

# Amélioration des mesures par corrélation d'images numériques sur le bord des échantillons

M. Baconnais<sup>a</sup>, M. François<sup>a</sup>, J. Réthoré<sup>a</sup>

a. Université de Nantes, Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France

## Abstract :

*Digital Image Correlation (DIC) [1] is one of the most used methods for displacement measurement. However, it was shown [3] that the measured error increases in particular zones : sample edges and cracks. Until now, three techniques have been used to avoid this error : limit the correlation domain in the sample, use an adapted mesh and exclude background pixels with a mask [3][4]. The purpose here is to use an edge position measurement method, the Virtual Image Correlation (VIC) [6], to help the DIC. This method allows describing a contour in a digital image with an analytical model – such as a circle, BSpline, NURBS... – with an accuracy close to 1/1000 pixel. First, this boundary position knowledge is used to create automatically a mesh adapted to the sample geometry. Then, it allows generating an accurate pixel mask by excluding pixels using a criterion on the signed distance between the boundary position and their centers. A sensitivity analysis of this criterion is carried out to choose its optimal value. Compared to segmentation methods this technique allows controlling which pixels are excluded based on their position instead of their gray level. Synthetic tests show that the pixel mask allows a significant reduction of the displacement and strain errors close to the boundaries. Besides, the boundary position information in each deformed image was used to constrain the DIC problem. However, this constrained method revealed to be less effective than with a simple mask. Due to the accuracy of the VIC, the adapted mesh and the pixel mask can be created even if the image quality is not perfect.*

**Mots clés : : corrélation d'images numériques, corrélation d'images virtuelles, bords, maillage adapté, masque de pixels**

## 1 Introduction

La corrélation d'images numériques [1] est aujourd'hui l'une des méthodes les plus utilisées pour mesurer les déplacements. En effet cette méthode optique permet de mesurer le champ de déplacement de la surface d'un échantillon avec une bonne précision et une bonne résolution. De plus, la DIC peut être mise en place avec un équipement expérimental simple dans son utilisation la plus basique. Au cours des dernières années cette méthode a montré son efficacité sur un grand nombre d'applications, comme les mesures à hautes résolutions spatiale et temporelle, des mesures de déplacement hors-plan par stéréo-corrélation et même en 3D sur des images de tomographie.

Malgré ses bonnes performances, la DIC montre une augmentation de l'erreur de mesure sur le bord des échantillons [2]. Un exemple de carte d'erreur est présenté en Figure 1. Ces erreurs sont dues à plusieurs facteurs : une discontinuité du champ de déplacement, une perturbation due aux pixels du fond de

l'image et une diminution de la quantité d'information utilisée pour estimer les paramètres sur le bord. Par exemple dans le cas de la modélisation éléments finis les nœuds de bord appartiennent à moins d'éléments que ceux internes au domaine. Pour éviter ces erreurs la technique la plus courante est d'exclure les bords du domaine de mesure, pourtant en mécanique ces zones contiennent beaucoup d'informations sur le comportement du matériau. D'autres méthodes ont alors été développées pour améliorer la précision de la mesure sur les frontières, par l'utilisation d'un maillage adapté [3] et également avec l'aide d'un masque de pixels [4] permettant d'exclure les pixels appartenant tout ou partie au fond de l'image.

Le principe du travail proposé ici, et de manière plus complète dans un article en cours de rédaction [5], est d'utiliser l'information de la position des frontières pour améliorer les mesures. La méthode utilisée pour mesurer la position des frontières est la corrélation d'images virtuelles (VIC) [6]. Celle-ci est une méthode de corrélation permettant une description analytique du bord avec une précision *subpixel*. L'apport de cette information à la DIC repose sur plusieurs points : la création d'un maillage parfaitement adapté à la géométrie de l'échantillon et à la génération d'un masque de pixels basé sur la position de la frontière.

## 2 Méthodes

### 2.1 Corrélation d'images avec masque de pixels

Une image digitale peut être représentée par une fonction scalaire  $F(\mathbf{X})$  représentant les niveaux de gris de chaque pixel de coordonnée  $\mathbf{X} \in \mathcal{N}^2$ . En DIC on utilise deux images  $F(\mathbf{X})$  et  $G(\mathbf{X})$  qui représentent la surface étudiée aux états de référence et déformé. Celles-ci sont liées par l'hypothèse de conservation du flot optique et la mesure ce fait par la minimisation de l'erreur de corrélation présentée en équation (1) :

$$\Psi(\mathbf{u}) = \int_{\Omega} [G(\mathbf{X} + \mathbf{u}(\mathbf{X})) - F(\mathbf{X})]^2 d\mathbf{X}, \quad (1)$$

avec  $\Omega$  le domaine de corrélation. Ce problème étant par définition mal posé – deux inconnues  $u_x$  et  $u_y$  pour une information  $G(\mathbf{X} + \mathbf{u}(\mathbf{X})) - F(\mathbf{X})$  – deux hypothèses sont posées en complément. On suppose la dérivabilité de l'image déformée autour de la position  $\mathbf{X} + \mathbf{u}$  et on modélise le déplacement sur une

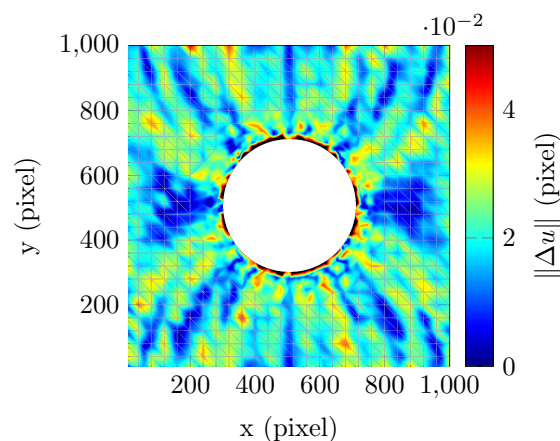


FIGURE 1 – Norme de l'écart entre les déplacements théorique et mesuré, pour la DIC sur un essai de plaque trouée synthétique.

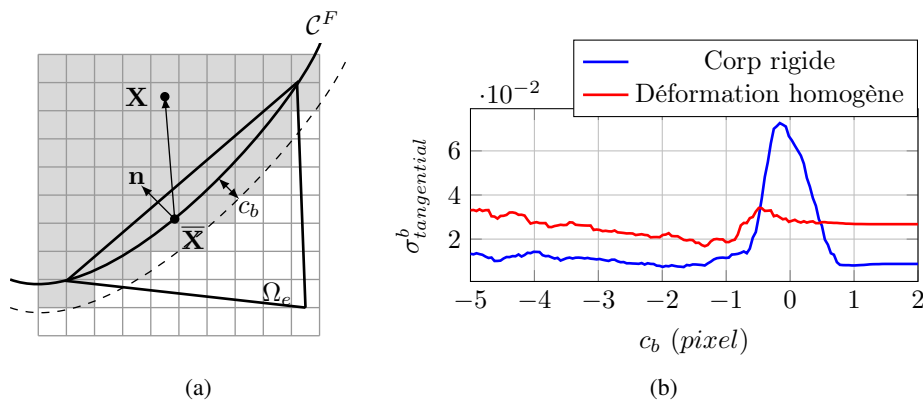


FIGURE 2 – Illustration du domaine d’intégration élémentaire  $\Omega_e$  et de la position mesurée de la frontière  $\mathcal{C}^F$  (a). Le masque de pixel est représenté en gris, ces pixels sont exclus du domaine d’intégration. Évolution de l’incertitude sur le déplacement radial, pour deux cas tests, en fonction du paramètre  $c_b$  (b).

base de fonctions d’interpolations. Dans cette étude une DIC globale avec une modélisation éléments finis du champ de déplacement est utilisée.

La courbe mathématique représentant la frontière dans l’image de référence est notée  $\mathcal{C}^F$ . Cette information permet alors d’adapter le maillage de mesure en positionnant les nœuds du bord sur  $\mathcal{C}^F$ . Dans un deuxième temps cela nous permet de créer un masque de pixels. Les pixels sont exclus du calcul s’ils vérifient l’inégalité suivante :

$$(\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}}) \cdot \mathbf{n} > c_b, \quad (2)$$

où  $\bar{\mathbf{X}}$  sont les points courants de la courbe  $\mathcal{C}^F$  et  $\mathbf{n}$  leur normale définie sortante. Le paramètre  $c_b$  est alors équivalent à la distance normale signée maximale par rapport à  $\mathcal{C}^F$  pour qu’un pixel soit pris en compte. Un critère  $c_b > 0$  correspond à un masque dont seuls les pixels qui ont leur centre à l’extérieur du domaine défini par  $\mathcal{C}^F$  sont exclus. Si  $c_b < 0$  des pixels dont le centre est à l’intérieur du domaine de l’élément sont exclus. Une illustration des différentes notations ainsi que du masque de pixels est présentée en Figure 2a.

Une étude de l’influence du paramètre  $c_b$  sur deux cas tests est présentée en Figure 2b. Ces cas tests correspondent à des images synthétiques de taille  $256 \times 256$  pixels et avec des cinématiques de corps rigide et de déformation homogène. Ici l’erreur est définie par l’incertitude sur la mesure du déplacement radial sur le bord.

$$\sigma_r^b = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{m_b} (u_r^k - U_r^k)^2}{m_b}},$$

où  $u_r^k$  et  $U_r^k$  sont respectivement les déplacements théorique et mesuré sur les pixels compris dans une bande – de largeur 8 pixels – le long du bord et  $m_b$  le nombre de pixels dans cette bande. On observe donc qu’une valeur de  $c_b$  proche de 0 augmente fortement l’erreur, on choisit un critère  $c_b \leq -1$  pixel pour réduire l’erreur.

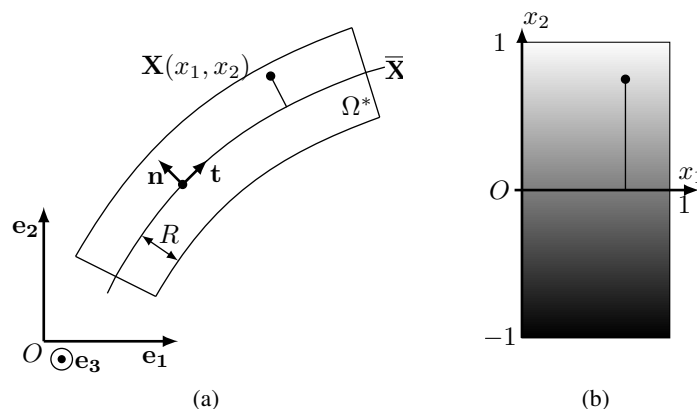


FIGURE 3 – Géométrie de l’image virtuelle, dans le repère de l’image digital (a) et dans son repère local (b).

## 2.2 Corrélation d’images virtuelles (VIC)

Le principe de la corrélation d’images virtuelles (VIC) est similaire à celui de la DIC, en effet il consiste à minimiser une erreur de corrélation définie par :

$$\Phi(\mu) = \frac{1}{2} \int_{\Omega^*} [G^*(x_2) - F(\mathbf{X}(x_1, x_2, \mu))]^2 dx. \quad (3)$$

où  $F$  est l’image dans laquelle on souhaite mesurer la position d’un contour et  $G^*$  définit l’image virtuelle que l’on crée similaire au bord que l’on souhaite mesurer. Pour cela on définit une image unitaire possédant un système de coordonnées locales  $(x_1, x_2)$  ainsi qu’une distribution de niveaux de gris, voir Figure 3b. Ensuite cette image unitaire est déformée pour qu’elle vienne épouser la forme du bord dans  $F$ . Cette transformation est effectuée en choisissant une famille de courbe paramétrique – cercle, ellipse, BSpline, NURBS, ... – dépendant de paramètres  $\mu_i$ . On définit également son épaisseur  $2R$ , les points de définition de cette image sont donnés par l’équation :

$$\mathbf{X}(x_1, x_2, \mu) = \overline{\mathbf{X}}(x_1, \mu) + x_2 R \mathbf{n}(x_1, \mu), \quad (4)$$

où  $\overline{\mathbf{X}}(x_1, \mu)$  définit l’équation de la courbe paramétrique choisie et  $\mathbf{n}$  sa normale. Une illustration de la forme de  $G^*$  dans le repère de l’image digitale est donnée en Figure 3a. Il est montré dans [6] que si l’initialisation de  $G^*$  est assez proche du contour à mesurer, la VIC permet de mesurer sa position avec une précision proche de 1/1000 pixel.

## 3 Résultats

Dans cette partie une comparaison des résultats de mesure de DIC avec et sans masque est présentée. Tout d’abord sur des images synthétiques dont la cinématique est connue. Cela permettra de comparer les erreurs de mesure des deux méthodes et d’évaluer l’influence de la taille des éléments utilisés. Puis un cas d’application sur des images expérimentales est présenté. Le champ de déplacement n’étant pas connu dans ce cas, une comparaison qualitative des résultats est présentée.

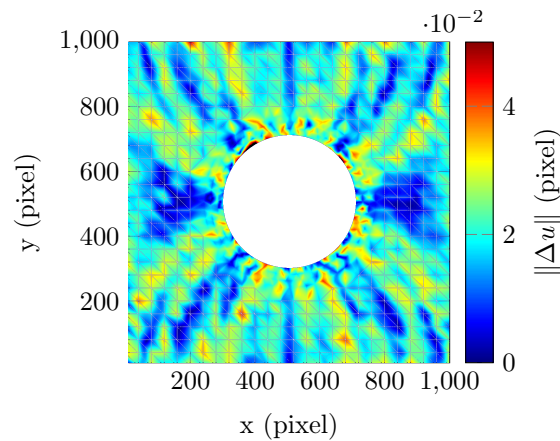


FIGURE 4 – Norme de l'écart entre les déplacements théorique et mesuré pour la DIC avec masque de pixels.

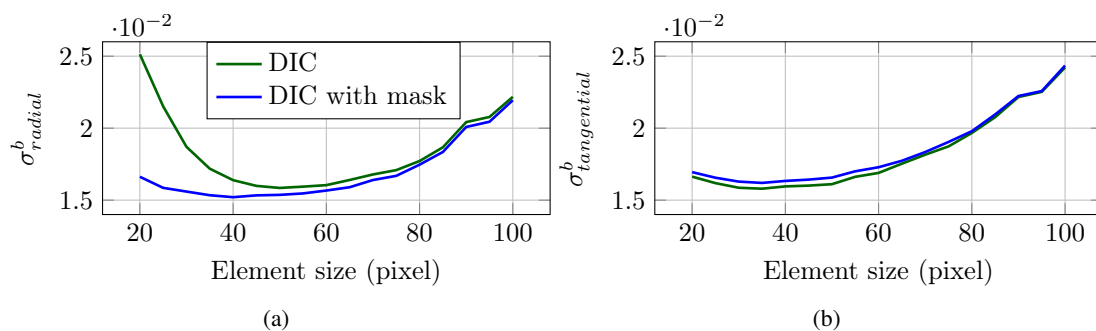


FIGURE 5 – Comparaison des incertitudes sur les déplacements radiaux (a) et tangentiels (b) en fonction de la taille des éléments finis.

### 3.1 Étude d'une plaque trouée en traction

Dans ce premier exemple un couple d'images correspondant à un essai synthétique d'une plaque trouée en traction selon  $e_x$  est utilisé. Le champ de déformation, calculé analytiquement sur un domaine infini, est utilisé pour calculer l'image  $G$ . Ces images sont de taille  $1024 \times 1024$  pixels et un maillage triangulaire linéaire, de tailles 40 pixels à l'intérieur du domaine et 20 pixels sur le bord, est utilisé. Ici le masque de pixels est créé avec un critère  $c_b = -1$  pixel. On présente les cartes pour la norme de l'écart entre les déplacements théorique et mesuré  $\|\Delta \mathbf{u}\|$  pour la DIC sans masque en Figure 1 et pour la DIC avec masque en Figure 4. Comme on peut l'observer, la mesure par DIC sans masque est entachée d'erreurs sur le bord comparé à la DIC avec masque.

On étudie l'incertitude sur les déplacements radiaux et tangentiels en fonction de la taille des éléments finis, voir Figure 5. Ces résultats sont calculés sur une bande de largeur 40 pixels sur le bord, à l'extérieur de cette bande le masque n'a plus d'influence. Comme on peut le constater l'utilisation du masque de pixels réduit significativement l'erreur de corrélation sur le déplacement radial pour les petits éléments. Le déplacement tangential n'est lui que peu impacté par ce masque.

### 3.2 Cas expérimental

L'exemple précédent a montré que l'utilisation d'un masque de pixels permet de réduire fortement les erreurs sur le déplacement radial. Dans ce second exemple on souhaite voir si dans le cas de données

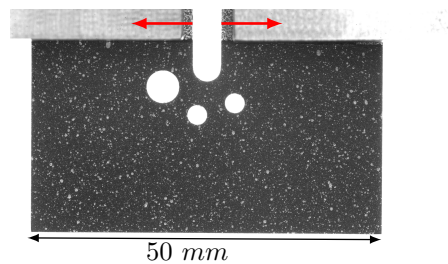


FIGURE 6 – Image de référence du cas expérimental.

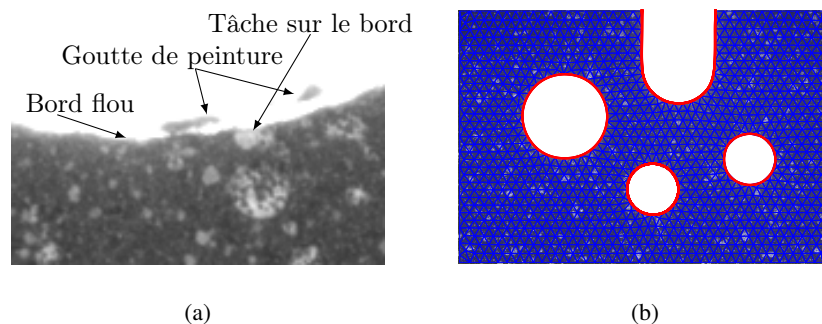


FIGURE 7 – Exemples de défauts que l'on peut constater sur les frontières dans les images expérimentales (a). Maillage adapté automatiquement avec l'information de la position des frontières (b).

expérimentales une amélioration de mesure peut être constatée. L'image de référence de cet essai est présentée en Figure 6. Cette image est similaire à celles du *Sandia fracture challenge* et correspond à un essai de déchirement d'une plaque d'acier doux afin d'en étudier le comportement autour des trous. Dans notre cas on utilise les deux premières images de la série où le déplacement correspond à un mouvement de corps rigide. Comme le champ cinématique théorique est inconnu cela nous permettra de comparer les deux méthodes en évaluant la valeur des déformations radiales le long des différentes frontières.

Tout d'abord la première difficulté consiste à mesurer la position des frontières avec une bonne précision malgré les défauts sur les bords de l'échantillon, voir Figure 7a. La VIC permettant de filtrer ces défauts, la position des frontières peut être détectée avec une précision suffisante pour créer un maillage adapté, présenté en Figure 7b, et le masque de pixels.

Pour cet exemple des éléments de 50 pixels sont utilisés et on prend un critère  $c_b = -5$  pixel. En effet en re-contrastant l'image on peut constater une bande de 5 pixels de large qui possède un niveau de luminosité différent. Cela est sûrement dû à l'éclairage utilisé en arrière-plan pour créer ce fond d'image parfaitement blanc, celui-ci perturbe ainsi la mesure sur cette bande. Les cartes de déformation radiale sur le bord sont présentées en Figure 8. Comme on peut le constater des déformations plus irrégulières, semblant donc moins physiques dans un mouvement de corps rigide, sont mesurées avec la DiC sans le masque de pixels. Dans ce second exemple le masque améliore donc aussi les mesures sur le bord.

## 4 Conclusions

Dans cet article la méthode de corrélation d'images virtuelles (VIC) a été utilisée pour améliorer la précision de la DIC sur le bord des échantillons. En effet cette méthode permet de mesurer avec précision la position d'un contour dans une image numérique. Cette information est donc utilisée pour initialiser

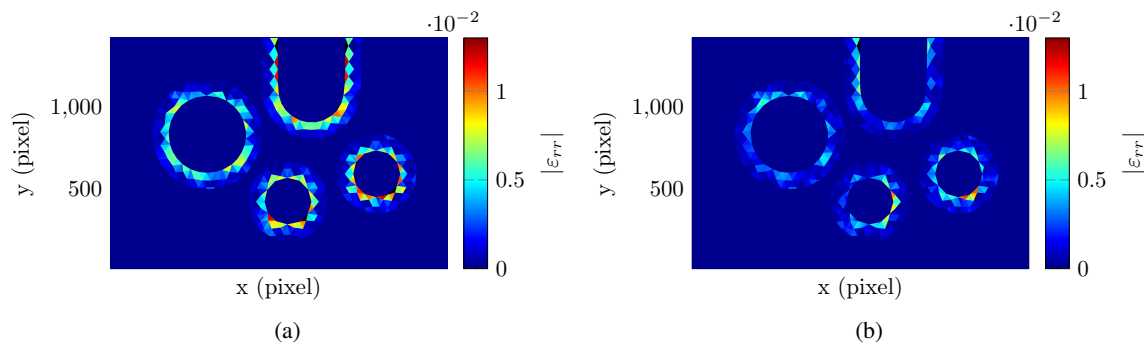


FIGURE 8 – Cartes de déformation radiale  $|\varepsilon_{rr}|$  sur le bord, pour la DIC (a) et la DIC avec masque de pixels (b).

le maillage de calcul et pour générer un masque de pixels permettant de supprimer l'influence des pixels perturbés par l'arrière-plan. Cela permet de réduire les erreurs de la DIC sur le bord qui sont dues à des discontinuités dans le champ de déplacement et à l'influence de ces pixels dans le calcul.

## Références

- [1] M Sutton, W Wolters, W Peters, W Ranson and S McNeill Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and vision computing*, 1(3) :133–139, 1983.
- [2] Y Sun, J.H Pang, C.K Wong and F Su. Finite element formulation for a digital image correlation method. *Applied optics* 2005, 44, 7357–7363.
- [3] J Zhang, Y Cai, W Ye, and T Yu. On the use of the digital image correlation method for heterogeneous deformation measurement of porous solids. *Optics and lasers in engineering*, 49(2) :200–209, 2011.
- [4] E Fagerholt, T Børvik, and OS Hopperstad. Measuring discontinuous displacement fields in cracked specimens using digital image correlation with mesh adaptation and crack-path optimization. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(3) :299–310, 2013.
- [5] M Baconnais, M François and J Réthoré. Digital image correlation for displacement measure on boundary. *En cours de rédaction*, 2019.
- [6] B Semin, H Auradou and M François. Accurate measurement of curvilinear shapes by virtual image correlation. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 56(1), 2011.