



HAL
open science

Stratégies d'identification de paramètres constitutifs à partir de mesures par corrélation d'images multi-résolutions

Christoph David, Jean-Charles Passieux, Jean-Noel Périé, Laurent Robert

► To cite this version:

Christoph David, Jean-Charles Passieux, Jean-Noel Périé, Laurent Robert. Stratégies d'identification de paramètres constitutifs à partir de mesures par corrélation d'images multi-résolutions. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03440387

HAL Id: hal-03440387

<https://hal.science/hal-03440387>

Submitted on 22 Nov 2021

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.

Stratégies d'identification de paramètres constitutifs à partir de mesures par corrélation d'images multi-résolutions

C. DAVID, J.C. PASSIEUX, J.-N. PERIE, L. ROBERT

Université de Toulouse, Institut Clément Ader (ICA,)INSA, Mines Albi, UPS
135, avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse, France

Résumé :

Une approche multi-échelle est proposée pour identifier des paramètres constitutifs à partir de mesures par corrélation d'images numériques (CIN). Une stratégie d'identification combinant des images à différentes échelles est développée. La méthode est mise en œuvre sur un essai de plaque trouée.

Abstract :

A multiscale approach is proposed to identify constitutive parameters from digital image correlation (DIC). We introduce a strategy to combine images taken at different scales. The method is illustrated on an open-hole tensile test.

Mots clefs: identification, multi-échelle, corrélation d'image numérique, recalage par éléments finis, matériau composite

1 Introduction

Les méthodes d'identifications classiques [2] nécessitent souvent plusieurs essais pour caractériser les paramètres d'un modèle de comportement. De plus en plus, les techniques optiques de mesure de champs sont utilisées car elles fournissent un volume d'informations suffisamment riche pour permettre l'identification de plusieurs paramètres à partir d'un seul essai non conventionnel [1,8,16]. Les incertitudes sur les paramètres identifiés dépendent bien évidemment de la qualité des mesures cinématiques et donc, *in fine*, des sources d'incertitudes de la méthode de mesure de champs utilisée. Parmi les méthodes de mesure de champs, la corrélation d'images numériques (CIN), se distingue par sa facilité de mise en œuvre. Lorsque l'on utilise la CIN, les incertitudes sur le déplacement dépendent (1) de la méthode de CIN utilisée [10], mais également fortement (2) de la résolution spatiale [4,10].

(1) Les méthodes de corrélation d'images numériques se basent habituellement sur une approche locale où la description cinématique est recherchée sur les fenêtres de corrélation [4]. Dans cette étude, nous nous appuyons sur une technique de mesure globale par élément finis (CIN-EF) [5,6]. En effet, outre le fait qu'entre les simulations numériques et les mesures aucune projection de champ n'est nécessaire puisque le déplacement est discrétisé de la même manière, les approches CIN-EF réduisent les incertitudes de mesure car elles imposent la continuité du champ de déplacement recherché dans toute la région d'intérêt (RDI) [10].

(2) Les incertitudes dépendent fortement du nombre de pixels par élément (résolution spatiale). Cependant, si l'on souhaite identifier tous les paramètres du modèle, le champ cinématique ne suffit généralement pas, et l'on doit également prendre en compte des quantités statiques [16]. Pour ce faire, la région d'intérêt (RDI) doit inclure des frontières du domaine sur lequel on connaît, au moins en moyenne, les chargements extérieurs. La résolution des images et la taille de la RDI étant fixées, la résolution spatiale est donc un paramètre fortement contraint expérimentalement (grande structure, gradients importants, géométrie complexe,...). Dans ce cas il se peut que les incertitudes de mesures deviennent pénalisantes pour l'identification.

Dans ce travail, un protocole de mesure multi-échelle et une méthode d'identification adaptés sont développés pour limiter les effets de ces sources d'incertitudes.

Dans un premier temps, on se propose donc d'utiliser deux séries d'images de résolutions différentes pour mesurer des champs de déplacement par CIN-EF sur la surface de l'éprouvette. Une série d'images capture l'éprouvette complète (champ lointain: à l'échelle de la « structure »), tandis qu'une seconde zoome sur un détail structural (champ proche: par exemple dans une région où le champ de déplacement est particulièrement sensible aux paramètres à identifier). Le maillage EF de la simulation est utilisé pour les deux mesures CIN-EF. Une procédure permettant de recalcr automatiquement et précisément l'image en champ proche dans l'image en champ lointain permet ici de placer précisément ce maillage sur l'image en champ proche.

Dans un second temps, une méthode d'identification multi-échelle qui tire parti des deux mesures CIN-EF est décrite. Elle est basée sur la méthode de recalage de modèle élément finis (Finite Element Model Updating, FEMU) [3]. La mesure CIN-EF en champ lointain fournit des conditions aux limites de type Dirichlet expérimentales représentatives pour la simulation. La mesure CIN-EF en champ proche permet quant à elle de disposer d'un champ cinématique mesuré mieux résolu pour la comparaison essais/calculs dans une région où les paramètres du modèle s'expriment tout particulièrement.

Cet article est structuré de la manière suivante. La première partie revient sur le principe de la procédure d'identification retenue. La seconde partie propose une application à un essai de traction réalisé sur une plaque trouée en composite stratifié verre/époxy.

2 Identification multi-échelle

La technique FEMU est une méthode d'identification intuitive, polyvalente et bien établie [1]. Elle consiste à mettre à jour les paramètres constitutifs dans un modèle EF dans le but de réduire l'écart entre des quantités mesurées et simulées. Les différentes approches de la FEMU se distinguent par le choix de l'algorithme d'optimisation et de la fonction coût [1,7,8]. Par exemple, les auteurs de [8,9] comparent en particulier les champs de déformation. Par opposition, la procédure proposée ici s'appuie plutôt sur une comparaison directe des champs de déplacement, ce qui évite d'amplifier le bruit de mesure par dérivation. Cela implique toutefois d'imposer des conditions aux limites cinématiques. La détermination des modules d'Young nécessite en outre la minimisation de l'écart entre les résultantes des efforts mesurés et simulés. Une fonction coût mixte sera donc construite. Par la suite, nous décrivons rapidement le principe d'une méthode FEMU mono-échelle basée sur les seules mesures à l'échelle de la structure (champ lointain) avant de proposer une approche multi-échelle.

Identification mono-échelle

On s'intéresse ici à des stratifiés supposés symétriques et orthotropes pour lesquels l'hypothèse d'un problème 2D en contraintes planes est pertinente. On traite donc un problème plaque et la géométrie est maillée en 2D avec des éléments quadratiques. En outre, on s'intéresse à un chargement dans le plan de l'éprouvette. Les grandeurs cinématiques mesurées en surface et celles présentes au niveau du plan médian sont donc assimilables. Comme indiqué précédemment, la procédure FEMU retenue exploite les mesures de champs de déplacements. Or le champ de déplacements simulé est particulièrement sensible aux conditions limites appliquées. Les déplacements mesurés aux bords de la RDI sont par conséquent appliquées directement comme déplacements imposés au bord pour la simulation EF.

Dans un premier temps, la procédure de recalage peut être menée à partir des seules mesures cinématiques réalisée à l'échelle « structure » [8,9]. La mesure du déplacement par CIN-EF exploite alors le même maillage que celui utilisé pour réaliser la simulation. Ce dernier est ajusté sur l'image de référence (l'image de l'objet non chargé ou sous chargement initial). Au final on cherche à minimiser la quantité suivante :

$$\underline{R}_{\text{monoéchelle}} = \begin{pmatrix} e_u \\ e_F \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$e_u = \frac{\underline{u}_{\text{mesure}}^{\text{loin}} - \underline{u}_{\text{simu}}}{\max(\underline{u}_{\text{mesure}}^{\text{loin}})} \quad (2)$$

$$e_F = \frac{F_{\text{mesure}} - F_{\text{simu}}}{F_{\text{mesure}}} \quad (3)$$

où \underline{R} représente le résidu entre la mesure et la simulation, $\underline{u}_{\text{mesure}}^{\text{loin}}$ le champ de déplacements mesuré par CIN-EF [6] et $\underline{u}_{\text{simu}}$ le champ de déplacement simulé par un calcul EF. L'effort mesuré F_{mesure} est comparé à la résultante des efforts de réaction F_{simu} du calcul EF.

La qualité de l'identification de certains paramètres va en particulier dépendre de la qualité de la détermination des gradients de déplacements dans certaines régions. Pour capturer de tels gradients, un maillage fin serait le bienvenu. Toutefois, pour la CIN, si la taille des éléments diminue (i.e., le nombre de pixel par élément diminue), les incertitudes de mesure augmentent. Les incertitudes de mesure conduisent donc inévitablement à des incertitudes d'identification [15]. Pour éviter ce dilemme, nous proposons ci-dessous une approche multi-échelle.

Identification multi-échelle

On se propose maintenant d'exploiter les mesures réalisées en champ proche. Comme indiqué précédemment, des images fortement résolues de détails structuraux sont alors disponibles. Se faisant, on parvient, à taille physique d'élément donnée, à augmenter le nombre d'informations présentes dans chaque élément. Pour obtenir des mesures cohérentes, le maillage doit toutefois être placé précisément au même endroit sur les images en champ proche.

Le problème de recalage du maillage peut se ramener à identifier la transformation entre les images saisies aux deux échelles. Pour cela une méthode automatisée de recalage d'image basée sur la CIN a été développée. Cette méthode itérative, basée sous l'hypothèse de petits déplacements (après initialisation grossière au pixel), propose une interpolation du déplacement décomposée sur les quatre modes suivant : deux modes représentent la translation dans le plan, un mode représente la rotation linéarisée et le dernier mode représente le facteur d'agrandissement.

Une fois le maillage correctement recalé sur l'image en champ proche, la mesure CIN-EF champ proche permet de disposer d'un champ cinématique mesuré $\underline{u}_{mesure}^{proche}$ mieux résolu dans une région où les paramètres du modèle s'expriment particulièrement. Dans la méthode FEMU multi-échelle développée ci-après, on cherche maintenant à minimiser l'écart entre ces déplacements nodaux mesurés et les déplacements simulés \underline{u}_{simu} en zone proche seulement. Toutefois, du fait du manque de connaissance des grandeurs statiques agissant sur le détail structural, on conserve la comparaison entre l'effort mesuré et la résultante des réactions correspondantes aux déplacements $\underline{u}_{mesure}^{loin}$ imposés sur les bords du modèle EF. En pratique, on utilise donc la fonction coût suivante :

$$\underline{R}_{multi\acute{e}chelle} = \begin{pmatrix} \tilde{\underline{e}}_u \\ e_F \end{pmatrix} \quad (4) \quad \tilde{\underline{e}}_u = \frac{\underline{u}_{mesure}^{proche} - \underline{u}_{simu}}{\max(\underline{u}_{mesure}^{proche})} \quad (5)$$

3 Application à un essai sur plaque trouée

La méthode d'identification multi-échelles proposée est appliquée à un essai réel. Un essai de traction est réalisé sur une éprouvette de matériau composite stratifié en verre/époxy [17] percée. Ce type d'essai hétérogène associé à des mesures de champs cinématiques permet d'identifier les quatre paramètres élastiques plan (E_T, E_L, ν_{TL}, G_T) à partir d'une seule expérience [8,9]. L'éprouvette est fabriquée à partir de quatre plis de satin de 8 stratifiés à 0° ($[0^\circ]_4$). Sa géométrie est rectangulaire (150 mm x 30 mm x 1.26mm) avec un trou centré ($\varnothing 10$ mm).

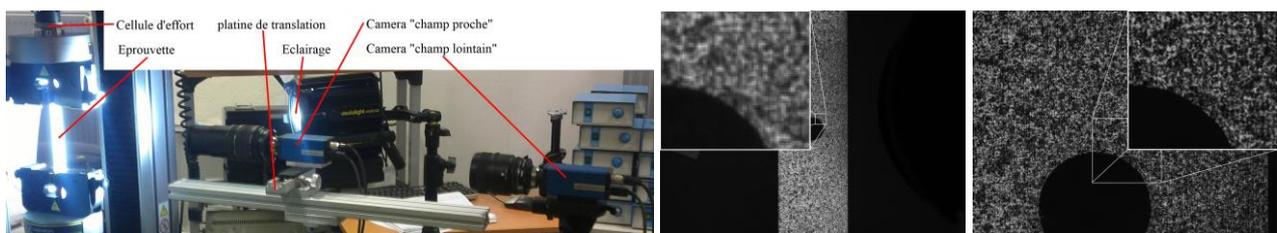


Fig. 1 Gauche: montage de l'essai multi-échelle avec platine de translation ; Centre/Droite : images prises à différentes échelles. Une région particulière de l'éprouvette est montrée pour illustrer les deux résolutions différentes obtenues par les caméras.

Deux caméras CCD (AVT Dolphin F-154B, 1392 x 1040 pixels, 8 bits) ont été utilisées pour observer l'éprouvette pendant l'essai. Une caméra observe l'ensemble de l'éprouvette à l'échelle lointaine. Une seconde cible une zone d'intérêt. Dans cette étude, cette zone d'intérêt se trouve au bord du trou. Le ratio entre les deux échelles est d'environ de 1:5. Les caméras sont orientées perpendiculairement à l'éprouvette. Pour ne pas interférer, la caméra proche est montée sur une platine de translation (voir Fig. 1). L'éprouvette est chargée par paliers successifs d'environ 0,5kN. A chaque niveau de chargement, une photo à chacune des échelles est prise. La mesure CIN-EF, la simulation EF et l'identification sont programmés dans l'environnement MatLab[®]. L'optimisation utilise l'algorithme Levenberg-Marquardt avec la fonction « lsqnonlin ».

Incertitudes de mesure:

Afin d'évaluer les incertitudes de mesure (dues au bruit d'image) et caractérisant un minorant des erreurs du champ de déplacement mesuré par la CIN, les images en champ lointain et en champ proche sont bruitées avec un bruit gaussien de moyenne nulle et d'écart-type de 1 niveau de gris. La CIN-EF mesure le champ de déplacement entre l'image de référence et l'image bruitée qui est a priori nul. Figure 2, l'évolution de l'écart-type des déplacements nodaux pour chaque échelle est tracée par rapport à la taille des éléments en. Les points représentent la moyenne sur les 20 tirages. On retrouve le compromis classique incertitude / résolution spatiale quel que soit les échelles. Entre les deux échelles on constate une réduction des erreurs aléatoires de l'ordre de grandeur du rapport de grandissement (1:5), ce qui justifie l'utilisation des mesures à l'échelle en champ proche pour minimiser les erreurs d'identification.

Analyse a priori de l'incertitude sur les paramètres identifiés :

Dans cette section, on étudie la « précision » avec laquelle les paramètres sont identifiés à l'aide d'image de synthèse. Pour cela, une image est construite, à chaque échelle, à partir du transport de l'image de référence par un champ de déplacement simulé provenant du résultat d'un calcul EF de plaque orthotrope en considérant un jeu de paramètres de référence. La procédure multi-échelle est ensuite appliquée avec les images de références et les images synthétiques ainsi construites. Elle est comparée à une approche FEMU mono-échelle en champs lointain. Une estimation initiale des paramètres est prise avec une erreur de 5 à 20% par rapport à la référence. L'écart des paramètres p identifiés par rapport à la référence est quantifié par l'erreur relative définie par $e(p) = \frac{\|p_{ref} - p_{opt}\|}{\|p_{ref}\|}$, mono-échelle donne : $e(p) = 2.08 \times 10^{-3}$ et celle multi-échelle : $e(p) = 3.15 \times 10^{-4}$.

De plus, l'effet du bruit sur l'algorithme d'identification est analysé afin de comparer la robustesse des méthodes d'identification mono-échelle et multi-échelle. Pour ce faire, un bruit gaussien de moyenne nulle et d'écart type variant de 1 à 16 niveaux de gris est ajouté aux images synthétiques proches et lointaines. Pour chaque niveau de bruit, l'identification mono-échelle et multi-échelle est réalisée pour 20 tirages aléatoires de bruit différents afin de représenter statistiquement l'évolution de l'erreur $e(p)$ en fonction du bruit. La figure 3 illustre la « précision » de l'identification par rapport au bruit en niveaux de gris ; les points représentent la moyenne sur les 20 tirages. On constate que la procédure multi-échelle proposée ici permet de réduire la sensibilité au bruit d'un ordre de grandeur par rapport à l'identification mono-échelle (rapport de résolution entre images proches et lointaines de 1:5).

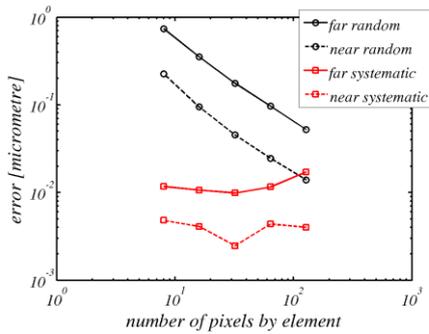


Fig. 2 Erreur aléatoire et systématique en champs proche et champs lointain par rapport à la taille d'éléments en pixel.

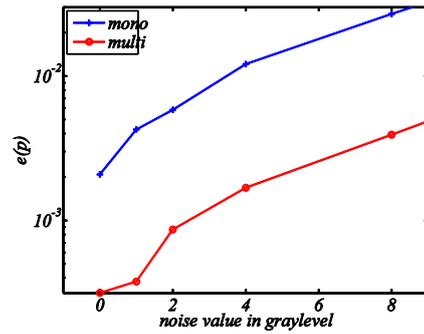


Fig. 3 Erreur sur les paramètres identifiés en fonction du niveau de bruit : comparaison en mono-échelle et multi-échelle.

Application à un cas réel :

L'essai de traction présenté plus haut est analysé avec la méthode proposée. On dispose de 10 images tous les 0.5 kN environ tant en champ proche qu'en champ lointain. L'algorithme est initialisé par les valeurs des paramètres p_0 obtenus avec les méthodes d'identification classiques : $E_t = 21.53$ GPa, $E_r = 20.59$ GPa, $\nu_{tr} = 0.15$ et $G_{tr} = 3.54$ GPa [17]. L'évolution des paramètres identifiés « classiques » au cours des 9 pas de chargements est tracée sur la figure 4.

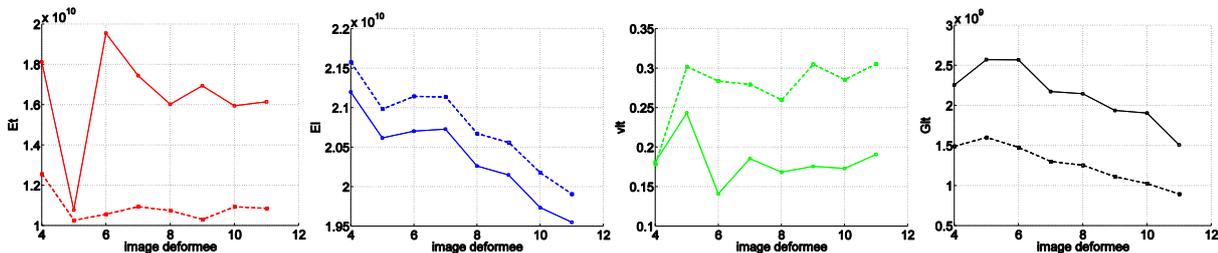


Fig. 4. Paramètres identifiés à partir de différents niveaux de chargements. De gauche à droite : E_t ; E_r ; ν_t ; G_{tr} , en trait plein, FEMU, mono-échelle, et en trait discontinu FEMU multi-échelle.

Les paramètres évoluent très tôt dans l'essai, ce qui fait que le domaine élastique est difficile à déterminer. Pour étayer cette hypothèse, le résidu en déplacement (écart entre champ mesuré et champ optimisé) est affiché sur la Figure 5 pour les chargements de 2 et 5kN. On constate un résidu quasi homogène pour le premier niveau de chargement ce qui laisse à penser que le modèle élastique orthotrope représente bien le comportement de l'éprouvette à cet instant de l'essai. En revanche, des résidus plus importants et localisés près du trou suggèrent qu'au deuxième niveau de chargement de la figure 5, au moins localement, le modèle élastique linéaire n'est plus convenable. Ceci pourrait sans doute être interprété par l'apparition d'endommagement tel qu'on le constate dans la littérature.



Fig. 5 Cartes de résidus des déplacements verticaux pour différents chargements. A gauche : déplacement en champ lointain, à droite en champ proche.

4 Conclusions et perspectives

Dans ce travail nous avons proposé une méthode d'identification de paramètres constitutifs basée sur une méthode de recalage de modèle EF utilisant des mesures de champs par CIN-EF. Les résultats montrent que les incertitudes peuvent être diminuées en combinant un protocole expérimental multi-résolution à une méthode d'identification multi-échelle. Une identification à partir d'une mesure en champ proche est donc plus robuste au bruit, et donc plus fiable si la position de cette zone en champ proche se situe là où le champ de déplacement est sensible aux paramètres constitutifs. La méthode a été illustrée sur un essai réel, et montre la difficulté que peut représenter l'identification des paramètres élastique d'une éprouvette composite tant la structure semble s'endommager rapidement. Les perspectives de ce travail sont nombreuses. D'une part, d'autres types de fonctions coût, et même d'autres types d'algorithmes d'identification [15,16] pourront être comparés. Une extension à la stéréo-corrélation et au couplage 2.5D-3D [16] représente également un grand intérêt pour les structures plus complexes. Enfin, on pourra également envisager d'identifier des modèles de comportement multi-échelle, dont le modèle à l'échelle du détail structural prendrait en compte l'endommagement.

References

- [1] Avril, S., Bonnet, M., Bretelle, A. Grediac, M. Hild, F. P. Jeny, Latourte F., Lemosse D., Pagano S., Pagnacco E. and others, Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements, *Experimental Mechanics*, 48- 4, 381-402, 2008.
- [2] ASTM. D3039-00, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, 15-3, 2000.
- [3] Kavanagh, K. T. and Clough, R. W. Finite element applications in the characterization of elastic solids, *International Journal of Solids and Structures*, Bd. 7-1, 11-23, 1971.
- [4] Sutton M., Wolters W., Peters W., Ranson W. and McNeill S., Determination of displacement using an improved digital correlation method, *Image and Vision Computing*, 1, 113-139, 1983.
- [5] Sun Y., Pang J., Wong C.K. and Su F., Finite element formulation for a digital image correlation method, *Applied optics*, 44-34, 2005.
- [6] Besnard G., Hild F. and Roux S., "Finite-Element" Displacement Fields Analysis from Digital Images: Application to Portevin–Le Châtelier Bands, *Experimental Mechanics*, 46, 789-803, 2006.
- [7] Robert L., Velay V., Decultot N., Ramde S., Identification of hardening parameters using finite element models and full-field measurements: some case studies, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 47(1), 3-17, 2012.
- [8] Molimard J., Riche R. L., Vautrin A. and Lee J., Identification of the four orthotropic plate stiffnesses using a single open-hole tensile test, *Experimental Mechanics*, 45, 404-411, 2005.
- [9] Lecompte D., Elastic and elasto-plastic material parameter identification by inverse modeling of static tests using digital image correlation, *Vrije Universiteit Brussel*, PhD thesis, 2007.
- [10] Hild F. and Roux S., Comparison of local and global approaches to digital image correlation, *Experimental Mechanics*, 52(9), 1503-1519, 2012.
- [11] Bornert M., Brémand F., Doumalin P., Dupré J., Fazzini M., Grédiac M., Hild F., Mistou S., Molimard J., Orteu J.-J. and others, Assessment of digital image correlation measurement errors: methodology and results, *Experimental mechanics*, 49-3 (2009) 353-370.
- [15] Leclerc H., Périé J.-N., Roux S. and Hild F., Integrated Digital Image Correlation for the identification of Mechanical Properties. *Lec. Notes Comput. Science*. 5496, 161-171, 2009.
- [16] Réthoré J., Muhibullah, Elguedj T., Coret M., Chaudet P., Combescure A., Robust identification of elasto-plastic constitutive law parameters from digital images using 3D kinematics. *International Journal of Solids and Structures*, 50, 73-85, 2013.
- [17] Bizeul M., Contribution à l'étude de la propagation de coupure en fatigue dans les revêtements composites tissés minces, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2009.