I}_{fBm, \sigma_n}^T \\ \mathbf{I}_{fBm, \sigma_n} & I_{\sigma_n \sigma_n} \end{pmatrix}$ , où  $\mathbf{I}_{fBm} = \begin{pmatrix} I_{\sigma_x \sigma_x} & I_{\sigma_x H} \\ I_{\sigma_x H} & I_{HH} \end{pmatrix}$  est l'information sur les paramètres du modèle fBm,  $I_{\sigma_n \sigma_n}$  est l'information sur l'écart-type du bruit et enfin  $\mathbf{I}_{fBm, \sigma_n} = (I_{\sigma_x \sigma_n} \quad I_{H \sigma_n})$  l'information mutuelle.

Il a été montré dans [8] que l'information de Fisher sur les paramètres du bruit (contenue dans une image dégradée donnée) est distribuée non uniformément sur l'intervalle des valeurs possibles de l'intensité de cette image. Ce résultat est directement exploité pour détecter les intensités de l'image, les plus informatives sur les paramètres du modèle de bruit, et aussi les fenêtres correspondantes de l'image. Ensuite, un estimateur défini comme étant l'écart-type des 6 composants DCT de plus haute fréquence d'un nombre raisonnable  $N_{sw}$  de ces fenêtres de taille  $9 \times 9$  (transformées par DCT dans le domaine spectral)

délivre l'estimation de la variance locale du bruit, correspondante à chaque intensité informative. Notons ici qu'une taille trop faible des fenêtres d'observation ne permet pas d'estimer correctement les paramètres d'un modèle fBm (plus particulièrement l'exposant de Hurst). Une taille trop grande n'est pas non plus adéquate pour décrire les textures hétérogènes (régions aux contenus différents). Enfin, l'ensemble de ces estimations locales de la variance du bruit est regroupé pour estimer les paramètres du modèle polynomial  $\mathbf{c}$  de la variance du bruit  $\sigma_n^2(I, \mathbf{c})$ .

Le schéma global est appelé NI+DCT. Au final, ce schéma reposant sur une estimation au sens du maximum de vraisemblance, bénéficie fortement de l'identification des zones détectées pour améliorer davantage la précision d'estimation des paramètres du modèle de bruit.

L'estimateur proposé a été objectivement comparé avec d'autres de l'état de l'art [7,8] au travers de la mise en œuvre systématique de chacun d'entre eux sur une base de 25 images de scènes naturelles NED 2012 [8] (cette base est constituée d'images brutes de taille  $1305 \times 1950$  extraites des données CFA de taille  $2611 \times 3900$  pixels, au format 12 bit, issues d'un capteur CCD de 10.2 mégapixels Nikon D80 DSLR avec différents réglages - ouverture, vitesse d'obturation, sensibilité - et sans aucun ajout de bruit). La principale hypothèse faite est que les paramètres intrinsèques du bruit restent stables avec le temps et les conditions d'acquisition. Les vraies valeurs des paramètres du bruit ont été obtenues en suivant une procédure de calibration semi-automatique pour une sensibilité ISO100 de réglage du capteur.

### 3 Analyse de la méthode proposée

Dans ce papier, il s'agit d'analyser plus finement (toujours en termes de biais, de variance d'erreur d'estimation et d'efficacité statistique) le comportement du schéma proposé en fonction du nombre de fenêtres  $N_{sw}$  retenues dans le calcul de l'estimation finale. Pour un algorithme donné, le biais et la variance d'erreur d'estimation sont susceptibles, dans le cas général, de croître avec une diminution de l'information (données) en entrée, et ce d'autant plus pour une image texturée. L'objectif est donc de prouver la capacité de la méthode proposée à satisfaire ses objectifs (bonne précision finale d'estimation et faible variance d'erreur d'estimation garanties) indépendamment de sa mise en œuvre opératoire plus ou moins pénalisée par le nombre total de fenêtres retenues. En effet, la principale contribution au coût

calculatoire est essentiellement engendrée par le nombre de fenêtres, détectées informatives, prises en compte dans le calcul de l'estimation finale. En particulier, nous montrons comment la précision d'estimation des paramètres du bruit dépendant du signal peut être améliorée de façon substantielle en considérant un plus grand nombre de ces fenêtres comparativement à celui initialement considéré dans la version originale de la méthode proposée [8]. Seul un faible pourcentage (5%) de ces fenêtres avait été retenu expérimentalement, car il conduisait à un surclassement de la méthode proposée par rapport aux autres méthodes avec un bon compromis précision finale/coût de calcul. Pour chacune des 25 images de la base NED 2012 (caractérisée par un bruit expérimental obtenu à la sortie d'un capteur CCD et donc non simulé), cela conduit à un total d'environ 400 fenêtres non recouvrantes de taille 9 par 9, sélectionnées aléatoirement à l'intérieur de l'ensemble des fenêtres détectées informatives sur les paramètres du bruit mais avec la contrainte incontournable de couvrir la dynamique réellement disponible de l'image traitée.

#### 4 Etude expérimentale

La figure Fig. 1 montre, pour la composante verte de l'image 15 de la base NED 2012, la distribution des estimations obtenues (points noirs) pour chaque composante du bruit  $\hat{\sigma}_{n,SI}^2$  et  $\hat{\sigma}_{n,SD}^2$  avec différentes valeurs de  $N_{sw}$  (croissantes de la droite vers la gauche) en fonction de leur précision potentielle  $\sigma_{n,SI}^2$  et  $\sigma_{n,SD}^2$ . Les traits rouges montrent l'intervalle de confiance à  $\pm 3\sigma$ . Cet intervalle se rétrécit très clairement avec l'augmentation de  $N_{sw}$ . Pour un estimateur efficace, les estimations doivent rester à l'intérieur de cet intervalle. Avec l'estimateur NI+DCT, cela ne se produit pas systématiquement pour toutes les images de la base NED 2012 (comme c'est ici favorablement le cas pour l'image 15).

Pour ce qui concerne les résultats moyens obtenus sur l'ensemble des 3 composantes des 25 images de la base NED 2012, les tendances suivantes sont relevables sur la figure Fig.2. Lorsque la valeur de  $N_{sw}$  augmente, les valeurs du biais relatif (Fig. 2 c) and d)) convergent vers une valeur non nulle (mais faible) pour chacune des composantes rouge, verte et bleue. La valeur non nulle du biais peut être indifféremment attribuée à l'incertitude sur la vraie valeur des paramètres du bruit (estimée à l'aide d'une procédure semi-automatique [8]) et/ou à la performance propre de l'estimateur NI+DCT. Les écarts-types respectifs

$\sigma_{n,SI}^2$  et  $\sigma_{n,SD}^2$  des estimations  $\hat{\sigma}_{n,SI}^2$  et  $\hat{\sigma}_{n,SD}^2$  décroissent d'une façon plus ou moins stable avec l'augmentation de  $N_{sw}$ . Cette décroissance est significative pour  $N_{sw}$  variant de 250 à 3000 et modérée au-delà. Dans le même temps, l'efficacité de l'estimateur décroît également de façon stable de  $\approx 15\%$  à  $\approx 5\%$  avec l'augmentation de  $N_{sw}$ . Ce comportement observé sur le biais, l'écart-type et l'efficacité peut s'expliquer par l'existence d'une erreur systématique de l'estimateur NI+DCT qui ne converge pas vers zéro avec l'augmentation de  $N_{sw}$ . Nous pouvons toutefois donner une borne supérieure sur l'écart-type d'une telle erreur, puisque l'écart-type de l'estimation  $\sigma_{n,SI}^2 \approx 1$  pour la composante du bruit indépendante du signal et  $\sigma_{n,SD}^2 \approx 0.007$  pour la composante dépendante.

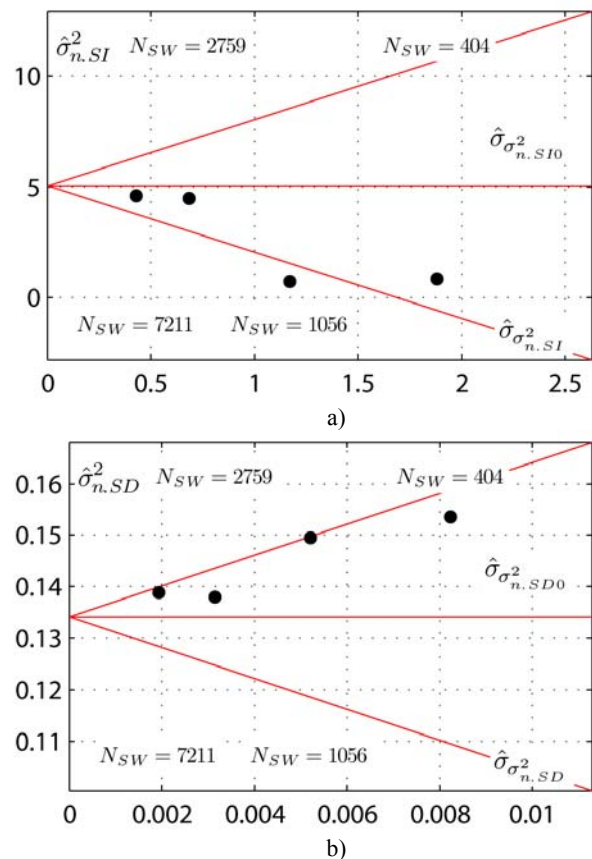


Fig. 1. Estimation de a) la composante indépendante  $\hat{\sigma}_{n,SI}^2$  et b) la composante dépendante  $\hat{\sigma}_{n,SD}^2$ , en fonction du nombre de fenêtres  $N_{sw}$  sur la composante verte de l'image 15 de la base NED 2012

Nos résultats montrent qu'accroître le nombre de fenêtres traitées au dessus d'un certain seuil n'améliore plus la performance de l'estimateur NI+DCT en termes de biais et de variance d'erreur d'estimation des paramètres du modèle de bruit.

#### 5 Conclusion

En conclusion, l'analyse menée dans ce papier permet de confirmer pour la méthode proposée

l'amélioration obtenue globalement au niveau de la précision d'estimation des paramètres de la variance d'un bruit dépendant du signal avec l'accroissement du nombre de fenêtres informatives prises en compte dans le calcul de l'estimation finale. La valeur du biais reste au même niveau, l'écart-type d'erreur d'estimation décroît jusqu'à une certaine limite, et l'efficacité statistique décroît également, compte-tenu du biais d'estimation, qui reste à réduire. Les résultats obtenus soulignent également la robustesse intéressante et consistante de la méthode avec un nombre réduit de ces fenêtres.

La méthode proposée fournit une très bonne précision d'estimation, au prix cependant d'un coût de calcul important. Notre objectif est donc de le réduire dans les travaux futurs.

## Références

- [1] P. Milanfar, "A Tour of Modern Image Filtering: New Insights and Methods, Both Practical and Theoretical," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol.30, no.1, pp.106-128, Jan. 2013
- [2] P. Chatterjee, P. Milanfar, "Practical Bounds on Image Denoising: From Estimation to Information," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.20, no.5, pp.1221-1233, May 2011
- [3] S. Abramov, V. Zabrodina, V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi and J. Astola, "Methods for Blind Estimation of the Variance of Mixed Noise and Their Performance Analysis," Book chapter in *Numerical Analysis - Theory and Application*, edited by Jan Awrejcewicz, InTech, pp. 49-70, (2011).
- [4] M. Lebrun, M. Colom, A. Buades, J.M. Morel, "Secrets of image denoising cuisine," *Acta Numerica*, Cambridge Univ Press, Vol. 21, No 1, 2012, pp. 475-576.
- [5] A. Foi, M. Trimeche, V. Katkovnik, K.O. Egiazarian, "Practical poissonian-gaussian noise modelling and fitting for single-image raw-data," *IEEE Trans. Image Process.*, Vol. 17, pp. 1737-1754 (2008).
- [6] C. Liu, R. Szeliski, S. B. Kang, C. L. Zitnick, W. T. Freeman, "Automatic estimation and removal of noise from a single image," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 30, no. 2, pp. 299-314 (2008).
- [7] M. Uss, B. Vozel, V. Lukin, S. Abramov, I. Baryshev, K. Chehdi, "Image Informative Maps for Estimating Noise Standard Deviation and Texture Parameters," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011:806516 (2011).
- [8] M. Uss, B. Vozel, V. Lukin, K. Chehdi, "Image informative maps for component-wise estimating parameters of signal-dependent noise," *SPIE Journal of Electronic Imaging* 22(1), 013019, (Feb 01 2013), 17 pages, Jan-Mar 2013
- [9] B. Pesquet-Popescu and J. Lévy Véhel, "Stochastic fractal models for image processing," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 19, no. 5, pp. 48-62 (2002).

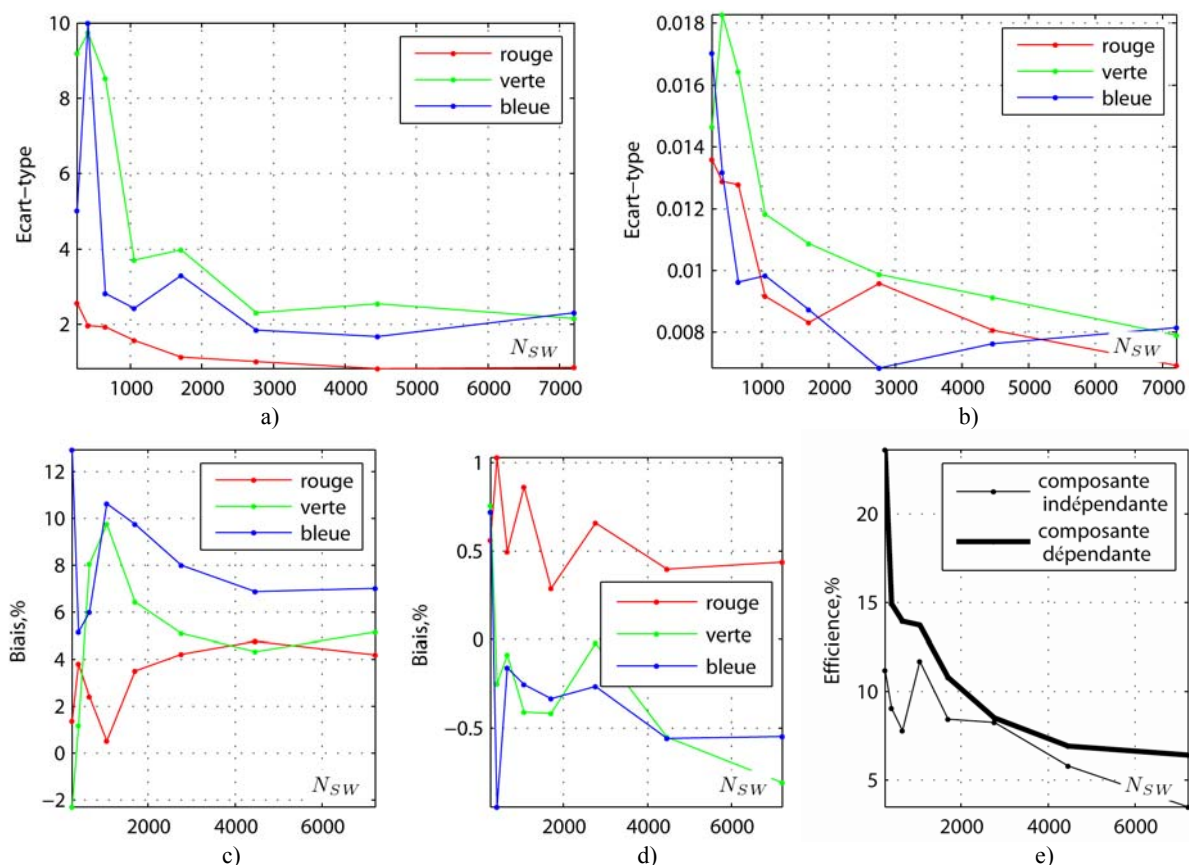


Fig. 2. Biais relatif, écart-type, et efficacité de l'estimateur NI+DCT sur l'ensemble des 25 images couleur de la base NED 2012 en fonction du nombre  $N_{SW}$  de fenêtres traitées : a) écart-type de la composante SI, b) de la composante SD ; c) biais relatif pour la composante SI et d) pour la composante SD ; e) efficacité pour les composantes SI et SD.