

## ESSAIS MÉCANIQUES

# Mesure de déformations : pensez à la corrélation d'images numériques

▼ La jauge de contraintes est longtemps restée une méthode de choix pour mesurer les déformations à la surface des matériaux. Mais l'émergence des techniques optiques a changé la donne. Ces dernières années, plusieurs d'entre elles ont quitté les laboratoires de recherche pour faire peu à peu leurs preuves dans l'industrie. C'est le cas en particulier de la corrélation d'images numériques. La méthode offre une vision globale et sans contact des déformations à la surface de tout type de matériau. Mais ici, pas de laser ou de montage optique complexe : pour corréler des images, il suffit d'utiliser deux caméras numériques et un logiciel d'analyse...

Ce ne sont pas les organisateurs du colloque annuel "Contrôles et mesures optiques pour l'industrie" (dont la dernière édition s'est tenue en novembre à Nantes) qui vous diront le contraire. Depuis quelque temps, ils observent une tendance très nette : après avoir fait leurs preuves dans les laboratoires de recherche, les méthodes optiques connaissent un essor considérable dans le domaine industriel. Les lasers et les caméras concurrents désormais les traditionnels capteurs

à contact dans une très large variété d'applications, de la mesure de distances ou de rugosité à la mesure 3D, en passant par la modélisation 3D ou l'analyse vibratoire.

La mesure des déformations à la surface des matériaux n'échappe pas à la règle. Pour étudier le comportement d'un matériau pendant sa durée de vie, anticiper ses défaillances ou connaître son mode de vieillissement, on le

soumet traditionnellement à toute une série d'essais mécaniques (traction, compression ou torsion). En utilisant des éprouvettes dont la forme et les dimensions sont normalisées, on parvient à déterminer de nombreux paramètres qui caractérisent le comportement du matériau : sa déformation élastique en fonction de la force qui lui est appliquée, son module d'Young, sa limite élastique, etc. La mesure des déformations est le plus souvent réalisée à l'aide de jauges de contraintes. Les jauges, rappelons-le, sont constituées d'une grille formée par un conducteur imprimé ou collé sur un support isolant, lui-même collé sur le matériau étudié. Lorsque celui-ci se déforme, la longueur du conducteur varie, et avec elle la valeur de la résistance électrique obtenue à ses bornes. Il suffit alors de mesurer cette résistance pour connaître l'élongation du conducteur, et donc la déformation du matériau (ou la contrainte qui lui est appliquée).

La méthode est fiable et précise, mais elle souffre de plusieurs inconvénients. Il n'est pas possible, par exemple, de connaître le comportement de la matière sur tous les points de la surface du matériau en essai. De plus, les jauges de contraintes que l'on utilise pour mesurer localement les déformations occupent une surface importante, et leur

présence est susceptible de fausser les mesures. Enfin, leur mise en œuvre peut être longue et délicate, surtout lorsqu'il s'agit de coller un grand nombre de jauges à des endroits bien précis, et de relier chacune d'entre elles à l'électronique de mesure.

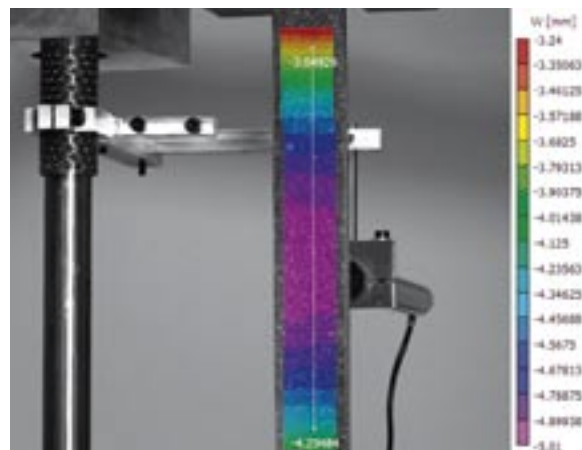
Conscients de ces limites, plusieurs laboratoires de recherche universitaires se sont penchés sur les possibilités des méthodes optiques dans la mesure de déformations. C'est ainsi qu'est née la corrélation d'images numériques. Plusieurs fournisseurs l'ont ensuite ajoutée à leur catalogue. Il faut dire que la méthode ne manque pas d'attrait. Elle offre tout d'abord une vision globale (en tout point) et sans contact du champ de déformations à la surface de tout type de matériau. Les mesures sont réalisables sur des pièces allant de quelques millimètres carrés à plusieurs mètres carrés, ce qui explique que l'on utilise la corrélation d'images aussi bien pour mesurer la déformation des dentures de micro-engrenages que pour simuler l'effondrement d'un sol. Si la méthode est longtemps restée pénalisée par des temps de calcul parfois longs, elle a su tirer parti des progrès de l'informatique. Désormais, l'obtention d'un calcul de corrélation sur une image ne prend plus que quelques secondes, et les dernières évolutions de logiciels auto-

### L'essentiel

- ▶ La corrélation d'images numériques est une méthode simple et efficace afin de mesurer les déformations à la surface des matériaux.
- ▶ Les dernières générations de logiciels offrent la possibilité de visualiser les déformations en temps réel.
- ▶ Le champ d'applications de la méthode s'étend à la mesure de phénomènes transitoires ou périodiques.



La corrélation d'images requiert un matériel simple : deux caméras numériques et un logiciel d'analyse suffisent.



En associant une caméra numérique à un logiciel de traitement d'images, on réalise un extensomètre optique. Ce montage est utilisé pour visualiser et mesurer les déplacements 2D.

risent même l'observation des champs de déformations en temps réel, en les superposant aux images de l'objet observé.

## Un montage simple

La corrélation d'images numériques est basée sur la mesure de déplacements en 3D des points d'une structure filmée par deux caméras numériques. Le principe est très intuitif. Pour estimer une déformation, la première idée qui vient à l'esprit consiste à "isoler" un point particulier sur un matériau, et à suivre son déplacement dans le temps (de son état de repos à un état de contrainte) au moyen d'une série de photographies. Dans un essai de traction sur éprouvette, c'est une caméra numérique qui est chargée de prendre ces "photographies" à une fréquence correspondant au déplacement minimum que l'on souhaite visualiser. En associant à cette caméra un logiciel de traitement d'images adapté, on réalise alors un extensomètre optique.

En poursuivant cette idée, on comprend que le suivi d'un ensemble de points conduise à la mesure d'un champ de déplacement. Il suffit de pouvoir identifier chaque point à partir de la configuration spécifique que présente son voisinage, et de suivre celui-ci de l'état de repos à l'état de contrainte. Dans le cas d'images numériques, c'est la variation du niveau de gris de chacun des pixels du voisinage (appelé fenêtre de corrélation ou subset) qui est prise en compte. Pour retrouver la forme initiale de la fenêtre de corrélation au fur et à mesure de la déformation du matériau, un algorithme de calcul applique

au voisinage du point un coefficient de corrélation. L'observation de ce coefficient permet alors de suivre le déplacement des différents points durant la déformation. Au final, le champ de déformation est obtenu grâce à un calcul matriciel (par dérivation numérique des déplacements). Contrairement au déplacement, la déformation est un nombre sans dimension. Elle est souvent exprimée en pourcents ou en microdéformations (*microstrains*). En fait, il n'y a rien de spécifiquement optique dans une telle méthode. Comme dans le cas des jauges de contraintes, c'est un phénomène géométrique (le fait qu'un ensemble de points se déforme en même temps que le substrat) qui conduit à la mesure.

Ce procédé, basé sur une seule caméra numérique, ne conduit au déplacement du point observé que si ce dernier reste dans le plan de mesure. Avec une telle vision de l'objet (que l'on qualifie de monoculaire ou

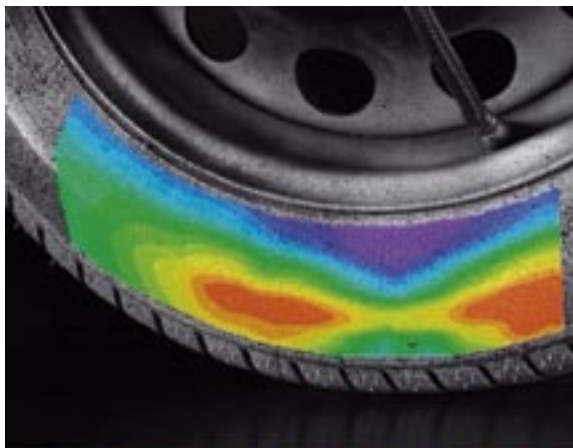
cyclopéenne), il n'est pas possible de déterminer la taille de la pièce ou d'obtenir une visualisation en trois dimensions. Sans compter qu'un mouvement hors du plan de mesure peut être confondu avec une déformation... Pour passer à une vision binoculaire de l'objet, on utilise alors une deuxième caméra : c'est le principe de la **stéréocorrélation**. A l'image de notre cerveau qui reconstitue l'espace qui nous entoure à partir de deux images planes projetées au fond des yeux, deux caméras numériques offrent une visualisation 3D de la scène observée. Grâce aux paires d'images obtenues, il est possible de suivre le déplacement des points (suivant le même principe qu'en 2D) et d'aboutir par calcul aux déformations de l'objet en 3D. Bien sûr, seuls les points communs aux deux images peuvent être traités par le principe de corrélation, et donc faire partie de la représentation 3D.

Le premier intérêt d'un tel montage, c'est sa simplicité. Contrairement aux autres techniques optiques basées sur un principe interférométrique (telles que l'interférométrie de Speckle ou la shearographie), il n'est pas nécessaire d'utiliser un laser et de se pré- →

## Un spécialiste de la mesure optique

La société *Limess Messtechnik and Software GmbH* a été fondée en 1998 en partenariat avec l'*Université technique de Karlsruhe*. Elle développe des systèmes de mesure optique pour une grande variété d'applications : mesure de déformations, analyse de vibrations, de mouvements, essais non destructifs, numérisation 3D, contrôle de produc-

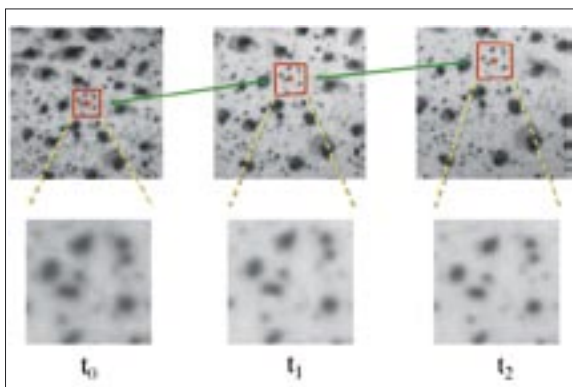
tion... Ses produits sont basés sur les méthodes de corrélation d'images numériques, ainsi que sur des techniques interférométriques (ESPI et shearographie). On trouve aussi des systèmes de "vibrocorrélation" pour l'étude de phénomènes périodiques. *Limess* est représentée en France par *LDS Test & Measurement*, basée à Courtabœuf (91).



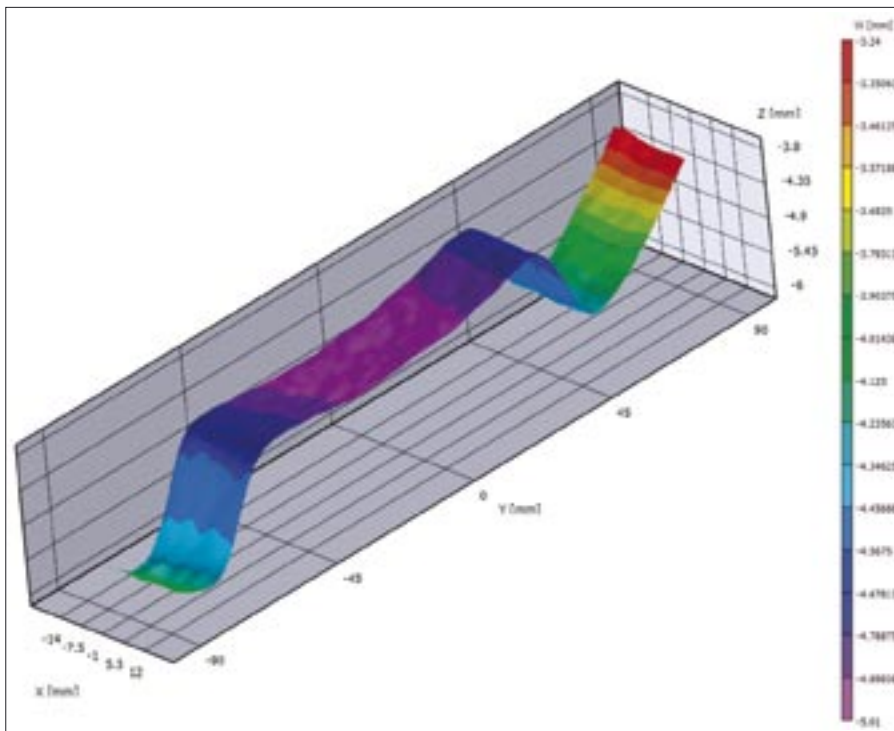
La corrélation d'images offre une vision globale et sans contact des déformations à la surface de tout type de matériau. La plupart du temps, la méthode nécessite de préparer la surface en projetant un mouchetis.

→ occuper de l'alignement ou de la stabilité des différents composants optiques. De même, il n'y a pas à projeter sur l'objet une lumière structurée (contrairement aux méthodes basées sur la projection de franges ou de grilles). Dans le cas de la corrélation d'images numériques, le matériel est simple et moins coûteux puisqu'il suffit d'utiliser deux caméras et un éclairage standard. Tout réside ensuite dans le logiciel de traitement d'images.

Autre avantage de la méthode: sa précision. La résolution spatiale obtenue dépend notamment de la caméra que l'on utilise (bruit de fond, dynamique, etc.), mais il est possible de localiser les différents points pendant leur déformation avec une précision largement inférieure au pixel (jusqu'à  $1/100^{\circ}$  de pixel, soit un déplacement de  $1 \mu\text{m}$  sur une surface de 100 millimètres de côté). Un résultat surprenant puisqu'on pourrait s'attendre à ce que la résolution s'arrête au pixel. Ceci pourrait se vérifier si l'on appariait un pixel de l'image déformée avec un pixel de l'image de référence. Mais ce n'est pas le cas.



Pour corréler des images numériques, il suffit de suivre au cours du temps le déplacement d'un point (que l'on identifie grâce à son voisinage). Les déplacements conduisent ensuite, par calcul, au champ des déformations.



Pour obtenir une visualisation 3D de l'objet, il est nécessaire d'utiliser deux caméras. C'est le principe de la stéréocorrélation. Dans ce cas, on parvient à calculer les déformations hors plan.

Il faut imaginer que le point dont on suit le déplacement peut occuper plusieurs pixels, et que chacun de ces pixels offre une certaine nuance de gris. En qualifiant les pixels en densité de points (autrement dit en densité de nuances de gris), on parvient à localiser les points que l'on observe avec une résolution inférieure au pixel.

## Bien préparer la surface

La mesure de déformations par corrélation d'images demande tout de même un certain nombre de précautions. Dans certains cas, une préparation de la surface est nécessaire. Pour que la mesure soit réalisable, il faut en effet que les images comparées présentent une répartition de points particulière. Les textures aléatoires répondent parfaitement à ces critères. Un certain nombre de matériaux tels que des ciments sont donc utilisables directement, sans préparation. Mais dans d'autres cas, la surface est trop homogène pour réaliser une mesure par corrélation. La plupart du temps, il faut alors projeter une peinture blanche, puis pulvériser un léger voile de peinture noire sur la surface étudiée. On obtient ainsi un mouchetis composé de points plus ou moins gros répartis de manière aléatoire (on parle de répartition stochastique). Le contraste et la texture ainsi créés influent directement sur la qualité de la mesure.

Autre précaution à prendre, étalonner les caméras. Ce n'est qu'à cette condition que

l'on peut obtenir une vision binoculaire de l'objet et réaliser une mesure 3D. L'étalonnage consiste à "faire connaître" au logiciel tous les paramètres du système optique utilisé. Ces paramètres sont mesurables automatiquement en utilisant une mire d'étalonnage spécifique. De 5 à 10 paires d'images de la mire orientées selon différentes positions dans l'espace suffisent au logiciel pour déterminer l'angle entre les deux caméras, la distance focale et la distorsion de l'optique. Le logiciel opère alors dans un repère 3D connu et sans distorsion.

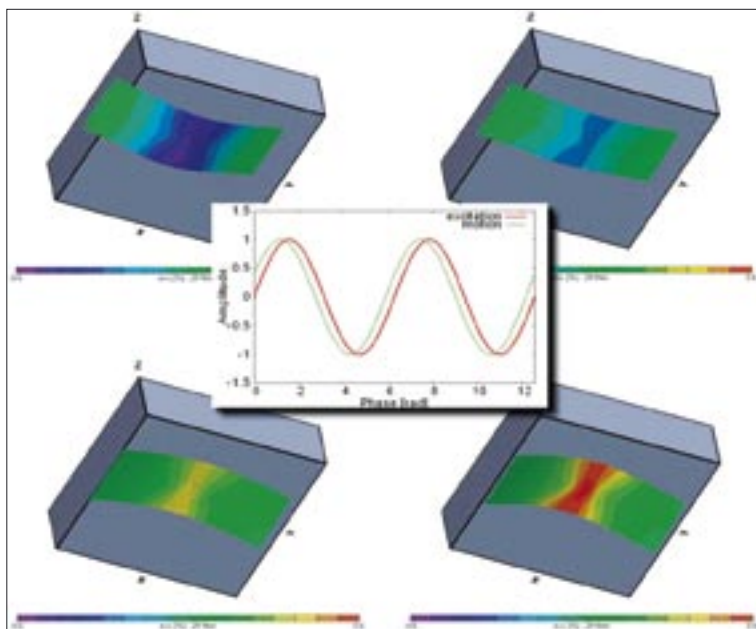
La mesure de déformation par corrélation d'images numériques est une méthode en plein devenir. Elle s'adresse déjà à une très large variété d'applications industrielles: la mesure de déformations ou la détection de fissures sur toutes sortes d'éprouvettes en traction, bien sûr, mais aussi sur des composants peu accessibles aux capteurs traditionnels, ou sur des métaux en compression à très haute température. On l'utilise aussi pour mesurer la déformation de grandes surfaces (mesures de formes sur un mur d'immeuble, déformation sur un bloc de béton, etc.). Suivant le matériel utilisé, il est également possible d'aller plus loin et d'appliquer la méthode à des phénomènes transitoires, ou même périodiques. Les applications "classiques" ne requièrent en effet que des caméras numériques capables de prendre de 10 à 15 images par secondes. Mais en les remplaçant par des caméras rapides (et sous

réserve que le logiciel et la puissance du PC soient adaptés à l'application), on peut avoir accès à une grande variété de phénomènes transitoires: la déformation de l'éclatement d'un capot d'airbag, la propagation d'une

fissure dans une céramique, un essai de traction à très haute vitesse, etc. Les caméras numériques ont aussi conduit au développement de "vidéo stroboscopes numériques" qui offrent la possibilité de décompo-

ser un mouvement périodique rapide en un mouvement lent en utilisant le phénomène bien connu de la stroboscopie. Encore une fois, c'est une idée simple qui entre en application: puisqu'on observe un phénomène périodique, on peut toujours récupérer une image légèrement décalée dans le temps à chaque période du mouvement. Une vibration sinusoïdale à 1 000 Hz, par exemple, produit 1 000 fois le même mouvement chaque seconde. En prenant dix images par seconde, et en les déphasant d'un dixième de milliseconde, par exemple, on obtient un mouvement ralenti virtuel du phénomène. Ces images peuvent être traitées par vidéocorrélation comme des images classiques, pour offrir une visualisation des déformations dynamiques de l'objet observé. Pour cela, il faut bien sûr utiliser des logiciels spécifiques de "vibrocorrélation" alliant les techniques de stroboscopie et de vidéocorrélation. Les résultats obtenus fournissent un complément précieux à l'analyse modale.

**Marie-Line Zani-Demange**  
d'après Henri Gérenton,  
LDS Test & Measurement France



Le champ d'applications de la corrélation d'images s'étend à la mesure de phénomènes transitoires ou périodiques. Pour observer un phénomène périodique, il faut acquérir une image légèrement décalée dans le temps à chaque période du mouvement.

## CODRA