



**HAL**  
open science

## Mesure 3d de champs cinématiques dans le cas d'un contraste non uniformément réparti.

Yannick Pannier, Michel Bornert

► **To cite this version:**

Yannick Pannier, Michel Bornert. Mesure 3d de champs cinématiques dans le cas d'un contraste non uniformément réparti.. Journées Annuelles de la SF2M, May 2007, Saint Etienne, France. hal-00173747

**HAL Id: hal-00173747**

**<https://hal.science/hal-00173747v1>**

Submitted on 20 Sep 2007

**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 3D DE CHAMPS CINÉMATIQUES DANS LE CAS D'UN CONTRASTE NON UNIFORMÉMENT RÉPARTI.

Auteurs : Yannick PANNIER, Michel BORNERT, Laboratoire de Mécanique des Solides, École polytechnique – Palaiseau

## Introduction

Les techniques de corrélation d'image numérique ont récemment été étendues afin de pouvoir analyser des séquences d'images tridimensionnelles, obtenues par exemple par microtomographie X. La résolution et la résolution spatiale des champs de déformation mesurés dépendent directement de la répartition, de la taille et du contraste local des marqueurs utilisés pour réaliser l'appariement des images. Habituellement le calcul du critère de ressemblance est réalisé sur des sous-domaines espacés régulièrement. Cette discrétisation spatiale homogène facilite le post-traitement des données mais ne permet pas toujours une exploitation optimale du signal. En effet, les domaines de corrélation ne sont a priori pas centrés sur les marqueurs présentant le meilleur contraste, ce qui peut conduire à des erreurs de mesure. Il est proposé ici de déterminer la position des points de mesure (centre des domaines de corrélation) en fonction de plusieurs critères quantifiant la qualité du signal présent dans l'image.

## Principe de la corrélation d'image

La détermination des champs cinématiques à partir d'un champ de données 2D ou 3D repose sur l'hypothèse que ces données sont transportées par la transformation mécanique. Plusieurs paramètres interviennent lors de l'identification de la transformation qui permet de passer d'une image à l'autre. Habituellement, le domaine analysé est décomposé en sous-domaines indépendants dont la taille détermine la résolution spatiale de la mesure de déplacement ainsi que la base de mesure des déformations locales. La transformation sur ces sous-domaines est supposée suivre une forme simple, décrite par un petit nombre de paramètres scalaires, qui peut être une translation (caractérisée par ses 3 composantes dans le cas d'images volumiques), un mouvement rigide (6 composantes), une transformation affine (12 composantes) ou d'ordre supérieur. L'appariement des données avant et après transformation est réalisé par l'évaluation d'un coefficient de corrélation qui mesure la ressemblance entre le domaine initial ayant subi la transformation et ce même domaine dans l'image déformée et dépend des paramètres de la transformation. La formulation adimensionnelle choisie ici (voir [2]) permet d'éliminer l'effet des fluctuations de contraste et de brillance susceptibles d'être rencontrées dans les images de microtomographie aux rayons X. Les paramètres conduisant à l'optimum du coefficient déterminent l'évaluation de la transformation locale susceptible d'être la plus proche de la transformation réelle. La recherche de l'optimum se déroule en deux étapes. Dans un premier temps, on identifie les trois composantes entières du déplacement en explorant le voisinage du point considéré sur un domaine de taille prédéfinie à partir d'une valeur du déplacement supposée *a priori*, sous l'hypothèse que les autres composantes de la transformation sont fixes. A l'issue de ce calcul approché au voxel près, la minimisation du coefficient s'effectue à l'aide d'un algorithme de descente du premier gradient, plus robuste au bruit très présent dans les images analysées que des algorithmes plus sophistiqués utilisant le jacobien. Dans cette seconde phase, toutes les composantes de la transformation peuvent être optimisées, ce qui nécessite le calcul d'autant de dérivée partielles à chaque itération. Diverses stratégies permettent de limiter les risques de détecter un minimum local. Les images en niveaux de gris sont interpolées, à l'aide d'une fonction trilineaire dans le cas présent, pour identifier la transformation et en particulier le déplacement au centre du domaine de corrélation avec une résolution subvoxel.

La transformation la plus simple à identifier est une translation homogène, déterminées par ses trois composantes. Cette hypothèse permet de limiter les temps de calcul et peut être réalisée localement en présence de petites déformations. Bien sûr, une transformation plus riche peut être utilisée, mais le nombre de paramètres à identifier est alors plus important. De plus, lorsque le contraste dans le domaine de corrélation n'est pas assez riche, la recherche des coefficients d'ordre supérieure peut s'avérer infructueuse et induit une erreur supplémentaire. En pratique, le déplacement homogène trouvé est

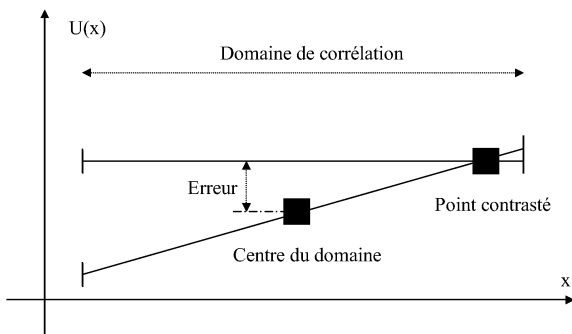


Figure 1: Illustration de l'erreur commise dans le cas 1D en supposant une simple translation du domaine de corrélation.

attribué au centre du domaine de corrélation. Cependant, si le signal est présent dans une partie limitée du domaine, le déplacement mesuré est entaché d'une erreur proportionnelle à la distance entre le centre de la région contrastée et le centre du domaine de corrélation multiplié par le gradient de la transformation. La figure (1) illustre schématiquement ce phénomène dans le cas 1D, mis en évidence de manière plus quantitative en 2D dans la référence [3].

Pour pallier ce phénomène, l'approche classique consiste à augmenter le nombre de paramètres de la transformation à identifier de manière à prendre en compte le gradient de la transformation, au prix des difficultés évoquées plus haut. Une autre solution peut être envisagée, ne nécessitant pas d'augmenter le nombre de paramètres à identifier. Elle consiste à centrer le domaine de corrélation sur la position qui offre le meilleur rapport

signal sur bruit. Si le bruit est essentiellement additif, le meilleur rapport est obtenu pour un contraste élevé. En présence de bruit multiplicatif, un critère supplémentaire doit lui être associé, comme le calcul du rayon d'auto-corrélation qui permettrait de distinguer le bruit d'un signal déterministe. Pour les images analysées ici, seul le contraste a été utilisé. Il peut être estimé en effectuant le rapport entre l'écart-type et la moyenne du niveau de gris sur le domaine. En centrant les domaines de corrélation sur la position qui offre le meilleur contraste, on corrige en partie l'erreur évoquée précédemment. A l'issue du calcul, on dispose du déplacement des centres des domaines de corrélation. La discrétisation spatiale de la structure est alors irrégulière contrairement à ce que l'on rencontre habituellement et se traduit par une base de mesure hétérogène dans le calcul des déformations locales, dont il doit être tenu compte dans l'interprétation des résultats.

### *Application sur des images en contraste naturel*

Lorsqu'il est présent, le contraste naturel issu des hétérogénéités intrinsèques au matériau peut directement fournir les marqueurs permettant de réaliser l'appariement des images [1]. Lorsque celui-ci fait défaut, des marqueurs supplémentaires peuvent être ajoutés, mais leur répartition spatiale est difficile à maîtriser [2]. Dans les deux cas, le contraste local peut être fortement non-uniforme, contrairement à ce qui peut être obtenu avec un mouchetis de peinture en corrélation d'image de surface. Ainsi, l'une des applications présentée dans [2] consiste en des essais de traction sur une éprouvette entaillée en aluminium marquée par des inclusions de cuivre. Ces inclusions ont tendance à s'agglomérer lors de la phase d'élaboration ce qui conduit à une répartition hétérogène des marqueurs. L'utilisation d'un maillage régulier associé à l'hypothèse d'une simple translation des domaines de corrélation conduit à des erreurs de mesure liées à la non prise en compte du gradient de la transformation (voir [2]). Elles se traduisent sur la figure 2a, représentant la déformation équivalente entre deux pas de chargement, par des fluctuations locales des déformations. L'utilisation d'un maillage centré sur les points contrastés associé à une simple translation des domaines de corrélation permet de rétablir la continuité des déformations mesurées (voir figure 2b). D'autres applications seront présentées, notamment sur le même matériau renforcé avec de larges particules sphériques de Zircône-Silice. Enfin, la déformation d'un alliage d'Aluminium-Cuivre en cours de solidification [4] sera analysée malgré un contraste local peu abondant dans la structure.

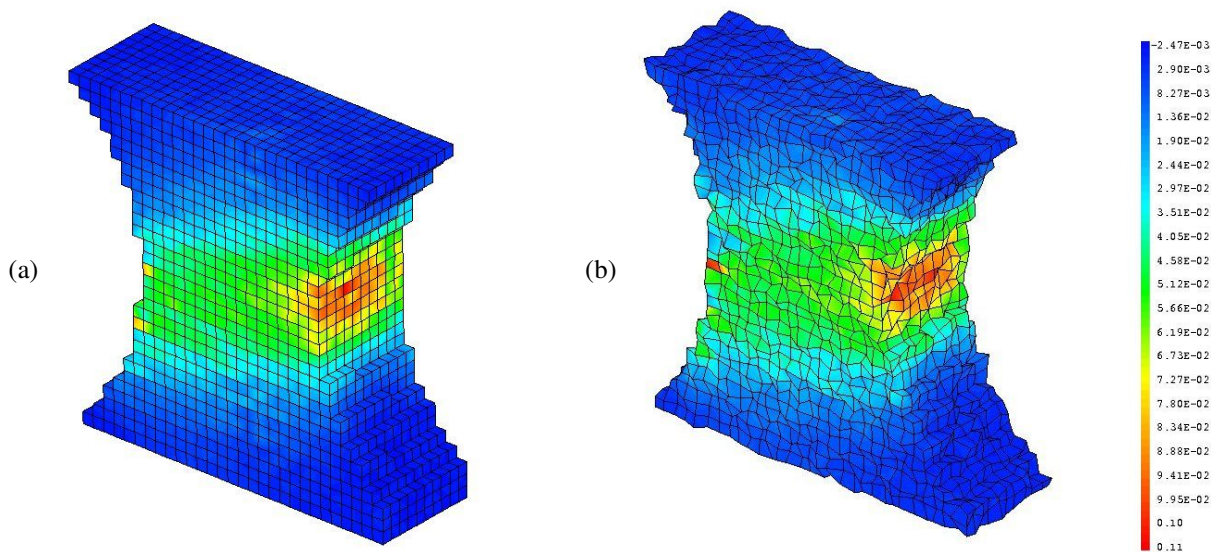


Figure 2 : Échantillon entaillé en traction : déformation équivalente calculée à partir d'un maillage élément fini basé sur les points de mesure. (a) : maillage régulier, (b) : maillage centré sur les points contrastés.

### **Références**

- [1] Bay, Smith, Fyhrie, Saad, Digital volume correlation : three-dimensional strain mapping using X-ray tomography, Experimental Mechanics, 1999.
- [2] Bornert, Chaix, Doumalin, Dupré, Fournel, Jeulin, Maire, Moreaud, Moulinec, Mesure tridimensionnelle de champs cinématiques par imagerie volumique pour l'analyse des matériaux et des structures. Instrumentation, Mesure, Métrologie, 2004.
- [3] Groupe de travail "Métrologie" du GDR 2519 "MCIMS", Resolution and spatial resolution of digital image correlation technique, Photomechanics 2006.
- [4] Limodin, Salvo, Suery, Dimichiel, In-situ investigation by X-Ray tomography of the overall and local microstructural changes occurring during partial remelting of an Al-15.8wt%Cu alloy, Acta Materialia, 2007.