

Méthodologies innovantes de calcul de champs dérivés à partir de mesures par cinématographie rapide. Application à l'identification de lois de comportement matériaux.

Pascal Bouda^a, Bertrand Langrand^a, Delphine Notta-Cuvier^b, Fabrice
Pierron^c et Eric Markiewicz^b

a. Onera - The French Aerospace Lab (Lille) - ONERA, F-59014 Lille - France, DMAS,
prenom.nom@onera.fr

b. LAMIH - CNRS : UMR8201, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis - Le Mont Houy
- 59313 Valenciennes Cedex 9 - France, {delphine.notta ;eric.markiewicz}@univ-valenciennes.fr

c. The University of Southampton - Faculty of Engineering and the Environment, Southampton - UK,
f.pierron@soton.ac.uk

Résumé :

Ces travaux visent à développer des techniques innovantes d'extraction de champs cinématiques dérivés à partir de mesures obtenues par des techniques classiques en cinématographie (méthode de grille et corrélation d'images numériques - DIC). Dans la perspective de l'identification d'un comportement élasto-viscoplastique, l'objectif est double : (1) - intégrer le caractère bruité des signaux (2) - contrôler le spectre fréquentiel des champs cinématiques calculés. Il est proposé dans un premier temps de traiter les cartographies à l'aide de méthodes de régularisation spectrale multidimensionnelles. Les champs dérivés sont ensuite calculés par des méthodes numériques avancées.

Abstract :

The following work aims at developing novel approaches to extract derived kinematic fields from full-field measurements obtained with image-based techniques (Digital Image Correlation - DIC and the grid method). Within the framework of the identification of an elastic-viscoplastic behaviour, the objective is twofold : (1) - taking the high noise level of the raw signal into account (2) - controlling the spectrum range of the processed fields. Whichever the measurement technique, it is proposed first to smooth the maps with a multidimensional spectral method. Then, the derived fields are extracted using some advanced numerical methods.

Mots clés : Mesure de champs ; Déformations ; Accélérations ; Dynamique transitoire ; Identification

1 Introduction

Le développement des méthodes de mesures de champs mécaniques (e.g. corrélation d'images numériques - DIC, méthode des grilles,...) permet d'accroître significativement la quantité d'information disponible pour caractériser des lois de comportement de matériaux, notamment lorsque les champs mécaniques deviennent hétérogènes. Avec la Méthode des Champs Virtuels (MCV) [1], le problème inverse d'identification des paramètres est traité en utilisant ces mesures pour calculer le Principe des Travaux Virtuels (PTV). En dynamique transitoire, la résolution du problème est possible à partir de la seule connaissance des champs de déformation et d'accélération [2–4].

Les grandes vitesses de sollicitation caractéristiques de la dynamique ultra-rapide nécessitent l'utilisation de moyens de mesure dont la cadence d'acquisition est très importante (de l'ordre du MHz). Cependant, ces mesures comportent des biais (bruit, distorsion, ...) ou des limitations liées au système d'acquisition (échantillonnage, gamme dynamique de caméra, ...). Celles-ci sont d'autant plus critiques lorsqu'il s'agit de mesurer des champs cinématiques avec des méthodes telles que la méthode des grilles ou la DIC utilisées pour la MCV. En effet, les résolutions spatiales et temporelles sont intimement liées à la caméra ultra-rapide utilisée pour filmer la scène. Ainsi, le calcul des champs de déformation et d'accélération à partir de la seule connaissance du champ de déplacements pose alors un certain nombre de problèmes, parmi lesquels le contrôle du spectre des champs cinématiques calculés, ou encore l'unicité de la solution obtenue quand le calcul est réalisé en plusieurs étapes (e.g. lissage spatial puis temporel ou l'inverse).

Les travaux présentés visent à développer des méthodologies en comparant des méthodes innovantes de régularisation spatio-temporelle en une seule étape combinées à des méthodes de dérivation à des techniques couramment utilisées en mesure de champs mais limitées. Il s'agit en effet d'utiliser des méthodes tridimensionnelles (donc bijectives) en remplaçant les conditions classiques sur la courbure par des conditions spectrales. Contrairement aux techniques les plus utilisées, les caractéristiques de la chaîne de mesure de champs (résolutions spatio-temporelles par exemple) seront ici explicitement utilisées pour calibrer la régularisation. Enfin, les champs dérivés seront obtenus à partir de méthodes numériques plus classiques.

2 Intégration du contrôle spectral dans la régularisation

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de régularisation pour lesquelles le contrôle spectral du signal final peut être envisagé. Ici, la méthode de Ditzkowski et *al.* [5], initialement prévue pour un champ unidimensionnel, est étendue à un champ tridimensionnel grâce à l'utilisation de trois familles indépendantes de polynômes :

$$\forall(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{t}) \in]-1, 1[^3, \quad \bar{U}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{t}) = \sum_{i,j,k \in \mathbb{N}^3} c_{i,j,k} L_i(\tilde{x}) L_j(\tilde{y}) L_k(\tilde{t})$$

$$\text{avec} \quad \forall(i, j, k) \in \mathbb{N}^3, \quad c_{i,j,k} = \left(i + \frac{1}{2}\right) \left(j + \frac{1}{2}\right) \left(k + \frac{1}{2}\right) \times \int \int \int_{]-1, 1[^3} U(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{t}) L_i(\tilde{x}) L_j(\tilde{y}) L_k(\tilde{t}) dx dy dt \quad (1)$$

où \tilde{t} est le point d'évaluation du signal ramené dans l'intervalle de référence $]-1, 1[$, \bar{U} le signal régularisé, U le signal bruité, et L_n le n ième polynôme de Legendre.

L'exploitation de cette approche permet le contrôle explicite du spectre du champ régularisé en une seule étape. En effet, plutôt que de choisir le nombre de modes en fonction de la valeur des coordonnées, le choix du nombre de polynômes ainsi que leur degré est fait en fonction de leur contenu spectral. Ce dernier est conditionné grâce aux résolutions spatio-temporelles issues des conditions expérimentales.

3 Méthodes d'évaluation des champs cinématiques dérivés

Dans un premier temps, seul le calcul de l'accélération est envisagé avec des schémas numériques discrets. En effet, la double différentiation est le cas le plus critique. Sachant que toute méthode unidimensionnelle est généralisable au calcul de dérivées dans le plan, deux approches sont ici comparées : l'utilisation de schémas discrets construits à partir de développements de Taylor et l'adaptation de schémas d'intégration temporelle issus de la littérature.

Deux schémas ont été construits : un schéma explicite au quatrième ordre, avec un support (stencil) incluant cinq points d'évaluation et un schéma implicite au troisième ordre, avec un stencil incluant trois points d'évaluation. Le schéma de Newmark [6] a aussi été étudié car sa formulation présente l'avantage de contenir celle de nombreux autres schémas utilisés en dynamique des structures.

4 Premiers résultats

Les schémas sont testés de plusieurs manières. Un signal analytique amorti a d'abord été généré en faisant varier son échantillonnage (50 et 500 points d'évaluation). Ensuite, un bruit gaussien (50 %) a été ajouté afin de valider la complémentarité du schéma numérique avec la méthode de régularisation testée, à savoir la régularisation avec les polynômes de Legendre (Figure 1).

Un sous-échantillonnage (50 points d'évaluation) du signal non bruité permet de démontrer une meilleure robustesse du schéma implicite par rapport aux deux autres schémas qui sont explicites. Ainsi, même si l'ajout de points au stencil permet d'augmenter l'ordre de précision du schéma, rendre ce dernier implicite pour un stencil donné améliore la robustesse vis à vis de l'échantillonnage et augmente sa précision.

Dans le cas où le signal bruité est plus échantillonné (500 points d'évaluation) et bruité, les mêmes conclusions ont été obtenues. La Figure 2 montre les résultats obtenus pour le calcul de la dérivée avec le schéma implicite à partir du signal régularisé.

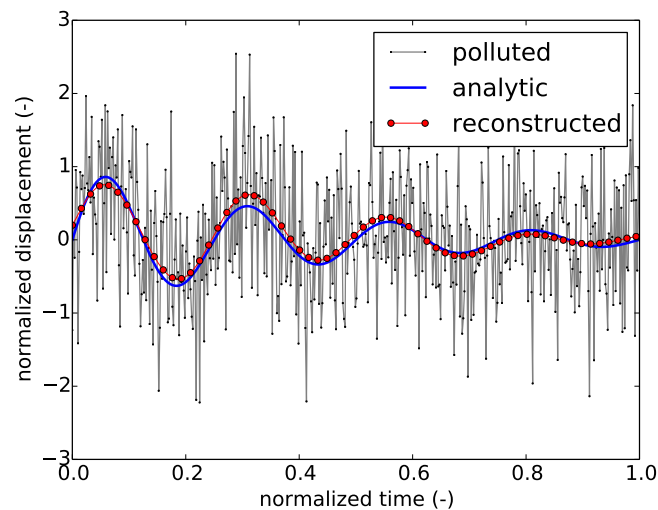


FIGURE 1 – Signaux utilisés pour tester la méthodologie

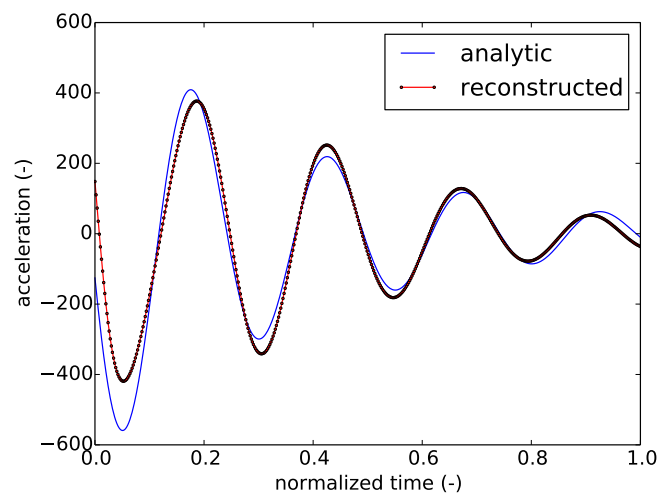


FIGURE 2 – Calcul de l'accélération avec le signal reconstruit

5 Conclusion et perspectives

La détermination de champs cinématiques dérivés à partir de mesure de champs reste un défi important, notamment dans le cadre de la caractérisation du comportement de matériaux en dynamique transitoire. En effet, le bruit caractéristique de la mesure oblige à une régularisation des champs avant toute dérivation. Une méthodologie innovante incluant l'utilisation des caractéristiques de la chaîne de mesure pour le contrôle du lissage est proposée. En effet, la régularisation tridimensionnelle proposée est effectuée en une seule étape et permet un contrôle strict du spectre du champ final obtenu. Par suite, les signaux dérivés sont obtenus à l'aide de schémas numériques de dérivation plus classiques.

Les premiers résultats obtenus dans le cas unidimensionnel sont prometteurs. Cependant, la méthode doit encore être validée et appliquée dans le cas tridimensionnel grâce à la Méthode des Champs Virtuels (MCV). Par ailleurs, elle pourrait également être améliorée avec une approche différente pour la régularisation comme celle proposée par Taubin *et al.* [7].

Références

- [1] Pierron F. et Grediac M., The Virtual Fields Method. Extracting Constitutive Mechanical Parameters from full-field Deformation Measurements, Springer (Ed.), New-York, 2012.
- [2] Moulart R., Pierron F., Hallett S. et Wisnom, M., Full-field strain measurement and identification of composites moduli at high strain rate with the virtual fields method *Experimental Mechanics*, 2011, 51, 509-536.
- [3] Pierron F., Zhu H. et Siviour C., Beyond Hopkinson's bar, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2014, 372.
- [4] Le Louedec G., Pierron F., Sutton M. A., Siviour, C. et Reynolds, A. P., Identification of the Dynamic Properties of Al 5456 FSW Welds Using the Virtual Fields Method, *Journal of Dynamic behavior material*, 2015, 1, 176-190.
- [5] Ditkowski A., Bhandari A. et Sheldon B. W., Computing Derivatives of Noisy Signals Using Orthogonal Functions Expansions, *Journal of Scientific Computing*, 2008, 36, 333-349.
- [6] Newmark N. M., A method of computation for structural dynamics, *Journal of Engineering Mechanics Division*, 1959, 67-94
- [7] Taubin G., A Signal Processing Approach to Fair Surface Design, *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, 1995, 351-358