

# Conception d'un essai purement inertiel pour la caractérisation du comportement viscoplastique de matériaux métalliques par la Méthode des Champs Virtuels

**Pascal Bouda<sup>a</sup>, Bertrand Langrand<sup>a</sup>, Delphine Notta-Cuvier<sup>b</sup>, Eric  
Markiewicz<sup>b</sup> et Fabrice Pierron<sup>c</sup>**

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 concevoir un essai innovant permettant la caractérisation du comportement dynamique de matériaux métalliques. Exploité avec la Méthode des Champs Virtuels (MCV), cet essai doit permettre l'identification des paramètres d'une loi de comportement élasto-viscoplastique valable sur une large gamme de déformation et de vitesse de déformation. Pour y parvenir, différentes configurations d'essais, utilisant notamment des géométries d'éprouvettes particulières, sont modélisés par éléments finis. Deux critères guident la sélection : (1) - le spectre des déformations et des vitesses de déformation couvert (2) - l'identifiabilité des paramètres. Alors que le premier critère est évalué par une analyse avancée des champs mécaniques, le second l'est grâce à la reproduction de la prise de clichés de cinématographie rapide à l'aide des simulations numériques. Par suite, le traitement des images obtenues menant à l'identification permet de démontrer la validité de la configuration d'essai.*

## Abstract :

*The following work aims at designing a novel test to characterize the dynamic behaviour of metallic materials. Using the Virtual Fields Method (VFM), this test should enable the identification of elastic-viscoplastic model that is valid on a wide strain and strain-rate range. In order to do so, several test settings - including notably several specimen geometries - are simulated. Two criteria will govern the selection : (1) - the strain and the strain-rate range (2) - the identifiability of the parameters. Whereas the*

first criterion is rated with an advanced processing of the mechanical fields, the other is evaluated - based on FE simulations - reproducing the shooting procedure with a Ultra-High-Speed camera. Finally, the extraction of the material parameters demonstrates the relevance of the test setting.

**Mots clefs : Méthode des Champs Virtuels, Méthode de grille ; DIC ; Dynamique ; Identification**

## 1 Introduction

L'identification des paramètres de lois de comportement dynamique d'un matériau reste un défi important pour l'industriel. Pour ce faire, des essais expérimentaux dits statiquement déterminés peuvent être réalisés. Ces derniers reposent sur des hypothèses fortes (staticité, vitesse de déformation homogène,...) souvent difficiles à respecter et nécessitant de multiplier les essais comme par exemple pour l'étude de la sensibilité d'un matériau à la vitesse de déformation. Une alternative à ces essais repose sur une approche dite statiquement indéterminée. Dans ce cas, aucune hypothèse n'est nécessaire sur les conditions d'essai et sur les propriétés des grandeurs à mesurer (homogénéité par exemple). Cette approche peut être très avantageuse, notamment pour l'identification de comportements en dynamique. En effet, l'exploitation de champs mécaniques hétérogènes permet d'accroître la diversité des trajets de chargement analysés au cours d'un essai d'où la possibilité d'en limiter le nombre lors de l'étude de modèles multi-paramétriques comme en viscoplasticité par exemple.

La Méthode des Champs Virtuels (MCV) [1] permet d'exploiter ces essais grâce à la résolution du problème inverse d'identification des paramètres matériaux avec le Principe des Travaux Virtuels (PTV). Avec un champ de déplacement virtuel habilement choisi, sa résolution nécessite uniquement la connaissance des champs de déformation et d'accélération (1) [2, 3]. Ainsi, la mesure des efforts est superflue, ce qui peut être avantageux en dynamique.

$$\int_V \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\varepsilon}, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}, \dots) : \boldsymbol{\varepsilon}^* dV + \int_V \rho \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{u}^* dV = 0 \quad (1)$$

Dans tous les cas, l'exploitation optimale des avantages de la MCV repose sur la conception d'une configuration d'essai judicieuse, définie en prenant en compte non seulement tous les paramètres influençant le processus d'identification mais aussi les exigences sur le domaine de la validité de la loi de comportement caractérisée. Ainsi, il est proposé de déterminer une configuration d'essai permettant la couverture du spectre de déformations et de vitesses de déformation visé tout en assurant l'identifiabilité des paramètres par la MCV. Le processus est mis en œuvre pour un comportement élasto-viscoplastique (modèle de Johnson-Cook) sur une large gamme de déformations (jusqu'à 10%) et de vitesses de déformation (jusqu'à 1000/s) pour un essai d'impact sur la tranche d'une éprouvette dont l'autre bord est libre [2].

## 2 Méthodologie

Afin de discriminer les différentes configurations d'essai, des simulations par éléments finis servent de base non seulement à l'étude de l'identifiabilité des paramètres, mais aussi à la vérification du respect des exigences en termes de couverture de spectre. En plus d'une exploitation avancée des champs mécaniques simulés, la cinématique du maillage est utilisée pour générer des images virtuelles en reproduisant

le plus fidèlement possible la prise de clichés par imagerie rapide. Le procédé est répété pour deux types de textures : un mouchetis pour de la corrélation d'images numérique et une grille pour la méthode des grilles, l'objectif étant d'éprouver ces deux techniques de mesure de champs.

## 2.1 Exigences sur la couverture du spectre

La loi d'écrouissage étant viscoplastique (modèle de Johnson-Cook), l'étendue du spectre des déformations et des vitesses de déformation est utilisée pour discriminer les différentes configurations. Il est proposé d'analyser les configurations d'essai à l'aide de diagrammes  $(\dot{\epsilon}_{eq}^p, \dot{\epsilon}_{eq}^p)$ , lesquels comptent les états plastiques atteints au cours de l'essai. Ce décompte - effectué par décade - est pondéré par l'aire des éléments concernés par l'écoulement plastique.

## 2.2 Identifiabilité des paramètres

L'identifiabilité est liée à l'exploitation des mesures expérimentales et donc à la réalisation de l'essai. Cependant, de trop nombreux biais (dont la quantification est difficile) pourraient perturber le processus de conception. Aussi, plusieurs travaux de la littérature proposent de générer des images virtuelles à l'aide de calculs aux éléments finis [4, 5]. Ici, la méthodologie est reprise en essayant de limiter au maximum les biais numériques tout en étant le plus fidèle possible à la prise réelle de clichés. Pour cela, les images déformées sont générées à l'aide du gradient de la transformation et de textures virtuelles connues analytiquement. Alors que la formulation analytique d'une grille est immédiate [4], celle d'un mouchetis nécessite l'utilisation d'une convolution [6]. En outre, le calcul discret du gradient de la transformation se fait à l'aide des fonctions d'interpolation. La Figure 1 illustre un exemple d'image virtuelle obtenue à partir de ce procédé pour l'essai d'impact envisagé.

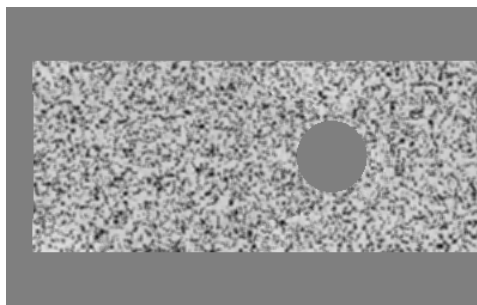


FIGURE 1 – Exemple d'une image virtuelle obtenue par déformation de texture

## 3 Premiers résultats

Concernant les exigences sur le spectre plastique, les premières simulations montrent que le développement du spectre se fait en bande (Figure 2). En effet, les déformations plastiques les plus grandes (resp. petites) ont lieu à haute (resp. basse) vitesse. Par ailleurs, ces déformations plastiques semblent mesurables au vu de la gamme de déformations totales associée.

Ces résultats confirment donc la possibilité d'identifier la loi de comportement sur le spectre visé avec la solution simulée. Il reste cependant à valider l'identifiabilité avec le simulateur d'images. Aussi, et ce pour converger vers une solution stabilisée, Rossi et *al.* [4] proposent dans un premier temps de répéter les identifications avec diverses perturbations (e.g. bruit spectral et/ou en amplitude, distorsion,...). Par suite,

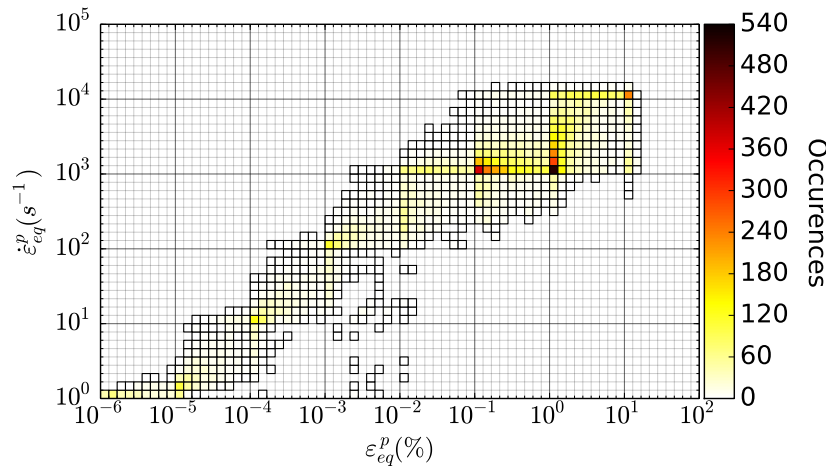


FIGURE 2 – État final de la plasticité pour une éprouvette doublement entaillée

une fonctionnelle dépendante des paramètres d'une configuration et traduisant un écart des constantes matériaux à des valeurs de référence peut être minimisée.

## 4 Conclusion

Ces travaux présentent une démarche originale de conception d'un essai innovant en dynamique rapide. Utilisant la Méthode des Champs Virtuels, la sélection d'une configuration d'essai est réalisée en respectant les exigences sur le domaine de validité de la loi de comportement caractérisée tout en s'assurant de l'identifiabilité des paramètres. Aussi, des simulations éléments finis permettent d'une part de justifier de la bonne couverture du spectre mais aussi de démontrer la validité de la configuration grâce à la reproduction de la prise de clichés par cinématographie rapide à partir des calculs EF. Cependant, la robustesse de la méthode peut être améliorée avec par exemple la minimisation d'une fonction optimisant la configuration d'essai.

## 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] Pierron F., Zhu H. et Siviour C., *Beyond Hopkinson's bar*, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2014, 372.
- [3] 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.
- [4] Rossi M. et Pierron, F., *On the use of simulated experiments in designing tests for material characterization from full-field measurements*, *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49, 420-435.
- [5] Rossi M., Lava P., Pierron F., Debruyne D. et Sasso M., *Effect of DIC Spatial Resolution, Noise and Interpolation Error on Identification Results with the VFM*, *Strain*, 2015, 51, 206-222.
- [6] Orteu J.-J., Garcia D., Robert L. et Bugarin F., *A speckle texture image generator*, *Proc. SPIE*, 2006, 6341, 63410H-63410H-6