



Evaluation d'erreurs de mesure par corrélation d'images numériques : méthodologie et résultats

Laurent Robert, Bertrand Wattrisse

► To cite this version:

Laurent Robert, Bertrand Wattrisse. Evaluation d'erreurs de mesure par corrélation d'images numériques : méthodologie et résultats. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391198

HAL Id: hal-03391198

<https://hal.science/hal-03391198>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Evaluation d'erreurs de mesure par corrélation d'images numériques : méthodologie et résultats

L. Robert ^(1,2), B. Wattrisse ^(1,3)

⁽¹⁾ GDR CNRS 2519 « MCIM » GT Métrologie <http://www.ifma.fr/lami/gdr2519/>

⁽²⁾ CROMEP, Mines Albi, Université de Toulouse

⁽³⁾ Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, Université Montpellier II

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'illustrer les différents régimes d'erreur qui peuvent être rencontrés dans une approche de mesure par Corrélation d'Images Numériques (CIN). L'analyse est fondée sur le traitement d'images de synthèse soumises à des champs de déplacement sinusoïdaux. La dépendance de ces différents régimes en fonction de la taille de la fenêtre de corrélation, des gradients de déplacement, ainsi que du bruit d'image est analysée.

Abstract :

The purpose of this work is to illustrate the various error regimes that can occur in measurements by Digital Image Correlation (DIC). The analysis is based on the processing of synthetic images submitted to sinusoidal displacement fields. Dependence of these various regimes according to the size of the subset, the displacement gradients as well as the image noise is analysed.

Mots clefs : corrélation d'images numériques, résolution, résolution spatiale, incertitude de mesure

1 Introduction

Les techniques de mesures de champs de déplacement et de déformation par corrélation d'images numériques sont de plus en plus utilisées pour l'analyse expérimentale des matériaux et des structures. Cependant, si cette technique doit son succès à son apparente simplicité d'emploi, un certain nombre de questions restent ouvertes quant aux incertitudes de mesure qui lui sont liées. L'objectif du groupe de travail « métrologie »¹ du GDR CNRS 2519 MCIMS est de contribuer à une meilleure compréhension de l'origine des incertitudes de mesure des techniques de photomécanique. Nous avons choisi de focaliser nos travaux sur le logiciel de corrélation d'images numériques, qui n'est qu'un élément de la chaîne métrologique, ceci pour deux raisons : d'une part les autres éléments (formation de l'image, échantillonnage, aberration géométrique, etc.) sont sinon maîtrisés du moins mieux connus, et d'autre part l'utilisateur final n'est souvent pas un spécialiste de traitement d'image. A ce titre, il ne connaît généralement pas clairement l'influence des divers paramètres sur lesquels il lui est permis d'intervenir. La méthodologie retenue consiste à évaluer les performances d'un dispositif fournissant le champ de déplacement reliant une image de référence à une image déformée, images supposées obéir parfaitement au principe de conservation du flot optique. On procède ensuite à l'analyse statistique des écarts en fonction des divers paramètres de l'algorithme utilisé en comparant le champ mesuré et le champ exact connu (analyse de la fonction de

¹ Les résultats présentés ont été obtenus par les personnes suivantes: P. Vacher (Univ. Savoie), S. Mistou et M. Fazzini (ENIT), J.C. Dupré (Univ. Poitiers), M. Bornert (EP), B. Wattrisse (Univ. Montpellier), L. Robert (EMAC), C. Poilâne (Univ. Caen).

transfert des logiciels de corrélation, considérés comme des boîtes noires). En complément d'approches antérieures plutôt limitées à des mouvements rigides linéaires ou quadratiques (Schreier *et al.*, 2002), l'analyse est ici étendue à des transformations hétérogènes plus générales. Dans ce but, des images de mouchetis subissant une transformation sinusoïdale de période et d'amplitude variables, sont simulées selon des principes reproduisant une caméra idéale. Cette approche est similaire à celle conduisant à l'établissement de la Fonction de Transfert de Modulation (FTM) utilisé pour caractériser les composants optiques.

Dans ce qui suit, nous présenterons dans un premier temps la méthodologie adoptée : transformation et caractéristiques des images de synthèse, paramètres choisis pour les sept logiciels de corrélation d'images commerciaux ou universitaires testés, et analyse statistique des résultats. Dans un second temps, on présentera les principaux régimes d'erreur mis en évidence : erreur d'adéquation entre transformation réelle et modèle de transformation locale, et erreur « ultime » rencontrée de manière asymptotique dès que le modèle représente « suffisamment bien » la transformations réelle. La dépendance de ces régimes d'erreur vis-à-vis d'un bruit ajouté aux images est enfin analysée.

2 Méthodologie

Les résultats présentés ici ont été obtenus avec des images simulées au moyen du logiciel TexGen (Orteu *et al.*, 2006), permettant une définition continue du niveau de gris de référence $f(\underline{X})$. Ce logiciel permet de déformer cette répartition selon n'importe quelle transformation $\phi(\underline{X})$ pour obtenir, sans approximation, une description continue du niveau de gris déformé $g(\underline{x})$, avec $\underline{x} = \phi(\underline{X})$, obéissant au principe de conservation stricte du flot optique $f(\underline{X}) = g(\phi(\underline{X}))$.

Ces signaux continus sont discrétisés pour obtenir des images de 512×512 pixels quantifiées sur 8 bits, avec un facteur de remplissage égal à 1. Dans ce travail, la transformation adoptée est de type sinusoïdal :

$$\underline{u}(\underline{X}) = \phi(\underline{X}) - \underline{X} = \alpha p \sin\left(\frac{2\pi \underline{X}}{p}\right) \underline{e}_x$$

où $2\pi\alpha$ est l'amplitude du 1^{er} gradient de la transformation ($u_{,x}^{Max}$), et p la période. Les amplitudes des 2nd 3^{ème} gradients valent respectivement $u_{,xx}^{Max} = 4\pi^2\alpha/p$, et $u_{,xxx}^{Max} = 8\pi^3\alpha/p^2$. Les images analysées ont été obtenues en associant les amplitudes $\alpha \in \{0.02, 0.01, 0.005, 0.001\}$ aux périodes $p \in \{10, 20, 30, 60, 130, 250, 510\}$ exprimées en pixels. La figure 1 en fournit quelques exemples.

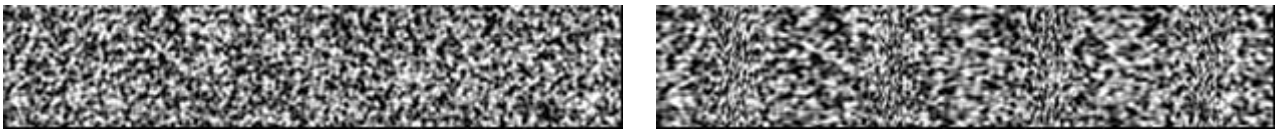


Figure 1 : Extrait 512×100 pixels de l'image de référence (à gauche) et d'une image déformée (à droite) avec $p = 130$ pixels et $\alpha = 0.1$

Sept logiciels de corrélation ont été utilisés pour traiter ces images dont 2 codes commerciaux (Aramis 2D, Vic-2D), ainsi que 5 codes académiques (7D, Univ. Savoie ; Correla, Univ. Poitiers ; CorrelManuV, Ecole Polytechnique ; KelKins, Univ. Montpellier ; TractionSPA, Univ. Caen). L'objectif n'est pas de comparer les performances de ces codes, mais de vérifier que les résultats observés sont bien liés aux choix algorithmiques et non aux détails d'implémentation informatique. Les principaux paramètres des logiciels de CIN envisagés ici sont les suivants : la fonction de forme Φ retenue pour décrire la transformation locale de l'image, la taille D de la fenêtre de corrélation (carrée) et le type d'interpolation des niveaux de gris I . La méthode d'optimisation retenue notée O n'est donnée qu'à titre indicatif. La notation suivante sera utilisée pour décrire les combinaisons de paramètres retenues : $\Phi\phi IiOoDdNn$, où $\phi \in \{0,1,2\}$ représente l'ordre de la fonction de forme polynomiale, $i \in \{l,c,q,f\}$ correspond à une interpolation linéaire, cubique quintique, ou effectuée dans l'espace de Fourier des niveaux de gris, $o \in \{f,p,b\}$ est associée à une optimisation complète, partielle ou biparabolique, $d \in \{9-10,15-16,21-22,31-32\}$ est la taille en pixels de la fenêtre de corrélation et

$n \in \{0,1,4,8\}$ représente l'écart-type en niveaux de gris du bruit blanc gaussien surimposé aux images. Le tableau suivant donne les différentes combinaisons de paramètres relatifs aux logiciels testés.

logiciel #	ϕ	i	o	d
1	0, 1	linéaire : l	partielle : p	paire, impaire
2	1	cubique : c	partielle : p	impaire
3	0, 1, 2	linéaire : l	complète : f	paire
4	0, 1, 2	quintique : q	complète : f	impaire
5	2	linéaire : l	bi-linéaire : b	impaire
6	1	?	complète : f	impaire
7	0	Fourier : f	----	paire

Tableau 1 : combinaisons de paramètres associées aux logiciels de CIN

On estime la composante horizontale u_{ij} par CIN sur un grand nombre N de points M_{ij} distants de plus de d pour assurer l'indépendance statistique. On analyse ensuite les écarts quadratiques moyens entre ces mesures et le déplacement imposé au milieu de la fenêtre :

$$RMS_G = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j} [u_{ij}^{mesuré} - u_{ij}^{imposé}]^2}$$

Les résultats sont exprimés sous la forme d'une dépendance de l'écart quadratique moyen avec les paramètres présentés plus haut (Bornert *et al.*, 2009) :

$$RMS_G = \text{fonction}(p, \alpha, \phi, d, i, o, n)$$

3 Résultats

Le premier résultat observé est que l'évolution de l'erreur RMS_G en fonction de la période présente les mêmes régimes quels que soient les paramètres de traitement :

– pour les très faibles périodes ($p < d$), l'erreur RMS_G est égale à l'écart-type du déplacement, ce qui signifie que la mesure n'a pas de sens. Ce cas limite bien connu montre que la résolution spatiale s'identifie à d .

– pour les autres situations, l'erreur RMS_G peut toujours s'écrire sous la forme :

$$RMS_G \leq \text{Sup}(\sigma^m, \sigma^u)$$

où σ^m peut être lié à l'erreur d'adéquation entre la transformation réelle et le modèle de transformation locale, et σ^u à l'erreur ultime rencontrée de manière asymptotique dès que le modèle représente « suffisamment bien » la transformations réelle. Seuls ces deux régimes sont discutés dans ce qui suit.

Il est important de noter que, comme le champ de déplacement est périodique et la taille de l'image est un multiple de la période, les effets d'erreur systématique s'annulent dans cette analyse. La valeur de RMS_G est donc sensiblement égale à l'erreur aléatoire sur u .

3.1 Régime d'erreur de modèle

Pour mettre en évidence le régime où l'erreur de modèle est prépondérante, on choisit de normer la valeur de RMS_G par un coefficient proportionnel à l'amplitude du premier gradient de la transformation négligé dans la fonction de forme. En effet, une indépendance par rapport à p et α de l'erreur ainsi normée traduit la proportionnalité de cette erreur au premier gradient négligé, quelle que soit la transformation réelle. L'erreur de modèle σ^m s'identifie alors à cette valeur asymptotique.

La figure 2 regroupe les résultats obtenus pour les transformations rigides ($\phi=0$, à gauche), linéaires ($\phi=1$, au centre) et quadratiques ($\phi=2$, à droite). Pour $\phi=0$ (figures 2.a et 2.b), l'asymptote (area III) est atteinte, après une zone de transition (area II : $d < p < 15d$), pour tous les logiciels, et pour toutes les amplitudes α , à

l'exception de $\alpha=0.001$ dans le cas où d est petit ($d \leq 10$). Pour $\phi=1$ (Fig. 2.c et 2.d), l'asymptote (area III) est toujours atteinte après une zone de transition plus réduite (area II : $d < p < 5d$), sauf pour les petites amplitudes ($\alpha \leq 0.005$) et les petites fenêtres ($d \leq 16$). Pour $\phi=2$ (Fig. 2.e), l'asymptote n'est atteinte que marginalement pour un logiciel et pour les plus grandes fenêtres.

Ces résultats permettent d'établir les combinaisons (p, α, d) associées au régime dans lequel l'erreur de modèle σ^m est prépondérante. On montre expérimentalement que les valeurs asymptotiques s'écrivent sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \sigma^m = k_0 u_{,x}^{Max} & \text{pour } \phi = 0 \\ \sigma^m = k_1 d^2 u_{,xx}^{Max} & \text{pour } \phi = 1 \\ \sigma^m = k_2 d^3 u_{,xxx}^{Max} & \text{pour } \phi = 2 \end{cases}$$

avec k_0 une fonction croissante de la taille du mouchetis, et $k_1 \approx 0.03$ et $k_2 \approx 0.0005$ (indépendantes de la taille du mouchetis).

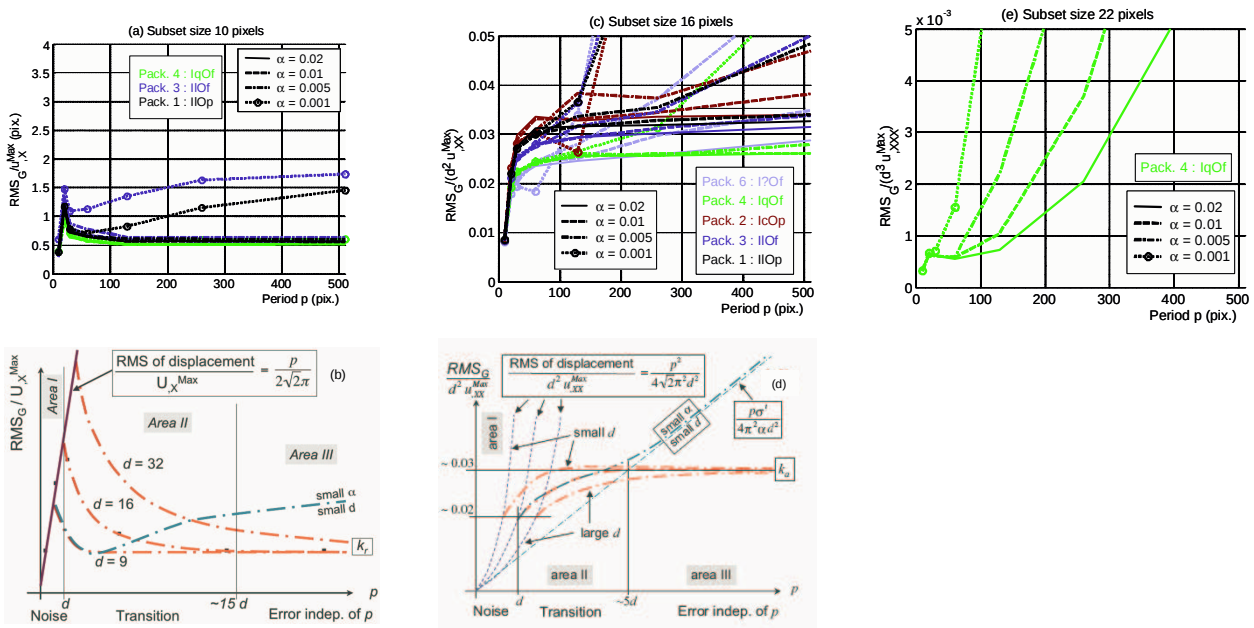


Figure 2 : Evolution de l'écart quadratique moyen (RMS_G) normé par un coefficient proportionnel à l'amplitude du premier gradient négligé dans la fonction de forme, en fonction de la période p du déplacement. (a) : $\phi = 0$, $d = 10$ pix. – (b) $\phi = 0$, $\forall d$ – (c) $\phi = 1$, $d = 16$ pix. – (d) $\phi = 1$, $\forall d$ – (e) $\phi = 2$, $d = 32$ pix.

Les schémas récapitulatifs des figures 2.b et 2.d montrent que les combinaisons (p, α, d) ne conduisant pas à une asymptote sur les courbes normées, correspondent en fait aux cas où RMS_G est elle-même indépendante de p et α , et définissent donc le régime d'erreur ultime σ^t .

3.2 Régime d'erreur ultime

Ce régime est obtenu pour les combinaisons associées à de petites amplitudes α , petites fenêtres d , et les fonctions de forme rigide et affine ($\phi=0$ et $\phi=1$), et quelque soient les combinaisons pour les fonctions de formes quadratiques ($\phi=2$).

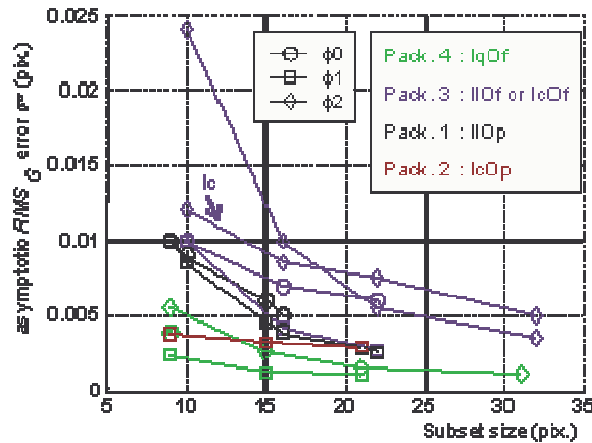


Figure 3 : Erreur ultime σ^u en fonction de d obtenue sur des images de transformations sinusoïdales

Sur la figure 3, on observe une forte diminution de σ^u avec la taille de fenêtre d , quel que soit l'algorithme de corrélation retenu. Cette dépendance a déjà été observée dans le cas de translations pures (Hild *et al.*, 2006). Ceci suggère que σ^u est aussi gouvernée, pour ces transformations générales, par les mêmes dépendances que pour les transformations de type translation. Cette diminution peut s'expliquer par l'augmentation de la quantité d'informations, en terme de gradients de niveaux de gris, obtenue lorsque l'on augmente la taille de fenêtre d . Enfin, l'utilisation d'une fonction de forme plus riche, donc comportant un plus grand nombre de paramètres à déterminer, s'accompagne, pour une taille de fenêtre d donnée, d'une augmentation de σ^u .

Tous les résultats précédents ont été obtenus sur des images parfaites, exemptes de tout bruit ($n=0$). La présence d'un bruit sur les images est maintenant discutée. Pour cela, les images synthétiques de mouchetis soumises à des transformations sinusoïdales, sur lesquelles a été rajouté un bruit blanc gaussien d'écart-type 0, 1, 4 et 8 niveaux de gris, ont été traitées. Les résultats sont présentés figure 4. Quelle que soit la fonction de forme adoptée, on observe, comme on pouvait s'y attendre, que l'erreur ultime σ^u présente une évolution quasi linéaire avec le niveau de bruit et que cette erreur est inversement proportionnelle à la taille de fenêtre d . La valeur de l'ordonnée à l'origine de ces courbes est associée au bruit de quantification toujours présent sur les images.

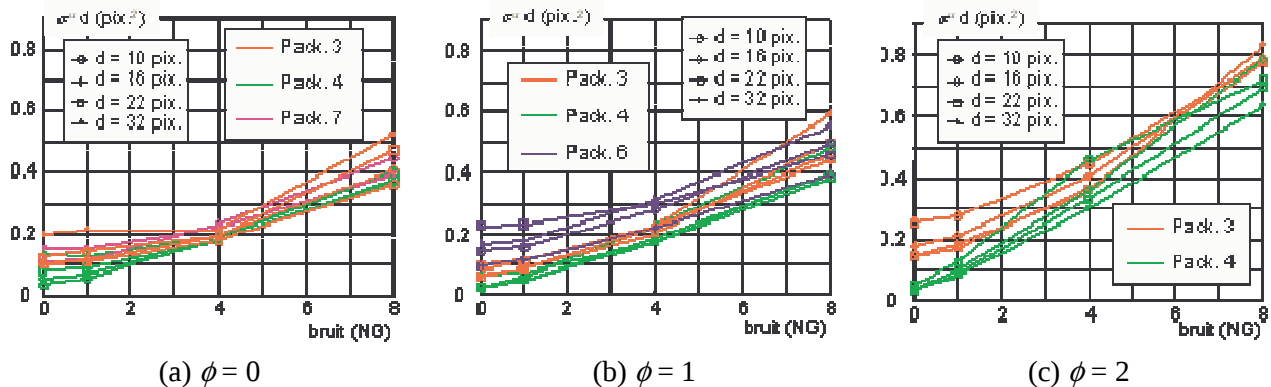


Figure 4 : Evolution de l'erreur ultime σ^u multipliée par la taille de fenêtre d en fonction du niveau de bruit rajouté sur les images (images de transformations sinusoïdales)

Comme suggéré précédemment, ces résultats ont été comparés à ceux obtenus sur des images de même texture, subissant simplement un mouvement de translation uniforme. A la différence des images transformées de façon sinusoïdale, l'erreur RMS ne s'identifie plus uniquement à l'erreur aléatoire, mais intègre aussi l'erreur systématique. On vérifie que l'erreur aléatoire se comporte qualitativement et quantitativement de la même manière vis-à-vis du bruit et de la transformation que dans le cas des images « sinus » présentées figure 4.

On présente figure 5 les résultats relatifs à l'erreur systématique, calculés avec le logiciel #4, et une interpolation quintique. Il a déjà été montré que l'amplitude de ce biais est d'autant plus faible que l'interpolation est riche (Schreier *et al.*, 2000), c'est pourquoi nous avons choisi de travailler avec une

interpolation d'ordre 5. En l'absence de bruit, l'amplitude maximale du biais est de 10^{-3} pixel. L'ajout d'un bruit de faible amplitude ne modifie sensiblement pas le biais. Par contre, pour des niveaux plus importants, on observe l'apparition d'une erreur systématique de forme sinusoïdale dont l'amplitude augmente d'autant plus que le bruit est important. La dépendance de cette erreur systématique à la fonction de forme est beaucoup moins marquée. Bien entendu, l'amplitude est indépendante de la taille de fenêtre d .

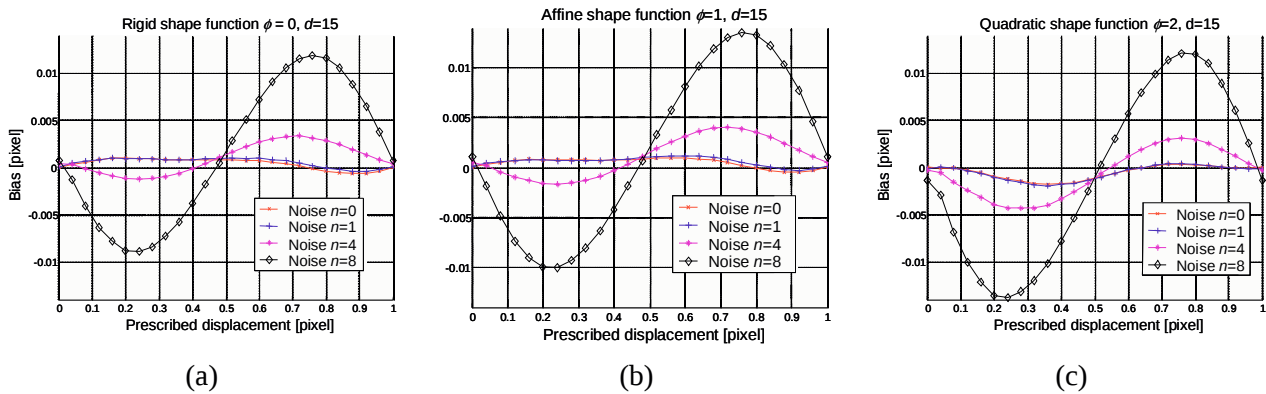


Figure 5 : évolution de l'erreur systématique pour des déplacements rigides compris entre 0 et 1 pix. (logiciel 4, $i = q$, $d = 15$ pix.) – (a) $\phi = 0$ – (b) $\phi = 1$ – (c) $\phi = 2$

4 Conclusions

Dans ce travail, les performances de différents algorithmes de corrélation ont été testées sur des images de synthèse présentant des transformations de type sinusoïdal de période et d'amplitude variable. Les résultats révèlent des tendances générales pour l'essentiel indépendantes des implémentations mais fortement corrélées aux algorithmes sous-jacents. On observe pour les faibles périodes inférieures à la taille de la fenêtre de corrélation, qu'aucune mesure n'est possible. La résolution spatiale s'identifie donc à la taille de fenêtre d . Pour les plus grandes périodes, nous montrons l'existence de deux régimes : un régime lié à l'erreur de modèle σ^m qui s'observe lorsque l'effet de discordance entre la forme supposée de la transformation locale et le champ réel est prépondérant, et un régime d'erreur ultime σ^u , toujours observé pour les fonctions de forme d'ordre 2 (erreur de modèle supplantée par l'erreur ultime car la transformation utilisée est proche de la transformation réelle). Ce régime est observé uniquement pour les petites fenêtres de corrélation et les petites déformations dans le cas des fonctions de forme d'ordre 0 ou 1. Ce dernier s'apparente à l'erreur ultime observée dans le cas de pures translations d'images (erreur de modèle nulle quelle que soit la formulation retenue). En présence de bruit, ce régime possède aussi les mêmes caractéristiques que l'erreur observée dans le cas des translations. De plus, l'utilisation d'une fonction de forme comportant un grand nombre de paramètres à calculer n'est pas toujours pertinente et s'accompagne, d'une augmentation de l'erreur ultime. Enfin, une augmentation significative de l'amplitude de l'erreur systématique est observée lorsque le niveau de bruit augmente.

References

- Schreier H. and Sutton M. 2002 Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions *Experimental Mechanics* **42** 303–311.
- Orteu J.-J., Garcia D., Robert L. and Bugarin F. 2006 A speckle-texture image generator in *Proceedings of the Speckle06*, Slangen, P. and Cerruti, C., Eds, SPIE vol. 6341.
- Bornert, M., Brémand, F., Doumalin, P., Dupré, J.-C., Fazzini, M., Grédiac, M., Hild, F., Mistou, S., Molimard, J., Orteu, J.-J., Robert, L., Surrel, Y., Vacher, P. and Wattrisse, B. 2009 Assessment of Digital Image Correlation measurement errors: methodology and results, *Experimental Mechanics*, ISSN 0014-4851 (Print) 1741-2765 (Online), DOI 10.1007/s11340-008-9204-7.
- Hild F. and Roux S. 2006 Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties - a review *Strain* **42** 69–80.
- Schreier H., Braasch J. and Sutton M. 2000 Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation *Optical Engineering* **39** 2915–2921.