

Corrélation d'images couleur optimale

J. CURT ^{a,b}, M. CAPALDO ^a, F. HILD ^b, S. ROUX ^b,

a. EDF R&D, Dpt ERMES, 7 Boulevard Gaspard Monge, 91120 Palaiseau, France

jordan.curt@edf.fr - matteo.capaldo@edf.fr

b. LMT - ENS Paris-Saclay - CNRS - Université Paris-Saclay

61 Avenue du Président Wilson, 94235 Cachan, France

francois.hild@ens-paris-saclay.fr - stephane.roux@ens-paris-saclay.fr

Résumé :

Comment utiliser au mieux une caméra couleur en Corrélation d'Images Numériques (CIN) sans convertir les images en niveaux de gris ? Les images considérées sont celles issues de caméras dont les capteurs, agencés suivant une matrice de Bayer, peuvent être vues comme un champ vectoriel à trois composantes RVB (Rouge, Vert, Bleu) en chaque centre de la matrice de Bayer appelé *pixel*. La CIN minimise une mesure de la différence entre deux images (l'image de référence et l'image déformée corrigée du champ de déplacement recherché). Si de nombreux travaux ont été consacrés à des métriques colorimétriques, ils sont le plus souvent motivés pour reproduire la sensibilité humaine sans objet ici. Parmi toutes les métriques envisageables, une se distingue comme optimale relativement à l'incertitude due au bruit dans l'image. Pour quantifier ce bruit, il est nécessaire de le caractériser statistiquement. Lorsque son caractère gaussien est observé, il est nécessaire d'évaluer ses corrélations à la fois en espace et selon la dimension de couleur. Pour chaque canal de couleur, il est ainsi illusoire de rechercher une résolution plus fine que la taille de la matrice de Bayer car l'interpolation qui serait nécessaire pour atteindre le pixel élémentaire créerait des corrélations spatiales qui annuleraient le bénéfice escompté. Au-delà d'un pixel, il est observé que ces corrélations spatiales peuvent être négligées. Pour chaque canal de couleur, il est observé que la variance de chaque pixel élémentaire (quelle que soit la couleur) croît en proportion directe de son intensité (après un ajustement de son niveau absolu) comme attendu pour un bruit poissonien. Ceci permet, par le biais d'une transformation de Anscombe, d'uniformiser la variance du bruit. Il reste enfin à caractériser les corrélations entre couleurs (R, V et B), par la matrice de covariance qui est observée être non triviale. En redéfinissant les couleurs élémentaires par une simple transformation linéaire, alors les nouvelles couleurs sont affectées par un bruit spatialement blanc, gaussien, de variance uniforme et décorrélé. Sur ces images transformées, la métrique de comparaison est une simple norme euclidienne qui permet de conférer un caractère optimal à cette mesure de similitude pour la CIN couleur.

Mots clefs : Corrélation d'images, Caméras couleurs

1 Introduction

L'analyse des champs de déplacement d'une structure au cours d'un essai mécanique est un élément clé pour la validation et l'identification des modèles. L'une des méthodes les plus utilisées est la corrélation d'images numériques (DIC) [1], qui donne accès à l'intégralité du champ de déplacement. Le champ de

déplacement recherché s'appuie sur une base cinématique [2], liée à la mécanique du problème. Ainsi, cette méthode peut être utilisée pour effectuer des mesures complexes avec une connaissance a priori des phénomènes à prendre en compte, telles que l'amorçage et la propagation de fissures [3].

Pour des applications scientifiques, les caméras monochromes sont utilisées dans la plupart des cas. Sur chaque pixel du capteur, une valeur d'intensité de brillance est stockée. Dans les conditions de laboratoire, le mouchetis appliqué est composé de peintures noire et blanche, ce qui rend suffisant l'utilisation d'une caméra monochrome. Etant donné que l'utilisation de ces caméras se restreint au monde scientifique, la diversité des caméras disponibles sur le marché est limitée. A l'inverse, il y a une large diffusion de caméras couleur numériques grand public avec une gamme de choix étendue. Les capteurs utilisés dans ces caméras sont le plus souvent disposés suivant une matrice de Bayer [4], sur un unique champ de capteurs. Ainsi des caméras couleur de haute qualité et haute définition sont disponibles à bas coût par rapport aux caméras scientifiques. Il est légitime de s'interroger sur le meilleur usage de leurs performances. Dans la littérature récente, des publications sont consacrées à l'utilité ou non des caméras couleur pour la CIN [5, 6, 7]. Les utilisations complexes comme la mesure modale [8] ou la détection de déformation de forme 3D [9, 10] ont déjà été traitées.

L'objectif de ce travail est de présenter les fondements mathématiques d'une CIN *optimale* pour des caméras couleur. Dans ce cadre, des conditions sur le bruit de mesure, intrinsèque à la caméra, sont exprimées. Si celles-ci ne sont satisfaites des procédés de transformation de l'image sont proposés afin de garantir ce caractère optimal. Un cas d'application de mesure d'incertitude de déplacement est traité dans un second temps en comparant les résultats obtenus pour différentes transformations classiques d'images couleur.

2 Corrélation d'images couleur

Cette partie vise à présenter le cadre mathématique de la corrélation d'images couleur optimale.

Tout d'abord, la corrélation d'images monochromes repose sur l'enregistrement d'une image $f(\mathbf{x})$ définie pour tous les pixels d'une région d'intérêt $\mathbf{x} = [x, y]$ dans une configuration de référence, et une série d'images $g(\mathbf{x})$ dans des configurations déformées. L'objectif est de mesurer le champ de déplacement \mathbf{u} qui obéit à une conservation de la brillance, à savoir que l'image déformée corrigée du déplacement ne se distingue de l'image de référence que par la présence d'un bruit η

$$f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})) + \eta(\mathbf{x}) \quad (1)$$

Lorsque ce bruit est gaussien, alors la probabilité de mesurer un écart entre $f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x}))$ au point \mathbf{x} est exactement la densité de probabilité de η , soit

$$P(\mathbf{u}(\mathbf{x})) = \frac{1}{\sigma(\mathbf{x})\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})))^2}{2\sigma(\mathbf{x})^2}\right) \quad (2)$$

Si ce bruit est "blanc", la probabilité que les deux images se correspondent est le produit des probabilités pixel à pixel

$$P(\mathbf{u}) = \prod_{\mathbf{x}}^N P(\mathbf{u}(\mathbf{x})) = \prod_{\mathbf{x}}^N \frac{1}{\sigma(\mathbf{x})\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})))^2}{2\sigma(\mathbf{x})^2}\right) \quad (3)$$

avec N le nombre de pixels considérés dans la région d'intérêt.

Si le bruit est uniforme en intensité sur l'ensemble de la région d'intérêt considérée, la probabilité de correspondance entre les deux images s'écrit

$$P(\mathbf{u}) \propto \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{\mathbf{x}}^N (f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})))^2\right) \quad (4)$$

Ainsi, le maximum de vraisemblance de cet écart est obtenu en minimisant la différence quadratique pixel à pixel entre les deux images

$$Q = \sum_{\mathbf{x}}^N (f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})))^2 \quad (5)$$

Cette démonstration prouve qu'avec des conditions de bruit blanc, gaussien et uniforme, la meilleure norme à minimiser pour corrélérer deux images en termes de niveaux de gris est la norme euclidienne. Pour une image couleur, celle-ci est composée de trois champs. Deux autres caractéristiques du bruit sont à prendre en compte : la corrélation entre couleurs ainsi que les intensités de bruit sur chaque canal. Ces informations sont contenues dans une matrice de covariance \mathbf{C} de dimension 3. Cette dernière est en fait représentative d'une métrique de couleurs qui permet d'établir une *distance* dans l'espace des couleurs entre deux triplets Rouge-Vert-Bleu (RVB) relativement au bruit. La probabilité de correspondance entre deux images couleur repose sur la comparaison de la différence entre deux points et les propriétés statistiques attendues pour le bruit. Les brillances sur chaque canal de couleur sont notées f_i et g_i . Si toutes les conditions précédemment énumérées sont remplies, la probabilité de correspondance est maximale au minimum du cologarithme de la vraisemblance, soit

$$\text{colog}(P)(\mathbf{u}) = \sum_{\mathbf{x}}^N \sum_{i,j}^3 (f_i(\mathbf{x}) - g_i(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x}))) \mathbf{C}_{ij}^{-1} (f_j(\mathbf{x}) - g_j(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x}))) \quad (6)$$

Sous condition qu'il n'y ait pas de corrélation entre les différentes directions de couleurs et que les intensités de bruits soient égales sur les trois composantes de couleur, la maximisation de la vraisemblance revient à une minimisation de la forme quadratique canonique pixel à pixel sur les trois canaux

$$Q_3 = \sum_{\mathbf{x}}^N \sum_i^3 (f_i(\mathbf{x}) - g_i(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})))^2 \quad (7)$$

Afin de réaliser une corrélation d'images optimale à l'aide d'un appareil photo couleur, il est ainsi nécessaire de connaître précisément les caractéristiques du bruit d'acquisition, et si nécessaire, transformer les images considérées pour avoir les propriétés de bruit voulues.

3 Caractéristiques de bruit

Dans cette partie, l'objectif est de présenter une méthode pour caractériser le bruit intrinsèque de la caméra. Trois propriétés sont étudiées : l'uniformité du bruit, les corrélations spatiales et les corrélations dans l'espace des couleurs. Ici un jeu d'images d'un mouchetis couleur est considéré (Figure 1).

Au cours de la prise de photos des déplacements de corps rigides de l'échantillon surviennent. Leurs amplitudes dans les deux directions principales sont déterminées par corrélation d'images dans le domaine de Fourier (translations de corps rigide) et les images corrigées sont reconstruites par interpolation cu-



FIGURE 1 – Photographie du mouchetis couleur utilisé pour l'analyse.

bique. Grâce à l'ensemble des images corrigées sur les trois champs de couleurs, une image moyenne est construite. Cette image servira d'image de référence dans la suite.

3.1 Corrélation spatiale

La théorie relative à la formule classique de corrélation d'images impose que le bruit soit blanc spatialement, sous peine de devoir intégrer dans le calcul de minimisation de la fonctionnelle des termes de corrélation entre des pixels adjacents. La reconstruction des champs de couleurs sur l'ensemble des détecteurs élémentaires à partir de l'agencement de la matrice de Bayer par l'utilisation d'algorithmes de dématricage (*demosaiicing*) consiste en une interpolation plus ou moins complexe des champs. Une interpolation implique nécessairement une corrélation spatiale dans le bruit. Pour éviter cela, il suffit de considérer des pixels, de centre chaque matrice de bayer et correspondant à une matrice de Bayer élémentaire. Pour les couleurs rouge et bleue, la valeur d'intensité au pixel correspond à l'intensité reçue au détecteur élémentaire de couleur correspondant. Pour la couleur verte, la valeur d'intensité retenue correspond à la moyenne de la brillance relevée sur les deux détecteurs de la matrice de Bayer élémentaire. Lors de l'établissement de la métrique de couleur, cette information se traduit par une division par deux de la variance associée au canal de couleur verte.

3.2 Bruit uniforme

Pour déterminer les caractéristiques de bruit d'une image à une autre, la gamme d'amplitude des champs de couleurs sur l'image de référence est partitionnée en plusieurs intervalles. Sur chaque intervalle la variance du bruit est calculée. Les variances de bruits sont tracées en fonctions des brillances pour le champ de couleur rouge (Figure 2). Une approximation polynomiale linéaire des moyennes des mesures en chaque point est également tracée. L'influence du biais d'interpolation sur la caractérisation du bruit est étudiée. En effet, des images corrigées d'une translation de corps rigide sont considérées. Si l'amplitude de la correction est importante, un biais intervient. Ce phénomène est montré en Figure 2. La dispersion des intensités de bruits mesurées est plus importante.

La variance du bruit évolue linéairement avec l'intensité du champ. Cette caractéristique correspond à un bruit de Poisson qui est une forme élémentaire associée au comptage d'événements indépendants. L'intensité est alors linéairement dépendante de l'intensité du signal. La Figure 3 présente les résultats pour les deux autres canaux de couleur et permet d'affirmer que le caractère poissonien du bruit est présent sur les trois canaux de couleurs.

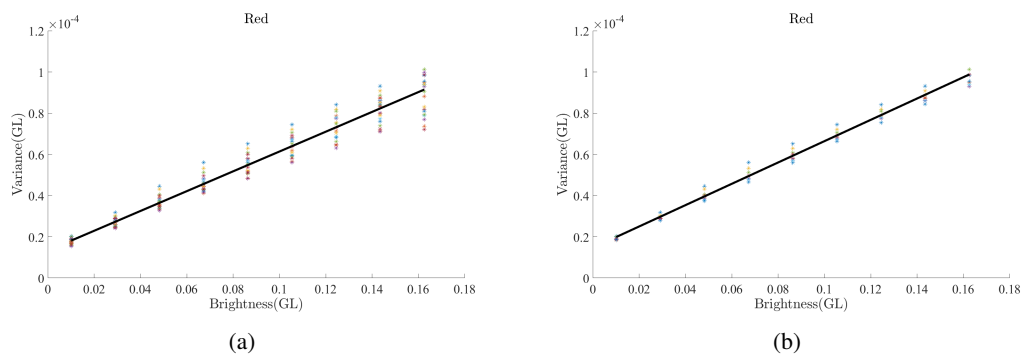


FIGURE 2 – Variance en fonction de l'intensité pour le canal de couleur rouge. Sans condition sur le déplacement de corps rigide (a) et avec (b).

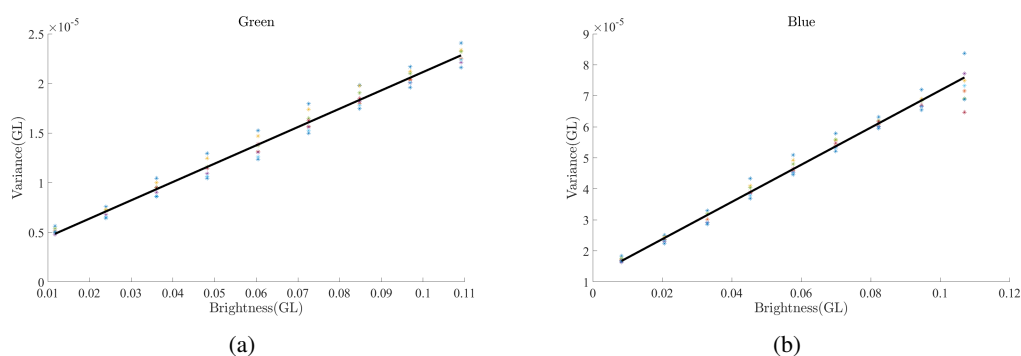


FIGURE 3 – Variance fonction de l'intensité pour les canaux de couleur verte (a) et bleue (b).

L'utilisation d'une transformation de Anscombe permet alors d'uniformiser la variance du bruit sur l'ensemble de la région d'intérêt et sur chaque canal de couleur.

3.3 Corrélations dans l'espace des couleurs

Il a été montré, grâce à des transformations adaptées, que l'intensité du bruit peut être rendue uniforme en intensité sur les trois canaux de couleur. En outre, si les données brutes sont utilisées, la propriété de bruit blanc spatial a été prouvée. Ensuite, il est nécessaire de calculer la matrice de covariance des trois canaux de couleurs, après transformation de Anscombe. Les vecteurs propres de matrices de covariance pour deux images successives sont montrées en Figure 4.

L'espace propre du bruit n'est pas orienté suivant les directions de couleurs. Des corrélations entre les espaces de couleurs existent. Cependant, la transformation linéaire $h_i = (\mathbf{C}^{-1/2})_{ij}g_j$ permet de formuler une image $h_i(\mathbf{x})$ dont les différents canaux i sont indépendants, et où l'amplitude du bruit est uniforme et de variance unité.

4 Application : incertitudes de mesure

Une manière de quantifier les incertitudes de mesure par CIN directement reliées à la caméra utilisée est de pratiquer sur un ensemble d'images du même échantillon des corrélations successives. L'écart type des déplacements relevés aux noeuds du maillage choisi donne l'incertitude de mesure dans les deux directions de déplacement. Les incertitudes sont dépendantes du maillage sélectionné mais le seul paramètre qui varie entre chaque image est le bruit de la caméra ajouté à l'image. Cette procédure est

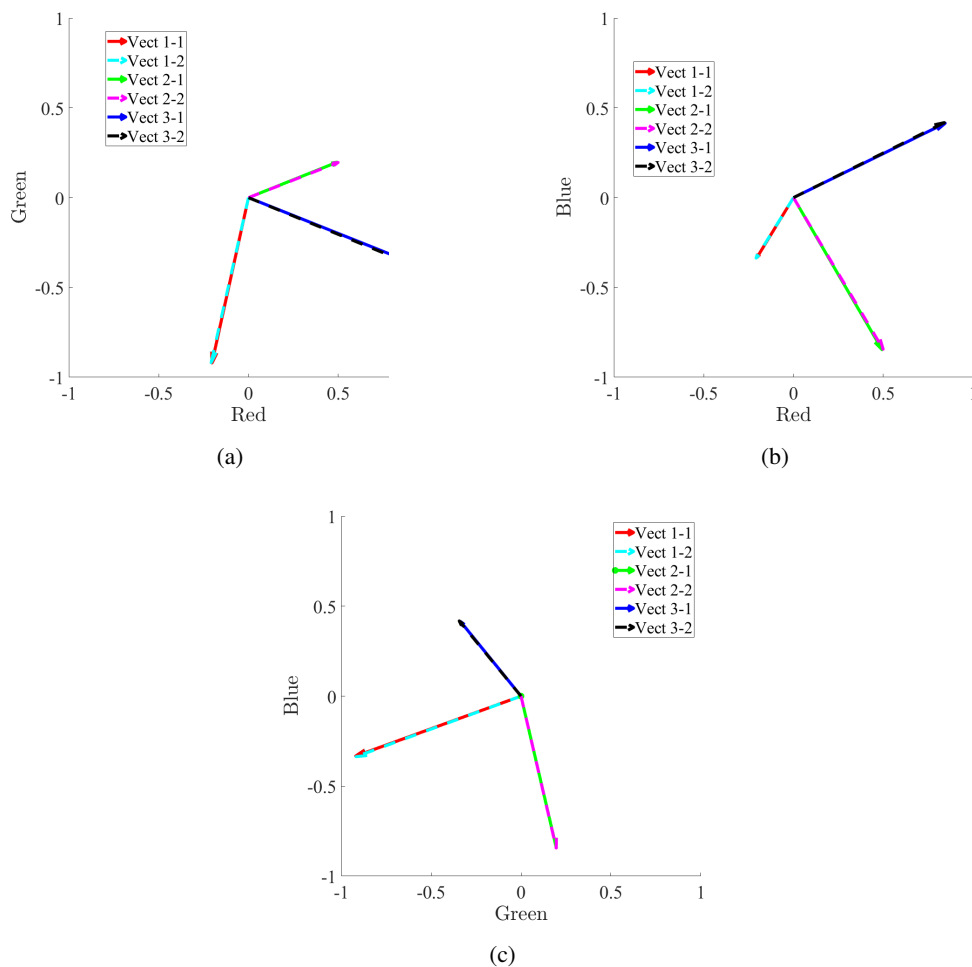


FIGURE 4 – Tracés des vecteurs propres du bruit pour deux image successives dans les espaces (a) Rouge-Vert, (b) Rouge-Bleu, (c) Vert-Bleu

réalisée pour deux mouchetis différents : l'un en couleur et l'autre en noir et blanc. L'appareil photo utilisé est de type CANON E70D. En tout, huit transformations d'images différentes sont testées :

- *Monochrome* : corrélation d'images monochromes à partir d'une simple sommation des trois champs de couleurs ;
- *Monochrome (rgb2grey)* : corrélation d'images monochromes obtenues à partir d'une sommation des trois champs de couleurs rouge, vert et bleu respectivement affectés des coefficients de pondération 0.2989, 0.5870, 0.1140. Cette transformation est utilisée par exemple dans le logiciel Matlab pour transformer une image couleur en niveaux de gris ;
- *Color* : corrélation d'images sur les trois champs de couleurs bruts ;
- *Poisson color* : corrélation d'images sur trois champs obtenus par transformation poissonienne et normés par leurs intensités de bruit propres ;
- *Poisson monochrome* : corrélation d'images monochromes obtenus par sommation des trois champs obtenus par transformation poissonienne et normalisation par les intensités de bruit de chaque champ de couleur ;
- *Color modes* : corrélation d'images sur les trois modes de couleurs ;
- *Color modes monochrome* : corrélation d'images monochrome obtenu après sommation des trois champs de modes de couleur.

La région d'intérêt choisie est de 1000×1000 pixels, en utilisant un maillage constitué d'éléments triangulaires T3 d'une longueur de 40 pixels. Le logiciel Correli 3.0 [11] est utilisé. Les résultats obtenus sont présentés en Figure 5 pour le mouchetis couleur et en Figure 6 pour le mouchetis noir et blanc.

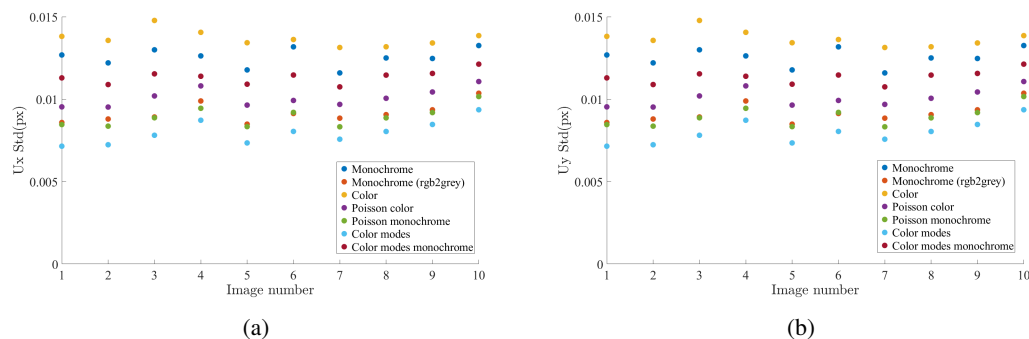


FIGURE 5 – Incertitudes des déplacements mesurés sur un échantillon avec mouchetis couleur suivant x (a) et suivant y (b).

Les observations sont identiques pour les résultats obtenus avec les deux mouchetis. La première remarque est que les incertitudes les plus importantes sont obtenues pour la corrélation d'images couleur basique. Ensuite, les incertitudes de mesure obtenues avec des images monochromes sont plus faibles que lorsque que les champs de couleurs sont considérés séparément avec ou sans transformation d'Anscombe et normalisation par l'intensité du bruit. Cette observation n'est pas valable lorsque la transformation sur les modes de couleurs est considérée : les incertitudes sont les plus faibles parmi toutes les transformations envisagées.

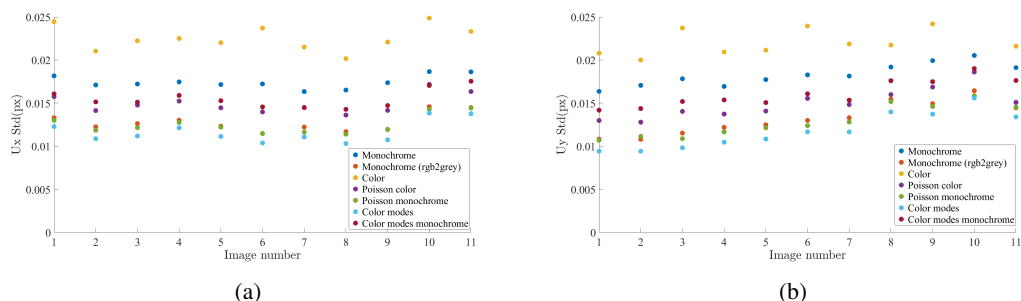


FIGURE 6 – Incertitudes de déplacements mesurés sur un échantillon avec mouchetis noir et blanc suivant x (a) et suivant y (b).

Ces résultats viennent corroborer la discussion de la première partie. Il est important de noter que la transformation choisie pour traiter une image couleur a une grande influence sur les incertitudes de mesure par corrélation d'images. Celles-ci varient du simple au double. Cependant, le point le plus remarquable n'est pas tant de proposer une formulation qui fonctionne mais que la caractérisation systématique du bruit conduit naturellement à un ensemble de transformations qui rendent la mesure de différence optimale.

5 Conclusion

Dans ce travail, l'importance de considérer d'une façon appropriée le bruit d'acquisition d'une caméra couleur a été soulignée. L'établissement d'une métrique de couleur robuste par rapport au bruit sur

chaque canal permet alors de définir la différence entre deux images de la manière la plus appropriée. Une méthode simple permettant de rendre le bruit uniforme, de même intensité sur chaque canal et décorrélé en espace de couleur a été développée.

De plus, une réflexion a été conduite concernant le dématricage des images couleur obtenues par des capteurs agencés suivant une matrice de Bayer (technologie la plus répandue pour les appareils grand public). Toute interpolation des champs implique une corrélation spatiale du bruit entre des pixels adjacents. Dans un cadre rigoureux, cette corrélation spatiale doit être prise en compte dans la minimisation de la fonctionnelle, ce qui fait augmenter significativement le nombre de calculs lors de la minimisation de la fonctionnelle. La solution choisie est de seulement considérer des pixels de taille caractéristique d'une matrice de Bayer élémentaire (un pixel regroupe quatre détecteurs élémentaires).

Des calculs d'incertitude de déplacement mesuré ont été menés à l'aide de mouchetis noir et blanc et couleur. Les conclusions sont similaires pour les deux cas. Le processus de transformation de l'image couleur pour une application de corrélation d'images a une grande influence sur les incertitudes, celles-ci varient du simple au double dans le cas présent. La transformation qui apporte le moins d'incertitudes de mesures consiste à projeter les trois champs RVB sur des modes de couleurs déterminés grâce à l'étape de caractérisation du bruit.

Références

- [1] M A Sutton. Computer vision-based, noncontacting deformation measurements in mechanics : a generational transformation. *Applied Mechanics Reviews*, 65(5) :050802, 2013.
- [2] F Hild and S Roux. Comparison of local and global approaches to digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 52(9) :1503–1519, 2012.
- [3] S Roux, J Réthoré, and F Hild. Digital image correlation and fracture : an advanced technique for estimating stress intensity factors of 2D and 3D cracks. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 42(21) :214004, 2009.
- [4] B E Bayer. Color imaging array. *US patent 3,971,065*, 1976.
- [5] D Hang, G M Hassan, C MacNish, and A Dyskin. Characteristics of color digital image correlation for deformation measurement in geomechanical structures. In *Digital Image Computing : Techniques and Applications (DICTA), 2016 International Conference on*, pages 1–8. IEEE, 2016.
- [6] A Baldi. Digital image correlation and color cameras. *Experimental Mechanics*, 58(2) :315–333, 2018.
- [7] C Petiot, S Roux, and F Hild. Multi-scale method for measuring the shape, movement and/or deformation of a structural part subjected to stresses by creating a plurality of colorimetric speckled patterns. u.s. patent no. 9,852,514. *Washington, DC : U.S Patent and Trademark Office*.
- [8] C Jailin. Full field modal measurement with a single standard camera. *Optics and Lasers in Engineering*, 107 :265–272, 2018.
- [9] L Yu and B Pan. Full-frame, high-speed 3d shape and deformation measurements using stereo-digital image correlation and a single color high-speed camera. *Optics and Lasers in Engineering*, 95 :17–25, 2017.
- [10] L Yu and B Pan. Color stereo-digital image correlation method using a single 3ccd color camera. *Experimental Mechanics*, 57(4) :649–657, 2017.

- [11] H Leclerc, J Neggens, F Mathieu, S Roux, and F Hild. Correli 3.0. agence pour la protection des programmes, paris, 2015. *IDDN. FR*, 1(000).