

Identification de propriétés microstructurales d'un matériau hétérogène par méthode d'identification inverse

I. Serrano-Munoz¹, V. Magnier¹, R. Mann¹, P. Dufrénoy¹

¹ LML, Université de Lille 1, {itzia.serrano, vincent.magnier, ruddy.mann, philippe.dufrenoy}@polytech-lille.fr

Résumé — Dans cette étude, on s'intéresse à l'influence de la microstructure sur le comportement mécanique d'un matériau de friction à plusieurs composants. Des tests en compression couplés avec la technique de corrélation d'images ont été effectués. Les champs de déformation servent comme données d'entrée dans une procédure d'identification inverse en utilisant une méthode de recalage de modèles éléments finis. Ces modèles sont créés à partir de la microstructure du matériau de friction.

Mots clés — Tomographie rayons X, corrélation d'images, recalage inverse de modèles Éléments Finis.

1 Introduction

Pendant leur vie utile, les matériaux de friction doivent assurer plusieurs fonctions. La principale étant d'assurer le freinage avec des circonstances les plus variées (hautes et basses températures, pluie, arrêt d'urgence, *etc.*). Ils doivent être durables (faible taux d'usure) et fabriqués à bas coût. En outre, il y a la problématique de la pollution acoustique (crissement) et les vibrations. Pour répondre à un tel cahier de charges, les matériaux de friction sont des composites très hétérogènes avec un nombre de composants importants (entre 20 et 30) dont les tailles sont différentes (effet multi-échelle)[1]. Dû à cette complexité, l'influence de chaque composant sur la réponse en service du matériau est peu connue. Ceci amène à des développements purement empiriques et très onéreux.

Il s'avère que les fournisseurs de garnitures font face à des législations environnementales de plus en plus restrictives. Par exemple, les lois approuvées dans les états de Washington et California (Senate Bill 6557 et 346)[2] prévoient l'élimination (<0.5%) du cuivre dans les garnitures pour l'année 2025. De nouvelles formulations assurant les performances de freinage (voire les améliorant) doivent être développées. Il devient impératif de développer un dialogue expérimental-numérique permettant de réduire les temps et coûts de validation.

Pour être capables de réaliser des modélisations de systèmes de freinage, il devient nécessaire de décrire qualitativement (compréhension des mécanismes responsables de la réponse matériau) ainsi que quantitativement (*e.g.*, les modules de Young des constituants que les fabricants ne connaissent pas !) l'influence des composants dans le comportement macroscopique du matériau de friction. Un outil puissant offrant une description quantitative des propriétés matériau est la méthode de recalage inverse en s'appuyant sur la méthode des Éléments Finis (EF). Cette approche permet d'être au représentatif de l'essai tout en respectant la géométrie de l'échantillon, les conditions aux limites, *etc.* Le principe fondamental de cette approche (présentée en 1971 par Kavanagh et Clough[3]) consiste à établir une fonction objectif de type moindres carrés entre mesures expérimentales et valeurs simulées. Les paramètres recherchés sont obtenus par minimisation de cette fonction objective. Nombreuses variantes de l'approche originale ont été proposées, généralement basées sur la comparaison des efforts mesurés et calculés (approche notée FEU-F (Finite Element Updating Force en anglais) ou entre des champs de déplacement mesurés et issus d'un calcul EF (approche notée FEU-U). Plus en détail, l'approche FEU-U a permis d'identifier des lois en élasticité linéaire[4, 5], en hyperélasticité[6] et même en élastoplasticité[7]. En ce qui concerne cette étude, nous proposons d'appliquer la méthode FEU-U au niveau des composants (autrement dit, à l'échelle de la microstructure) pour étudier leur réponse élastique.

Dans un premier temps, nous présentons le matériau d'étude. Deux types d'essais de compression ont été menés. Le premier type permet d'obtenir la loi de comportement du matériau. En outre, un mouchetis a été appliqué sur une des faces de l'échantillon. Les résultats de corrélation sont en suite injectés dans la

méthode de recalage inverse adaptée au cas 2D. Il s'avère que ces résultats 2D ne sont pas suffisants pour décrire le comportement du matériau. Des essais de compression *in situ* par tomographie de laboratoire aux rayons X ont été réalisés pour obtenir des informations 3D. Il est attendu que les résultats de la méthode de recalage inverse en 3D serviront à décrire plus précisément le comportement du matériau.

2 Matériaux

2.1 Matériau de friction

Le matériau d'étude a été simplifié à 9 composants (la formulation est donnée dans le Tableau 1). Le Graphite 2 sont les particules les plus larges, avec de tailles qui varient entre 550 et 1100 μm . Le procédé de fabrication est comme suit : (i) les composants sont pesés et mélangés, (ii) le mélange est déposé dans un moule où il est compacté (contraintes jusqu'à 1000 tonnes), (iii) le frittage a lieu dans un four à balayage à 1100°C pendant 8 heures.

TABLE 1 – Composition du matériau d'étude

	Poudres métalliques	Graphites 1&2	Céramiques 1&2
% en masse	70	20	10
Tailles (μm)	<100	100-1100	100-250

Il faut noter que les essais de compression ont été réalisés à l'échelle dite *macro* du matériau. A cette échelle il est seulement possible d'identifier les particules de Graphite 2. Il est considéré que le reste de composants (8) font partie du composant nommé *Matrice*. C'est à dire, dans les essais de compression seulement deux composants vont être étudiés : le Graphite 2 et la *Matrice* (qui est composée par les poudres métalliques, les deux céramiques et le Graphite 1).

2.2 Matériaux à composants dissociés

Pour être capables de tester les propriétés de chaque composant il a fallu créer des matériaux dissociés. Dans cette étude on se focalise uniquement sur le comportement du Graphite 2.

2.2.1 Graphite 2

Tester les propriétés mécaniques de poudres est une tâche compliquée. Si on fabrique un échantillon à base de poudres compactées il existe le risque d'étudier l'adhérence entre les particules au lieu de leurs propriétés intrinsèques. Pour l'éviter, on a produit trois types d'échantillons : un échantillon à base de résine époxy, un autre qui contient 80% de résine (pourcentages massiques) et 20% de particules de Graphite 2 (dénommé par la suite comme G2-20%) et un dernier avec 20% de résine et 80% de Graphite 2 (G2-80%). Ces trois échantillons sont en suite testés en compression. L'intérêt de cette démarche et d'aller récupérer les paramètres des particules Graphite 2 dans l'échantillon G2-20%.

3 Méthodes expérimentales

3.1 Compression 2D

Une machine INSTRON-5500 est utilisée pour comprimer des échantillons de 20x20x20 mm³ (voir Fig. 1). Les faces supérieures et inférieures sont rectifiées pour assurer leur planéité. Un mouchetis est appliqué sur l'une de faces latérales. Des jauges de déformation sont collées sur les autres trois faces latérales. Ces trois jauges servent à valider la mesure de corrélation et aussi à vérifier que l'échantillon se déforme d'une façon homogène dans tout son volume. La face contenant le mouchetis est illuminé avec des fibres optiques. L'acquisition d'images se réalise tous les 500 ms avec une caméra XIMEA à 4x10⁶ pixels. Le capteur de force de la machine est paramétré à 100 Hz.

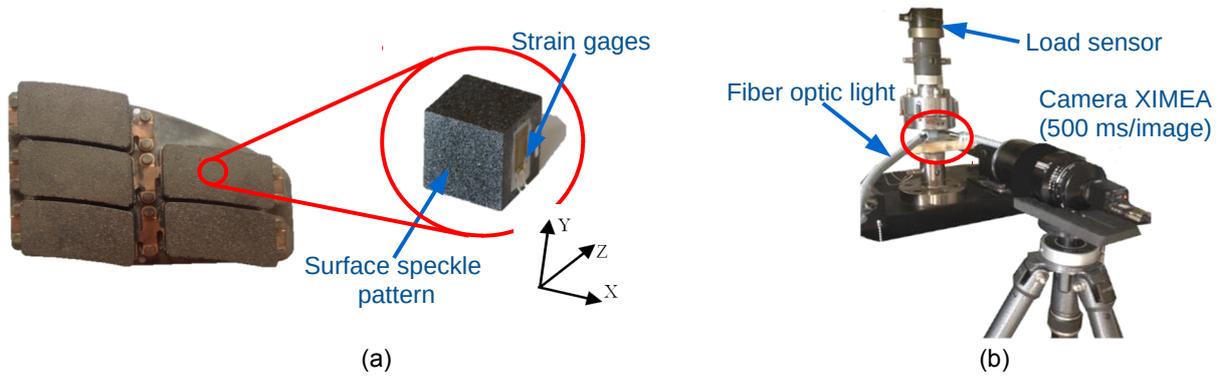


FIGURE 1 – (a) Image du prélèvement et préparation d'un échantillon $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$. (b) Image de l'instrumentation de l'essai de compression avec la machine INSTRON-5500.

3.2 Compression 3D

Ces essais *in situ* sont effectués dans le tomographe de la plateforme ISIS4D[8] (voir Fig. 2). Ils consistent à obtenir des images tomographiques de la microstructure à : (i) l'état zéro, où une petite précharge (10 N) est appliquée pour éviter que l'échantillon bouge, (ii) l'état sous contrainte, (iii) et la décharge, où l'échantillon est de nouveau soumis à la précharge. Le *set up* avec la machine *in situ* détermine une taille de voxel de $22,7 \mu\text{m}$ qui ne peut pas être réduite. A cette échelle-là, seules le Graphite 2 et la *Matrice* peuvent être distingués (voir la microstructure de la Fig. 3). En outre, la taille de l'échantillon a été réduite à $15 \times 15 \times 20 \text{ mm}^3$. En effet, pour ce matériau, les épaisseurs supérieures à $\sim 15 \text{ mm}$ est la limite où les rayons X ne peuvent plus traverser l'échantillon.

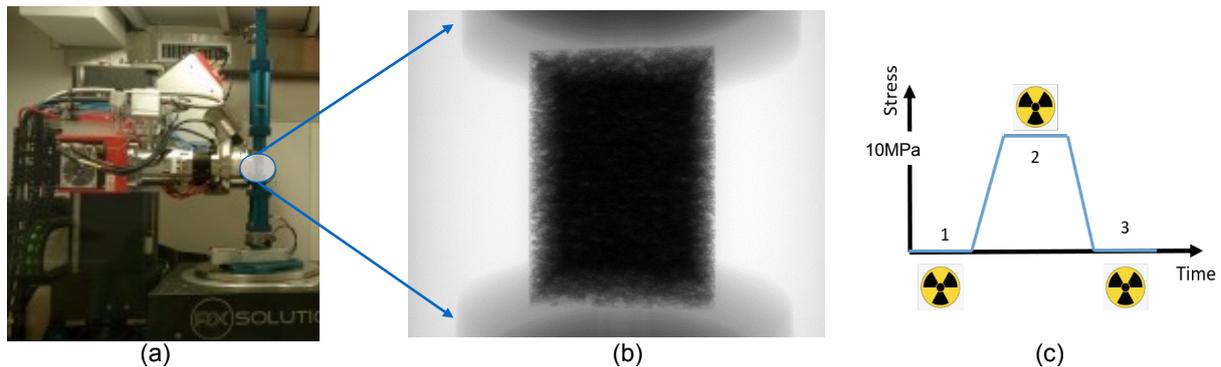


FIGURE 2 – (a) *Set up* de l'essai de compression 3D avec la machine *in situ*. (b) Radiographie montrant l'échantillon $15 \times 15 \times 20 \text{ mm}^3$ et les mors de compression. (c) Graphe des trois scans qui ont été réalisés.

3.3 Méthode de recalage inverse

La Fig. 3 montre les étapes clés de la méthode. Les données d'entrée sont différentes selon le type d'essai. Pour la compression 2D, il est nécessaire de prendre une image de la microstructure avant d'appliquer un mouchetis qui servira de motif pour la corrélation d'images (effectuée avec le logiciel YaDICs[9]). L'image de la microstructure est segmentée en séparant les particules de Graphite 2 de la *Matrice*. Le logiciel open-source OOF2D[10] est utilisé pour mailler la microstructure (10^4 éléments). Dans le cas 3D, le maillage de la microstructure est créé à partir des images tomographiques utilisant le logiciel Avizo[11] (7×10^6 éléments, dans la Fig. 3 le Graphite 2 est montré en bleu et la *Matrice* en gris). De même, la microstructure sert de motif pour la corrélation volumique. Néanmoins, ce motif microstructural est assez irrégulier (dû à la variété de tailles [$550-1100 \mu\text{m}$] des particules de Graphite 2), ce qui rend la corrélation volumique un peu moins précise que la corrélation 2D (où le mouchetis est très fin). De toute façon, les résultats de corrélation 3D semblent en bon accord avec les résultats 2D (qui ont été validés par les jauges de déformation).

Une fois que les données d'entrée sont générées (maillage de la microstructure, où les conditions limites imposées sont issues de la corrélation d'images, plus les champs de déplacement correspondants au domaine élastique), la boucle est initialisée. Cette boucle consiste à minimiser une fonction moindres carrés du type $f = |\epsilon_{DIC} - \epsilon_{FEA}|^2$ où l'algorithme d'optimisation à chaque itération est celui proposé par Levenberg-Marquardt[12]. La simulation EF est réalisée avec le logiciel Abaqus. En fin, les résultats en sortie correspondent aux modules élastiques des deux composants (E_{NumG2} et $E_{NumMatrice}$).

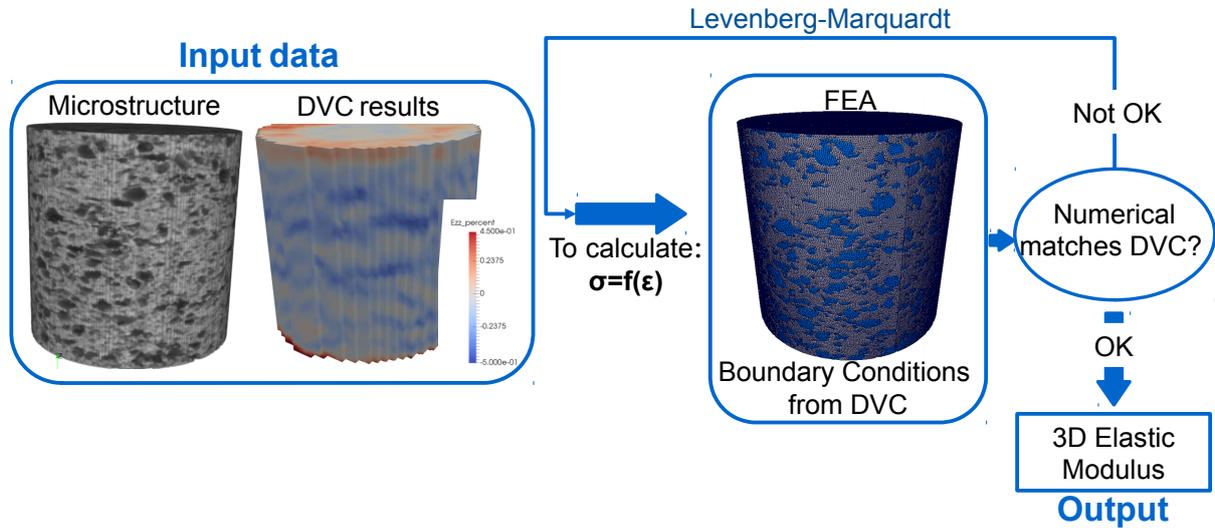


FIGURE 3 – Schéma descriptif de la méthode de recalage inverse des Éléments Finis (version 3D) proposée dans cette étude.

4 Résultats

4.1 Compression 2D

4.1.1 Matériau de friction

Ces essais ont permis de déterminer la valeur de la limite élastique ($\sigma_{YS} = 10$ MPa) et du module Young ($E_{Expmacro} = 5500$ MPa). En plus, la corrélation d'images montre que la déformation est très hétérogène (voir Fig. 4b), avec des bandes de déformation (en rouge) qui se forment à plusieurs endroits au long de la surface. Si on compare les résultats de corrélation avec la microstructure (Fig. 4a-c), on constate que le Graphite 2 est le responsable de cette localisation de la déformation.

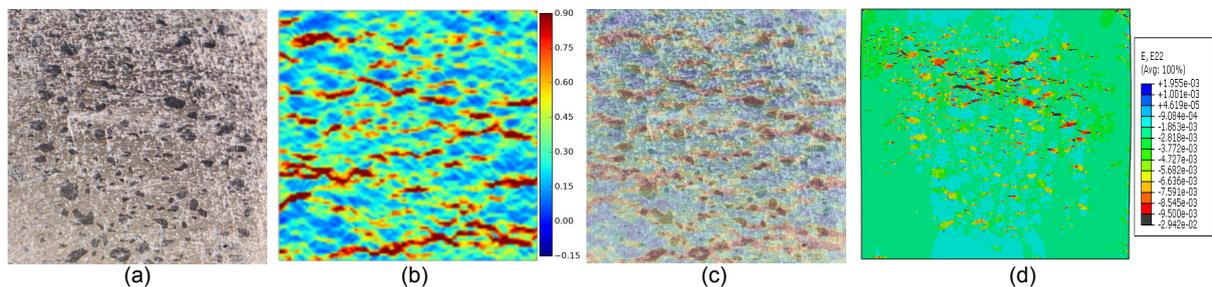


FIGURE 4 – (a) Image de l'état initial de la microstructure avant l'application du mouchetis. (b) Champs de déformation dans la direction de chargement (ϵ_{yy}). Ce résultat est obtenu par corrélation d'images 2D et à la décharge de 15 MPa. (c) Superposition des deux images précédentes. (d) Résultats ϵ_{yy} de la simulation EF réalisée avec les modules obtenus par méthode inverse.

En ce qui concerne la méthode de recalage inverse, les valeurs obtenues sont $E_{NumG2} = 2000$ MPa et $E_{NumMatrice} = 10000$ MPa. La simulation EF effectuée avec les modules précédents est capable de reproduire l'effet de localisation de la déformation dans les particules de Graphite 2 (Fig. 4d). Par contre,

cette simulation n'est pas capable de reproduire la liaison entre les différentes particules de Graphite 2, c'est à dire, les bandes de déformation. Ces valeurs numériques seront par la suite confrontées aux résultats expérimentaux obtenus avec les matériaux dissociés à fin d'évaluer leur exactitude.

4.1.2 Graphite 2

Comme indiqué auparavant, il a fallu produire trois types d'échantillons pour déterminer le module du Graphite 2 (E_{ExpG2}). Ce point nécessite de plusieurs étapes où la méthode de recalage inverse est aussi utilisée. D'abord, les matériaux ont été imagés par tomographie rayons X (voir Fig. 5) pour produire un maillage volumique et pouvoir appliquer la méthode de recalage inverse. En suite, des essais de compression (avec la machine INSTRON-5500) ont été réalisés et, à l'aide de la corrélation d'images 2D, les modules macroscopiques de ces trois matériaux ont été déterminés. Le module de la résine est 6570 MPa, 6470 MPa pour le G2-20% et 2140 MPa pour le G2-80%.

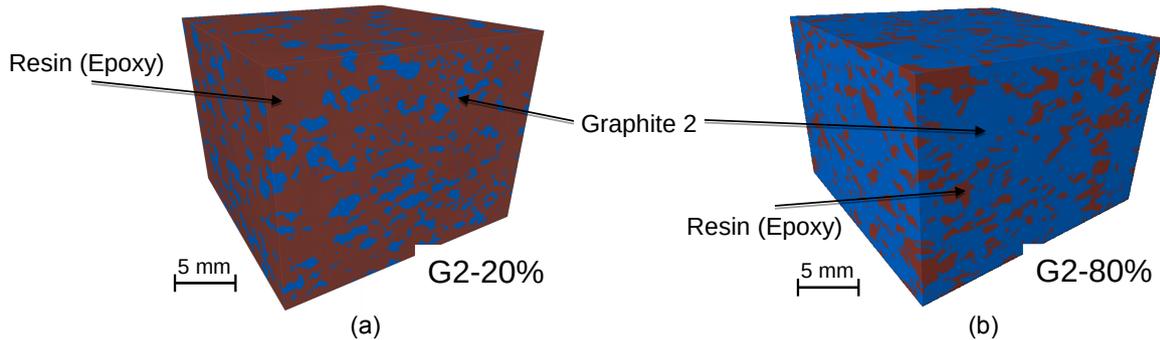


FIGURE 5 – (a) Rendu 3D de l'échantillon G2-20% après segmentation des images tomographiques. (b) Rendu 3D de l'échantillon G2-80%.

La méthode de recalage inverse est appliquée aux modèles maillés des échantillons G2-20% et G2-80%, avec la différence que maintenant il y a un seul inconnu : le module du Graphite 2. Les résultats de cette démarche sont $E_{NumG2(G2-80\%)} = 1900$ MPa et $E_{NumG2(G2-20\%)} = 2400$ MPa, en bon accord avec $E_{NumG2} = 2000$ MPa.

4.1.3 Matrice

En manque d'un échantillon constitué de tous les composants sauf le Graphite 2 (il est envisagé de produire et tester ce matériau) pour déterminer le module de la matrice ($E_{ExpMatrice}$), une démarche numérique a été adoptée. Cette démarche consiste à imager par tomographie rayons X (la taille de voxel est $22.7 \mu\text{m}$) un échantillon de $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ à l'état initial (0 MPa). Un maillage volumique de la microstructure est en suite généré dans l'objectif de simuler une compression où les modules de la Matrice et du Graphite 2 sont respectivement $E_{NumG2} = 2000$ MPa et $E_{NumMatrice} = 10000$ MPa. Il en résulte que le déplacement U de la partie supérieure de l'échantillon est 0,05 mm, ce qui donne un module macro $E_{Nummacro} = 8500$ MPa, loin de la valeur expérimentale ($E_{Expmacro} = 5500$ MPa). Comme la valeur $E_{NumG2} = 2000$ MPa est considérée représentative du module E_{ExpG2} (voir section 4.1.2), il est en déduit que les résultats 2D ne sont pas suffisants pour reproduire le comportement de la Matrice. Des analyses 3D deviennent nécessaires.

4.2 Compression 3D

La compression *in situ* dans le tomographe a été uniquement réalisée pour le matériau de friction. L'étape de chargement a été effectuée à 10 MPa pour rester dans le domaine élastique. Les résultats issus de la corrélation volumique ainsi que le maillage de la microstructure (Fig. 3) sont en train d'être exploités. Il est prévu que ces résultats numériques seront plus exacts, concrètement celui de la Matrice. En effet, les résultats de la simulation EF sur le cube $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ ($E_{Nummacro} = 8500$ MPa) indiquent que la valeur du module $E_{Matrice}$ doit être plus faible pour être capables de reproduire le comportement macro ($E_{Expmacro} = 5500$ MPa).

5 Conclusions

Une méthode de recalage inverse pour identifier les propriétés au niveau de la microstructure a été introduite. Cette méthode (dans sa version 2D) est capable de déterminer le module élastique du Graphite 2. Néanmoins, le module obtenu pour le composant *Matrice* n'est pas exacte. Des calculs des modules 3D pour ces deux composant sont en cours. Il est attendu que la version 3D de la méthode de recalage inverse sera capable de reproduire avec plus d'exactitude le module de la *Matrice*.

Finalement, il est envisagé d'étendre cette étude à l'échelle micro du matériau de friction à fin d'étudier son comportement au niveau des composants métalliques ; sans oublier que l'objectif ultime est d'étudier l'évolution des propriétés des composants pour différentes sollicitations de freinage.

Références

- [1] P. Blau. *Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives*, Oak Ridge National Lab., TN (US), 2001.
- [2] California Department of Toxic Substances Control. <https://www.dtsc.ca.gov/SCP/BrakePadTimeline.cfm>.
- [3] K.T. Kavanagh et R.W. Clough. *Finite element applications in the characterization of elastic solids*, International Journal of Solids and Structures, vol. 7, pages 11-23, 1971.
- [4] D. Lecompte, A. Smits, H. Sol, J. Vantomme et D. Van Hemelrijck. *Mixed numerical-experimental technique for orthotropic parameter identification using biaxial tensile test on cruciform specimens*, International Journal of Solids and Structures, vol. 44, pages 1643-1656, 2007.
- [5] J-F. Witz, S. Roux et F. Hild. *Mechanical properties of crimped mineral wools : Identification from digital image correlation*, Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 130, pages 1-7, 2008.
- [6] K. Genovèse, L. Lamberti et Pappalettere C. *Mechanical characterization of hyperelastic materials with fringe projection and optimization techniques*, Optics and Lasers in Engineering, vol. 44, no. 5, pages 423-442, 2006.
- [7] A. Khalfallah. *Identification des lois de comportement élastoplastiques par essais inhomogènes et simulations numérique*. Thèse de Doctorat, Université Tunis El Manar, Tunisie, 2004.
- [8] Plateforme d'imagerie par rayons X ISIS4D. <http://isis4d.univ-lille1.fr/wordpress/>.
- [9] YaDICs Software, Université de Lille. <http://yadics.univ-lille1.fr/wordpress/>.
- [10] OOF : Finite Element Analysis of Microstructures. NIST US Department of Commerce. <http://www.ctcms.nist.gov/oof/>.
- [11] AVIZO 3D, FE.. <http://www.fei.com/software/avizo3d/>.
- [12] D. Marquardt. *An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters*, SIAM J. Appl. Math., pp. 11, 431-441, 1963.