

De la corrélation d'images numériques à l'identification de champs de propriétés

Damien Claire, François Hild, Stéphane Roux

► **To cite this version:**

Damien Claire, François Hild, Stéphane Roux. De la corrélation d'images numériques à l'identification de champs de propriétés. Bulletin de la Société Française de Physique, 2003, 139, pp.29-31. hal-00002926

HAL Id: hal-00002926

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00002926>

Submitted on 21 Sep 2004

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.

De la corrélation d'images numériques à l'identification de champs de propriétés

Damien CLAIRE, François HILD et Stéphane ROUX

LMT-Cachan

ENS de Cachan / CNRS-UMR 8535 / Université Paris 6

61 Avenue Président Wilson, 94235 Cachan Cedex

et

Laboratoire Surface du Verre et Interfaces,

Unité Mixte de Recherche CNRS/Saint-Gobain,

39 Quai Lucien Lefranc, 93303 Aubervilliers Cedex

Introduction

Il est classique de constater que les capacités d'élaboration de matériaux à microstructure contrôlée, associant différentes phases à dessein, sont de plus en plus considérables. Dans le même temps, croissent la volonté ou la nécessité d'appréhender avec précision le comportement des solides sous des sollicitations multiples ou des trajets de chargement variés. Le lien entre ces offre et demande se fait par l'étude du comportement mécanique de ces matériaux, et la modélisation numérique. Dans ce dernier domaine également, la croissance rapide des capacités de calcul numérique permet d'alimenter des codes d'éléments finis avec des descriptions de plus en plus fines du comportement mécanique. Mais dans cette chaîne apparaît un maillon faible qui consiste à mesurer expérimentalement l'ensemble des informations nécessaires à la modélisation, c'est-à-dire la loi de comportement qui sera utilisée dans la modélisation [1]. Il devient en effet impératif de savoir mesurer les paramètres des lois constitutives en enrichissant la finesse de la description, soit de façon globale, soit même localement dans, par exemple, les différentes phases du matériau. Sous cette pression, et en profitant à la fois de savoir-faire issus de la mécanique des fluides et de moyens techniques d'acquisition d'image de plus en plus performants et de mise en oeuvre facile, se produit en ce moment une révolution majeure dans le domaine des essais mécaniques : *l'avènement des mesures de champs cinématiques*.

Un essai mécanique consiste à appliquer des efforts sur une éprouvette, et à mesurer des déplacements, ou inversement. Cependant, pour que ces mesures soient exploitables, tout l'art consiste habituellement à se placer dans une géométrie telle que les contraintes et déformations soient homogènes [1] ou connues de façon simple (par exemple pour un essai de flexion). Ceci permet alors un passage aisé des quantités

pertinentes locales (contraintes et déformations) à des mesures intégrales de ces grandeurs (effort et déplacement) et de pouvoir les appréhender sur des domaines communs avec fiabilité. (Ce résumé brutal de la philosophie des essais mécaniques évacue des cas importants comme les mesures de dureté par le poinçonnement local d'un indenteur "rigide", mais le caractère inhomogène de ce type d'essai est justement ce qui interdit de remonter à des caractérisations fines du comportement.) Les déformations sont classiquement estimées soit globalement comme évoqué ci-dessus, soit à une échelle plus locale tant que le type d'essai et le matériau le permettent, par des extensomètres ou des jauges de déformation comme une rosette collée sur une face de l'éprouvette. Il s'agit alors d'une mesure locale représentative de la zone où la jauge est placée.

Or il est des situations où, en dépit de la géométrie choisie, la déformation a un caractère hétérogène, comme par exemple lors de la localisation de la déformation lorsque la loi de comportement est adoucissante (i.e., une baisse de contrainte est observée lors d'un incrément de déformation). Dans ce cas, la mesure globale n'est pas représentative de l'ensemble du solide et il est alors pratiquement impossible de relier contrainte et déformation de manière intrinsèque.

L'arrivée sur le marché de caméras CCD ou d'appareils de photos numériques permet aujourd'hui l'acquisition d'images de haute qualité, tant en terme de définition spatiale qu'en dynamique de niveaux de gris. L'utilisation d'optiques adaptées, (microscope à grande distance focale, zoom, objectifs photographiques ou télécentriques, ...) permet de couvrir de larges gammes d'échelle depuis quelques micromètres pour un matériau à grain fin jusqu'à un ouvrage de génie civil. Si l'on étend les analyses développées ci-dessus à des prises de vue par satellites, on peut aborder le domaine de la géophysique. À l'opposé, les techniques de microscopie de champ proche (e.g., AFM, STM) permettent d'envisager des transpositions à l'échelle nanométrique. À partir d'imagerie rapide, on peut également aborder le domaine des essais dynamiques rapides (chocs). De plus, ces prises d'image sont par nature non-intrusives, elles ne nécessitent donc aucune préparation spécifique des éprouvettes. Elles s'adaptent également à des essais réalisés dans des ambiances inhospitalières (e.g., très haute ou très basse température, humidité, corrosion).

L'exploitation quantitative de différentes images correspondant à un état de référence et un état déformé permet par des techniques de corrélation d'effectuer des mesures de *champs de déplacement*, ainsi en chaque point de l'image on accède au déplacement de ce point entre les deux états référence et déformé. Ces mesures donnent donc accès par dérivation au champ de déformation (et de rotation). Potentiellement, on voit donc que l'exploitation du champ de déplacement obtenu à partir de ces images permet d'une part de garantir que l'hypothèse d'homogénéité sur les essais classiques est bien fondée et d'autre part de mieux apprécier les limites de validité d'un protocole d'essai. Mais surtout, ces outils permettent d'ouvrir le domaine des essais mécaniques à des sollicitations inhomogènes ou à des matériaux hétérogènes (multiphasés). Ce dernier point ne constitue pas une véritable nouveauté : en effet, depuis quelques années des analyses très fines de champs de déplacement résolus spatialement ont été effectuées, mais elles demandaient un soin très particulier et un temps d'analyse considérable. La véritable révolution tient

donc plutôt dans la banalisation que l'on est en droit d'attendre du développement de ces nouveaux outils.

Dans ce qui suit, on présente tout d'abord le principe de mesure du champ de déplacement par corrélation d'images numériques. On a ainsi accès, au cours de l'essai, à une information cinématique spatio-temporelle. À partir de ces mesures, il est notamment possible de déterminer un champ de propriétés élastiques dont l'évolution est une signature de dégradations (e.g., fissuration dans un matériau composite).

1 Mesure du champ de déplacement

Nous avons mentionné très brièvement ci-dessus que les champs de déplacement étaient évalués par comparaison entre deux images, l'une de l'état initial, l'autre de l'état déformé, mais en quoi consiste donc cette "comparaison" ?

L'idée de base est assez simple. Nous savons presque d'instinct faire cette démarche à l'oeil nu. Il s'agit d'identifier un détail spécifique sur une des images et de chercher sa trace sur la seconde image. Une fois cette reconnaissance effectuée, nous pouvons attribuer à ce détail un déplacement. Si nous renouvelons l'opération sur d'autres "détails", nous sommes en mesure de construire un tel champ de déplacement, tout au moins défini sur un ensemble discret de points. À partir d'images numériques, l'idée de l'exploitation quantitative est très similaire : le détail peut être quelconque à partir du moment où il ne s'agit pas d'une zone de couleur uniforme. Par "détail", nous entendons une "imagerie" extraite de l'image de référence que nous allons ensuite comparer à des zones de même taille dans l'image déformée, et ce pour différents positionnements, puis retenir celui qui donne le meilleur recouvrement entre ces deux "images" (figure 1). La comparaison est effectuée en mesurant leur intercorrélation, opération qui s'effectue de manière très efficace en utilisant des transformées de Fourier rapides. Ce principe de base est le même que celui utilisé en mécanique des fluides pour le même but (i.e., mesure de champs de vitesse) par vélocimétrie par imagerie de particules ou P.I.V. pour retenir l'acronyme anglais. Cependant quelques spécificités l'en distinguent lorsque l'on rentre dans le détail de l'utilisation.

Tout d'abord la texture de l'image est ce qui conditionne la qualité de l'analyse. Il s'agit des détails sur lequel s'accroche l'identification. Dans les cas les plus courants, il suffit de travailler avec l'état de surface courant de l'éprouvette. Cependant, si celui-ci est trop homogène, il est souvent possible de venir disposer à la surface un mouchetis de peinture (un "dripping" à la Pollock !) pour enrichir la texture naturelle.

Comme nous l'avons déjà mentionné, pour une partie des essais mécaniques classiques, on s'efforce de réaliser un état de contrainte et de déformation homogène. Dans ce cas, le champ à identifier est particulièrement simple. Ceci permet de tra-

vaiquer sur des tailles “d’images” importantes, et donc de déterminer des champs de déplacement avec une résolution très sensiblement inférieure à la taille d’un pixel. On peut en effet atteindre des précisions sur le déplacement relatif de l’ordre de 10^{-2} à 10^{-3} pixel si les conditions de prise d’image sont favorables.

Dans d’autres cas, nous aurons à apparier des images qui sont fortement déformées l’une par rapport à l’autre. Alors l’identification peut être difficile. Nous avons développé une stratégie de mesure de déplacement multi-échelle qui combine des *filtrages* pour apprécier sur une image “régularisée” des amplitudes de déplacement importantes puis une *interpolation* du champ de déplacement grossier précédemment estimé, pour venir prédéterminer le positionnement (et éventuellement la déformation) des images avec une bonne précision, puis une *réintroduction* progressive des détails les plus fins des images, pour affiner la détermination finale. Cette stratégie déclinée en appréciant l’erreur commise pour évaluer sa performance locale, et en effectuant des aller et retours entre différentes échelles de description, permet d’atteindre des niveaux de robustesse, de résolution et de fiabilité de la méthode d’analyse très intéressants [2].

Lorsque le champ de déplacement recherché est un peu plus tourmenté, l’analyse par translation rigide d’images peut être insuffisante. Il est alors possible de rechercher directement un champ de déplacement sous une forme fonctionnelle simple comme une décomposition en série de Fourier, et marier la détermination des composantes spectrales du déplacement à l’analyse d’intercorrélation de la texture de manière “naturelle” [2].

À l’autre extrémité de la chaîne, il est tout à fait envisageable aujourd’hui, de ne pas rechercher une précision optimale, mais plutôt une détermination grossière globale mais extrêmement rapide si l’on pense à la conduite en temps réel d’un essai sans autres mesures extensométriques. Des dispositifs commerciaux, utilisant de marqueurs spécifiques sur l’éprouvette, commencent aujourd’hui à être disponibles pour des déterminations globales de la déformation. Il n’y a guère d’obstacle à étendre ce premier pas vers des analyses par intercorrélation plus riches et surtout mieux résolues.

Parmi les développements qui sont envisagés aujourd’hui, on peut citer l’analyse de champs de déplacement à trois dimensions à partir d’imagerie 3D par tomographie des rayons X. Le côté spectaculaire l’emporte ici sur la difficulté technique, car les mêmes idées sont facilement transposables à trois dimensions sous réserve bien entendu que la “texture” soit suffisamment riche. Toujours dans l’esprit d’enrichir l’analyse vers la troisième dimension, il est aussi possible de travailler sur des surfaces non planes par stéréo-corrélation, ou encore de combiner cette technique à une projection de franges.

2 Mesure de champ de propriétés

Un des avantages majeurs de l'analyse de champs de déplacement consiste en l'exploitation directe que l'on peut souhaiter faire de ces mesures au-delà des simples déplacements pour identifier les propriétés élastiques locales. En effet, un solide, fut-il hétérogène, ne peut pas donner n'importe quel champ de déplacement à sa surface. Ces champs possèdent des propriétés dont l'exploitation peut donner des informations sur l'élasticité locale. Cela est particulièrement vrai si l'on a des idées un tant soit peu précises sur son comportement. Par exemple, si l'on image la surface d'un matériau endommageant (i.e., subissant une micro-fissuration contrôlée qui affaiblit progressivement les propriétés élastiques du milieu), l'analyse du champ de déplacement peut permettre de déterminer (à une constante multiplicative près) le champ d'endommagement si ce dernier est isotrope sans aucune hypothèse *a priori* sur le chargement) [3]. La constante multiplicative manquante peut alors être identifiée par une mesure d'effort global.

Si l'on formule précisément le problème on se rend compte qu'il s'agit en fait d'un problème mal posé, au sens où un seul champ de déplacement ne peut pas fournir suffisamment d'information pour résoudre en tout point les propriétés élastiques. Cependant, si l'on impose des hypothèses additionnelles, alors le problème peut devenir bien posé, et l'analyse inverse du problème abordée. Ces hypothèses supplémentaires peuvent porter sur le type de loi de comportement, ou encore sur la régularité des champs de propriétés. Le même type d'analyse s'étend également au cas de la thermique, où une simple carte de température (pour un milieu plan) dans un domaine sans source permet d'apprécier les conductivités locales [3].

3 Exemple : essai biaxial sur composite

Pour illustrer la méthode, considérons un essai biaxial sur une éprouvette en forme de croix. L'effort appliqué dans les deux directions est identique et égal à F . Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 2. L'éprouvette est un composite constitué d'une matrice vinylester renforcée par des fibres de verre réparties de façon homogène et isotrope. La surface centrale de l'éprouvette est observée par une caméra CCD de résolution 1 Mpixel. L'essai est conduit jusqu'à la ruine de la structure qui se produit par une fissuration initiée dans la partie supérieure gauche de l'éprouvette.

La figure 1-a montre une imagerie extraite de l'image de référence et sa position avant et après appariement (figure 1-b). Après analyse, on obtient le vecteur déplacement associé à la zone d'étude. La figure 3 montre l'ensemble du champ de déplacement identifié pour l'éprouvette lorsque l'effort $F = 11$ kN est proche de la rupture (se produisant lorsque $F = 11,1$ kN).

Lors de l'analyse de champ de propriétés, nous supposons un comportement en-

dommageant, caractérisé par des modules élastiques E variables localement lors de tout incrément de sollicitation. Ce champ est donc défini entre chaque prise de vue consécutive car il diminue sous sollicitations croissantes (figure 4). Nous observons après analyse qu'au voisinage des congès de l'éprouvette (zones de concentration de déformations et de contraintes) la perte de raideur se développe plus vite qu'au cœur de l'éprouvette, puis se concentre dans le coin supérieur gauche qui va donner lieu à la fissuration (lisible sur la figure 3).

4 Conclusion

Le développement de ces nouvelles techniques d'analyse d'image ne vient pas qu'améliorer la productivité ou l'efficacité du mécanicien devant sa machine d'essai. Il remet en cause la conception même des essais. En effet, nous avons vu que l'homogénéité de l'essai ou sa simplicité n'est plus un impératif, et qu'en conséquence des essais inhomogènes peuvent être imaginés, non pour le plaisir d'une complication additionnelle, mais par souci d'efficacité, de manière à pouvoir appréhender sur un seul essai le plus d'information utile sur le comportement du milieu. Ceci n'est pas une simple vue de l'esprit car une sollicitation inhomogène donne beaucoup plus d'information, et permet une formulation du problème d'identification des paramètres constitutifs mieux conditionnée. Cela est à même de bouleverser complètement la stratégie de conception des essais mécaniques.

L'intégration de techniques d'analyse inverse ou de recalage par modélisation numérique venant directement interagir avec les mesures de champ vient compléter ce dispositif en permettant des aller et retours fructueux entre expérience et calcul pourquoi pas, dans un futur proche, en temps réel. On peut alors rêver à la machine d'essai intelligente qui vienne appliquer la sollicitation utile pour acquérir l'information manquante dans le processus d'identification des propriétés recherchées.

References

- [1] S. Calloch, D. Dureisseix et F. Hild, Identification de modèles de comportement de matériaux solides : utilisation d'essais et de calculs, *Technologies et Formations* **100** (2002) 36-41.
- [2] F. Hild, B. Raka, M. Baudequin, S. Roux et F. Cantelaube, Multi-Scale Displacement Field Measurements of Compressed Mineral Wool Samples by Digital Image Correlation, *Appl. Optics* **IP 41** (2002) 6815-6828. Voir aussi : B. Wagne, S. Roux et F. Hild, Spectral Approach to Displacement Evaluation From Image Analysis, *Eur. Phys. J. AP* **17** (2002) 247-252.
- [3] D. Claire, F. Hild et S. Roux, Identification of damage fields using kinematic measurements, *C. R. Mecanique* **330** (2002) 729-734. Voir aussi : D. Claire,

S. Roux et F. Hild, Identification de conductivités thermiques et de propriétés élastiques locales par analyse de champs, *Méc. Ind.* (2002) accepté.

List of Figures

- 1 Appariement d'une imagerie dans l'image de référence et dans l'image déformée. Le décalage observé correspond au vecteur déplacement dans le repère de la caméra. 9
- 2 Éprouvette en croix étirée dans deux directions perpendiculaires à l'aide de quatre vérins de la machine multiaxiale ASTRÉE et microstructure du composite étudié. Le champ de déplacement de la zone centrale est mesuré par corrélation d'images numériques. 10
- 3 Champ de déplacement de la zone centrale de l'éprouvette mesuré par corrélation d'images numériques pour un effort $F = 11$ kN proche de la rupture. 11
- 4 Champs calculés de modules élastiques E de la zone centrale de l'éprouvette pour cinq niveaux d'efforts croissants (E_0 correspond au module élastique du matériau sain). 12

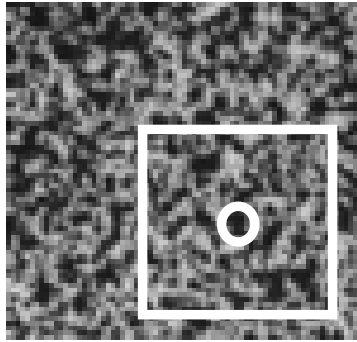


image de référence

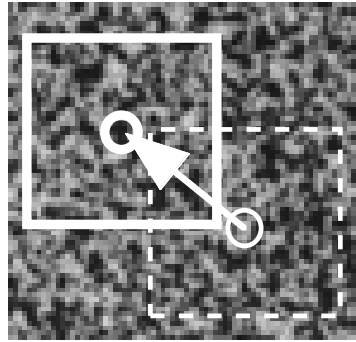


image déformée

Fig. 1. Appariement d'une imagerie dans l'image de référence et dans l'image déformée. Le décalage observé correspond au vecteur déplacement dans le repère de la caméra.

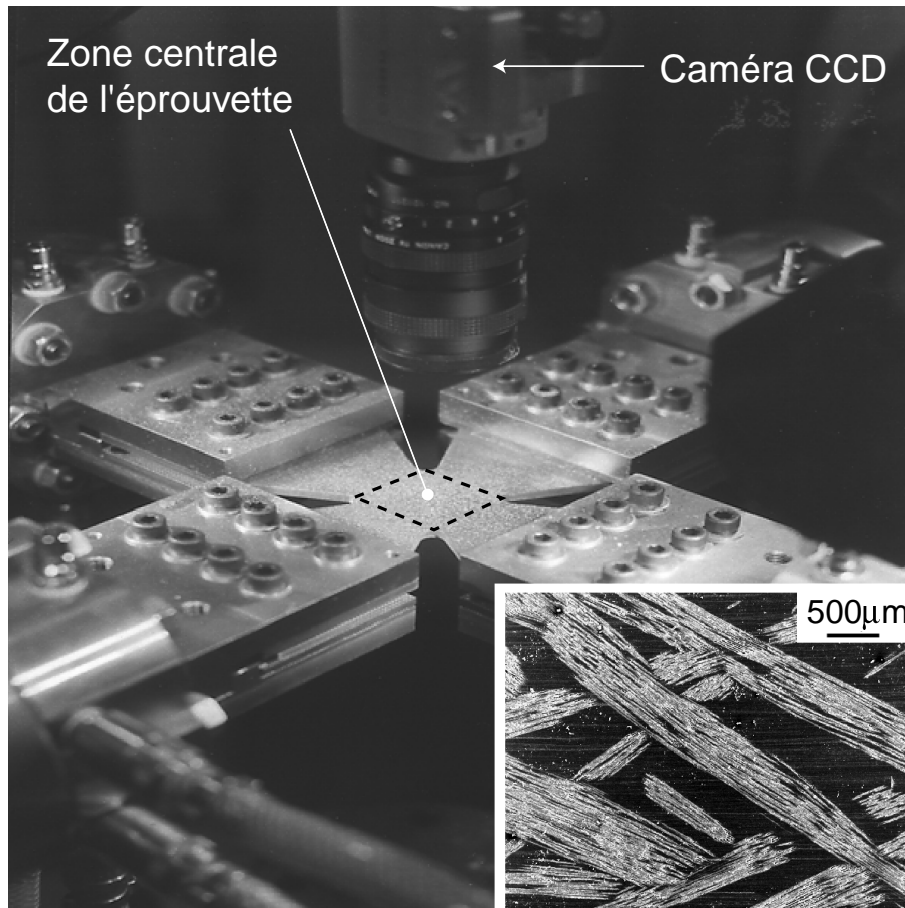


Fig. 2. Éprouvette en croix étirée dans deux directions perpendiculaires à l'aide de quatre vérins de la machine multiaxiale ASTRÉE et microstructure du composite étudié. Le champ de déplacement de la zone centrale est mesuré par corrélation d'images numériques.

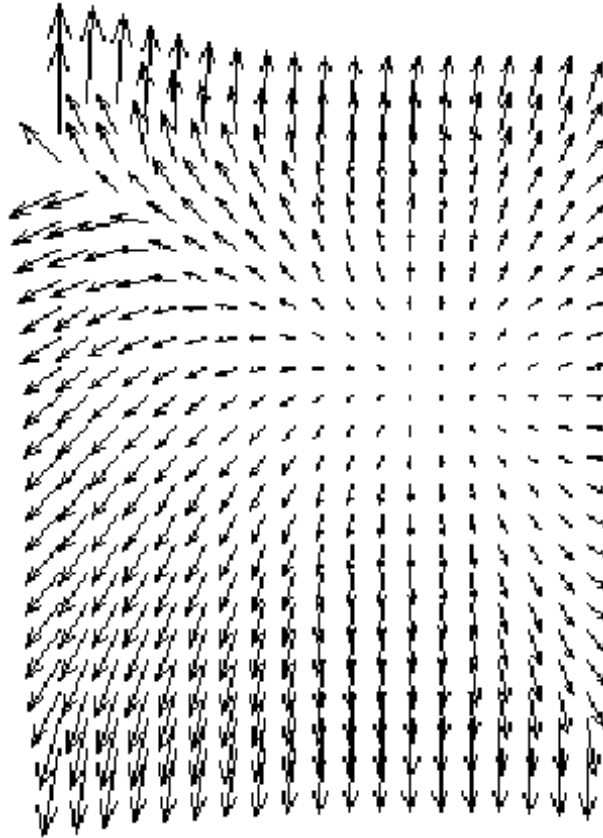


Fig. 3. Champ de déplacement de la zone centrale de l'éprouvette mesuré par corrélation d'images numériques pour un effort $F = 11$ kN proche de la rupture.

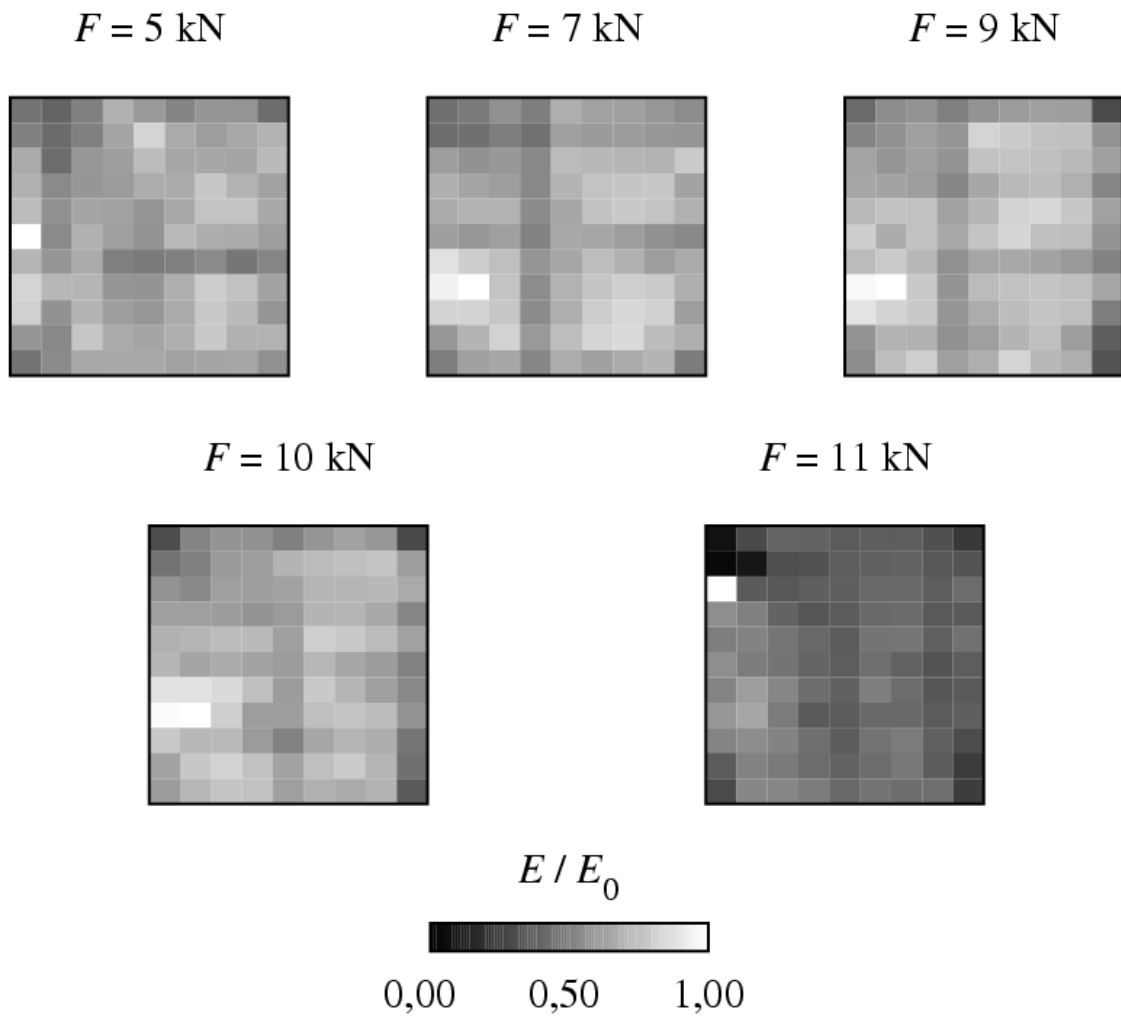


Fig. 4. Champs calculés de modules élastiques E de la zone centrale de l'éprouvette pour cinq niveaux d'efforts croissants (E_0 correspond au module élastique du matériau sain).