



HAL
open science

Mesure de champs de déformations par stéréocorrélation - Comparaison entre des mesures par jauges, par corrélation d'images et des résultats de simulations numériques

J.P. Chambard, S. Jaminion, M. Tazeroualti, C. Bosquet, F. Hild, S. Leclercq

► To cite this version:

J.P. Chambard, S. Jaminion, M. Tazeroualti, C. Bosquet, F. Hild, et al.. Mesure de champs de déformations par stéréocorrélation - Comparaison entre des mesures par jauges, par corrélation d'images et des résultats de simulations numériques. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.142. hal-00598118

HAL Id: hal-00598118

<https://hal.science/hal-00598118>

Submitted on 4 Jun 2011

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.

Mesure de champs de déformations par stéréocorrélation – Comparaison entre des mesures par jauges, par corrélation d'images et des résultats de simulations numériques.

Strain field measurement by digital stereocorrelation ~ Comparison between strain gauges, optical measurements and numerical simulations.

J.P. Chambard¹, S. Jaminion¹, M. Tazeroualti¹, C. Bosquet², F. Hild³, S. Leclercq⁴

1 : HOLO3
7 rue du Général Cassagnou – F-68300 SAINT-LOUIS
e-mail : jp.chambard@holo3.com, s.jaminion@holo3.com, m.tazeroualti@holo3.com

2 : EADS France
12 rue Pasteur – F-92152 SURESNES CEDEX
e-mail : catherine.bosquet@eads.net

3 : LMT Cachan
ENS de Cachan / CNRS / UPMC / PRES UniverSud Paris – F-94235 CACHAN CEDEX
e-mail : hild@lmt.ens-cachan.fr

4 : MESSIER DOWTY
ZA Louis Bréguet BP 10 – F-78140 VELIZY VILLACOUBLAY
e-mail : sylvain.leclercq@messier-dowty.com

Résumé

Dans le cadre du projet VULCOMP soutenu par l'ANR et dédié à la vulnérabilité des composites, le logiciel de stéréocorrélation CORRELI^{STC} [2] a été développé. Il permet la mesure des déplacements, calcule les déformations, mais donne aussi la possibilité de plusieurs post traitements tels que la création de jauges virtuelles, de profils. Une première évaluation du logiciel et du procédé qui le sous-tend a permis d'estimer les incertitudes sur les déplacements mesurés [3,4]. Au travers de nombreux essais aussi bien en mode quasi-statique qu'en mode dynamique, nous avons également évalué la qualité des résultats en termes de déformations.

La première partie de cette étude montrera une comparaison entre des mesures par jauges collées sur le matériau étudié, prises en référence, et des mesures par jauges virtuelles mises en place dans le logiciel de stéréocorrélation. L'influence de paramètres tels que la taille de la jauge virtuelle, son positionnement et son orientation seront abordés.

La deuxième partie de cette étude montrera les possibilités de comparaison directe entre les déformations issues de mesures par stéréocorrélation et les déformations théoriques calculées par des logiciels de calcul par éléments finis, ainsi que les perspectives d'applications qui peuvent en découler.

Abstract

In the VULCOMP project funded by ANR and dedicated to the vulnerability of composites, a stereocorrelation software called CORRELI^{STC} [2] was developed. It allows for the measurement of displacement, calculates in-plane strains but also gives the possibility of several post-treatments, such as the creation of virtual gauges, of profiles. A first evaluation of the software and process that underlies it has led to the estimate of uncertainties on the measured displacements [3,4]. Through extensive testing both in quasi-static and dynamic modes, we also assessed the quality of results in terms of strains.

The first part of this study shows a comparison between measurements by strain gauges bonded on the studied material, taken as a reference, and virtual gauge measurements implemented in the

stereocorrelation software. The influence of parameters such as size of the virtual gauge, its positioning and orientation will be discussed.

The second part of this study shows the potential for direct comparisons between strains from stereocorrelation measurements and calculated by finite element simulations, and the applications that can be envisioned.

Mots Clés : Corrélation d'images, stéréovision, incertitudes de mesure, champ de déplacements 3D, champ de déformations 2D

Keywords: Image correlation, stereovision, uncertainty, 3D displacement fields, 2D strain fields

1. Introduction

La corrélation d'images est de plus en plus utilisée pour le suivi d'essais mécaniques [1] car c'est une technique relativement simple d'utilisation et qui fournit une grande quantité d'informations permettant d'exploiter au mieux un essai. Sur la base de travaux initiaux du LMT de Cachan [5], et partant des besoins exprimés par EADS-IW France, le logiciel CORRELI^{STC} a été développé dans le cadre du projet VULCOMP.

Une première étude a été conduite afin d'estimer les incertitudes de mesure sur les déplacements, donnée principale d'un outil de corrélation [3,4]. Toutefois, de nombreux utilisateurs industriels souhaitent également obtenir des cartographies de déformations des objets étudiés. Ces données sont obtenues par des opérations de dérivation des champs de déplacements qui prennent également en compte la géométrie 3D de la surface. Il est donc très difficile d'estimer d'une façon générale une incertitude sur ces cartographies de déformations. C'est pourquoi nous avons privilégié une approche expérimentale pour évaluer, dans différentes configurations, la justesse des mesures de déformations à partir de données de stéréocorrélation, en prenant comme référence les grandeurs fournies par des jauges traditionnelles collées sur la surface des pièces étudiées.

D'autre part, une demande croissante apparaît pour réaliser de façon simplifiée le lien entre des données issues de l'expérimentation et des données issues de simulations numériques. Pour pouvoir être comparées, ces deux types de données doivent être exprimées de la même façon et dans le même référentiel. Une première approche de comparaison calcul / essai est présentée dans cet article.

2. Description de CORRELI^{STC}

2.1 Une approche par éléments finis de la corrélation d'images

Le champ de déplacement recherché s'écrit sous la forme d'une fonction continue $\underline{u}(\underline{x})$ qui peut se décomposer à l'aide de champs élémentaires $\underline{\psi}_i$ à l'échelle de l'élément (p.ex. polynômes de degré 1)

$$\underline{u}(\underline{x}) = \sum v_i \underline{\psi}_i(\underline{x}) \quad (\text{Eq. 1})$$

Le calcul du champ de déplacement revient à minimiser **globalement** le résidu de corrélation défini par

$$\Phi = \int [f(\underline{x}) - g(\underline{x} + \underline{u}(\underline{x}))]^2 d\underline{x} \quad (\text{Eq. 2})$$

Par rapport aux inconnues cinématiques v_i . Dans cette expression, $f(\underline{x})$ et $g(\underline{x})$ représentent l'intensité en chaque pixel \underline{x} respectivement de l'image de la configuration de référence et de

l'image dans la configuration déformée. On suppose dans cette approche que les variations d'intensité de l'image initiale à l'image finale ne dépendent que du champ de déplacement $\underline{u}(\underline{x})$.

A partir de cette écriture, on peut montrer que la minimisation se résume à la résolution d'un système linéaire où les inconnues sont les déplacements nodaux associés à la discrétisation adoptée [5]. L'intérêt de cette approche de type éléments finis est double :

1. on choisit le type de fonction qui représente le champ de déplacements à l'échelle de l'élément, et une continuité des déplacements est automatiquement satisfaite ;
2. les liens en import et export avec des résultats issus de calculs par éléments finis en sont facilités, voire directs si les maillages se correspondent.

2.2 Détermination du tenseur des déformations

Les trois termes plans du tenseur des déformations (écriture lagrangienne, hypothèse de petites déformations) s'obtiennent par dérivation du champ de vecteur déplacement exprimé dans le plan tangent local $\underline{u}_p(\underline{x})$

$$\underline{\underline{\varepsilon}}_p = \text{sym}(\underline{\nabla}_p \otimes \underline{u}_p) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\frac{\delta(dx')}{\delta x'} = A, \quad \frac{\delta(dx')}{\delta y'} = B \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\frac{\delta(dy')}{\delta x'} = E, \quad \frac{\delta(dy')}{\delta y'} = F \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\varepsilon_{x'x'} = A \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\varepsilon_{y'y'} = F \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\varepsilon_{x'y'} = \frac{1}{2}(B + E) \quad (\text{Eq. 8})$$

Il est donc nécessaire d'exprimer les vecteurs déplacement dans un référentiel local lié au plan tangent à la surface. Le plan tangent peut être celui d'un élément associé à son centre. Dans la pratique, on peut sélectionner un ensemble d'éléments voisins du point considéré, de façon à minimiser l'influence des incertitudes liées à la reconstruction 3D initiale. De la même façon le calcul de dérivée des déplacements peut être effectué en considérant non pas un seul élément mais également les éléments voisins.

2.3 La notion de jauge virtuelle

De façon à se rapprocher des us et coutumes des ingénieurs et chercheurs mécaniciens, nous avons créé la notion de jauge virtuelle. Une jauge virtuelle est définie par une orientation, une largeur et une longueur. Tout comme une jauge de déformation réelle, une jauge virtuelle donnera la déformation moyenne (dans la direction de la longueur) du matériau en fonction du temps, pour toute la séquence d'images acquises. S'agissant d'une jauge virtuelle, toutes les autres grandeurs définies sur sa surface peuvent aussi être fournies :

- les déplacements 3D moyens de la zone choisie ;
- l'allongement dans la direction perpendiculaire ;
- les trois termes du tenseur des déformations dans un repère global (comme dans le cas d'une rosette) ;
- les directions principales et les déformations principales.

Les valeurs fournies par la jauge correspondent à une moyenne des valeurs aux nœuds du maillage inclus dans la surface de celle-ci. Lorsque la jauge est plus petite qu'une maille les valeurs fournies sont obtenues par interpolation des valeurs aux nœuds voisins.

3. Un comparatif entre jauges de déformations réelles et virtuelles

3.1 Cas d'un essai de traction sur éprouvette en aluminium plane

Un test comparatif a été effectué sur une éprouvette en alliage d'aluminium d'épaisseur 2 mm soumise à un essai de traction simple (Fig. 1). La face arrière de l'éprouvette a été équipée de jauges de déformations, la face avant étant recouverte de mouchetis pour les mesures par corrélation. Dans le logiciel CORRELI^{STC}, des jauges virtuelles ont été mises en place, dont les positions et dimensions sont similaires à celles des jauges collées en face arrière, autorisant ainsi une comparaison directe des données mesurées.

Les paramètres généraux de ces essais étaient les suivants :

- champ visualisé de 1 m^2 imposé pour cette application, l'éprouvette faisant une dimension de 200mm x 80mm ;
- caméra 1600 x 1200 pixels élément de calcul de corrélation : 16 x 16 pixels ;
- taille de la jauge : 4 x 4 pixels (équivalent à la taille de la jauge collée).

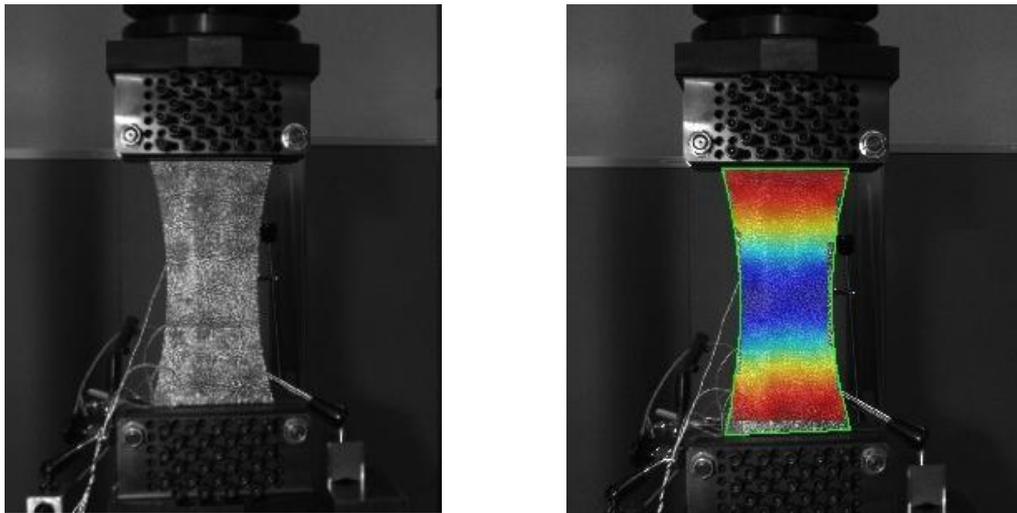


Fig. 1 : Eprouvette en alliage d'aluminium soumise à la traction et cartographie des déformations dans la direction du chargement.

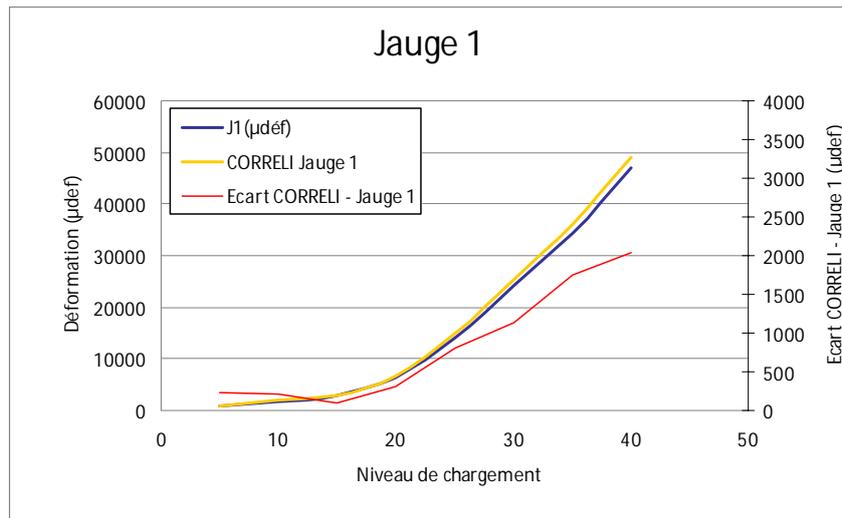


Fig. 2 : Comparaison des déformations obtenues sur jauges réelle (en bleu) et virtuelle (en jaune).

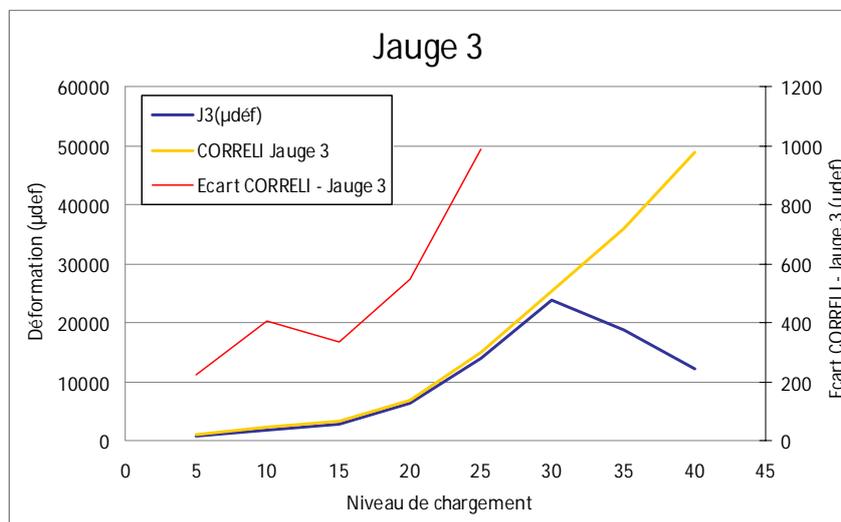


Fig. 3 : Comparaison des déformations obtenues sur jauges réelles (en bleu) et virtuelles (en jaune). On constate un décollement de la jauge 3 à partir de 25 000 μdef

Les valeurs fournies par les deux procédés (jauges réelles et virtuelles) sont tout à fait comparables, jusqu'à des niveaux de déformation importants. L'écart maximum enregistré (figure 2 et 3) de 2000 μdef est obtenu pour un niveau de déformation de 49 000 μdef , ce qui correspond à un écart de 4 %. Lors de ces essais, une des jauges (N°3) s'est décollée.

3.2 Cas d'un essai de traction sur éprouvette composite épaisse

La figure 4 montre un essai réalisé sur une éprouvette d'épaisseur 15 mm dans la partie centrale en matériau composite. L'enregistrement a été effectué au moyen d'un capteur de numérisation 3D (technique de lumière structurée), le capteur étant placé dans une position oblique par rapport à l'éprouvette de façon à analyser simultanément deux faces de l'échantillon.

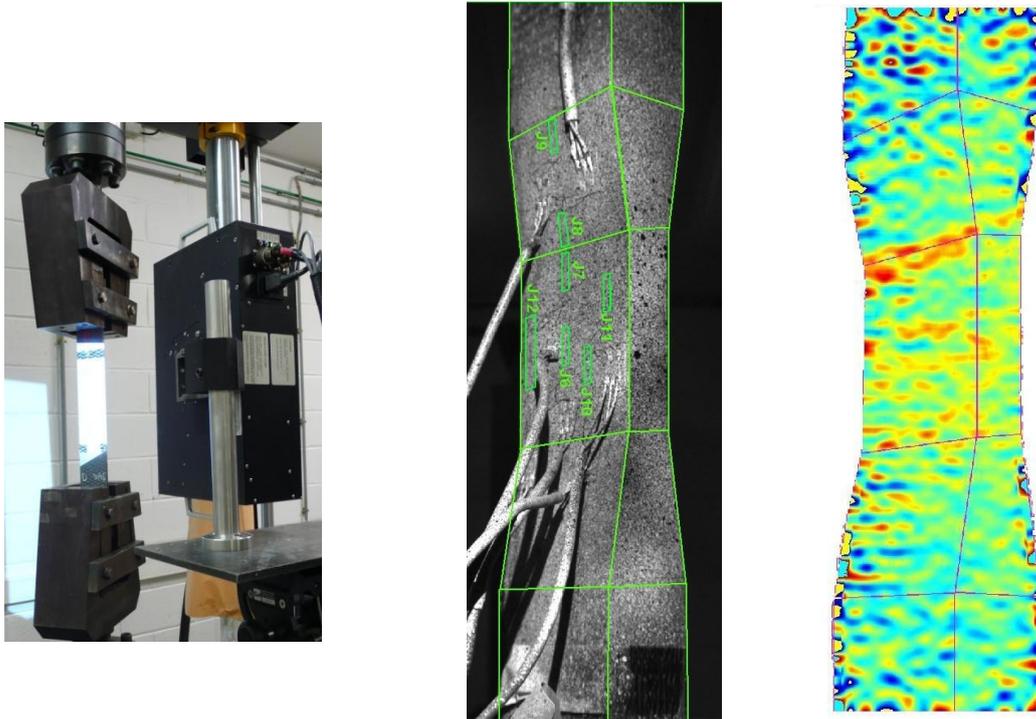


Fig. 4 : Essai de traction sur composite épais. L'image de gauche montre l'éprouvette ainsi que le système d'enregistrement (au premier plan). L'image de droite montre le positionnement des jauges virtuelles sur une des faces de l'éprouvette, ainsi que le champ de déformation obtenu.

Les comparaisons entre les données fournies par les jauges collées et les jauges virtuelles sont reportées dans le tableau 1 ci-dessous. On constate un écart maximum de 626 μdef . Les écarts parfois importants peuvent être expliqués par l'hétérogénéité du matériau et par la difficulté à positionner la jauge virtuelle par rapport à la jauge collée. C'est pourquoi nous avons étudié l'influence du positionnement de la jauge virtuelle (Tab. 2). Un écart de positionnement des jauges virtuelles de ± 1 mm engendre un écart maximum sur les valeurs de déformation de 180 μdef .

Jauges	1	2	5	12
Jauges collées (μdef)	1920	1920	2210	2380
Jauges virtuelles (μdef)	2066	2142	2240	2563
Ecart (μdef)	-146	-222	-30	-183

Jauges	6	7	10	11
Jauges collées (μdef)	2550	3120	2510	1960
Jauges virtuelles (μdef)	2450	2494	2290	2102
Ecart (μdef)	100	626	220	-142

Tab. 1: Différences mesurées entre les jauges mécaniques et les jauges virtuelles.

μdef	N° jauge	6	7	8	9	10	11	12
Position initiale	10 kN	-10	-10	-60	100	80	180	60
	200 kN	2300	2660	1830	1230	2310	2050	2570
+ 1 mm X	10 kN	0	-80	-40	120	130	140	80
	200 kN	2250	2660	1990	2020	229	2060	2580
+ 1 mm Y	10 kN	20	-10	-80	-80	100	160	60
	200 kN	2240	2720	1920	1140	2270	2070	2570

Tab. 2 : Influence du positionnement de la jauge virtuelle sur les valeurs de déformations obtenues.

3.3 Cas d'un élément de structure composite

Des essais de comparaison jauges réelles / virtuelles ont également été faits dans le cas d'une structure composite de train d'atterrissage. Cette structure tubulaire, munie de deux chapes est soumise à un essai de traction / compression comportant plusieurs cycles. Les déformations engendrées lors de ce test sont de faible niveau, restant toujours inférieures à 1000 μ def.

La figure 5 montre la pièce montée sur la machine d'essai ainsi que la zone analysée de cette pièce. Dans cette vue sont visibles les jauges virtuelles positionnées ainsi que trois cibles de repérage. Ces cibles permettent de définir le changement de référentiel entre celui de la mesure et celui de la pièce (qui peut être par exemple le référentiel CAO). Le logiciel CORRELI^{STC} permet ainsi d'exprimer les données mesurées et issues du traitement dans ce référentiel pièce.

Préalablement à l'essai, la structure a été équipée de jauges de déformations. Dans ce cas, le mouchetis a été réalisé après le collage des jauges et recouvre toute la pièce, y compris la surface des jauges collées. Les jauges virtuelles ont ensuite été définies (en position, orientation et taille) de façon à couvrir exactement les jauges collées. Les jauges virtuelles mesurent ainsi les déformations des jauges mécaniques.

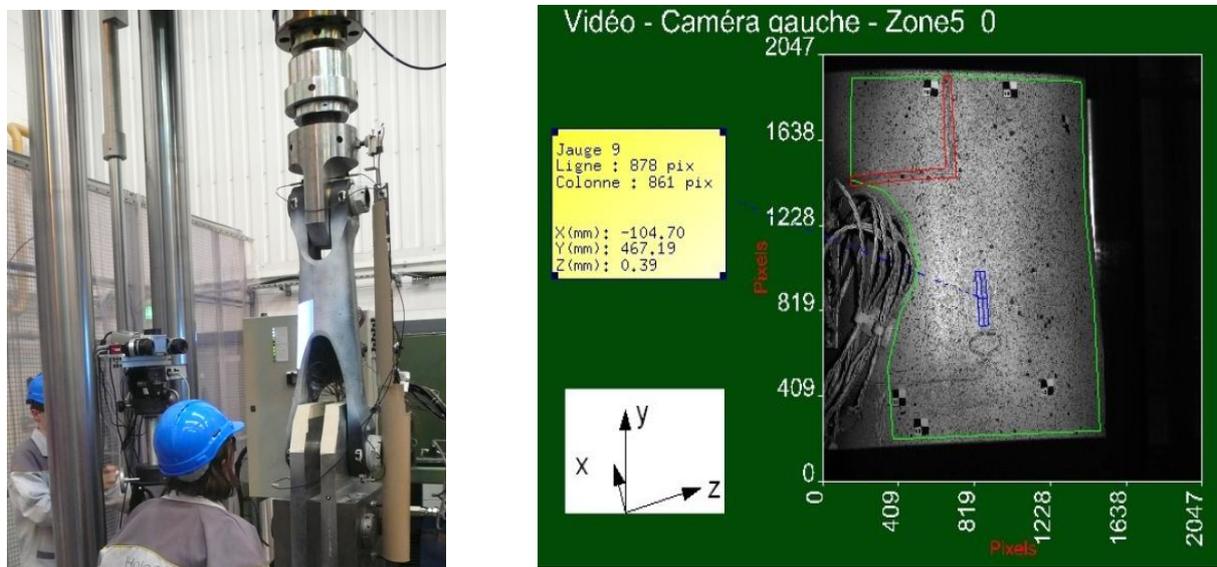


Fig. 5 : Elément de train d'atterrissage sur la machine d'essai et zone de mesure sélectionnée avec les jauges virtuelles positionnées

La figure 6 montre les profils de déformation obtenus pour une jauge réelle et une jauge virtuelle pour l'ensemble du cycle de sollicitation : petite compression – grande compression – petite compression – petite traction – grande traction – petite traction. Les données restent comparables, y compris pour ces faibles niveaux de déformation, l'écart maximal observé étant de 200 μ def. Lorsque l'on prend pour référence non pas l'état zéro du chargement mais la première petite traction, les profils sont quasiment superposés, le plus grand écart descendant à 50 μ def. Cela peut s'expliquer par la mise en position initiale de la pièce (rattrapage de différents jeux mécaniques) qui engendre des mouvements de corps rigide de type translation et rotation qui sont parfois importants au regard des déplacements induits par la déformation propre de la pièce.

Les paramètres généraux de ces essais étaient les suivants :

- champ visualisé de 200 x 200 mm, avec des caméras de 4 M. pixels ;
- élément de calcul : 30 x 30 pixels ;
- taille de la jauge : 20 x 200 pixels (équivalent à la taille de la jauge collée).

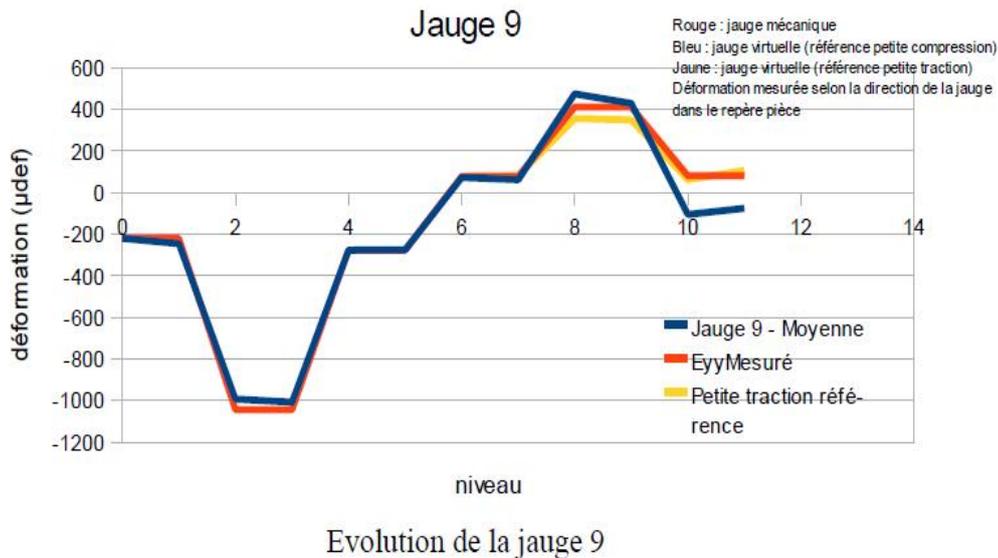


Fig. 6 : Déformations mesurées par la jauge collée et la jauge virtuelle

3.4 Influence des paramètres de définition de la jauge virtuelle

Les paramètres de définition de la jauge virtuelle sont de trois ordres :

- la surface (largeur x longueur) ;
- l'orientation ;
- la position.

La surface de la jauge est à placer en regard de la taille de l'élément fini du calcul de corrélation. Pour toute dimension de jauge inférieure ou égale à la dimension de la maille de calcul, la déformation obtenue sera directement issue du calcul de corrélation : en effet l'ordre 1 des fonctions élémentaires ψ_i (voir paragraphe 2.1) est une mesure de la déformation à l'échelle de l'élément. Toute dimension supérieure aura un effet de moyenne du bruit spatial de mesure des déplacements. La taille de la jauge est également à mettre en regard du matériau étudié. Les matériaux composites comportant un motif de fibres tissées pourront présenter localement de fortes variations de déformation liées à leur structure interne.

L'orientation de la jauge peut aussi avoir une influence, en particulier dans cette démarche de comparaison jauge collée / jauge virtuelle. Une rotation de 3 degrés de la jauge virtuelle dans le cas de l'essai de la pièce de train d'atterrissage engendre un écart de déformation maximale de 21 μdef . Enfin le positionnement de la jauge virtuelle par rapport à la jauge collée a été effectué manuellement lors de ces essais. La précision de ce positionnement induit des écarts de 180 μdef (voir Tab. 2) qui peuvent être interprétés comme étant un reflet de l'hétérogénéité du matériau ou simplement du bruit spatial des mesures des déformations.

4. Comparaison entre mesure par corrélation et calcul par éléments finis

Un calcul par éléments finis du cas simple de traction reporté au paragraphe 3.1 a été réalisé à l'aide du logiciel ABAQUS, dans le but de vérifier les possibilités de comparaison calcul / essai dans le logiciel CORRELI^{STC}. La démarche est la suivante :

- préparation du maillage : elle a pour but de ne retenir que les éléments du maillage qui sont en surface de la pièce et qui correspondent à une zone étudiée par corrélation. Elle est directement réalisée dans le code éléments finis ;
- import du maillage et des résultats du calcul par éléments finis dans CORRELI^{STC} : les données importées sont les nœuds du maillage, leurs connectivités, les valeurs de déplacements et de déformations calculées ;

- calcul de la transformation permettant de passer du référentiel mesure au référentiel calcul : ceci est réalisé simplement en cliquant trois points dans l'image et en fournissant les coordonnées de ces trois points dans le référentiel calcul ;
- les données issues du calcul et de l'essai peuvent alors être affichées et comparées dans CORRELI^{STC}.

La figure 7 montre ainsi la comparaison calcul / essai correspondant à l'essai décrit au paragraphe 3.1. Les résultats sont tout à fait comparables. Les données issues du calcul sont mises sous une forme identique à celle des données expérimentales et sont gérées dans le logiciel CORRELI^{STC} de la même façon. On peut donc réaliser des comparaisons directes entre les deux types de données.

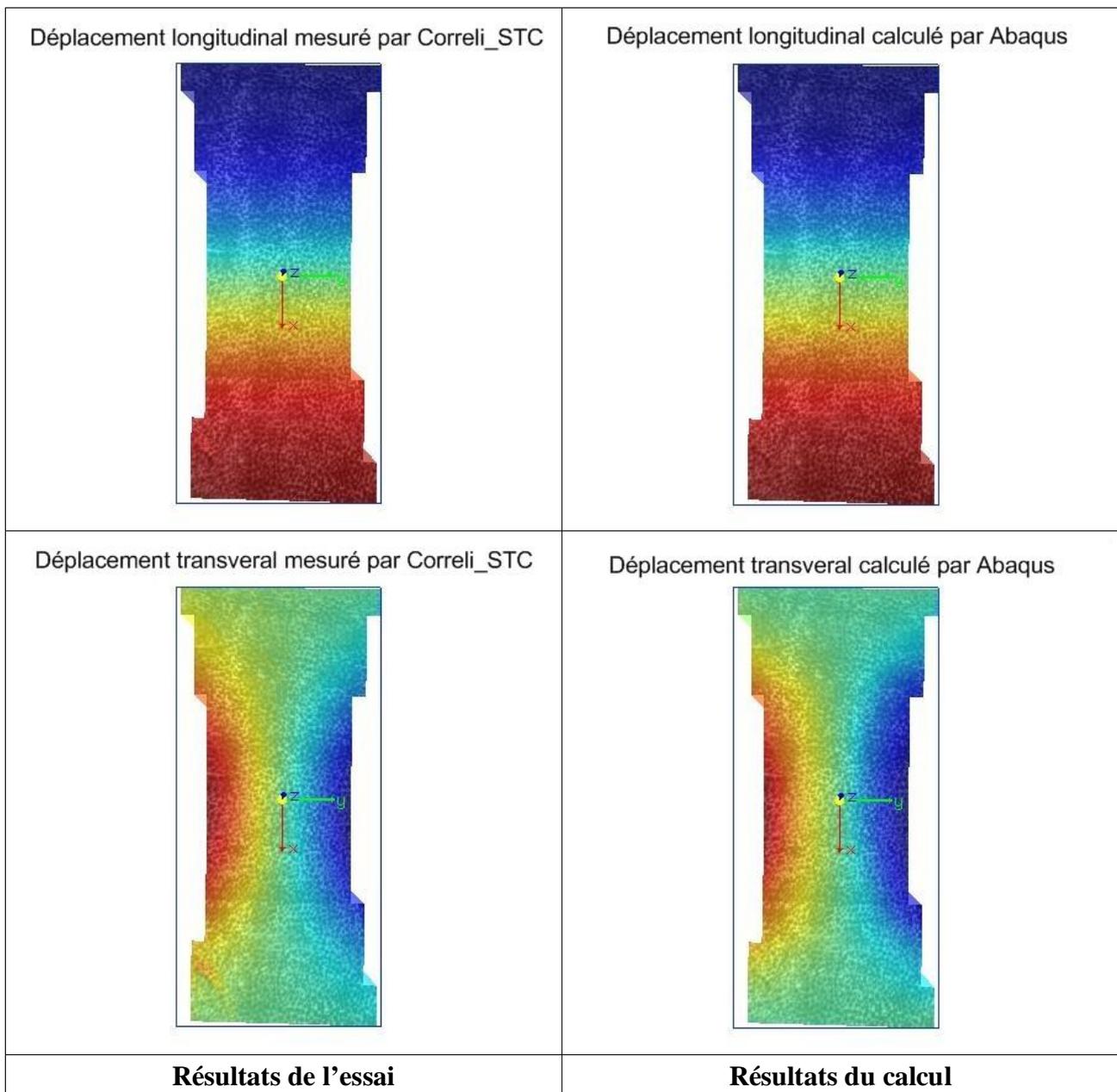


Fig. 7 : Exemple de comparaison calcul /essai : champs de déplacement longitudinal (en haut) et transverse (en bas).

5. Conclusion

La corrélation d'images est une technique connue pour ses capacités à mesurer des champs de déplacements à la surface de pièces et ainsi est un outil efficace pour analyser les essais mécaniques. L'usage de cette technique peut être étendu à l'étude des déformations mécaniques,

obtenues par un post-traitement des champs de déplacements mesurés. La notion de jauge virtuelle nous a permis de faire des comparaisons directes entre des mesures issues du calcul par corrélation et des informations fournies par les jauges de déformation collées. Ainsi les valeurs obtenues sont tout à fait comparables, les écarts relevés étant fortement liés aux caractéristiques des jauges virtuelles (dimensions, position et orientation par rapport à la jauge réelle).

La possibilité de comparer directement des données issues de simulations par éléments finis à des données issues de la corrélation d'images ouvre des perspectives intéressantes dans le domaine du recalage de calculs par éléments finis. En effet, une fois exprimée dans le même référentiel et sous forme de cartographies, ces données sont facilement comparables visuellement et surtout quantitativement.

Remerciements :

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet VULCOMP soutenu par l'ANR et le fonds européen FEDER.

Références

- [1] T. C. Chu, W. F. Ranson, M.A. Sutton, W.H. Peters (1985) « Applications of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics ». *Exp. Mech.* 3(25), 232-244.
- [2] Logiciel de stéréocorrélation CORRELI^{STC} développé dans le cadre du projet VULCOMP. Rapport final.
- [3] J.P. Chambard, S. Jaminion (2007) « Evaluation de l'incertitude de mesure d'un capteur optique de numérisation 3D ». Actes du 13^e Congrès International de Métrologie, 18-21 juin 2007, Lille (France).
- [4] J.P. Chambard, S. Jaminion, M. Tazéroualti, C. Galerne, F. Hild (2009) « Mesure de champs de déplacements 3D par corrélation d'images – Etude métrologique et application sur structure composite ». *JNC16*, Toulouse 2009 (France)
- [5] G. Besnard, F. Hild, S. Roux (2006) « Finite-element displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Châtelier bands » *Exp. Mech.* 46, 789-803.