



**HAL**  
open science

# Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images : applications en mécanique expérimentale

Jean-José Orteu, Dorian Garcia, Michel Devy

## ► To cite this version:

Jean-José Orteu, Dorian Garcia, Michel Devy. Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images : applications en mécanique expérimentale. *Photoniques*, 2003, 10, pp.34-43. hal-01832922

**HAL Id: hal-01832922**

**<https://hal.science/hal-01832922>**

Submitted on 6 Nov 2018

**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 formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images : applications en mécanique expérimentale

JEAN-JOSÉ ORTEU<sup>1</sup> – DORIAN GARCIA<sup>2</sup> – MICHEL DEVY<sup>3</sup>

*De nombreux domaines concernant le comportement mécanique des matériaux posent le problème de la mesure des déplacements ou des déformations.*

*Pour ce type de mesure, les méthodes optiques se sont largement imposées car elles présentent de grands avantages tels que l'absence de contact, une résolution spatiale élevée, et l'obtention d'une information de champ, par opposition à une information ponctuelle.*

*Dans cet article, nous présentons la technique de stéréo-corrélation qui utilise deux caméras liées de façon rigide et qui permet d'une part la mesure de la forme tridimensionnelle (3D) d'un objet à partir d'une simple paire d'images stéréoscopiques de l'objet, et d'autre part la mesure de champs de déplacements/déformations 3D à partir d'au moins deux paires d'images correspondant à différents instants de déformation de l'objet (en général, analyse d'une séquence de paires d'images acquises en cours de déformation).*

*Peu de méthodes de mesure de déformations permettent à la fois d'obtenir une information tridimensionnelle (déformations dans le plan et hors plan) et de mesurer des taux de déformations pouvant aller de quelques centièmes de pour cent à plusieurs centaines de pour cent.*

## Mesure de formes 3D par stéréo-corrélation

### La stéréovision

La stéréovision est basée sur le principe que l'information de profondeur peut être obtenue par triangulation à partir de deux images ayant une partie commune dans leur champ de vue.

La *figure 1-a* représente les plans images de chacune des deux caméras d'un capteur de vision stéréoscopique.  $C_1$  et  $C_2$  désignent les centres optiques de chacune des caméras (qui, pour des raisons de simplification, sont positionnés derrière le plan image alors qu'ils sont en réalité devant).

On constate sur la *figure 1-a* que le calcul de la position tridimensionnelle du point  $P$  est possible si :

– on sait reconnaître dans les deux images les points  $p_1$  et  $p_2$  qui correspondent à la projection dans les images du même point physique  $P$ . Cette phase porte le nom

d'appariement ou de mise en correspondance des images ou également de recherche des stéréo-correspondants. C'est la phase critique de la technique de stéréovision ;

– on sait calculer les droites  $C_1p_1$  et  $C_2p_2$  dont l'intersection fournit le point  $P$  recherché.

Cette phase nécessite de connaître les paramètres intrinsèques de chacune des caméras (longueur focale de l'objectif,

taille des pixels de la matrice CCD, coefficients pour tenir compte de la distorsion des images induite par l'objectif,...) ainsi que la position et l'orientation d'une caméra par rapport à l'autre. L'obtention de ces données passe par le calibrage du capteur de vision stéréoscopique.

### Calibrage d'un capteur de vision stéréoscopique

Le calibrage d'une caméra est une étape importante pour la métrologie dimensionnelle par vision artificielle. Calibrer une caméra consiste à déterminer ses para-

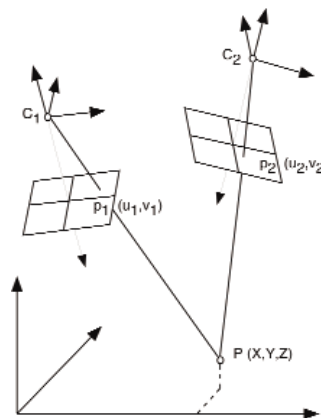


Figure 1. (a) Principe de la stéréovision



(b) Capteur de vision stéréoscopique

1. École des Mines d'Albi-Carmaux – Tél. : 33 (0)5 63 49 30 73 – Jean-Jose.Orteu@enstima.fr

2. École des Mines d'Albi-Carmaux (actuellement à l'Université de Caroline du Sud, Columbia, SC, USA) dgarcia@enr.sc.edu

3. LAAS-CNRS Toulouse – Tél. : 33 (0)5 61 33 63 31 – devy@laas.fr

mètres intrinsèques. Calibrer un capteur de stéréovision, constitué de deux caméras liées de façon rigide, consiste à déterminer les paramètres intrinsèques de chacune des caméras, et la position et orientation relative de ces deux caméras. Ces paramètres de calibrage sont nécessaires pour calculer, par triangulation, les coordonnées tridimensionnelles d'un point correspondant à des pixels appariés dans les deux images [1].

## Appariement des images stéréoscopiques

Le problème de l'appariement d'une paire d'images stéréoscopiques est un cas particulier du problème général d'appariement d'images.

On peut en effet distinguer deux cas de figure :

– l'appariement d'images acquises par une seule caméra, à des instants différents, sur un objet qui se déforme. On parlera d'*appariement temporel*, de *suivi de pixel* ou de *tracking*. Ce cas correspond par exemple à la situation rencontrée en extensométrie bidimensionnelle à partir d'une seule caméra [2] ;

– l'appariement de deux images acquises, à un instant donné, par deux caméras stéréoscopiques liées de façon rigide. On parlera de *mise en stéréo-correspondance*.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser au problème de type 2.

Nous verrons plus loin dans cet article que la mesure de champs de déplacements 3D par stéréovision met en oeuvre à la fois une technique d'appariement temporel (type 1) et une technique de mise en stéréo-correspondance (type 2).

## Méthode utilisant des grilles

La phase de mise en correspondance peut être facilitée si la surface de l'objet observé a été préalablement marquée d'une grille [2]. Habituellement, chacune des deux images stéréoscopiques est analysée indépendamment pour en extraire les noeuds de la grille. Les deux grilles extraites sont ensuite mises en correspondance automatiquement.

Les inconvénients majeurs de cette méthode sont :

– l'obtention d'une reconstruction 3D éparse (par opposition à une reconstruction 3D

dense) puisque seuls les noeuds de la grille sont mis en correspondance et reconstruits en 3D par triangulation ;

– une grande précision d'extraction des noeuds de la grille est difficile à obtenir ce qui a une influence sur la précision de reconstruction 3D.

## Méthode utilisant la corrélation d'images (stéréo-corrélation)

La corrélation d'images est abondamment utilisée en extensométrie bidimensionnelle à partir d'une seule caméra.

Étant donné deux images correspondant à deux états de déformation d'un objet, pour déterminer le correspondant d'un pixel de la première image dans la seconde, on mesure la ressemblance entre deux pixels en calculant un score de corrélation (critère de ressemblance) déterminé sur leur voisinage (*figure 2*).

De par son principe, la technique de corrélation ne peut fonctionner correctement qu'avec des objets présentant une surface avec une texture suffisamment aléatoire. Si l'objet n'est pas naturellement texturé ou si sa texture n'est pas suffisamment discriminante, différentes techniques existent pour permettre l'utilisation de la corrélation : illumination de la surface avec une source laser pour faire apparaître une structure granulaire (effet speckle), projection de peinture (technique dite du mouchetis),...

La technique de corrélation peut être également utilisée pour rechercher des stéréo-correspondants à partir d'une paire d'images stéréoscopiques. On parle alors de stéréo-corrélation.

À noter qu'une différence essentielle distingue la mise en correspondance temporelle par corrélation (deux images acquises à des instants différents par une même caméra, comme sur la *figure 2*) de la mise en stéréo-correspondance par corrélation (deux images acquises au même instant par un capteur de vision stéréoscopique) : dans le cas de la stéréovision, il existe une contrainte géométrique [3], dite *contrainte épipolaire*, qui permet de guider la recherche du stéréo-correspondant. Grâce à cette propriété géométrique importante, la recherche du stéréo-correspondant d'un point de l'image gauche se ramène à une recherche 1D dans l'image droite (le long

de la droite épipolaire associée) plutôt qu'une recherche 2D (recherche exhaustive dans toute l'image droite). La prise en compte de cette contrainte permet d'accélérer et de rendre plus robustes les algorithmes de mise en stéréo-correspondance. De plus, une opération dite de *rectification des images* permet de transformer les images initiales en images dites rectifiées de sorte que les pixels stéréo-correspondants soient sur la même ligne dans les deux images rectifiées (figure 3a). Cette opération de rectification préalable (non obligatoire) simplifie la mise en œuvre de la technique. À noter que l'on appelle *disparité* la différence des numéros de colonne des pixels stéréo-correspondants dans les images rectifiées (leurs numéros de ligne sont les mêmes). La notion de disparité est abondamment utilisée en stéréoscopie.

Les choses sont un peu plus compliquées lorsqu'on prend en compte la distorsion induite par l'objectif (ce qui est indispensable pour des applications de métrologie). Dans ce cas, il faut d'abord corriger les points-image de leur distorsion, en utilisant les coefficients de distorsion de chacune des caméras calculés lors de l'étape de calibrage, pour se ramener dans la configuration idéale, dite de la projection perspective, de la figure 1a.

Le principe de la stéréo-corrélation est décrit sur la figure 3a : pour déterminer le correspondant d'un pixel de la première image dans la seconde, on mesure la ressemblance entre deux pixels en calculant un score de corrélation déterminé sur leur voisinage. En pratique, les voisinages considérés sont des domaines rectangulaires centrés sur les points examinés. Étant donné un pixel dans la première image et son voisinage associé, son correspondant dans la seconde image est celui qui maximise le score de corrélation le long de la ligne (figure 3b).

Dans la mise en œuvre classique de la technique de stéréo-corrélation, la corrélation s'effectue sur des domaines rectangulaires de taille fixée a priori (figure 3a). Pour des applications de métrologie, où une grande précision est recherchée, une précision subpixel (jusqu'à 1/100 pixel) est obtenue en utilisant des domaines dont la forme s'adapte dynamiquement à l'information présente dans les images (prise en

compte de la courbure et de l'orientation des surfaces à mesurer) [1] et en mettant en œuvre des techniques d'interpolation (soit des niveaux de gris des images, soit des courbes de score de corrélation au voisinage du maximum trouvé).

Il est à noter que les opérations de rectification et de correction de distorsion, qui font appel à des interpolations des niveaux de gris des images initiales acquises par le capteur, introduisent des dégradations.

Dans le but d'obtenir la meilleure précision d'appariement possible, nous avons proposé une nouvelle technique [1], appelée sté-

réo-corrélation fine améliorée, qui calcule les scores de corrélation directement dans les images acquises par le capteur et non pas dans les images dégradées par les opérations de rectification et de correction de la distorsion.

La technique de stéréo-corrélation permet d'obtenir une carte dense d'appariements (en théorie chacun des pixels de la matrice CCD peut être apparié), ce qui conduit ensuite, après triangulation, à une carte dense de points 3D (voir plus loin les exemples sur la tôle mince emboutie). À noter que cette technique permet également

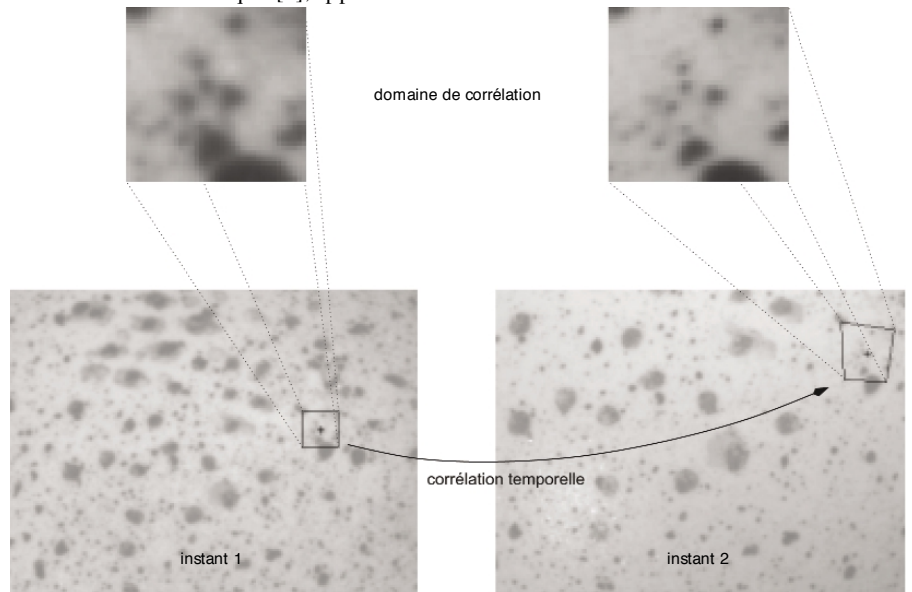


Figure 2. La corrélation d'images : entre les instants 1 et 2, la surface plane observée par la caméra s'est déformée

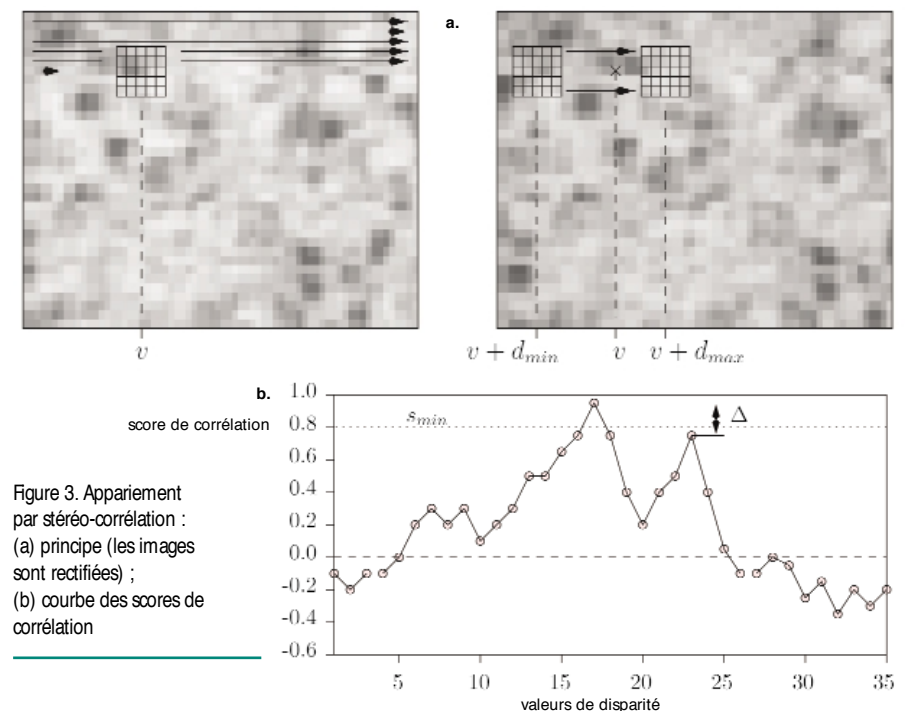


Figure 3. Appariement par stéréo-corrélation : (a) principe (les images sont rectifiées) ; (b) courbe des scores de corrélation

d'obtenir une reconstruction 3D éparses si la mise en stéréo-correspondance ne porte que sur un nombre limité de points choisis par l'utilisateur (*figures 14 et 21*).

Il est à noter que lorsqu'il s'agit de mesurer la forme 3D d'un objet statique, la grille ou le mouchetis n'ont pas besoin d'être solidaires de la surface de l'objet. On peut tout simplement projeter la grille ou le mouchetis sur l'objet (avec un projecteur de diapositives ou un vidéoprojecteur) ce qui permet ensuite la mise en correspondance des images acquises par le capteur de vision stéréoscopique. On rejoint alors les méthodes de reconstruction 3D par lumière structurée qui peuvent également fonctionner avec une seule caméra.

## Triangulation

À partir de deux points  $p_1$  et  $p_2$  correctement appariés, la reconstruction 3D s'effectue par triangulation, en calculant l'intersection dans l'espace des droites  $C_1p_1$  et  $C_2p_2$  (*figure 1a*).

## Précision de mesure

La précision de mesure de formes 3D par stéréovision dépend de plusieurs facteurs :

- la qualité des caméras et leur résolution,
- la configuration des caméras (angle formé par leur axe optique) qui conditionne la précision de triangulation,
- la précision du calibrage du capteur de vision stéréoscopique,
- la précision avec laquelle les points de mesure sont extraits dans chacune des images stéréoscopiques.

La précision avec laquelle les points de mesure sont extraits dans chacune des images stéréoscopiques dépend du type de point de mesure choisi. L'extraction de marqueurs ou des noeuds d'une grille peut s'effectuer avec une précision de l'ordre de 1/30 pixel. La technique de corrélation permet d'apparier des points avec une meilleure précision (jusqu'à 1/100 pixel).

Avec des caméras numériques de résolution 1 024 x 1 024, il est possible d'obtenir par stéréo-corrélation une précision de l'ordre de D/50 000 (D étant la plus grande dimension de l'objet vu plein champ par les caméras), soit +/- 10  $\mu\text{m}$  sur un objet de 50 cm.

Il convient de préciser que la technique de stéréovision n'est pas la technique de

numérisation 3D qui fournit la meilleure précision. Pour ne parler que des techniques utilisant des caméras, il est préférable d'utiliser une technique de type vidéo-grammétrie (photogrammétrie à partir d'images prises par une caméra ou un appareil photo numérique), qui utilise un grand nombre de vues de l'objet (possibilité de tourner autour de l'objet pour en obtenir la forme complète) et avec laquelle des précisions meilleures que D/100 000 sont atteignables [6]. Par contre, la vidéo-grammétrie (une caméra qui se déplace) ne permet pas de traiter le cas de phénomènes dynamiques (rapides) et ne permet donc pas d'accéder au champ de déplacements 3D. De ce point de vue là, la stéréovision est un outil très performant comme nous allons le voir par la suite.

## Mesure 3D de déformations par stéréo-corrélation et appariement temporel d'images

La technique de stéréovision permet de mesurer l'évolution de la forme 3D d'un objet en enregistrant plusieurs paires stéréoscopiques relatives à différents états de déformation de cet objet. Néanmoins, le but généralement poursuivi en mécanique expérimentale est la mesure des déformations de surface, qui peut être obtenue en suivant au cours du temps le déplacement de certains points répartis sur la surface de l'objet (on parlera de champ de déplacements). L'extensométrie bidimensionnelle à partir d'une seule caméra [2] permet d'accéder au champ de déplacements 2D à la surface d'un objet plan. La technique de stéréovision permet d'accéder au champ de déplacements 3D d'un objet de forme quelconque en couplant la stéréovision par corrélation de pixels (stéréo-corrélation) pour accéder à l'information tridimensionnelle et la corrélation plus classique (appariement temporel) pour mettre en correspondance des images acquises à des instants différents. La mesure proprement dite fournit des déplacements à partir desquels il est possible de calculer ensuite des déformations.

## Mesure du champ de déplacements 3D

Le principe de la méthode est résumé sur la *figure 4a* dans le cas de deux paires stéréoscopiques (une avant déformation et une après).

Les étapes (1) et (3) permettent d'obtenir la forme 3D de l'objet aux instants  $t$  et  $t + \Delta t$ . L'étape (2) permet d'établir une relation temporelle entre chacun des points 3D constituant les deux nuages de points 3D correspondant aux instants  $t$  et  $t + \Delta t$  (*figure 5*).

Habituellement, les étapes (1), (2) et (3) se font de façon séquentielle, ce qui a pour conséquence de cumuler les erreurs d'appariement de chacune des étapes. Pour minimiser globalement les erreurs commises, nous avons proposé une technique globale d'appariement qui exploite simultanément les quatre images disponibles (méthode de stéréo-tracking combiné présentée sur la *figure 4b* et décrite dans [1]).

Pour que l'appariement temporel par corrélation de pixels puisse fonctionner, il ne faut pas que le taux de déformation soit trop important (typiquement  $< 30\%$ ). Pour mesurer des grandes déformations ( $> 100\%$ ), il est nécessaire d'acquérir plusieurs paires d'images stéréoscopiques et d'effectuer un suivi temporel des pixels à travers les différentes images de la séquence (voir plus loin l'exemple des membranes en élastomère soufflées). Habituellement, les points de l'image gauche à

corrélérer sont répartis suivant une grille virtuelle ce qui fournit au final un champ des déplacements 3D en chacun des noeuds de la grille. Cette grille sera exploitée par la suite pour le calcul des déformations (*figure 6*).

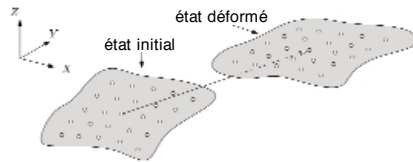


Figure 5. Détermination du champ de déplacements 3D

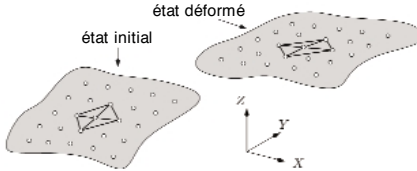


Figure 6. Détermination du champ de déformations de surface

## Calcul du champ de déformations

La technique de stéréovision fournit un champ de déplacements 3D (*figure 5*). Le champ de déformations est ensuite calculé à partir des déplacements au moyen d'un schéma numérique de dérivation discrète [4]. Notons que les déformations peuvent être calculées en utilisant un code aux éléments finis. Le champ de déplacements

mesuré fournit la valeur du déplacement en chaque point d'une grille virtuelle. À partir de cette grille, on crée un maillage éléments-finis qui va servir de support au calcul des déformations (*figure 6*). La valeur du déplacement mesuré est imposée en chaque noeud du maillage et le post-processeur éléments-finis calcule le champ des déformations.

## Précision de mesure

Les déformations sont obtenues par dérivation discrète à partir des déplacements mesurés en un certain nombre de points d'un maillage. La déformation en un point du maillage est calculée à partir des points situés dans un voisinage (on parle de domaine d'intégration).

La précision des déformations dépend du schéma de dérivation utilisé (forme du domaine), de la précision avec laquelle les déplacements sont mesurés et de la base de calcul (pas de la grille utilisée).

Par exemple, avec un voisinage du type de celui représenté sur la *figure 6*, on obtient, dans le cas 2D de l'extensométrie bidimensionnelle, une incertitude sur la mesure des déformations planes qui vaut [4] :

$$\Delta \varepsilon = \Delta d / \sqrt{2} \Delta x$$

avec :  $\Delta \varepsilon$  : incertitude sur la mesure des déformations

$\Delta d$  : incertitude sur la mesure des déplacements

$\Delta x$  : base de calcul des déformations

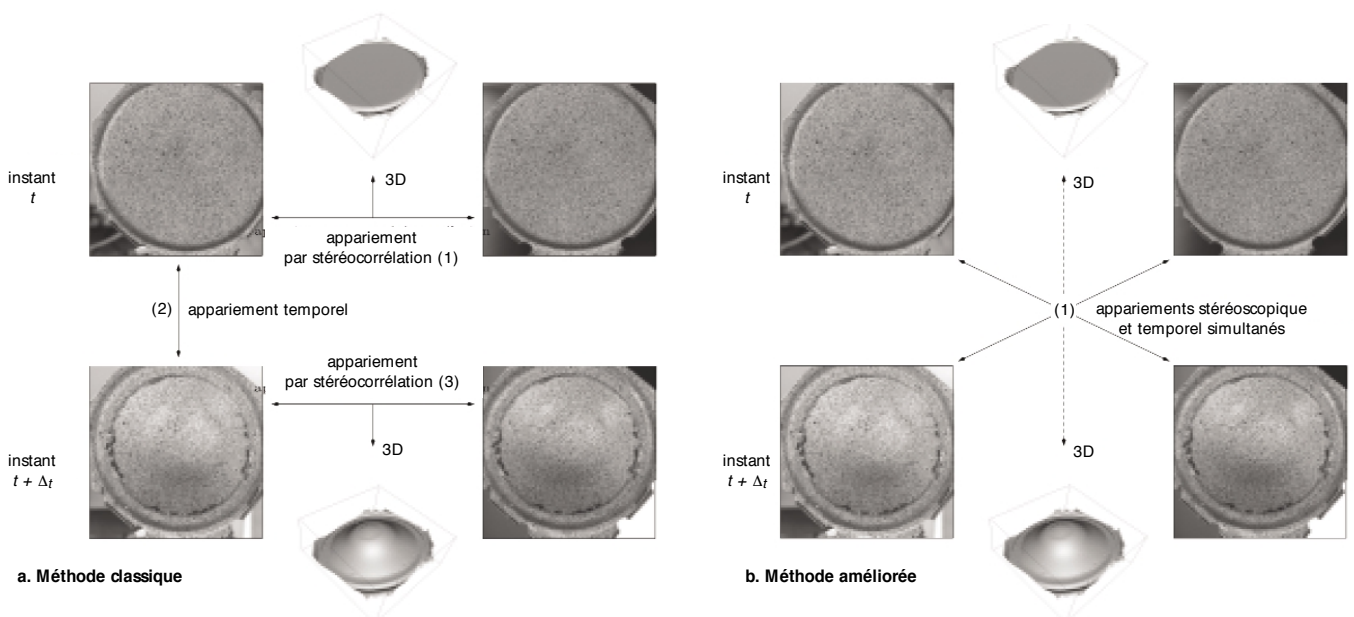


Figure 4. Détermination du champ de déplacements 3D par stéréo-corrélation et appariement temporel de pixels par corrélation

Par exemple, pour  $\Delta d$  égal à 1/50 pixel et une base de calcul des déformations  $\Delta x$  égale à 14 pixels, on obtient une incertitude sur la mesure des déformations  $\Delta \varepsilon$  égale à 0,1 %. On peut atteindre une incertitude 10 fois plus faible (0,01 %) en prenant une base de calcul des déformations 10 fois plus grande (140 pixels) mais le résultat a alors une signification moins locale (ce qui peut être gênant dans le cas de matériaux hétérogènes).

Dans le cas 3D de la stéréo-corrélation, l'expérience a montré qu'il était possible d'obtenir une précision de l'ordre de 0,05 % avec un maillage de taille 50 pixels environ [1].

## Exemples d'applications

Dans le domaine de l'emboutissage, il est important de connaître la limite supérieure de formage admissible pour une tôle avant l'apparition de la striction localisée. Pour obtenir cette limite, on procède généralement à un essai expérimental et on mesure le champ de déformations sur la tôle emboutie.

De même, dans le domaine de la mise en forme des polymères, il est fondamental de pouvoir accéder au calcul des déformations pour une meilleure compréhension du comportement des polymères durant la phase de mise en forme. À noter qu'avec ce type de matériau, on est confronté à des grandes déformations (> 100 %).

L'introduction de fibres métalliques dans les bétons a pour objectif de diminuer la fragilité qui caractérise leur comportement mécanique. Les essais de traction sur éprouvettes pré-entaillées permettent de caractériser et de quantifier le gain obtenu sur les performances mécaniques d'un

matériau ainsi renforcé.

Dans ces applications, la technique de stéréovision s'est avérée un outil intéressant pour la détermination automatique et rapide du champ de déformations.

## Tôles minces embouties

### Mesure de forme 3D par stéréo-corrélation

Les figures 7 à 9 illustrent l'application de la technique de stéréo-corrélation pour l'obtention de la forme 3D d'une pièce emboutie. La surface de la pièce a été texturée par dépôt d'un mouchetis de peinture

Comme déjà mentionné, la technique de stéréo-corrélation permet une reconstruction 3D dense. La figure 9 gauche par exemple correspond à environ 1,3 million de points 3D reconstruits. Pour afficher un nuage de points aussi dense, il faut parfois réduire la quantité de données disponibles en calculant un maillage triangulaire du nuage de points 3D (figure 9 droite).

Ce maillage est également utilisé pour le calcul des déformations de la surface de la pièce. Le choix du pas de ce maillage (sorte de grille virtuelle) s'effectue au moment du post-traitement des données et peut donc être adapté aux gradients de déformations en présence. C'est là un des

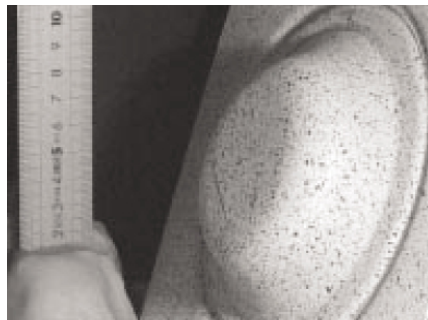


Figure 7. La pièce emboutie dont il faut mesurer la forme 3D

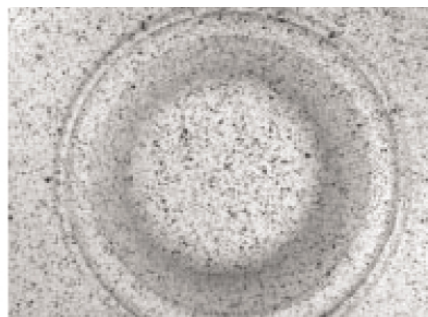
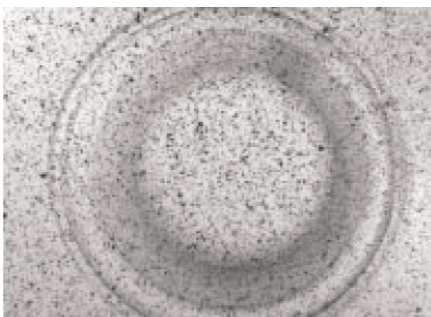


Figure 8. La paire d'images stéréoscopiques acquise par le système

gros avantages de la méthode de stéréo-corrélation, qui fournit une information 3D dense (en chaque pixel), par rapport aux méthodes de grille [2] qui imposent le choix du pas de la grille au moment de son dépôt sur l'objet avant déformation.

### Mesure de déformations de surface par stéréo-corrélation et appariement temporel d'images

Nous illustrons ici l'application de la technique de stéréo-corrélation pour l'obtention du champ de déplacements/déformations sur une tôle mince emboutie.

La surface de la tôle est d'abord préparée par pulvérisation de peinture blanche puis noire de manière à créer une texture de surface convenable pour la corrélation. Il est à noter que cette opération prend à peine quelques minutes ce qui est un gros avantage par rapport aux méthodes utilisant des grilles [2] qui sont beaucoup plus délicates à déposer.

Une paire d'images stéréoscopiques du flan avant emboutissage est acquise (figure 10), la pièce est emboutie et une deuxième paire d'images stéréoscopiques de la pièce emboutie est acquise (figure 11).

En appliquant la technique décrite sur la figure 4b, on obtient le champ de déplacements 3D.

Ce champ de déplacements est calculé à partir des deux formes 3D du flan et de l'embouti obtenues par stéréo-corrélation (figure 12).

### Analyse de l'expérience

L'expérience illustrée par les figures 10 à 12 correspond à l'emboutissage d'une tôle en aluminium en utilisant un contre-flan en acier percé en son centre de façon à localiser les contraintes au centre du flan (c'est-à-dire au sommet de l'embouti). On peut constater sur la reconstruction 3D de la pièce emboutie (figure 12) une trace au sommet de l'embouti qui correspond au marquage du contre-flan, ce qui donne une indication sur la précision de numérisation 3D de la méthode.

Par ailleurs, on peut également constater sur les figures 11 et 12 que l'embouti étudié présente des défauts de formage (la forme obtenue n'est pas hémisphérique). Nous avons pris cet embouti comme exemple

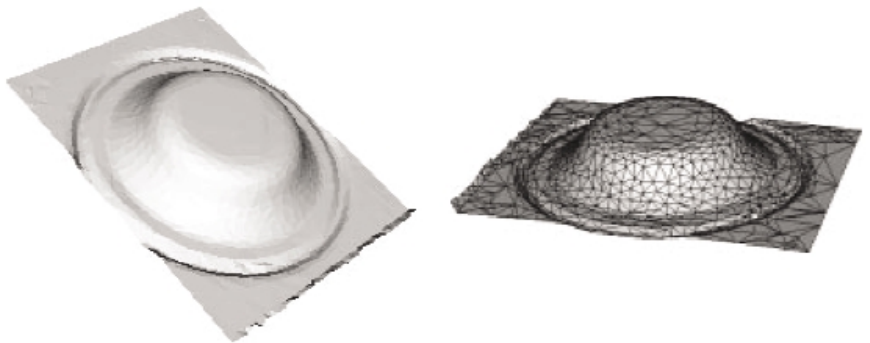


Figure 9. Reconstruction de la forme 3D de la pièce emboutie

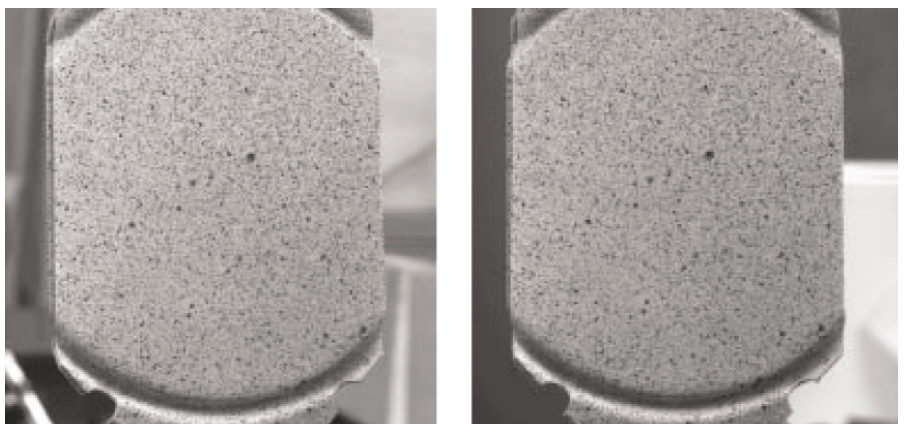


Figure 10. La paire d'images stéréoscopiques du flan avant emboutissage

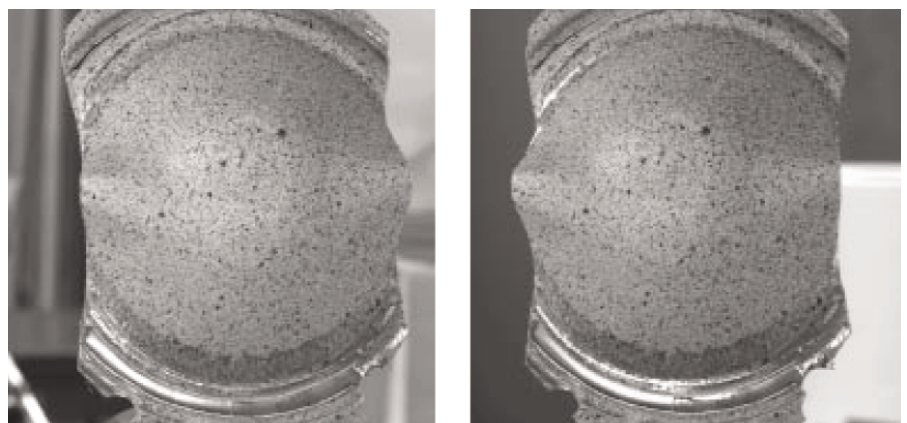


Figure 11. La paire d'images stéréoscopiques de la pièce emboutie

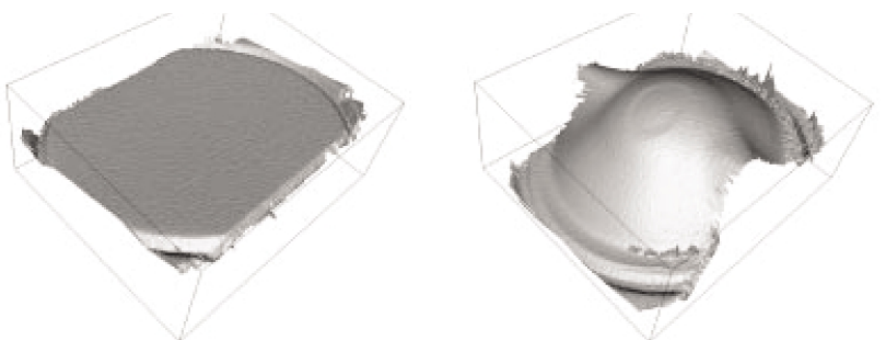


Figure 12. Forme 3D du flan avant emboutissage (à gauche) et de la pièce emboutie (à droite) calculées à partir des paires d'images des figures 10 et 11.



car il correspond à un cas particulièrement critique pour la stéréo-corrélation : la surface présente de fortes pentes qui conduisent à de fortes distorsions perspectives des motifs à corrélérer dans les images. La qualité de la reconstruction 3D finalement obtenue est due à l'utilisation de domaines de corrélation déformables qui s'adaptent localement à la courbure et à l'orientation de la surface [1].

À titre d'exemple, la *figure 13* montre un autre résultat de reconstruction 3D dense obtenu sur un second embouti, avec notamment un zoom sur le sommet de l'embouti

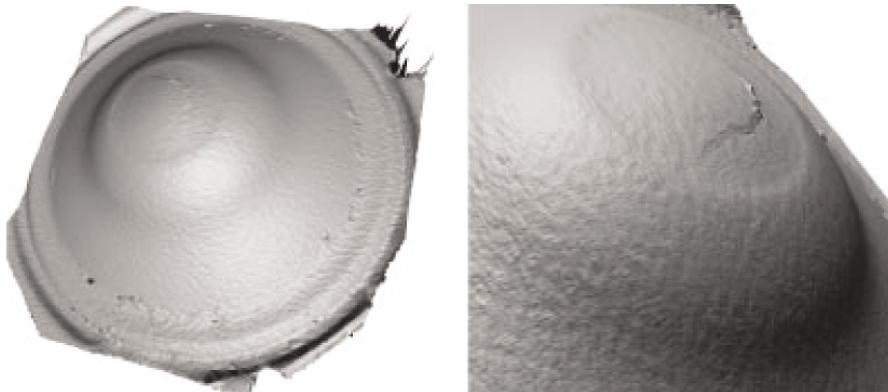


Figure 13. Reconstruction 3D d'un second embouti. On peut observer la marque circulaire du contre-flan et la rupture de la tôle au sommet de l'embouti

pour apprécier la finesse avec laquelle la trace du contre-flan en acier est détectée, ainsi que la zone de rupture de la tôle.

À partir du champ de déplacements obtenu par la technique décrite sur la *figure 4b*, il est possible de calculer le champ de déformations de surface. La *figure 14* montre un maillage triangulaire dont les noeuds ont été appariés dans les deux paires d'images stéréoscopiques. Ce maillage comporte 3 000 points et 6 000 triangles dont les côtés ont une longueur d'environ 10 pixels. La *figure 15* montre les valeurs des déformations principales maximales calculées avec

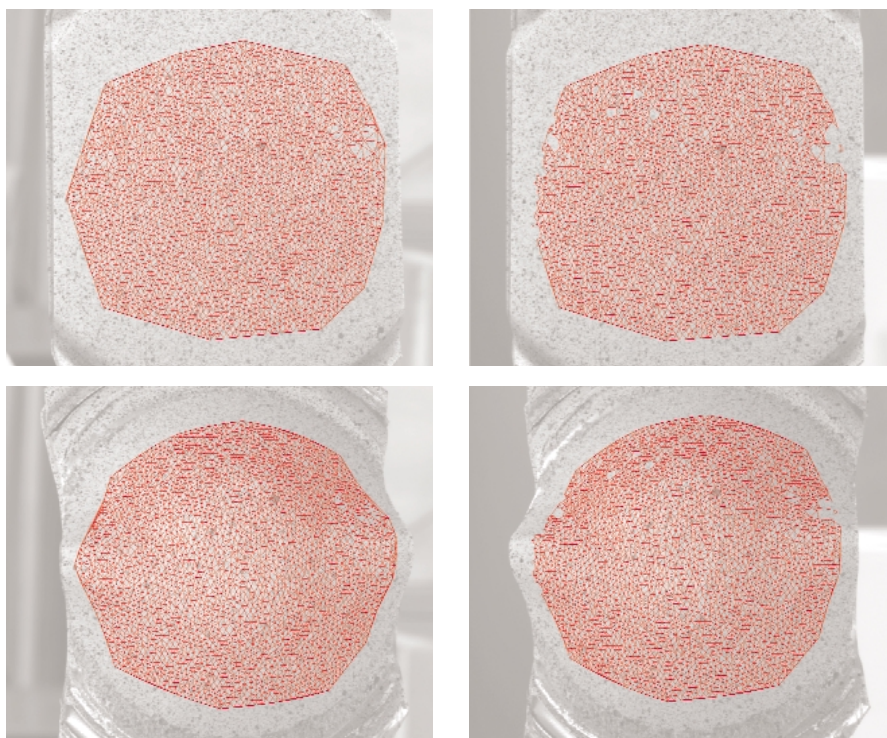


Figure 14. Suivi des noeuds d'un maillage triangulaire par stéréo-corrélation et suivi temporel de pixels. Le maillage a été initialement défini dans l'image gauche de la paire stéréoscopique initiale (images du haut). Ce maillage comporte 3000 noeuds et 6000 triangles d'environ 10 pixels de côté

le logiciel ABAQUS™ avec une précision de l'ordre de 0,1 % (compte tenu de la taille du maillage choisi). On peut y observer une déformation maximale d'environ 25 %, localisée au sommet de l'embouti, ce qui était prévisible du fait de l'utilisation d'un contre-flan percé en son centre.

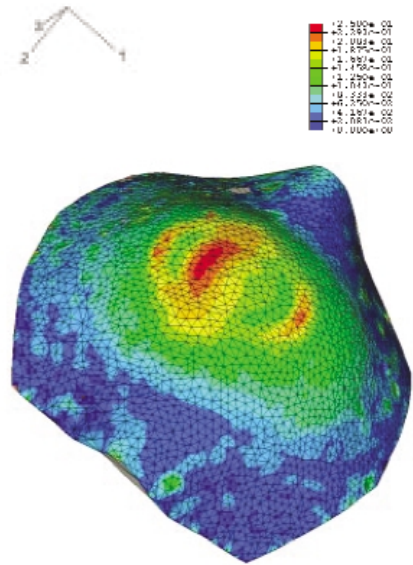


Figure 15. Champ des déformations principales maximales de la tôle mince emboutie

## Membranes en élastomère soufflées

Les *figures 16 à 19* illustrent l'application de la technique de stéréo-corrélation pour l'obtention du champ de déplacements 3D sur une membrane en élastomère en train de gonfler ainsi que la forme 3D de la membrane à chacun des instants d'acquisition. La surface de la membrane a été préalablement texturée par dépôt d'un mouchetis de peinture.

Il est à noter que dans le cas de l'emboutissage les déformations à mesurer sont de l'ordre de quelques % (on parle de petites déformations), alors que dans le cas des polymères, les déformations peuvent atteindre plusieurs centaines de %. Dans ce dernier cas, on enregistre une séquence d'images avec une fréquence garantissant que la déformation entre chaque prise de vue reste dans la limite des déformations mesurables par corrélation.

La *figure 16* montre quatre images (numéros 1, 3, 5 et 6) extraites d'une séquence de

six images acquises par la caméra gauche du capteur de vision stéréoscopique (bien entendu, une séquence de six images a également été acquise simultanément par la caméra droite).

Nous avons appliqué la méthode d'appariement temporel (tracking) pour suivre dans le temps un ensemble de points répartis sur une grille virtuelle. Sur la *figure 17*, on montre le chemin suivi par chacun des points de la première ligne de la grille. Sur la *figure 18*, on montre la grille initiale déposée virtuellement sur la première image de la séquence et la grille obtenue par tracking dans la dernière (sixième image).

En utilisant la technique décrite sur la *figure 4b* (à noter que dans le cas présent, on traite 6 paires d'images stéréoscopiques et non pas simplement 2 paires comme dans le cas de l'emboutissage), on peut calculer la reconstruction 3D correspondant à chacune des vues de la membrane en élastomère, puis le champ de déplacements 3D (*figure 19*).

## Béton renforcé de fibres métalliques

Nous avons réalisé un essai de traction sur une éprouvette parallélépipédique en béton renforcé de fibres métalliques pré-entallée équipée de deux extensomètres mécaniques placés sur deux faces opposées de l'éprouvette

La stéréovision a été utilisée pour mesurer l'orientation 3D des fibres présentes sur le faciès de rupture obtenu après rupture de l'éprouvette (*figure 20b*) [5].

La technique de stéréo-corrélation a été utilisée pour mesurer en cours d'essai le champ de déplacements/déformations au voisinage de la pré-fissure.

Nous avons acquis une séquence de paires d'images stéréoscopiques pendant l'essai, en mémorisant pour chaque paire la charge appliquée et les valeurs des déplacements mesurés par les extensomètres mécaniques. Par stéréo-corrélation, nous avons mesuré le déplacement 3D d'un certain nombre de points (une centaine de couples) répartis de part et d'autre de la

fissure (extensomètres virtuels). La *figure 21* montre les couples de points dans la première image gauche et dans la dernière image gauche de la séquence.

Dans cette application, l'utilisation de la stéréo-corrélation a permis d'obtenir sans contact le champ de déplacements 3D d'une centaine de points répartis à la surface de l'éprouvette. Les mesures ont été validées par comparaison avec les valeurs fournies par les extensomètres mécaniques (*figure 22*).

Outre la densité des mesures de déplacements fournies, le grand nombre d'extensomètres virtuels a permis de mettre en évidence que le mode de sollicitation en traction introduisait une flexion parasite. La mesure 3D par stéréovision a permis de quantifier cette part de flexion sans avoir recours à quatre extensomètres mécaniques.

Il est à noter que la texture naturelle du béton se prête parfaitement à la corrélation d'images si bien qu'aucune préparation de la surface de l'éprouvette n'a été nécessaire.

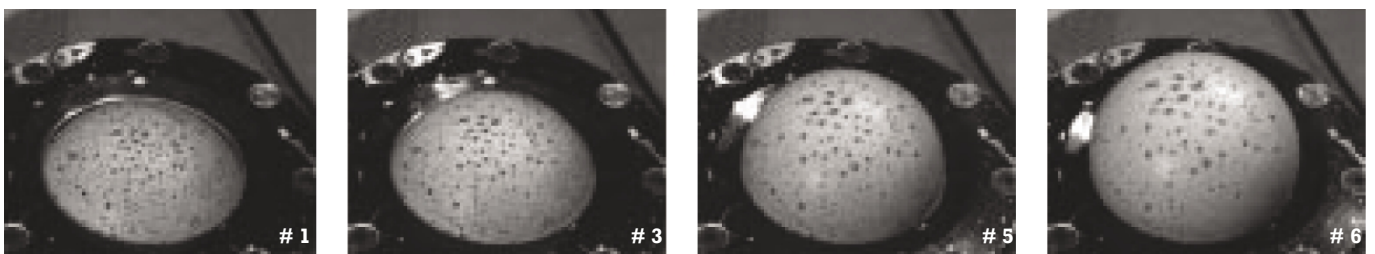


Figure 16. Quatre images extraites d'une séquence de six images

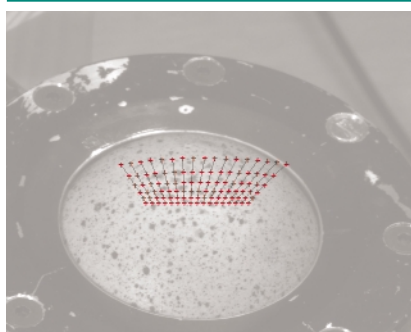


Figure 17. Nous avons suivi une ligne de points à travers les six images de la séquence. Le résultat est affiché en surimpression de la première image.

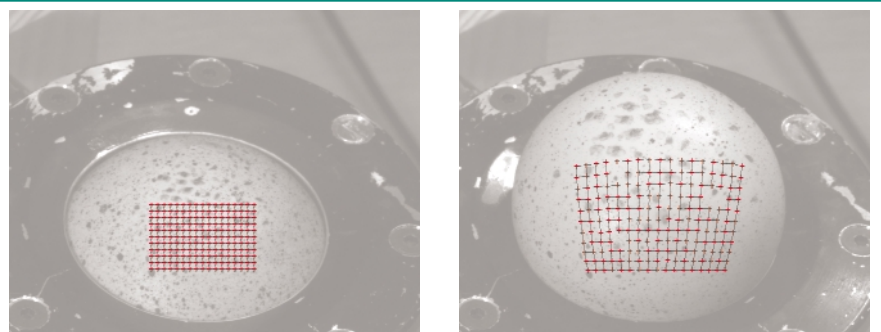


Figure 18. Appariement temporel d'une grille virtuelle entre la première et la dernière image de la séquence

Figure 19. Reconstruction 3D de la membrane en élastomère (# 1 et # 4) et champ de déplacements 3D correspondant

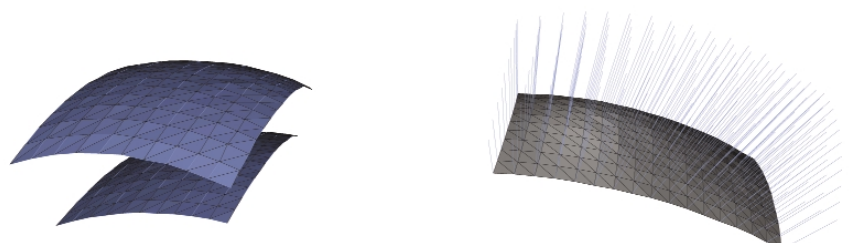




Figure 20. Une éprouvette en béton renforcée de fibres métalliques: (a) avant l'essai de traction ; (b) après rupture

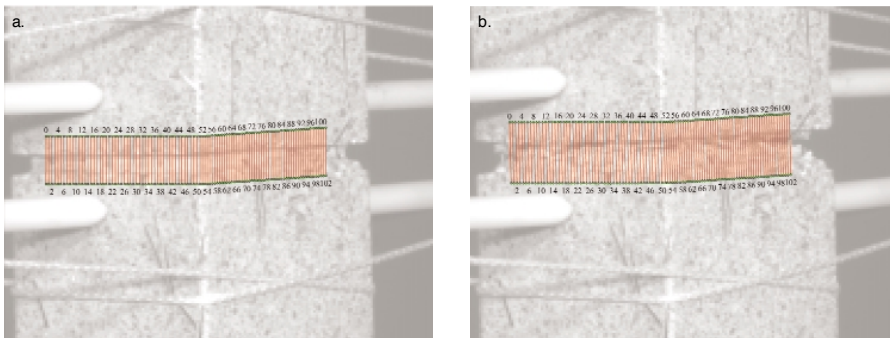


Figure 21. Extensomètres virtuels et extensomètres mécaniques (tiges blanches) : (a) au début de l'essai de traction ; (b) en fin d'essai

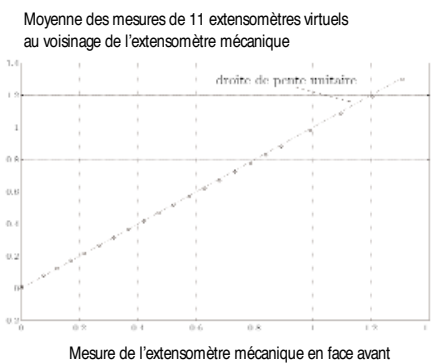


Figure 22. Comparaison des déplacements mesurés par l'extensomètre mécanique et par stéréovision

## Perspectives

La photomécanique est une discipline relativement récente qui s'intéresse à l'application des techniques de mesure optiques pour l'étude du comportement des matériaux et des structures.

La technique de stéréo-corrélation présentée ici est une de ces techniques : les améliorations apportées permettent aujourd'hui d'envisager son utilisation pour des mesures 3D précises dans le domaine de la mécanique expérimentale.

Plusieurs systèmes commerciaux fonctionnent suivant un principe identique à celui décrit dans cet article même si les al-

gorithmes mis en œuvre dans ces systèmes ne sont pas strictement identiques à ceux décrits ici : on peut citer par exemple Vic3D (Correlated Solutions, Inc.), ARAMIS (GOM mbH), ASAME (CamSys, Inc.), 3D-StrainMaster (La Vision GmbH) ou PHAST (Geodelta).

## Bibliographie

- [1] Garcia D. Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images. Thèse de l'Institut national polytechnique de Toulouse, 21 décembre 2001.
- [2] Orteu JI. Mesure 3D de formes et de déformations par stéréovision. Techniques de l'Ingénieur. Traité Génie Mécanique. Travail des matériaux, No BM 7015, Avril 2002.
- [3] Faugeras OD. Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint. The MIT Press, 1993.
- [4] Doumalin P. Microextensométrie locale par corrélation d'images numériques. Thèse de l'École polytechnique, 29 juin 2000.
- [5] Garcia D, Orteu JI, Cutard T, Cailleux E. Application of Stereovision to the Mechanical Characterization of Refractory Ceramics Reinforced with Metallic Fibers. SEM Conference on Experimental and Applied Mechanics, Milwaukee, Wisconsin (USA), 10-12 June 2002.
- [6] Horst A. Beyer. Digital Photogrammetry in Industrial Applications. IAPRS, Vol. 30, Part 5W1, ISPRS Intercommission Workshop "From Pixels to Sequences", Zurich, March 22-24, 1995:373-8.