



**HAL**  
open science

**Identification de lois d'endommagement anisotrope à  
partir de la corrélation d'images numériques =  
Identification of anisotropic damage laws using digital  
image correlation**

Jean-Noël Périé, Hugo Leclerc, Stéphane Roux, François Hild

► **To cite this version:**

Jean-Noël Périé, Hugo Leclerc, Stéphane Roux, François Hild. Identification de lois d'endommagement anisotrope à partir de la corrélation d'images numériques = Identification of anisotropic damage laws using digital image correlation. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 8 p. hal-00385791

**HAL Id: hal-00385791**

**<https://hal.science/hal-00385791>**

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.

# Identification de lois d'endommagement anisotrope à partir de la corrélation d'images numériques

## *Identification of anisotropic damage laws using digital image correlation*

Jean-Noël Périé<sup>1,2</sup>, Hugo Leclerc<sup>1</sup>, Stéphane Roux<sup>1</sup> et François Hild<sup>1</sup>

1 : LMT-Cachan (Laboratoire de Mécanique et Technologie)  
ENS de Cachan/CNRS/UPMC/PRES UniverSud Paris  
61 avenue du Président Wilson, F-94235 Cachan CEDEX, France  
Courriel : {jean-noel.perie, hugo.leclerc, stephane.roux, francois.hild}@lmt.ens-cachan.fr

2 : Université de Toulouse; INSA, UPS, Mines Albi, ISAE; ICA (Institut Clément Ader)  
133 avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse, France  
Courriel : jean-noel.perie@iut-tlse3.fr

### Résumé

L'objectif est de présenter une démarche d'identification de loi d'endommagement anisotrope s'appuyant sur des images prises au cours d'un essai mécanique (non conventionnel). L'exemple d'un essai biaxial sur une éprouvette plate cruciforme en composite C/C stratifié et aiguilleté est proposé. La loi d'endommagement à identifier prend en compte la diminution progressive du module de cisaillement. La méthode d'identification proposée ici repose sur la mise en œuvre successive de deux méthodes inverses cohérentes. Une technique de corrélation d'images numériques globale, reposant sur des fonctions de forme des éléments finis, est dans un premier temps retenue pour mesurer un champ de déplacement à différents niveaux de chargement. Une déclinaison par éléments finis de la méthode de l'écart à l'équilibre est ensuite utilisée pour déterminer les paramètres d'une loi d'endommagement à partir des champs cinématiques mesurés. Les cartes d'endommagement obtenues sont similaires à celles post-traitées à partir de paramètres identifiés de manière classique. Le champ de déplacement reconstruit est très proche de celui mesuré.

### Abstract

The aim of this paper is to present a way to identify anisotropic damage laws by using images taken during non conventional mechanical tests. The example of a biaxial test performed on a cruciform specimen made of a needle-punched C/C laminate is considered. The chosen damage law accounts for shear softening. The proposed identification technique is based on two consistent inverse methods. A global digital image correlation technique based on finite element shape functions is first used to extract the in-plane displacement fields from pictures taken at various stages of the experiment. A finite element version of the equilibrium gap method is then used to retrieve the parameters of a damage law from these data. The identified damage maps are similar to those post-processed using classically identified parameters. The reconstructed displacement field is very close to the measured one.

**Mots Clés :** Corrélation d'images numériques, Identification, Endommagement anisotrope, Méthode de l'écart à l'équilibre

**Keywords:** Digital image correlation, Identification, Anisotropic damage, Equilibrium gap method

## 1. Introduction

Les effets des mécanismes de dégradation intervenant dans les matériaux composites sont fréquemment modélisés à l'aide de la mécanique de l'endommagement dans le cadre de la thermodynamique des milieux continus [1]. Les variables d'endommagement introduites représentent des chutes relatives de module. Pour les matériaux stratifiés, différentes variables peuvent être introduites à l'échelle des constituants élémentaires (microscopique [2]), ou à l'échelle du pli (mésoscopique [3-5]) pour rendre compte de l'anisotropie des effets de la dégradation. Le comportement de l'empilement (macroscopique) résulte alors de l'application d'une théorie des stratifiés généralisée. L'identification des nombreux paramètres relatifs aux lois d'évolution requiert généralement la réalisation d'un nombre conséquent d'essais de traction sur diverses séquences d'empilement. Malheureusement, dans le cas

particulier des matériaux thermostrostructuraux tels que les composites C/C, un tel échantillonnage n'est pas toujours possible. La validation de tels modèles vis-à-vis des données expérimentales n'est en outre pas évidente, en particulier du fait des difficultés liées à leur instrumentation et à la réalisation de trajets de chargement discriminants.

Les mesures de champs de déplacements constituent une base solide pour apprécier la loi de comportement du matériau, la valider et permettre son utilisation ultérieure dans des simulations numériques, e.g. par éléments finis (EF). Les développements récents de ces techniques [6] ouvrent la voie à des méthodes inverses pratiques et robustes basées sur l'exploitation de la richesse des champs cinématiques obtenus lors d'essais non homogènes [7]. L'hétérogénéité peut résulter de la géométrie du spécimen, de chargements non proportionnels et multiaxiaux, ou encore de phénomènes de localisation. La voie de l'identification de paramètres de modèles s'appuyant directement sur les images paraît dorénavant possible. On peut également imaginer utiliser ces méthodes pour évaluer l'apport de chaque raffinement introduit.

L'utilisation de mesures de champs pour identifier une loi d'endommagement a déjà été proposée par le passé. Claire *et al.* [8] utilisent par exemple la méthode de l'écart à l'équilibre (MEQ) pour identifier une loi d'endommagement isotrope d'un matériau composite SMC [9]. Dans ce cas, le lien entre l'endommagement et une déformation équivalente est obtenu par interpolation des données contrastes/déformations équivalentes collectées à divers stades du chargement. Cette approche a récemment été déclinée en différences finies dans le cas de l'endommagement anisotrope [10] (et a en particulier permis de traiter l'essai biaxial discuté par la suite). Différentes cartes de contrastes de rigidité sont obtenues. En exploitant certaines de ces cartes de rigidité, on parvient à identifier un lien entre l'endommagement de cisaillement et une déformation équivalente sous la forme d'une loi puissance. Une approche alternative basée sur la méthode des champs virtuels (MCV) a été proposée par Chalal *et al.* [11]. Un composite unidirectionnel est chargé en cisaillement. Une hypothèse de dépendance quadratique de l'endommagement de cisaillement (seul endommagement pris en compte) vis-à-vis de la déformation de cisaillement permet alors une résolution directe.

Si de nombreuses approches sont envisageables, les champs obtenus à partir de logiciels de corrélation numériques ne sont généralement pas discrétisés sur une base EF et imposent une étape de projection (introduisant souvent des biais) avant d'être comparés à des calculs. L'approche qui suit (*Digital Image Mechanical Identification* ou DIMI [12]) permet d'identifier une loi d'endommagement à partir d'images de façon cohérente tout en autorisant une indépendance des discrétisations. Basée sur un nouveau schéma de corrélation d'images numériques s'appuyant sur une description EF du champ de déplacement (CIN-Q4 [13]) et sur une déclinaison EF de la méthode de l'écart à l'équilibre reconditionnée [12], l'approche est étendue à un cas d'endommagement anisotrope.

La première partie décrit la procédure d'identification. Les deux étapes permettant d'aller des images à l'identification des paramètres de la loi d'endommagement anisotrope sont brièvement décrites. Les bases de la technique de corrélation CIN-Q4 visant à mesurer un champ de déplacement EF à partir des images sont dans un premier temps rappelées. La manière dont l'approche DIMI est adaptée dans le cas de l'endommagement anisotrope considérée est ensuite proposée. La troisième partie présente des résultats obtenus lorsque l'approche proposée est appliquée à un essai biaxial sur un matériau composite [14]. La surface de l'éprouvette cruciforme prélevée dans un matériau stratifié [ $\pm 45^\circ$ ] et aiguilleté est soumise à un essai de cisaillement. Une partie des images saisies au cours de l'essai, correspondant aux décharges, sont traitées afin d'identifier la loi d'endommagement considérée.

## 2. Démarche d'identification DIMI

### 1.1 De l'image au champ de déplacement : CIN-Q4

Considérons deux images codées en niveaux de gris  $f$  et  $g$  ( $f$  représentant l'image de référence, et  $g$  celle de l'état déformé) saisies à deux instants distincts de l'essai. Les techniques de corrélation d'images numériques reposent classiquement sur la recherche du maximum de corrélation entre imagerie prélevées dans les deux images [15, 6]. A la différence de ces approches *locales*, l'approche *globale* utilisée par la suite consiste à déterminer le flot optique en faisant l'hypothèse de conservation de la luminance [13]. On suppose par la suite que la texture de l'image est passivement advectée par le champ de déplacements recherché  $u$ . Le problème consiste donc à identifier le meilleur champ de déplacement  $u$  permettant de minimiser la fonctionnelle  $\Phi$  des résidus de corrélation

$$\Phi(u) = \int_{\Omega} [g(x) - f(x + u(x))]^2 dx \quad (1)$$

La minimisation de  $\Phi$  est intrinsèquement non linéaire et constitue un problème mal posé. Pour ces raisons, une formulation faible est préférée en adoptant un schéma de discrétisation général

$$u(x) = \sum_n a_n \psi_n(x) = [\psi(x)]\{u\} \quad (2)$$

où les  $\psi_n$  sont les fonctions de forme, et les  $a_n$  leurs degrés de liberté associés. Dans un formalisme matrice-vecteur,  $[\psi]$  est une matrice ligne qui contient les valeurs des fonctions de forme  $\psi_n$  et  $\{u\}$  le vecteur colonne des degrés de liberté  $a_n$ . Si l'amplitude des déplacements est suffisamment petite, une forme linéarisée de la fonctionnelle  $\Phi$  peut avantageusement être utilisée

$$\Phi_{lin}(u) = \int_{\Omega} [f(x) + [\psi(x)]\{u\} \cdot \nabla f(x) - g(x)]^2 dx \quad (3)$$

Une stratégie multirésolution permet de contourner les limitations induites par cette dernière hypothèse. A ce niveau de généralité, on peut choisir de décomposer le champ de déplacements  $u(x)$  sur une base plus ou moins « riche ». On peut par exemple choisir des fonctions de forme classiques utilisées dans les calculs par éléments finis. Dans ce qui suit, des fonctions de formes bilinéaires associées à des éléments quadrilatéraux à 4 nœuds (or Q4P1) [8] sont retenues, d'où le nom de CIN-Q4. La minimisation du résidu global  $\Phi$  conduit finalement à résoudre un ensemble de systèmes linéaires  $[M]\{a\} = \{b\}$ , où  $\{a\}$  est le vecteur des déplacements nodaux inconnus.  $[M]$  et  $\{b\}$  sont respectivement une matrice et un vecteur second membre déterminés à partir des images et des fonctions de formes.

## 1.2 Du champ de déplacement à la loi d'endommagement : MEQ reconditionnée

### 1.2.1 Matériau et comportement

Le matériau étudié est un composite carbone/carbone (C/C) aiguilleté [14]. Ce type de matériau est fabriqué en deux étapes principales. Dans un premier temps, des plis de satins sont superposés pour former un stratifié  $[0; 90]_n$ , puis l'ensemble est aiguilleté afin de lier les couches entre elles (fibres transférées dans la direction normale aux plis). Dans un second temps, la préforme tridimensionnelle ainsi obtenue est densifiée par un procédé d'infiltration chimique sous phase vapeur. Le matériau, une fois consolidé, présente un comportement macroscopique anisotrope [14]. Il se révèle particulièrement non linéaire lorsque le matériau est soumis à du cisaillement.

Le modèle utilisé ici pour décrire le comportement du matériau découle d'une approche développée à l'échelle mésoscopique (du pli) pour des matériaux stratifiés [4]. On se place toutefois à l'échelle macroscopique, *i.e.*, l'échelle du stratifié aiguilleté. On suppose que les mécanismes de dégradation sont essentiellement guidés par les fibres (et peu par la direction du chargement [2, 4-5]). Le matériau est supposé initialement homogène. Les indices (1; 2) se réfèrent au système de coordonnées du stratifié (*i.e.*, repère lié au matériau) qui coïncide dans le cas présent avec la direction des fibres. L'angle entre ce repère et celui de l'observateur ( $x; y$ ) (*i.e.*, repère caméra) est noté  $\theta$  (voir figure 1a). Avec les notations introduites,  $E_1$  et  $E_2$  représentent les modules d'Young initiaux (dans la direction des fibres),  $G_{12}$  le module de cisaillement initial, et  $\nu_{12}$  l'un des coefficients de Poisson. Par la suite, seule la variable d'endommagement  $d_{12}$  est considérée. Elle décrit une dégradation progressive du module de cisaillement qui apparaît bien avant la rupture des fibres. Le cadre de la thermodynamique des milieux continus est utilisé [1]. La densité d'énergie libre de Gibbs  $\psi$  du composite peut alors s'écrire

$$\psi = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_{11}^2}{E_1} - 2 \frac{\nu_{12}}{E_1} \sigma_{11} \sigma_{22} + \frac{\sigma_{22}^2}{E_2} + \frac{\sigma_{12}^2}{G_{12}(1-d_{12})} \right) \quad (4)$$

On dérive les lois d'état à partir du potentiel  $\psi$ . Par exemple, la force thermodynamique  $Y_{12}$  associée à la variable d'endommagement  $d_{12}$  s'exprime par

$$Y_{12} = \frac{\partial \Psi}{\partial d_{12}} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{12}^2}{G_{12}(1-d_{12})} = 2G_{12}\varepsilon_{12}^2 \quad (5)$$

Cette force  $Y_{12}$  dépend d'une déformation (indirectement mesurée) et d'un paramètre élastique. Dans ce qui suit, l'évolution de  $d_{12}$  sera supposée exclusivement pilotée par sa force thermodynamique associée  $Y_{12}$ . Notons que lorsque trois variables d'endommagement sont introduites (*e.g.* pour prendre en compte la rupture dans le sens des fibres), d'autres expressions de la force pilotant l'endommagement  $d_{12}$  ont été proposées, *e.g.* par Hochard *et al.* [17]. Pour des raisons de simplicité, les notations abrégées  $d = d_{12}$  et  $Y = Y_{12}$  sont utilisées dans la suite. Il est maintenant possible de définir une déformation équivalente

$\varepsilon_{eq} = \sqrt{Y/2G_{12}}$  qui pilote l'endommagement. Elle peut être évaluée à partir des mesures réalisées dans le repère global  $(x, y)$

$$\varepsilon_{eq} = |\varepsilon_{12}| = \left| \frac{1}{2}(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx})\sin 2\theta + \varepsilon_{xy}\cos 2\theta \right| \quad (6)$$

Enfin, le problème revient à rechercher les paramètres d'une loi d'endommagement liant la variable d'endommagement  $d$  et le maximum de la déformation équivalente  $\varepsilon_{eq}$  sur le temps écoulé.

### 1.2.1 Ecriture de la Méthode de l'Ecart à l'Équilibre reconditionnée

On présente ci-après les principaux ingrédients permettant de décliner la méthode de l'écart à l'équilibre sous une forme EF dans le contexte d'un endommagement anisotrope particulier [16]. La MEQ consiste en pratique à minimiser les résidus d'efforts nodaux associés aux contrastes de propriétés élastiques entre éléments voisins [12]

$$[\mathbf{K}(\{d\})]\{u_{mes}\} - \{f_{vol}\} = \{f_{res}\} \quad (7)$$

où  $\{f_{vol}\}$  représente les forces nodales liées au chargement extérieur et  $\{f_{res}\}$  le vecteur des résidus d'efforts nodaux associés au champ de déplacement mesuré  $\{u_{mes}\}$ . Contrairement aux problèmes EF classiques, le but est ici de déterminer le champ d'endommagement  $\{d\}$  à partir des champs de déplacements connus  $\{u_{mes}\}$  (*i.e.*, mesurés) et du vecteur des efforts nodaux  $\{f_{vol}\}$  (supposés s'annuler lorsque seuls les nœuds intérieurs sont considérés sans force de volume). Des éléments Q4 sont utilisés afin d'être cohérent avec les mesures. La variable d'endommagement  $d$  est supposée constante dans chaque élément. Du fait de l'anisotropie de l'endommagement, la matrice de rigidité élémentaire  $[k^{el}]$  n'est pas simplement linéaire en  $d$  (comme dans le cas de l'endommagement isotrope [12]), mais affine. On peut décomposer la matrice élémentaire sous la forme

$$k_{ij}^{el} = M_{ij}^0 + M_{ij}^1(1-d) = k_{ij}^0 - k_{ij}^1 d \quad (8)$$

où  $[k^0]$  et  $[k^1]$  sont des matrices qui dépendent des paramètres élastiques initiaux (*i.e.*, de l'élément non endommagé). La contribution correspondante de l'élément  $e$  à la force nodale au niveau du nœud interne  $j$  est décrite par  $L_{je}^n = \sum_i k_{ije}^n u_i$  ( $n = 0$  ou  $1$ ). Le problème revient finalement à minimiser la norme quadratique  $R$  de « l'écart à l'équilibre » pour les nœuds internes  $i$

$$R = \sum_i \left( \sum_e (L_{ie}^0 + L_{ie}^1 d_e) \right)^2 \quad (9)$$

La solution de ce problème fournit une carte de contraste de module de cisaillement pour chaque niveau de chargement [8]. Pour régulariser le problème, plutôt que de travailler *a posteriori* à partir de cartes de contrastes [9], on considère dès le départ que ces cartes découlent de la *même* loi d'endommagement  $d=H(\varepsilon_{eq}, C_k)$ . On adopte la décomposition  $H$  de la loi d'endommagement

$$d = \sum_k C_k \varphi_k(\hat{\varepsilon}_{eq}) \text{ où } C_k > 0 \quad \forall k, \text{ et avec} \\ \varphi_k(\hat{\varepsilon}_{eq}) = 1 - \exp\left(-\frac{\hat{\varepsilon}_{eq}}{\varepsilon_k}\right) \text{ et } \hat{\varepsilon}_{eq} = \max_{0 < \tau < t}(\varepsilon_{eq}(\tau)) \quad (10)$$

La fonction objectif  $R$  dépend alors de manière quadratique des coefficients  $C_k$  qui définissent la loi d'endommagement pour le jeu de déformations caractéristiques  $\varepsilon_k$  choisi. Le système obtenu à partir de la minimisation de  $R$  n'est pas bien conditionné. Les matrices  $[k]$  correspondent en effet, dans le schéma de discrétisation adopté, à des opérateurs différentiels du second ordre qui agissent sur le champ de déplacement. Or le champ de déplacement expérimental est nécessairement sujet au bruit. De fait, la formulation du problème proposée peut souffrir d'une importante sensibilité à ce bruit, en particulier pour de faibles longueurs d'onde. Pour renforcer la robustesse [12], on introduit l'opérateur  $S$  (homogène à une souplesse) de telle sorte que  $[S]\{L\} = \{u_{mes}\}$ , où  $[S]\{L\}$  est la solution (en déplacement) d'un problème



élastique pour lequel le solide est supposé non endommagé, et où  $\{L\}$  représente des forces volumiques (nodales). La fonction objectif  $\tilde{R}$  correspondant à une écriture de l'écart à l'équilibre « reconditionné » est finalement adoptée

$$\begin{aligned} \tilde{R}(C_k) &= \sum_i \left( \sum_j S_{ij} \sum_e (L_{je}^0 + L_{je}^1 (1 - \sum_k C_k \varphi_k(\hat{\varepsilon}_{eq}^e))) \right)^2 \\ &= \sum_i \left( u_i^{mes} - \sum_k C_k \sum_j S_{ij} \sum_e L_{ie}^1 \varphi_k(\hat{\varepsilon}_{eq}^e) \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

On notera que la minimisation est réalisée sous la contrainte que  $C_k > 0$  pour tout  $k$ . On peut donc écrire la fonction objectif  $\tilde{R}$  sous la forme

$$\tilde{R}(C_k) = \sum_i \left( u_i^{mes} - \sum_k C_k w_k(\hat{\varepsilon}_{eq}) \right)^2 \quad (12)$$

Reste à trouver les paramètres  $C_k$  qui permettent de minimiser cette fonctionnelle. Une caractéristique remarquable de cette procédure, destinée à identifier la loi d'évolution de l'endommagement (non linéaire), est qu'elle conduit finalement à la résolution d'un petit nombre de problèmes linéaires. Ce résultat est dû en particulier à la forme spécifique de la loi d'endommagement retenue (10) et au choix de la norme (9).

### 3. Application à un essai biaxial sur un composite C/C

La configuration retenue, suite à des simulations numériques [14], consiste en un essai biaxial de cisaillement réalisé sur une éprouvette plane cruciforme. Le spécimen, considéré comme un stratifié  $[\pm 45^\circ]$ , est soumis respectivement à de la traction suivant l'axe  $y$  et de la compression suivant l'axe  $x$  (figure 1a). Cette sollicitation conduit à des niveaux d'endommagement importants dans la partie centrale de l'éprouvette. De nouvelles simulations non linéaires de cet essai ont été utilisées pour vérifier cette fois l'implémentation de la méthode d'identification proposée à partir d'une loi de comportement connue (figure 1b [16]). Un état de contrainte plane est considéré. L'éprouvette toute entière est maillée (figure 1b). La partie centrale représentant la région d'intérêt (ROI) est maillée à l'aide d'éléments Q4. Les bras et les régions entourant la ROI sont maillés à l'aide d'éléments T3. Les champs de déplacements obtenus à l'issue d'un calcul par éléments finis ont été utilisés comme données d'entrée de la méthode d'identification proposée. L'ensemble de ces analyses a démontré la stabilité et la robustesse de l'approche.

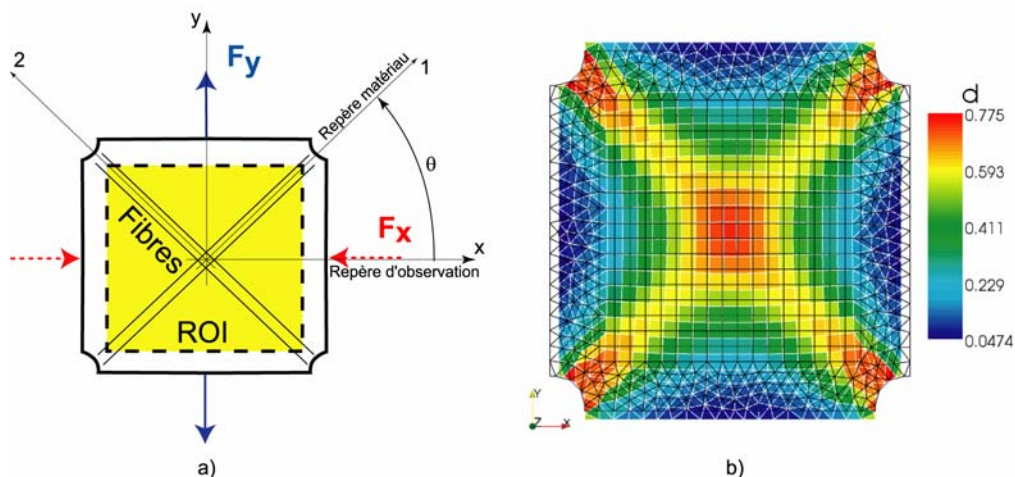


Figure 1. a) Principe d'un essai de cisaillement sur une éprouvette cruciforme  $[\pm 45^\circ]$ .  
b) Carte d'endommagement simulé.

L'essai a été conduit sur la machine multiaxiale ASTRÉE. Des talons collés sur les bras (100 mm de large) permettent le transfert des efforts à la partie utile à l'aide des mors (figure 2a). Du fait de l'épaisseur du spécimen (10 mm), on suppose que l'hypothèse des contraintes planes est valide. Onze cycles de décharge / charge sont réalisés. Le détail du trajet de chargement ainsi que du montage expérimental peut être trouvé dans [14]. Des images de la surface (1016 × 1008 pixels, codées sur 8 bits) sont acquises à plusieurs stades du chargement (figure 2b), et analysée en utilisant l'algorithme de CIN-Q4. La taille des

éléments est fixée à 32 pixels (3 mm). Les champs de déplacements obtenus sont ensuite utilisés pour identifier les paramètres de la loi d'endommagement. L'utilisation de la première image comme référence conduit à des champs de déplacements consécutifs non seulement aux mécanismes d'endommagement mais également aux effets inélastiques. Pour découpler ces effets, comme lors de procédures d'identification classiques (basées sur des essais de traction), on utilise les différentes décharges réalisées. Onze cycles charge / décharge sont exploités (figure 2b). Les effets hystériques sont négligés et la déformation est supposée élastique (on fige l'état d'endommagement). La première photo est prise juste avant la décharge tandis que la seconde l'est une fois l'éprouvette déchargée (en termes de résultante normale sur chacun des bras).

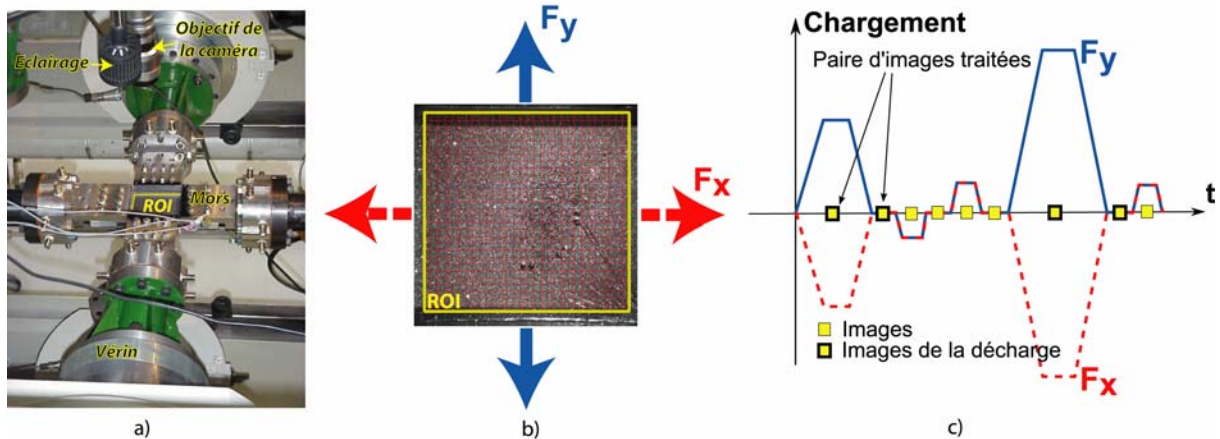


Figure 2. a) Détail du montage expérimental dans ASTRÉE  
b) Sollicitations et ROI c) Histoire de chargement et moment des prises de vues.

Les champs de déplacements utilisés en entrée de la MEQ correspondent à la différence entre les champs de déplacements associés à ces deux images. Les paramètres élastiques sont quant à eux identifiés à partir d'essais de traction. La figure 3a présente la carte d'endommagement correspondant à la loi identifiée pour le dernier niveau de chargement.

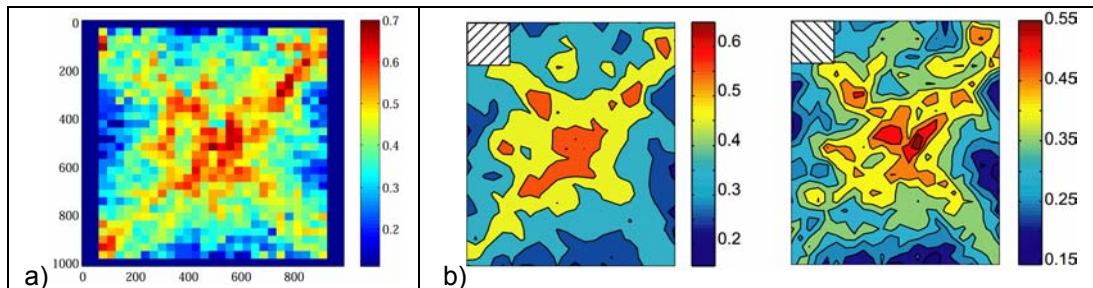


Fig. 3. Cartes d'endommagement de cisaillement a) identifiée au dernier stade du chargement à l'aide de la procédure présentée. b) Post-traitements à partir d'un modèle identifié classiquement (dans les plis [14]).

Le champ d'endommagement peut également être calculé dans la ROI à l'aide d'un post-processeur d'endommagement [14]. Les paramètres non linéaires sont alors identifiés à partir d'une procédure classique basée sur des essais de traction. Les plis tissés sont alors modélisés comme un stratifié  $[0, 90]$  constitué de plis unidirectionnels. On reporte en figure 3b la carte d'endommagement de cisaillement pour les deux types de plis. On observe un excellent accord entre ces cartes d'endommagement post-traitées et celles obtenues à l'aide de la méthode d'identification proposée (figure 3a).

Il est intéressant de souligner que cette approche permet d'identifier une loi d'endommagement avec des niveaux d'endommagement (figure 3) supérieurs à ceux observés lors d'essais classiques de traction [14] (typiquement inférieurs à 0.5). La figure 4 montre par ailleurs une comparaison entre les champs de déplacements mesuré et recalculé (à partir du champ d'endommagement identifié) au dernier stade de chargement. Le résidu d'identification défini par l'écart type de la différence entre champs divisé par l'écart type du champ mesuré est alors de 5%.

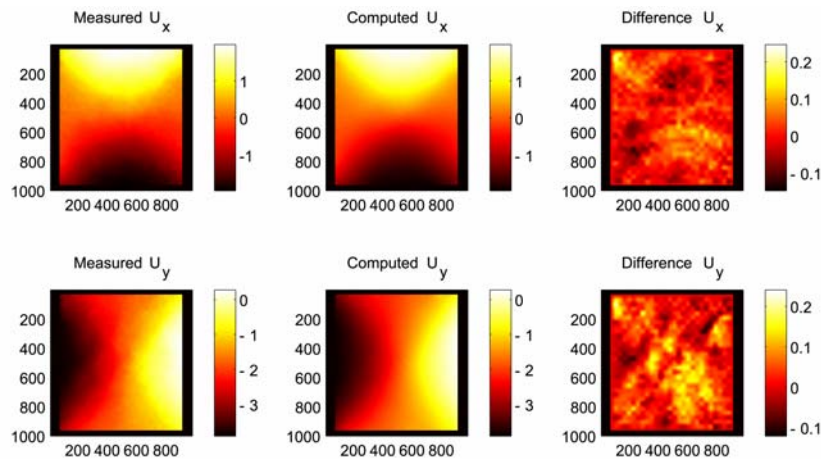


Fig. 4. Comparaison entre champs de déplacements mesuré et reconstruit (exprimé en pixel) et différences associées pour le dernier niveau de chargement.

#### 4. Conclusion

Une démarche d'identification de lois d'endommagement anisotrope s'appuyant sur la simple donnée d'images saisies pendant un essai mécanique est présentée. L'approche proposée repose sur le développement de deux méthodes inverses permettant de former une chaîne cohérente : une technique de corrélation d'images numériques globale basée sur une description par élément finis du champ de déplacement, et une formulation reconditionnée de la méthode d'écart à l'équilibre. La première technique permet de mesurer un champ de déplacements EF à divers stades du chargement. La seconde consiste à résoudre un problème non standard pour lequel les inconnues sont les paramètres décrivant la loi d'endommagement, tandis que les données sont les déplacements nodaux précédemment mesurés. La procédure est appliquée à un essai de cisaillement réalisé sur un matériau composite C/C stratifié et aiguilleté. La carte d'endommagement de cisaillement identifiée est similaire à celle obtenue à l'aide de post-traitements au moyen d'une loi d'endommagement identifiée de manière conventionnelle. Le champ de déplacement reconstruit permet de décrire 95% des fluctuations expérimentales observées.

Les travaux actuels visent à intégrer les couplages entre endommagement et inélasticité, ainsi qu'à étendre l'approche à des modèles plus complexes.

#### Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet VULCOMP soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche.

#### Références

- [1] P. Germain, Q. S. Nguyen, P. Suquet, « Continuum Thermodynamics ». *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 50, pp. 1010-1020, 1983.
- [2] A. Burr, F. Hild, F. Leckie, « Continuum Description of Damage in Ceramic-Matrix Composites ». *Eur. J. Mech. A/Solids*, Vol. 16, Num. 1, pp. 53-78, 1997.
- [3] P. Ladevèze, E. LeDantec, « Damage Modelling of the Elementary Ply for Laminated Composites ». *Comp. Sci. Tech.*, Vol. 43, pp. 257-267, 1992.
- [4] P. Ladevèze, « A damage computational approach for composites: Basic aspects and micromechanical relations ». *Comput. Mech.*, Vol. 17, Num 1-2, pp. 142-150, 1995.
- [5] J.-L. Chaboche, J.-F. Maire, « A new micromechanics based CDM model and its application to CMC's ». *Aerospace Sci. Tech.*, Vol. 6, Num. 2, pp. 131-145, 2002.
- [6] P.K. Rastogi (ed.), « Photomechanics ». *Springer*, Berlin, 2000.
- [7] S. Avril, M. Bonnet, A.-S. Bretelle, M. Grediac, F. Hild, P. Lenny, F. Latourte, D. Lemosse, S. Pagano, E. Pagnacco, F. Pierron, « Overview of identification methods of mechanical parameters based on full field measurements ». *Exp. Mech.*, Vol. 48, pp. 381-402, 2008.
- [8] D. Claire, F. Hild, S. Roux, « A finite element formulation to identify damage fields: The equilibrium gap method ». *Int. J. Num. Meth. Engng.*, Vol. 61, Num. 2, pp. 189-208, 2004.
- [9] D. Claire, F. Hild, S. Roux, « Identification of a Damage Law by Using Full-field Displacement Measurements », *Int. J. Damage Mech.*, Vol. 16, pp. 179-197, 2007.
- [10] L. Crouzeix, J.-N. Périé, F. Collombet, B. Douchin. « An orthotropic variant of the Equilibrium Gap Method applied to the analysis of a biaxial test on a composite material ». *Comp. Part A*, à paraître.



- [11] H. Chalal, F. Meraghni, F. Pierron, M. Grédiac, « Direct identification of the damage behaviour of composite materials using the virtual fields method ». *Comp. Part A*, Vol. 35, Num. 7-8, pp. 841-848, 2004.
- [12] S. Roux, F. Hild., « Digital Image Mechanical Identification (DIMI) ». *Exp. Mech.*, Vol. 48, Num. 4, pp. 495–508, 2008
- [13] G. Besnard, F. Hild, S. Roux, « Finite-element displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Châtelier bands ». *Exp. Mech.*, Vol. 46, pp. 789-803, 2006.
- [14] J.-N. Périé, S. Calloch, C. Cluzel, F. Hild, « Analysis of a Multiaxial Test on a C/C Composite by Using Digital Image Correlation and a Damage Model ». *Exp. Mech.*, Vol. 42, Num. 3, pp. 318-328, 2002.
- [15] M.A. Sutton, W.J. Wolters, W.H. Peters, W.F. Ranson, S.R. McNeill. « Determination of displacements using an improved digital correlation method ». *Im. Vis. Comput.*, Vol. 1, Num. 3, pp. 133–139, 1983.
- [16] J.-N. Périé, H. Leclerc, S. Roux, F. Hild, « Digital image correlation and biaxial test on composite material for anisotropic damage law identification ». *Int. J. of Solids and Struct.*, Vol. 46, pp. 2388-2396, 2009.
- [17] C. Hochard, N. Lahellec, C. Bordreuil, « A ply scale non-local fibre rupture criterion for CFRP woven ply laminated structures ». *Comp. Struct.*, Vol. 80, Num. 3, pp. 321-326, 2007.