

**Mesure de champs de déplacements 3D par corrélation
d'images – Etude métrologique et application sur
structures composites = 3D displacement field
measurement by digital image correlation – Metrological
study and application to composite structures**

J.P. Chambard, S. Jaminion, M. Tazeroualti, Christophe Galerne, François
Hild

► **To cite this version:**

J.P. Chambard, S. Jaminion, M. Tazeroualti, Christophe Galerne, François Hild. Mesure de champs de déplacements 3D par corrélation d'images – Etude métrologique et application sur structures composites = 3D displacement field measurement by digital image correlation – Metrological study and application to composite structures. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 8 p. hal-00385770

HAL Id: hal-00385770

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00385770>

Submitted on 11 Jun 2009

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.

Mesure de champs de déplacements 3D par corrélation d'images – Etude métrologique et application sur structures composites –

3D displacement field measurement by digital image correlation – Metrological study and application to composite structures –

J.P. Chambard¹, S. Jaminion¹, M. Tazeroualti¹, C. Galerne² et F. Hild³

1 : HOLO3

7 rue du Général Cassagnou – F-68300 SAINT-LOUIS

E-mail : jp.chambard@holo3.com , s.jaminion@holo3.com, m.tazeroualti@holo3.com

2 : EADS Innovation Works

12 rue Pasteur – F-92152 SURESNES CEDEX

E-mail : catherine.galerie@eads.net

3 : LMT-Cachan

ENS Cachan / CNRS / UPMC / PRES UniverSud Paris – F-94235 CACHAN CEDEX

E-mail : hild@lmt.ens-cachan.fr

Résumé

L'objet de cette étude est l'identification des facteurs d'incertitude de mesure intervenant dans les procédés de stéréocorrélation d'images, ainsi que l'évaluation de l'incertitude globale. Dans un premier temps, nous faisons une description détaillée des deux procédés qui sous-tendent un dispositif de mesure de champ de déplacement 3D par corrélation d'images : le procédé de corrélation d'images de mouchetis d'une part et la reconstruction 3D par stéréovision d'autre part. La phase initiale de calibrage est également détaillée. Une liste non exhaustive des facteurs d'incertitudes de mesure est ensuite donnée, pour un essai typique sur structure composite en ambiance industrielle. L'influence de chaque facteur est étudiée et son apport au bilan d'incertitude globale est quantifié. En raison du grand nombre de paramètres intervenant dans le bilan de l'incertitude de mesure globale, celle-ci est évaluée par des essais métrologiques (répétitivité, reproductibilité). Des valeurs d'incertitudes sont fournies. La mise en œuvre d'une procédure de vérification d'un moyen de mesure sur site industriel est ensuite discutée. Si elle ne nécessite qu'un étalon de forme pour valider la mesure de forme 3D, elle peut s'avérer plus délicate pour vérifier la justesse de la mesure des déplacements.

Abstract

This study aims at the identification of uncertainty factors of a stereo-correlation equipment as well as the assessment of the global uncertainty. First, we give a detailed description of the underlying algorithms of a stereo-correlation system, namely, the registration of random patterns in pictures of the two cameras and the 3D reconstruction of the surface. The initial calibration phase is also described. The uncertainty factors of a typical on-site measurement of a composite structure are listed. The effect of each factor and its contribution to the global uncertainty is evaluated. Due to the large number of uncertainty factors, the global uncertainty is assessed by statistical analyses of multiple measurements (repeatability and reproducibility tests). The definition of a checking procedure of a typical equipment prior to a measurement is then discussed. Although one only needs a reference sample to check 3D shapes, it is more difficult to check the accuracy of the measured displacements.

Mots Clés : Corrélation d'image, stéréovision, calibrage, incertitude de mesure, champ de déplacements 3D
Keywords: Image correlation, stereovision, calibration, uncertainty, 3D displacement maps

1. Introduction

Parmi les procédés de mesure basés sur l'optique, la corrélation d'images s'impose aujourd'hui comme un outil de mesure de champ de déplacement utilisable en milieux académiques et industriels en raison de sa grande flexibilité, de sa facilité d'emploi et de la grande richesse des informations fournies lors d'un essai mécanique. Historiquement, la corrélation d'images a d'abord été utilisée avec une seule caméra ne permettant d'étudier que des surfaces planes [1] sujettes à des champs de déplacements 2D.

D'autre part, les procédés optiques de numérisation 3D se sont fortement développés durant cette dernière décennie, faisant apparaître la technique d'ingénierie inverse permettant de réaliser rapidement la définition numérique d'un objet existant (par exemple à partir d'un modèle physique ou d'un prototype). Ces techniques sont également reconnues dans l'industrie comme moyen de contrôle dimensionnel rapide, même si un travail d'amélioration et de standardisation reste à faire [2-3].

L'association d'une technique de numérisation 3D (stéréovision ou lumière structurée) avec la corrélation d'images permet d'accéder de façon simple au champ de déplacement 3D de la surface d'une pièce soumise à une sollicitation. Partant des travaux réalisés pour évaluer les erreurs de mesure dans le domaine de la numérisation 3D, nous conduisons ici une analyse métrologique d'un capteur de stéréocorrélation en vue de déterminer l'incertitude de mesure d'un tel moyen. Cette analyse a été conduite en utilisant le logiciel CORRELI^{STC} développé dans le cadre du projet VULCOMP.

2. Description générale du procédé de stéréocorrélation

2.1 Corrélation d'images

La figure 1 montre deux images de mouchetis de la même pièce qui a subi une sollicitation engendrant une déformation de sa surface. Cette déformation se traduit par une modification locale du mouchetis qui va être analysée par corrélation d'images. D'un point de vue mathématique, on suppose que les images dans deux états différents de l'objet s'écrivent $f(\underline{x})$ et $g(\underline{x})$, où \underline{x} représente les coordonnées en pixel dans l'image. Si on appelle $\underline{u}(\underline{x})$ le champ de déplacement entre les deux images, la conservation locale de la luminance s'écrit

$$g(\underline{x}) = f(\underline{x} - \underline{u}(\underline{x}))$$

Si l'on suppose que les images sont différentiables, un développement de Taylor au premier ordre conduit à

$$g(\underline{x}) = f(\underline{x}) - \underline{u}(\underline{x}) \cdot \underline{\nabla} f(\underline{x})$$

Le calcul du champ de déplacement revient à minimiser globalement le résidu de corrélation défini par

$$\Phi = \int [g(\underline{x}) - f(\underline{x}) + \underline{u}(\underline{x}) \cdot \underline{\nabla} f(\underline{x})]^2 d\underline{x}$$

L'originalité de l'approche réside dans l'utilisation d'une décomposition de type éléments finis du champ de déplacement

$$\underline{u}(\underline{x}) = \sum v_i \underline{\psi}_i$$

où les $\underline{\psi}_i$ sont une base de fonctions élémentaires polynomiales de degré 1 définies sur un maillage rectangulaire de la surface de l'objet. Cette écriture permet de ramener la minimisation de la fonctionnelle Φ à la résolution d'un ensemble de systèmes linéaires. Nous utilisons un algorithme itératif basé sur une décomposition multi-échelles des images ; une estimation initiale avec une faible résolution spatiale est effectuée et progressivement ce calcul est itéré en modifiant l'échelle d'analyse c'est-à-dire en augmentant la résolution spatiale et la précision du calcul [4].

A partir de cette écriture, on peut montrer que la minimisation peut se résumer à la résolution d'un système linéaire où les inconnues sont les déplacements nodaux associés à la discrétisation adoptée. L'intérêt de cette approche de type éléments finis est double :

1. on choisit le type de fonction qui représente le champ de déplacements à l'échelle de l'élément, et une continuité des déplacements est automatiquement satisfaite ;
2. les liens en import et export avec des résultats issus de calculs par éléments finis en sont facilités.

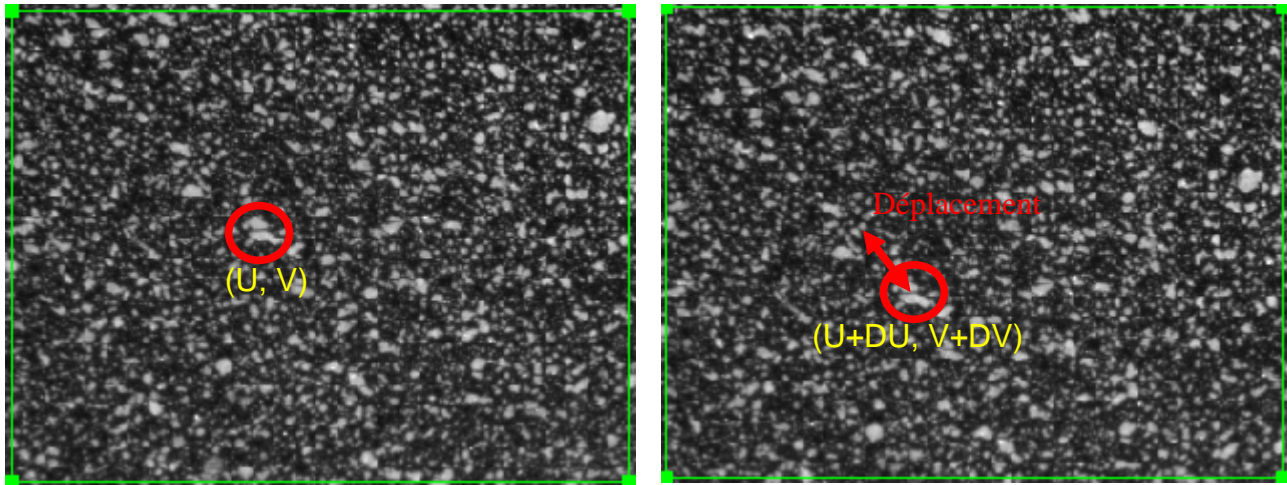
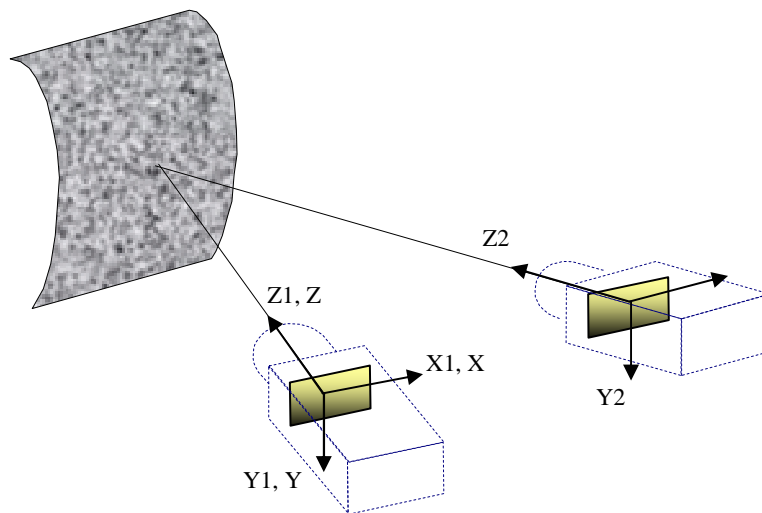


Figure 1 : Deux images de mouchetis.

2.2 Calibrage des caméras

Le calibrage est une phase initiale essentielle du procédé, qui permet de transformer des informations de position de pixels en informations métriques. Une caméra est définie par ses paramètres intrinsèques (point principal (C), distance focale (f) et coefficients de distorsion (k)), définis dans le repère rétinien (figure 2).



- X_1, Y_1, Z_1 repère rétinien parfait de la caméra 1 (dite principale)
- X_2, Y_2, Z_2 repère rétinien parfait de la caméra 2
- X, Y, Z repère général de mesure aligné sur le repère X_1, Y_1, Z_1

Repère rétinien : repère dans lequel les pixels sont normés et corrigés des aberrations optiques

Figure 2 : Le modèle stéréoscopique et ses repères.

Ces paramètres sont déterminés en utilisant une mire (damier) dont les caractéristiques sont connues. Cette mire est placée dans différentes positions et différentes orientations dans le volume « vu » par la caméra. Chaque image ainsi recueillie permet de faire la correspondance entre les positions réelles des intersections du damier dans l'espace et leurs coordonnées en pixel dans le plan du CCD. Ces correspondances permettent, par un algorithme de minimisation, de déterminer les paramètres intrinsèques de la caméra [5]. Les paramètres dits « extrinsèques » définissent la translation et la rotation permettant de passer du repère rétinien de la caméra 1 vers celui de la caméra 2. Ils sont déterminés à partir d'une image (au minimum) de la même mire. A partir de ces données de calibrage, les coordonnées d'un point 3D de l'espace peuvent être calculées dès lors que l'on connaît sur quel pixel de la caméra 1 et sur quel pixel de la caméra 2 ce point est vu.

2.3 Reconstruction de la surface initiale en 3D

A partir d'une paire d'images (prise par chaque caméra), la première étape pour la reconstruction 3D de la surface est la procédure d'appariement. Celle-ci consiste à rechercher pour chaque pixel de la caméra droite son correspondant sur la caméra gauche. Cette correspondance est obtenue par corrélation entre l'image de droite et l'image de gauche. Par triangulation, et connaissant les paramètres intrinsèques et extrinsèques des deux caméras, le point 3D correspondant à chaque paire de pixel peut être calculé. En balayant la totalité de l'image de la caméra principale, on reconstruit ainsi une succession de points 3D situés sur la surface de l'objet visualisé.

2.4 Détermination d'un champ de déplacement 3D

Pour chaque caméra, un champ de déplacement (quantifié de manière sub-pixelle) est calculé par corrélation d'images. On dispose alors des informations suivantes :

- des paires de pixels appariés dans l'état 0 : (i_1, j_1) caméra 1 avec (i_2, j_2) caméra 2. Ce résultat résulte de la procédure d'appariement décrite ci-dessus ;
- des vecteurs déplacements 2D quantifiés de manière sub-pixelle pour chaque caméra : (u_1, v_1) pour la caméra 1 et (u_2, v_2) pour la caméra 2.

On obtient donc pour chaque état de l'objet, les paires de pixels appariés :

- Etat 0 : (i_1, j_1) pour la caméra 1 et (i_2, j_2) pour la caméra 2 ;
- Etat 1 : $(i_1', j_1') = (i_1, j_1) + (u_1, v_1)$ pour la caméra 1 et $(i_2', j_2') = (i_2, j_2) + (u_2, v_2)$ pour la caméra 2.

A partir de ces données, on peut donc calculer les coordonnées des points en 3D pour chaque état de l'objet, et ainsi les vecteurs déplacements 3D correspondants.

3. Les facteurs d'incertitude de mesure

3.1 Caractéristiques des caméras

L'algorithme de corrélation d'images est basé sur l'exploitation de différence d'images et de dérivées spatiale d'image. Aussi les paramètres suivants des caméras vont être essentiels sur la qualité des résultats fournis :

- la résolution spatiale : une grandeur caractéristique est la taille d'un pixel projeté sur la surface ;
- la dynamique : les images peuvent être codées sur 8 bits, 12 bits ou plus ;
- le bruit de numérisation : même en l'absence totale de lumière, un signal non nul et aléatoire est obtenu. Le niveau de ce signal réduit d'autant la dynamique utile de la caméra.

D'autre part, la qualité de l'optique placée devant la caméra aura également une influence sur les résultats. En particulier, la tâche d'Airy de l'optique génère un lissage spatial du signal : l'intensité recueillie sur un pixel est une moyenne pondérée avec les pixels voisins.

3.2 Erreurs liées au calibrage

Cette étape fondamentale, décrite ci-dessus, est basée sur la prise d'images de mires. Pour exploiter au mieux les possibilités des composants utilisés, il est souhaitable que les positions des motifs utilisés (les

carrés du damier) soient connues avec une incertitude faible par rapport à l'incertitude finale de l'équipement de stéréocorrélation. Même dans ces conditions, le calcul des paramètres de calibrage est entaché d'erreurs dont les écarts types typiques, exprimés en fraction de pixel, ont les ordres de grandeur suivants :

distance focale = 0.37 pixel
point principal = 0.60 pixel
coefficients de distorsion : 0.0007

Les paramètres extrinsèques sont également déterminés par un traitement statistique des données acquises. Les écart-types sur les valeurs obtenues sont les suivants :

translation : 0.007 mm
rotation : 0.03 mrad

Ces incertitudes de détermination des paramètres de calibrage vont tout naturellement engendrer des erreurs de justesse dans le calcul des coordonnées 3D. Typiquement, une erreur de 0.4 pixel sur la distance focale engendrera une erreur de 0.05 mm au maximum sur les coordonnées 3D et les erreurs cumulées sur les paramètres extrinsèques engendreront une erreur de 0.02 mm sur les coordonnées 3D.

3.3 Choix des paramètres de calcul

Le paramètre essentiel pour le calcul de corrélation est la taille de l'élément (8 x 8 pixels, 16 x 16 pixels, 32 x 32...). Un lien direct existe entre cette taille et l'incertitude liée au calcul par corrélation [4]. A titre d'exemple, si une incertitude de 2×10^{-2} pixel est obtenue pour une taille d'élément de 8 x 8 pixels, on aura une incertitude de 3×10^{-4} pixel pour une taille d'élément de 64 x 64 pixels. Toutefois, une augmentation de la taille de l'élément se fera au détriment de la finesse de l'information spatiale recueillie. Un compromis est donc à trouver selon le type d'essai : déplacements très lissés, ou au contraire forts gradients attendus. Les autres paramètres de calcul pouvant avoir une influence sur le résultat final sont :

- Le seuil de convergence : l'algorithme étant itératif, l'itération sera interrompue si au cours de deux calculs successifs, l'écart entre les résultats est inférieur au seuil de convergence choisi ;
- Le nombre maximum d'itération : ce paramètre limite le nombre d'itération en cas de non convergence de l'algorithme ;
- Le nombre d'échelles de calcul : ce paramètre est déterminé par le niveau de déplacement attendu et par la taille de la région d'étude choisie.

Il n'est pas aisé pour un utilisateur non averti de définir ces paramètres d'essai. C'est pourquoi il a été mis en place dans le logiciel CORRELI^{STC} un outil d'analyse préliminaire des images qui propose un jeu de paramètre optimal.

3.4 Qualité du mouchetis

Le mouchetis est en général réalisé de façon manuelle par l'opérateur en utilisant de la peinture en spray. Le mouchetis idéal a un fort contraste. Il est composé de motifs dont la taille est adaptée au champ caméra c'est-à-dire fins pour des petits champs et plus grossiers pour des champs de grande dimension. On doit également conserver une homogénéité d'ensemble car les paramètres de calcul sont définis pour l'ensemble de l'image.

La qualité du mouchetis est un facteur d'incertitude de mesure important. L'outil d'analyse du logiciel CORRELI^{STC} permet, avant de procéder à un essai réel, de vérifier que la qualité du mouchetis est suffisante pour obtenir une mesure fiable du champ de déplacement.

3.5 Environnement de l'essai

Les conditions environnementales de l'essai, qui ne sont pas toujours maîtrisées, vont influencer sur la qualité des résultats. Parmi les points clés, on peut citer :

- La température : un équipement de stéréocorrélation est composé de deux caméras reliées par un support mécanique. Une élévation de température pendant un essai induira une dilatation du support qui conduira à une modification des paramètres extrinsèques calculés lors du calibrage. De même, on respectera un temps de chauffe des caméras, qui peut avoir une influence non négligeable sur les paramètres intrinsèques.

- Les vibrations : la présence de vibration peut générer des mouvements des caméras qui se traduiront par un flou dans les images (en fonction du temps de pause choisi), ce qui peut dégrader la précision des calculs de déplacement.

- La lumière extérieure : dans l'algorithme de corrélation d'images, on fait l'hypothèse que la modification des images entre deux états de l'objet n'est liée qu'aux déplacements. Toute variation d'éclairage de la surface pendant l'essai peut être génératrice d'erreurs de mesure.

4. Evaluation de l'incertitude de mesure

4.1 Définition de la grandeur mesurée

La stéréocorrélation est une technique qui permet d'accéder à de nombreuses données lors d'un essai :

- Forme 3D de l'objet ;
- Cartographies des déplacements en X, Y ou Z ;
- Cartographie de la norme du déplacement ;
- Cartographies des composantes du tenseur des déformations (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{xy}) ;
- Cartographie des directions principales et des déformations principales.

Toutes ces données peuvent également être visualisées sous la forme de courbes montrant l'évolution d'une grandeur en fonction du temps (ou en fonction d'un paramètre d'essai tel que le chargement par exemple). Il convient donc de définir le type de donnée de mesure dont l'incertitude doit être évaluée. Nous considérons que l'apport essentiel de cette technique est la possibilité de fournir des cartographies en tout point de la surface de l'objet. D'autre part, la première grandeur métrique issue d'une mesure par stéréocorrélation est le déplacement, les composantes du tenseur des déformations étant calculées à partir du déplacement, ce qui constitue donc un post-traitement. En conclusion, nous considérons qu'un équipement de stéréocorrélation est avant tout un moyen qui permet de mesurer des champs de déplacements associé à une forme (surface) 3D. C'est pourquoi, nous nous attacherons à déterminer les incertitudes sur les mesures de cartographies de déplacements.

4.2 Description des essais métrologiques

Les caractéristiques de l'équipement testé étaient les suivantes :

- champ visualisé : 800 x 800 mm
- résolution caméra : 1280 x 960 pixels, monochrome 8 bits
- angle entre caméras : 30°
- optiques monture C.

Les essais ont été réalisés sur une plaque en matériau composite soumise à des déplacements de corps rigide dans les 3 directions de l'espace. Nous avons effectué les deux tests suivants :

1- Evaluation de la résolution et de la justesse de mesure

A partir d'un état initial nous avons déplacé l'objet de 0, puis 10 μm , 20 μm , ... jusqu'à 200 μm , par pas successifs. Pour chaque position, une paire d'images est enregistrée. Cet essai a été réalisé trois fois, pour évaluer les trois directions de déplacement : X, Y et Z. Le calcul de corrélation a été effectué en utilisant des éléments de 32 x 32 pixels. Le tableau 1 résume les résultats de ces essais.

Dépl't imposé X	σ sur X	Ecart sur X	σ sur Y	Ecart sur Y	σ sur Z	Ecart sur Z
10	26	16	32	26	24	17
20	29	17	30	23	24	11
30	26	18	34	30	27	11
42	19	13	33	28	23	-13
50	11	9	38	39	26	-14
62	10	4	36	32	26	-22
72	13	3	30	21	26	-33
80	17	6	30	25	29	-12
92	16	0	30	24	28	-14
104	16	2	32	28	27	-10
150	14	5	27	22	28	49
202	13	1	22	19	34	73
Valeur Moyenne	18	8	31	26	27	4
Valeur mini		0		19		-33
Valeur maxi		18		39		73

Tableau 1 : Erreurs de justesse (valeurs en μm)

L'écart constaté pour chacun des axes, est la différence entre la valeur imposée et la moyenne de la mesure sur toute la surface de l'objet. On ne constate pas de différences significatives entre les différents axes,

l'écart moyen étant d'environ 30 μm (avec une valeur extrême à 73 μm). Nous avons également reporté l'écart type σ sur chacun des axes. La valeur maximale pour tous les essais effectués est de 38 μm . La résolution de l'équipement est estimée à 10 μm , plus petit déplacement imposé dans nos essais et qui soit visible dans les trois directions X,Y et Z (figure 3).

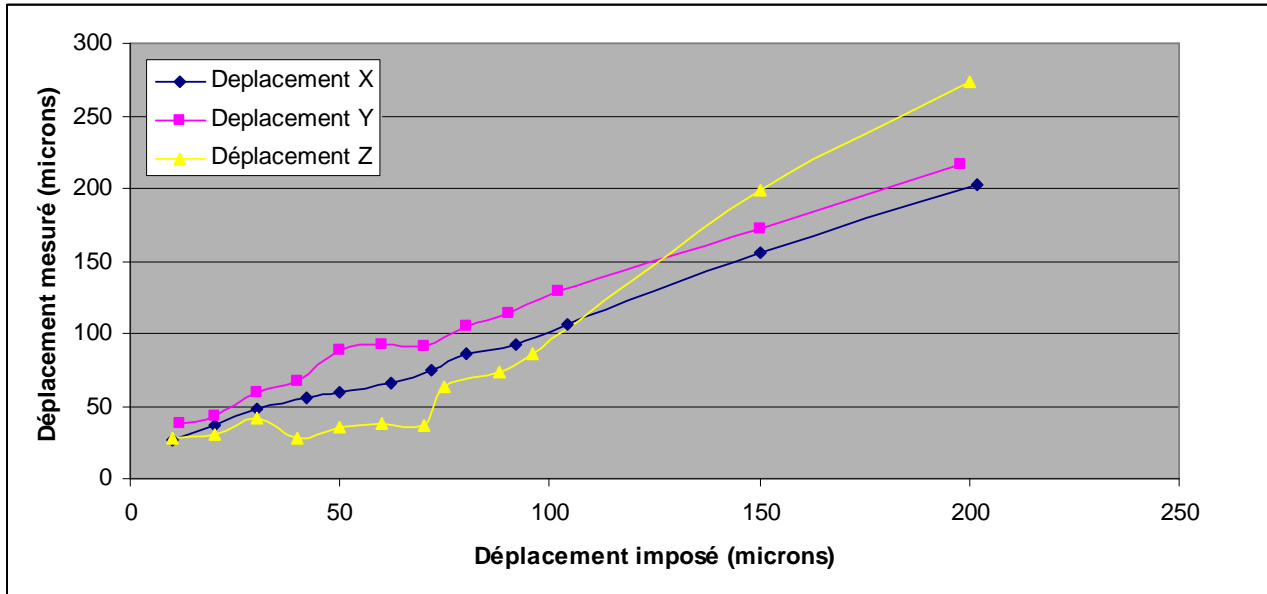


Figure 3 : Résolution et erreur de justesse

2- Répétabilité des mesures

L'objet étant dans un état stable appelé l'état 0, une série de 30 acquisitions de paires d'images a été effectuée. Après une translation de 1 mm correspondant à l'état 1 de l'objet, une nouvelle série de 30 acquisitions (paires d'images) a été réalisée. Le traitement de ces données a permis d'obtenir 30 cartographies de déplacement complètement indépendantes car issues d'images différentes. Le calcul a été effectué en utilisant des éléments de 16 x 16 pixels. Sur les 30 cartographies, on définit 1000 points de mesure. Pour chacun de ces points on analyse les variations de répétitivité du résultat (tableau 2).

Déplacement imposé = 1000 μm	Déplacement moyen (30 images)	Ecart-type (30 images)	Max-min (30 images)
Un point de mesure	992	14,8	65,1
Moyenne sur 1000 points	999,2	16,9	70

Tableau 2 : Erreurs de répétitivité (valeurs en μm)

5. Vérification pratique d'un équipement sur site

La vérification du calibrage est relativement aisée à conduire. Il suffit de placer dans le champ des caméras la mire ayant servi au calibrage ou une mire similaire connue. Une vérification des paramètres intrinsèques et extrinsèques peut alors être réalisée. Cette étape permet ainsi de garantir la qualité des données géométriques 3D (reconstruction de la forme 3D de la surface).

Cela ne permet toutefois pas de garantir la qualité des mesures des champs de déplacements, d'autres facteurs d'incertitude pouvant intervenir : qualité du mouchetis, paramètres de calcul, environnement de l'essai. Par simulation, il est possible d'évaluer l'incertitude de mesure compte tenu de la qualité des images (qualité mouchetis) et des paramètres de calcul. La simulation consiste à imposer un déplacement artificiel de l'objet et à calculer les images obtenues sur chaque caméra, en partant des images

initiales réelles de l'objet. Un calcul des déplacements par corrélation est ensuite effectué et le résultat est comparé en tout point au déplacement virtuel imposé.

6. Conclusion

Cette étude a permis d'obtenir une évaluation de l'incertitude de mesure de déplacements par stéréocorrélation basée sur le logiciel CORRELI^{STC}. Malgré l'utilisation d'un ensemble de composants tout à fait standard (caméras 1280 x 960 pixels, codage sur 8 bits, optiques monture C), les résultats obtenus sont très encourageants compte tenu du champ mesuré (800 x 800 mm). Toutefois cette étude est basée uniquement sur des déplacements de corps rigide. Il serait intéressant de poursuivre ces travaux en évaluant le procédé de stéréocorrélation dans le cas de champs de déplacements comportant des gradients.

Remerciements : Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet VULCOMP soutenu par l'ANR et le fonds européen FEDER.

Références

- [1] M.A. Sutton, W.J. Wolters, W.H. Peters, W.F. Ranson, S.R. McNeill (1983) « Determination of Displacements Using an Improved Digital Correlation Method ». *Im. Vis. Comp.* **1**(3), 133-139.
- [2] J.P. Chambard, S. Jaminion (2007) « Evaluation de l'incertitude de mesure d'un capteur optique de numérisation 3D. » *Actes du 13^e Congrès International de Métrologie*, 18-21 juin 2007, Lille (France).
- [3] R. Kokku, G. Brooksby (2005) « Improved 3D surface measurement accuracy on metallic surfaces. » *Proc. of "Optical Metrology 2005"* **5856**, 618-624.
- [4] G. Besnard, F. Hild, S. Roux (2006) « Finite-element displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Châtelier bands. » *Exp. Mech.* **46**, 789-803.
- [5] J.Y. Bouquet : Camera Calibration Toolbox for matlab http://www.vision.caltech.edu/bouquetj/calib_doc/