



Sur le développement et l'utilisation d'outils de mesure de champs cinématiques en mécanique expérimentale

Benoît Blaysat

► To cite this version:

Benoît Blaysat. Sur le développement et l'utilisation d'outils de mesure de champs cinématiques en mécanique expérimentale. Mécanique des solides [physics.class-ph]. Université Clermont Auvergne, 2017. tel-01859157

HAL Id: tel-01859157

<https://hal.science/tel-01859157>

Submitted on 21 Aug 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.

Habilitation à Diriger des Recherches

Université Clermont Auvergne

Sur le développement et l'utilisation d'outils de mesure de champs cinématiques en mécanique expérimentale

Benoît Blaysat

Soutenue le 20 Octobre 2017

Jury :

Rapporteurs	Xavier Balandraud	PR, SIGMA-Clermont
	Jean-José Orteu	PR, École des Mines d'Albi
	Julien Réthoré	DR, CNRS, École Centrale de Nantes
Examineurs	Marc Geers	PR, Eindhoven University of Technology
	Michel Grédiac	PR, Université Clermont Auvergne
	Fabrice Pierron	PR, University of Southampton
	Frédéric Sur	MCF HdR, Université de Lorraine
	Evelyne Toussaint	PR, Université Clermont Auvergne

Table des matières

Introduction	1
Mesure de champs en mécanique expérimentale	5
1 Du matériau au pixel	6
2 Performances métrologiques – concept et notations	8
Méthode de la grille	13
1 Principe de la méthode de la grille	14
1.1 D’une paire d’images de grille au déplacement	15
1.2 Quelques éléments de métrologie	17
2 Minimisation du repliement de spectre	18
2.1 Introduction d’un filtre fréquentiel	19
2.2 Compréhension de l’origine des franges parasites : le phénomène de repliement de spectre	21
2.3 Proposition d’une solution pour minimiser le repliement de spectre	22
3 Illustration d’une application de la GM	23
4 Bilan et perspectives	28
Corrélation d’images numériques	31
1 Principe de la DIC	32
1.1 DIC - algorithmique	33
1.2 DIC - performances métrologiques	36
2 Création de mouchetis synthétiques	42
3 Applications	45
3.1 DIC dédiée à la caractérisation du délaminage en mode I	45
3.2 Utilisation de la DIC dans un cadre d’usinage	50
3.3 Utilisation de la DIC pour la caractérisation de l’état de santé d’un biofilm	55
4 Bilan et perspectives	57
Utilisation des mesures de champs	59
1 Caractérisation des matériaux à partir de mesures de champs	60
1.1 Énoncé du problème direct	60
1.2 Quelques méthodes d’identification associées à la mesure de champs cinématiques	61
2 Cadre non-linéaire - identification en élasto-plasticité	63
3 Cadre linéaire - Reformulation du comportement en élasticité	66
4 Bilan et perspectives	68
Conclusion	71
Bibliographie propre et générale	73

Table des figures

1	La pyramide des essais proposée par l'éditeur de SAMCEF, divisée entre les essais "réels" et "virtuels" réalisés à chaque étapes de conception [Bruyneel <i>et al.</i> , 2014]. .	1
1.1	Schématisation du chemin optique éprouvette capteur.	6
1.2	Illustration de l'échantillonnage : un zoom de l'image (a) illustré en (b) permet de discerner chaque pixel. De plus, l'évolution du signal le long de la ligne bleue, présentée figure (c) permet de voir que le signal est aussi encodé sur des entiers en amplitude.	7
2.1	Illustration d'une image de grille (extraite de [ACL8]).	14
2.2	Représentation schématique 1D d'une transformation et interprétation sur la phase de la porteuse.	16
2.3	Illustration de franges parasites lors d'un essai de traction à taux de déformation imposé sur un alliage d'aluminium (extraite de [ACL5]). La carte de déformation longitudinale est représentée. On localise très distinctement la bande PLC au sein de l'éprouvette, mais celle-ci entraîne une queue de franges parasites.	18
2.4	Partie centrale du spectre du taux de déformation $\dot{\varepsilon}_{xx}$ illustré figure 2.3, en échelle logarithmique. Les termes qui sont non-alignés avec le pic central sont ceux qui sont à l'origine des franges.	19
2.5	Illustration de l'utilisation de différents filtres fréquentiels. (a), (c) et (e) présentent la partie centrale des différentes spectres une fois les filtres appliqués, et (b), (d) et (f) illustrent les cartes de déformation associées.	20
2.6	Représentation schématique du support du spectre d'une image de grille de pas $1/p$. Les majorants $(E_i^j)_{(i,j) \in \{1,2\}^2}$, définis Eq.(2.16), sont liés aux maxima des composantes du tenseur des déformations.	22
2.7	Illustrations schématiques du phénomène de repliement de spectre, c'est-à-dire de la superposition du spectre original et de ses copies. L'impact d'une rotation de la grille est illustré figure (b).	23
2.8	Illustration de l'essai réalisé afin de comprendre le phénomène de repliement de spectre : une éprouvette trouée soumise à un effort de traction est instrumentée avec deux grilles identiques, mais dont l'une est volontairement non-alignée avec la grille capteur (a). Sous effort, l'effet du repliement de spectre est observable uniquement sur la grille alignée (b).	24
2.9	Résultats macroscopiques des essais de compression pour les éprouvettes de différents rapports RAP - asphalt vierge. (a) évolution de l'effort mesuré en fonction du déplacement imposé. Seule la partie compression de l'essai est représentée ; (b) évolution de la déformation macroscopique de l'éprouvette en fonction du temps. .	25
2.10	Cartes des déformations ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{xy} associées à une éprouvette 100% RAP à effort de compression maximal. Ces cartes correspondent au point rouge sur la courbe effort-déplacement macroscopique de la figure 2.9a.	25

2.11	Évolution du déplacement et des déformations entre les deux agrégats A et B , exprimés dans le repère local dirigé par les deux centres des agrégats observés. Ces observations mettent en avant deux phénomènes : (i) le lissage des mesures à aux frontières agrégats/bitume (ii) la déformation de cisaillement pilote la transformation.	26
2.12	Illustration du phénomène d'agglomération de plusieurs agrégats recyclés au sein de RAP. (a) photo de la face observée d'une éprouvette 40% RAP, au sein des zooms, les zones blanches correspondent aux agrégats recyclés et les zones bleues aux zones à déformation nulle ; ces dernières sont déterminées par l'étude de la carte de la déformation équivalente (b).	27
2.13	Histogramme de la différence adimensionnée entre déformation équivalente sous chargement maximal et déformation résiduelle. L'écart à la valeur unitaire traduit l'irréversibilité du comportement et la dispersion l'hétérogénéité de la réponse.	28
3.1	Illustration de la conservation des niveaux de gris entre l'état de référence (a) et l'état courant (b). L'intensité du point $\underline{m}_p$ sur l'image de référence S_0 se retrouve sur l'image courante au point $\underline{m}_p + \underline{u}_t(\underline{m}_p)$.	33
3.2	Comportement de l'algorithme de DIC en fonction du choix de calcul pour la matrice Jacobienne du résidu. $\mathbf{J}_1$ correspond à la définition Eq.(3.8), tandis que les autres sont des approximations. Pour plus d'information se référer à [ACL6].	36
3.3	Observation et estimation de la résolution de mesure sur un cas de translation d'un signal 1-D. Le signal de référence est illustré figure 3.3a, et les différentes résolutions de mesures figure 3.3b. L'estimation proposé dans [ACL7], cf Eq.(3.18), prend parfaitement en compte le déplacement sous-pixelique.	38
3.4	Illustration de l'éprouvette utilisée pour la validation de l'estimation de la résolution de mesure. Cette éprouvette est instrumentée avec une grille, cf (a) et (b), et sa réponse en déplacement à 2500 [N] est présentée en (c) et (d).	39
3.5	Validation expérimentale de l'estimation Eq.(3.18) appliquée aux versions locale et globale de la DIC : (a), (b), (c) (d) résolutions observées ((c) et (d) correspondent aux zones rouges illustrées sur (a) et (b)). On voit bien sur (c) la taille des différentes RoI, les croix correspondants en leur centre ; (e) rapport entre résolution observée et résolution estimée et sur (b) le maillage utilisé pour décrire la cinématique. (e) et (f) illustrent les histogrammes des rapports entre résolutions observées et résolutions estimées. L'unité correspond à l'égalité entre les résolutions prédite et observée.	40
3.6	Prédictions du biais de mesure associé à la DIC à l'aide du filtre de Savitzky-Golay (traits continus) et résultats sur images synthétiques (traits pointillés), pour différentes tailles de RoI. h correspond à la largeur de la RoI.	41
3.7	Illustration d'images de référence (a) et courante (c), avec le déplacement imposé vertical (b). Les paramètres de génération des images sont donnés Eq.(3.32).	45
3.8	Illustration de l'essai DCB (a). La zone de délaminage est caractérisée par une ouverture Δ et un effort de réaction t (b). La détermination de l'effort d'interface t et la mesure de la réponse cinématique permet de remonter à la loi d'ouverture (c). L'éprouvette est modélisée comme deux poutres satisfaisant l'hypothèse d'Euler-Bernoulli (d).	47
3.9	La description des efforts d'interface est séparée en deux domaines : en amont de la pointe de fissure, on considère le comportement de l'interface comme non-endommagé et linéaire élastique et on s'appuie sur la solution analytique associée dites de Winkler ; tandis qu'une description paramétrique est introduite en aval.	48

3.10	Comparaison entre simulations et observations. Des essais DCB sont simulés avec plusieurs lois d'ouverture, les solutions cinématiques obtenues permettent de créer des paires d'images synthétiques sur lesquelles la procédure DIC proposée est testée. La figure (a) illustre la différence entre la distribution d'effort à l'interface entre la simulation (ligne noire) et l'effort mesuré à l'aide de l'outil I-DIC (ligne rouge) dans le cas d'une loi bilinéaire. La figure (b) illustre toutes les lois d'ouverture implémentées ainsi que leur pendant observées. Des plus, le tableau présente les grandeurs macroscopiques associées.	49
3.11	(a) Illustration du centre d'usinage CRENO utilisé dans le cadre des projet FUI Ophélia et ANR SimpAéro. Ici, un mouchetis a été peint sur une face de l'éprouvette, et l'appareil photo est fixé sur la table d'usinage ; (b) Représentation schématique de la pièce usinée, de la RoI associée au mesures DIC (haut) et des points de sortie des simulations (bas).	51
3.12	Comparaison brute des calculs éléments finis (traits continus) avec les mesures DIC (traits pointillés) pour les étapes 22 à 42 de la séquence d'usinage.	52
3.13	Nouveau support (rouge) et nouvel éclairage (portique) fixé sur la table du centre d'usinage CRENO.	53
3.14	Illustration du mouchetis collé sur la broche. Les rectangles verts correspondent aux marquages introduits pour le calcul des mouvements de solide rigide, l'ensemble des carrés orange représente l'ensemble des RoI de 100×100 pixels où les calculs DIC sont réalisés.	53
3.15	(a) Mesure DIC locale de la variation de déplacement de la broche en fonction de la position de la RoI au sein de l'image. Chaque série de points correspond aux résultats associés à une même paire d'images. Au déplacement de chaque RoI est soustrait le déplacement de la RoI la plus éloignée du centre optique de la série concernée. (b) Même jeu de données après correction de la distortion radiale. . . .	54
3.16	Carte du déplacement vertical après les 4 premières opérations d'enlèvement de matière. On peut voir que la pièce fléchit au droit de la poche usinée à chaque étape. . . .	55
3.17	Illustration du principe du BioFilm Ring Test [®] . (a) et (b) : des particules métalliques sont mélangées au milieu à tester. Après un temps d'incubation, le mélange est placé au dessus d'un aimant. Attirées par le champ magnétique, les particules se déplacent au dessus de l'aimant en l'absence de biofilm (a), ou elles restent bloquées par celui-ci (b). Une fois regroupées au dessus de l'aimant, les particules forment un amas visible (c-e), qui traduit donc la présence d'un biofilm ou non. [www.biofilmcontrol.com]	56
4.1		60
4.2	Illustration du problème continu utilisé pour valider la méthode d'identification proposée. Ce problème est résolu à l'aide d'un code éléments finis s'appuyant sur un maillage très fin (100×100 éléments Quad à 8 noeuds), et une partie de la solution (grille de 21×21 points) sont considérés comme mesures pour nourrir l'approche inverse.	65
4.3	Cartes de propriétés de rigidité élastique E et plastique k obtenues à l'aide de l'approche inverse proposée, à comparer avec la solution vraie, cf figure 4.2b. . . .	65
4.4	Illustration du problème continu utilisé pour valider la méthode d'identification proposée. Un essai de traction/flexion est soumis à une plaque bi-matériau. Le module d'Young prend la valeur $E = 1$ [MPa] au sein de la matrice (noire) et $E = 2$ [MPa] pour les inclusions (blanches) . Les deux matériaux ont même coefficient de Poisson $\nu = 0.3$	67

4.5	Rapports entre valeurs mesurées et valeurs vraies du module d'Young E et du coefficient de Poisson ν . Les rapports proches de l'unité indique une bonne correspondance entre mesures et valeurs vraies, bien que le déplacement mesuré, défini sur une grille 8×8 , soit très pauvre en information.	68
4.6	Distribution spatiale du contraste du coefficient a_{23} obtenue par l'approche inverse proposée, en injectant 31×31 points de mesure de déplacement. On observe une excellente correspondance entre les contrastes des mesures et celui des valeurs vraies.	68

Liste des tableaux

1.1	Notations utilisées dans le document.	9
1.2	Notations utilisées pour désigner les performances métrologiques discutées dans le document	11
4.1	Propriétés de l'erreur relative sur les paramètres (E, k) identifiés.	65

Introduction

Le Falcon 7X de Dassault Aviation résume très bien la tendance actuelle au sein de l'industrie. Aucun prototype n'a été réalisé ; le premier modèle assemblé a permis de passer les tests de certification et a ensuite été vendu. Les avancées des outils de simulation numérique permettent aujourd'hui de telles prouesses, qui sont surtout synonymes de gains en terme de coût pour le constructeur. En effet, les étapes de design, de conception, de dimensionnement et de fabrication sont beaucoup plus rapides quand le recours à l'expérimentation n'est pas nécessaire. La figure 1, issue de [Bruyneel *et al.*, 2014], illustre bien, pour le cas particulier des matériaux composites, les solutions que proposent les éditeurs de logiciels de simulation pour remplacer, à toutes les échelles, les essais "réels" par des "virtuels". La ligne séparant ces deux catégories d'essais tend d'ailleurs à réduire la part "réelle" des essais.

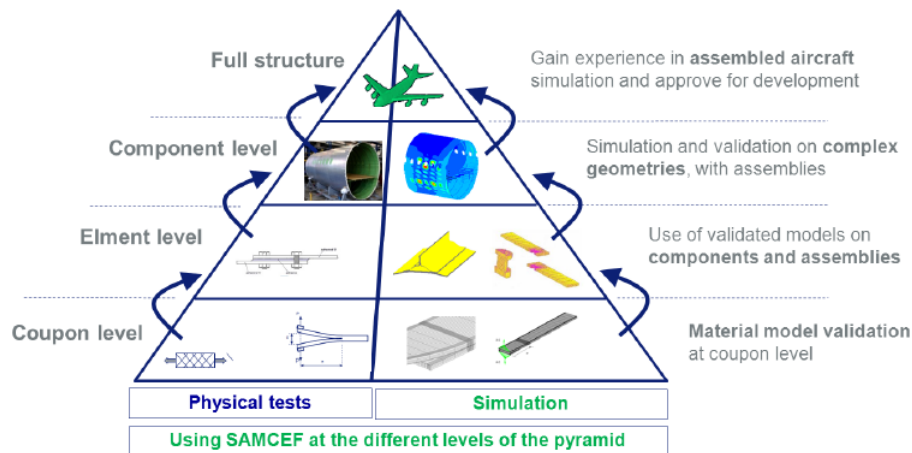


FIGURE 1 – La pyramide des essais proposée par l'éditeur de SAMCEF, divisée entre les essais "réels" et "virtuels" réalisés à chaque étapes de conception [Bruyneel *et al.*, 2014].

Toutefois, il faut bien nourrir les approches numériques avec des modèles prédictifs pertinents. La puissance toujours croissante des ordinateurs permet d'utiliser des lois de comportement de plus en plus complexes afin de traduire au mieux le comportement matériau. Devant ces descriptions au plus proche de la matière, l'observation fine du comportement des matériaux et leur caractérisation représentent donc de véritables défis pour la communauté de la mécanique expérimentale. Ces enjeux importants se dessinent tandis que la mécanique expérimentale est en train de vivre une profonde mutation. L'arrivée des outils de mesure de champs cinématiques contribue particulièrement à celle-ci. En effet, contrairement à l'instrumentation classique comme les jauges de déformation fournissant une mesure ponctuelle, ces outils offrent une mesure du déplacement en tout point d'un domaine. L'accroissement de la quantité de données mesurables au cours d'un essai a radicalement métamorphosé la perception que l'expérimentateur a de ses propres essais. La

corrélation d'images numériques, ou digital image correlation en anglais (DIC), de par la simplicité de sa mise en oeuvre, a permis à ces méthodes de sortir des tables optiques. Elle a particulièrement contribué à la diffusion des outils de mesure de champs. Depuis les premiers travaux portant sur la DIC de M. Sutton au milieu des années 80 [Sutton *et al.*, 1983, Chu *et al.*, 1985], la technologie d'acquisition d'images numériques a évolué suivant les progrès des appareils photos, tomographes, microscopes à balayage électronique ; tout comme les méthodes numériques employées pour traiter les images (DIC locale, DIC globale), [Hild et Roux, 2006, Pan *et al.*, 2009, Tong, 2013a]. Ces évolutions, souvent synonymes d'améliorations, ont permis aux techniques de mesure de champs d'offrir des mesures toujours plus pertinentes, d'élargir encore leurs champs d'applications mais aussi de favoriser le dialogue vers l'identification [Avril *et al.*, 2008, Grédiac et Hild, 2013].

En parallèle du développement et de la diffusion de la DIC, une méthode encore aujourd'hui marginale s'est développée. Il s'agit de la méthode de la grille (GM). Contrairement à la DIC qui s'appuie sur une comparaison des niveaux de gris contenus dans les images, la GM repose sur le contenu fréquentiel de ces images. Une attention particulière est donc portée sur la texture des surfaces imagées afin que celles-ci présentent un contenu fréquentiel adéquat. Dans la pratique, des grilles sont utilisées, donnant le nom à la méthode. Ces grilles étaient initialement utilisées afin de localiser facilement les intersections à la main [Parks, 1969]. Celles-ci étaient suivies au cours du temps et permettaient l'obtention des premières mesures de champs en mécanique expérimentale. Y. Surré, dans les années 1990, a généralisé les outils du traitement de phase propre à l'analyse de franges d'interférence aux traitements d'images de grilles [Surré, 1996]. Reprise depuis maintenant une dizaine d'année par l'équipe clermontoise autour de M. Grédiac [Badulescu *et al.*, 2009], et récemment revisitée avec l'oeil nouveau d'un collègue de la communauté du traitement d'image, F. Sur [Sur et Grédiac, 2014a, Sur et Grédiac, 2015a], les limites originelles de la GM ont été dépassées et ses performances présentent aujourd'hui un intérêt face à la DIC classique.

Malgré l'utilisation aujourd'hui courante des outils de mesure de champs au sein des laboratoires de mécanique expérimentale aussi bien dans les établissements de recherche que dans l'industrie, aucune norme n'y est actuellement associée. Seul un guide des bonnes pratiques est disponible, *cf* [ASTM]. Ceci s'explique par la relative jeunesse de ces outils de mesure d'une part et d'autre part par l'essence même des mesures que ces outils offrent : des champs. La référence en terme de vocabulaire métrologique [VIM] n'introduit par exemple pas toutes les notions adéquates à la caractérisation des performances des outils de mesure de champs. Ces carences normatives excluent donc actuellement la mesure de champs des phases de certifications, mais elles ne limitent pas pour autant leur utilisation à des fins de caractérisation. La très grande quantité de données disponible grâce à la mesure de champs permet en effet de répondre à la complexification des modèles matériaux.

C'est dans ce contexte que s'articule le présent travail. Plus particulièrement, les questions suivantes sont soulevées : **Quelles sont les performances métrologiques des différents outils de mesure de champs ? Quelles sont les notions nécessaires à leur caractérisation ? Comment améliorer ces performances ?** Des éléments de réponses sont proposés dans ce manuscrit. Plus particulièrement, deux outils de mesure de champs, la DIC et la GM, sont étudiés et des améliorations sont avancées. Leurs performances métrologiques sont examinées et des formules prédictives proposées. Des utilisations poussées de la GM et de la DIC sont aussi présentées, permettant de faire remonter leur spécificités : de hautes performances métrologiques pour la GM et une grande possibilité d'intégration d'information pour la DIC. Une autre question concerne le post-traitement des mesures disponibles : **Comment tirer le meilleur parti des outils de mesure de champs en identification ?** Deux pistes sont présentées dans ce manuscrit. Les deux méthodes proposées sont basées sur la généralisation de l'erreur en comportement au cadre de l'identification. Celles-ci utilisent en effet la grande quantité d'informations fournies par la mesure de champs afin de caractériser des comportements matériaux hétérogènes.

Ce manuscrit est organisé en 4 chapitres de la manière suivante :

- ◇ le premier chapitre met en avant le contexte de mécanique expérimentale dans lequel s'inscrit les outils de mesure de champs cinématiques. Les notions communes à la plupart de ces outils sont donc introduits. La terminologie propre aux performances métrologiques de ces outils est aussi introduite.
- ◇ le deuxième chapitre s'intéresse à la méthode de la grille (GM). Après un rappel succinct des principes de la méthode, ses performances métrologiques sont discutées. La GM, méthode s'appuyant sur un marquage périodique, est sujette à des franges parasites altérant les mesures. Dans un premier temps, un post-traitement de type filtrage fréquentiel est introduit afin de corriger les cartes de déformation mesurées. Dans un second temps, la compréhension du phénomène physique à l'origine de ces franges est mis en exergue et une solution pratique est proposée pour les éliminer *a priori*. Enfin, l'utilisation de la GM pour l'étude de la réponse d'un asphalte à un essai de compression est présentée. Cette illustration met particulièrement en avant les propriétés métrologiques de la GM.
- ◇ la plus utilisée des méthodes de mesure de champs cinématiques, la DIC, est l'objet du troisième chapitre. Les principes généraux sont rappelés afin d'introduire les notations nécessaires à son étude et de contextualiser certaines hypothèses communément acceptées dans le cadre de la mécanique des matériaux. Une attention particulière est prise afin de formaliser le problème pour les deux versions de la DIC : la locale et la globale. Fort de ce formalisme commun, les performances métrologiques sont étudiées dans un second temps, plus particulièrement la résolution de mesure. Le biais est par contre uniquement traité pour la version locale de la DIC. Ces études ont mis en exergue le fait que l'utilisation d'images synthétiques est actuellement systématique dans la communauté de photomécanique pour valider toutes études théoriques de DIC. Afin de répondre à cette problématique, un outil de génération de mouchetis synthétiques est introduit. Une attention particulière est portée afin de maîtriser les approximations introduites nécessaires à la création d'images échantillonnées. Enfin, deux illustrations de développement de la DIC dictées par leur cadre d'utilisation et leurs objectifs sont présentées. Il s'agit de la mesure DIC en contexte d'usinage et l'implémentation d'une méthode d'identification dédiée aux propriétés mécaniques des interfaces.
- ◇ le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'utilisation des mesures de champs pour l'identification de paramètres matériaux. Dans un premier temps, la problématique de l'identification ainsi que les différentes techniques de la littérature sont rappelées. Deux applications de la méthode de l'erreur en comportement sont ensuite présentées : l'une consiste à la généralisation d'une mesure de l'erreur de discrétisation à l'identification tandis que l'autre revisite le formalisme de l'erreur en comportement afin de proposer une approche d'identification moins coûteuse en terme de puissance de calcul.

Chapitre 1

Mesure de champs en mécanique expérimentale

Ce chapitre présente d'une manière générale le contexte des mesures de champs cinématiques en mécanique expérimentale. Il permet d'y définir une base commune dont les notations seront utilisées dans le reste du manuscrit.

Sommaire

1	Du matériau au pixel	6
2	Performances métrologiques – concept et notations	8

Les matériaux sont en constante évolution. En effet, aussi bien dans les centres de recherche et de développement de grands groupes que dans certains laboratoires, on cherche à améliorer les rapports poids/propriétés mécaniques et coût/propriétés mécaniques. Toutefois, il est de première importance d'observer, mais aussi de quantifier les propriétés mécaniques de ces matériaux. Les outils de mesure de champs cinématiques représentent la solution la plus appropriée à ce besoin. Le fait d'avoir non plus des mesures ponctuelles mais bien un champ de mesures offre une opportunité sans commune mesure avec les outils traditionnels. Dans ce chapitre on s'intéresse tout d'abord à la présentation générale du contexte des outils de mesure de champs en mécanique expérimentale. Enfin, des notions de métrologie, indissociables de toute notion de mesure, sont ici présentées afin de les adapter à ce cadre particulier des champs. En effet, il n'existe actuellement pas de norme détaillée dédiée à ces mesures.

1 Du matériau au pixel

Parmi tous les outils de mesures de champs cinématiques en mécanique expérimentale, leur véritable essor remonte aux premiers travaux sur la corrélation d'images numériques (CIN, ou "digital image correlation", DIC en anglais) de Sutton et Chu au milieu des années 80, cf [Chu *et al.*, 1985, Sutton *et al.*, 1986]. L'objet de cette partie n'est pas de dresser une liste exhaustive de toutes les différentes techniques qui existent, d'autant plus qu'uniquement deux seront traitées dans ce documents : la méthode de la grille (GM) et la DIC. Les points communs entre ces deux méthodes sont introduits, ceux-ci sont de plus partagés avec la plupart des autres méthodes de mesures de champs.

Dans ce document, on s'intéresse aux techniques de mesure de champs s'appuyant sur la vision d'une partie de la surface d'une éprouvette à l'aide d'un appareil photo, ou d'une caméra. On se place dans le cas particulier où la surface observée est plane et le capteur du système d'acquisition parallèle à celle-ci, comme illustré figure 1.1 avec $R_{surface} = R_{capteur}$. Ce choix simplifie l'écriture puisque le repère ainsi que la métrique sont directement dictés par la grille du capteur :

- on note $(\underline{e}_x, \underline{e}_y)$ le repère capteur, $\underline{e}_x$ (resp. $\underline{e}_y$) correspond aux lignes (resp. colonnes) de pixels du capteur ;
- l'unité de longueur est définie par la taille que prend un pixel sur la surface observée, en prenant en compte le grossissement permis par l'utilisation d'optiques.

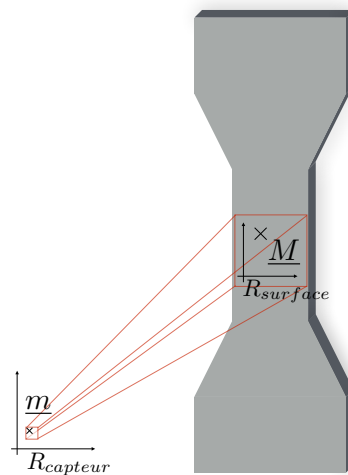


FIGURE 1.1 – Schématisation du chemin optique éprouvette capteur.

Cette hypothèse de transformation linéaire du matériau au pixel autorise une grande simplification de l'écriture du problème permettant de remonter aux cartes d'informations mécaniques à partir des données du capteur. Des modèles plus complets existent dans la littérature, *cf* [Garcia, 2001, Sutton *et al.*, 2009], s'appuyant sur le modèle sténopé pour passer du repère de la pièce imagée au repère du capteur [Rogatto *et al.*, 1993] ainsi que sur la modélisation des distortions optiques [Beyer, 1992]. Cette hypothèse forte est aussi synonyme de limites aux champs d'applications des techniques étudiées. En effet, la surface observée doit rester, au cours de l'essai, dans le même plan que celui correspondant à l'état initial, tout déplacement hors plan affectant le grossissement [Sutton *et al.*, 2008]. L'utilisation d'un objectif télécentrique permet de s'en affranchir mais d'une part leur grossissement est réduit et d'autre part on ne perçoit alors qu'une partie du mouvement. D'autres approches spécifiques enrichissent la technique de mesure afin de le prendre en compte [Wittevrongel *et al.*, 2015, Neggers *et al.*, 2012].

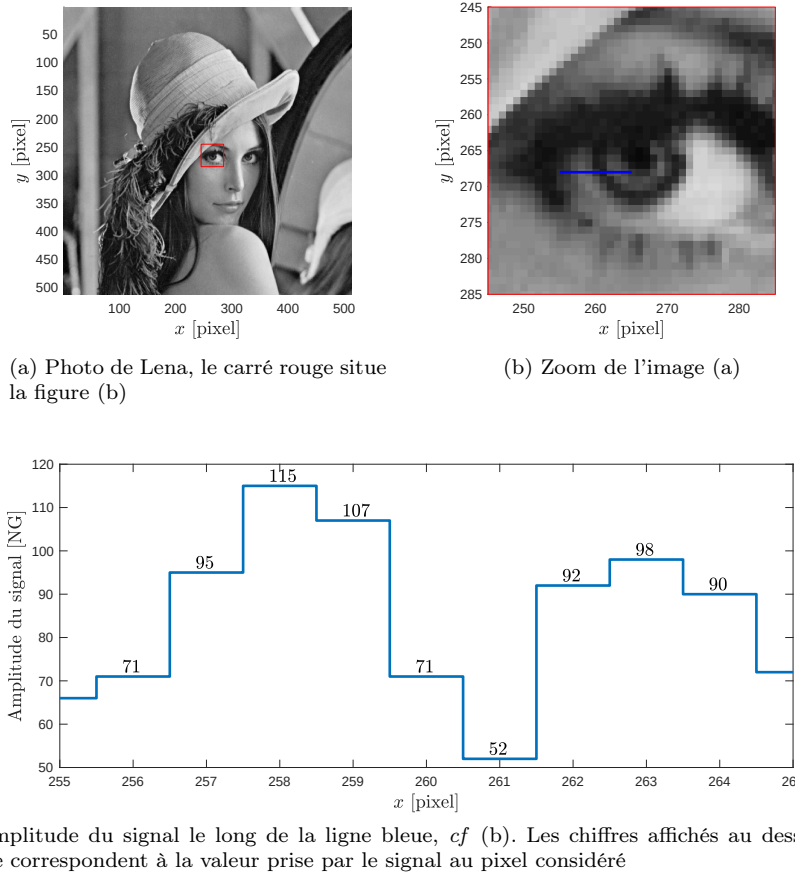


FIGURE 1.2 – Illustration de l'échantillonnage : un zoom de l'image (a) illustré en (b) permet de discerner chaque pixel. De plus, l'évolution du signal le long de la ligne bleue, présentée figure (c) permet de voir que le signal est aussi encodé sur des entiers en amplitude.

La fusion des deux repères permet aussi d'occulter la notation $\underline{M}$ des points de la surface imagée, *cf* figure 1.1. On ne considère par la suite que l'ensemble fini des points $\underline{m}$ du capteur $(\underline{e}_x, \underline{e}_y)$. Ce dernier ne fournit pas en effet un signal continu de l'image mais une version échantillonnée, définie par la grille de pixels. Ainsi, une image à un instant t , notée S_t , n'est connue qu'en un ensemble de points $\underline{m}_p$ de coordonnées (x_p, y_p) , coordonnées correspondant au p -ème pixel. À titre

d'illustration, la figure 1.2a illustre une image prise par un appareil photo, et si l'on s'intéresse à une petite zone de celle-ci, cf figure 1.2b, on voit apparaître la matrice de son capteur. La figure 1.2c montre l'évolution du signal le long de la ligne bleue tracée figure 1.2b. D'une part le signal est discret en espace, d'autre part il ne prend que des valeurs entières. En effet, les dimensions de l'image de Lena sont de 512×512 pixels et elle est encodée en 8 bits. Ces deux échantillonnages ont un impact direct sur l'utilisation des images. Le déplacement de la surface du matériaux observés prend en tout point une valeur de $\mathbb{R}^2$ et ne correspond pas à un nombre entier de pixel. Son calcul introduit alors nécessairement une étape d'interpolation. De plus, l'échantillonnage de l'amplitude du signal limite la profondeur de l'information. On appelle dynamique la plage de niveaux de gris utilisée pour enregistrer le signal. Assez logiquement, il est important de prendre des précautions particulières lors de la mise en place du dispositif expérimental en termes d'éclairage, mais aussi du réglage du temps d'exposition et de l'ouverture de l'appareil photo afin que la dynamique des images soit la plus grande possible. A titre de remarque, il est intéressant d'utiliser plutôt un capteur dans les tons sombres que dans les tons clairs. En effet, à l'échelle du pixel toute mesure de lumière est accompagnée d'une erreur aléatoire dont la variance σ^S est proportionnelle à l'intensité lumineuse capturée, cf [Healey et Kondepudy, 1994]. L'ordre de grandeur de ce bruit de capteur est de $\sigma^S = 1\% \times Dyn$, où Dyn correspond à la dynamique maximale du capteur.

En mécanique expérimentale, l'objectif principal des techniques de mesures de champ est la mesure $\underline{u}$ du déplacement vrai $\underline{u}_t$ entre deux états dits de référence ($t = 0$) et courant (t). Cette mesure est réalisée en chaque pixel $\underline{m}_p$ d'une région d'intérêt, "Region of Interest" (RoI) en anglais, celle-ci étant toujours plus petite que l'image. En effet, l'image peut tout d'abord contenir plus d'information que nécessaire. Par exemple si l'éprouvette est trouée, les pixels correspondant à l'intérieur du trou ne traduisent aucune information mécanique. De plus, une partie de l'image va disparaître du champ de la caméra sous sollicitation, ce qui rend impossible tout calcul du déplacement sur ces zones correspondantes.

L'ensemble des notations introduites dans cette partie et nécessaire dans la suite du document sont rappelées dans le tableau TAB.(1.1).

2 Performances métrologiques – concept et notations

En plus d'éléments bibliographique, cette partie s'appuie sur des travaux réalisés dans le cadre d'une collaboration entre permanents (projet TIMEX), valorisés par [ACL14].

Comme toute techniques de mesure, le mesurande est aussi important que ses propriétés métrologiques. Toutefois, le cadre particulier des mesures de champs nécessite la définition de ces différentes propriétés. En effet, il n'existe actuellement pas de norme définissant un quelconque standard pour les différentes techniques de mesure de champs. On trouve dans la littérature seulement un guide des bonnes pratiques, cf [ASTM]. Le problème réside tout d'abord dans la formulation des différentes propriétés métrologiques qui caractérisent toute mesure de champs.

Dans [ACL14], on démontre qu'avec des conditions de régularité assez faibles, les solutions obtenues à l'aide de la GM et de la DIC sont théoriquement identiques. En effet, dans le cas où les images utilisées s'appuient sur une grille, il est prouvé que la différence de phase obtenue par la GM et le déplacement correspondant coïncide avec la solution du problème de minimisation de la DIC. Ainsi, en portant la même attention aux conditions expérimentales pour la mise en oeuvre des deux techniques, les différences en termes de performances métrologiques sont liés à des paramètres intrinsèques aux deux méthodes. Dans ce document, on s'intéressent particulièrement aux suivantes :

- la pertinence des hypothèses nécessaires au calcul des cartes de déplacements ;
- la valeur des critères d'arrêt introduits pour stopper les schémas itératifs ;
- la méthode d'interpolation choisie pour toute quantité sous-pixelique ;
- la manière dont le bruit de capteur est transporté jusqu'aux cartes de déplacement ;

Notation	Définition
a	scalaire
$\underline{a}$	tenseur d'ordre 1
$\underline{\underline{a}}$	tenseur d'ordre 2
$\mathbf{a}$	vecteur de données
$\mathbf{A}$	matrice de données
$(\underline{e}_x, \underline{e}_y)$	Plan du capteur (fusionné avec la surface observée)
$\underline{m}_{\mathbf{p}}$	Point associé au $\mathbf{p}$ -ème pixel
$(x_{\mathbf{p}}, y_{\mathbf{p}})$	coordonnées du $\mathbf{p}$ -ème pixel, en [pixel]
S_t	Image prise à l'instant t , en [niveau de gris]
σ^S	écart-type du bruit de capteur (peut être défini en chaque pixel), en [niveau de gris]
$N_{x,y}$	Taille de l'image. Pour des raisons de commodité, on considère $N_{x,y}$ impairs.
S_0	Image de référence, en [niveau de gris]
$\mathbf{s}_0$	Image de référence réduite à la région d'intérêt, sous forme vectorielle, en [niveau de gris]
$\mathbf{s}_t$	Image courante, sous forme vectorielle, en [niveau de gris]
$\underline{u}_t$	Champs de déplacement vrai entre l'instant initial et t , en [pixel]
$\underline{u}$	Champs de déplacement approché entre les instants de référence et courant, en [pixel]
$\underline{\phi}$	Transformation associé au déplacement $\underline{u}$, en [pixel]
RoI	Collection de pixels où le déplacement est recherché
N_p	Nombre de pixels contenus dans la RoI

TABLE 1.1 – Notations utilisées dans le document.

- la qualité du marquage.

Le dictionnaire du vocabulaire international de métrologie [VIM] centralise nombre de notions de métrologie et sert ici de document de référence. Toutefois, des notions sont manquantes et vont être introduites. Les notions introduites sont alors les mêmes que celles proposées dans [ACL14]. Ainsi, le mesurande offert par les méthodes étudiées dans ce document est le déplacement u . En tout point de la RoI, une composante u du champ de déplacement mesuré diffère de sa valeur vraie u_t telle que :

$$u = u_t + b + e, \quad (1.1)$$

où b est l'erreur systématique et e l'erreur aléatoire, notions définies dans [VIM] telles que :

- l'erreur aléatoire, qui caractérise la **résolution de mesure**, est la “composante de l'erreur de mesure qui, dans des mesurages répétés, varie de façon imprévisible”. Dans la pratique, la résolution de mesure est définie comme l'écart-type de l'erreur aléatoire (ou tout multiple “raisonnable” fixé). Elle est notée

$$\sigma_h(u), \quad (1.2)$$

où h est une longueur caractéristique propre à la méthode de mesure utilisée pour obtenir u .

- l'erreur systématique, ou **biais de mesure**, est la “composante de l'erreur de mesure qui, dans des mesurages répétés, demeure constante ou varie de façon prévisible”. Il est commode d'écrire le biais relativement à la valeur mesurée, soit

$$b = \lambda \times u \text{ ou } (1 - \lambda)\langle u \rangle = \langle u_t \rangle, \quad (1.3)$$

la notation $\langle \square \rangle$ correspondant à l'opérateur moyenne. Dans un cas pratique “idéal”, λ est un paramètre choisit *a priori* par l'utilisateur.

Toutefois, la mesure u en un pixel s'appuie sur toute une bande de pixels l'entourant. De manière assez logique, la taille de cette zone vient directement changer les performances métrologiques associées à u : par un effet de moyenne, augmenter la taille de la zone permet en effet de diminuer l'erreur aléatoire au prix d'un accroissement de l'erreur systématique. Il est alors commode d'introduire la notion de **résolution spatiale**. Il s'agit d'une longueur caractéristique de la zone support du calcul de la mesure u en un pixel. Cette quantité est propre aux seuls outils de mesure de champs et traduit aussi la dépendance qu'a la mesure du déplacement en un pixel donné à la valeur prise par le déplacement vrai au sein des pixels voisins. Dans ce document, la résolution spatiale correspond à longueur d'onde spatiale minimale du déplacement vrai, mesuré avec un biais λ donné, cf [ACL14]. On l'écrit

$$\ell_{h,\lambda}. \quad (1.4)$$

Enfin, un indicateur peut être construit à partir de la résolution de mesure et de la résolution spatiale. Introduit dans [Grédiac et Sur, 2014], le produit entre la résolution de mesure et la résolution spatiale traduit bien l'ensemble des performances métrologiques d'une technique à biais donné :

$$\alpha_{h,\lambda} = \sigma_h(u) \times \ell_{h,\lambda} \quad (1.5)$$

Cet indicateur est d'ailleurs utilisé dans [ACL14] pour comparer les performances métrologiques de la DIC et de la GM.

Notation	Définition
$\sigma_h(u)$	Résolution de mesure (en déplacement ici, en [pixel])
λ	Biais (relatif) de mesure
$\ell_{h,\lambda}(u)$	Résolution spatiale à biais λ donné, en [pixel]
$\alpha_{h,\lambda}$	Indicateur de performances métrologiques à biais λ donné

TABLE 1.2 – Notations utilisées pour désigner les performances métrologiques discutées dans le document

Chapitre 2

Méthode de la grille

Dans ce chapitre, on s'intéresse à une technique de mesure de champs qui s'appuie sur un marquage au contenu fréquentiel fort : la méthode de la grille (GM). Dans une première partie, le principe de la méthode est rappelé ainsi que les outils d'estimation de ses performances métrologiques. Dans un second temps, le phénomène de repliement de spectre associé à l'utilisation de la GM pour l'observation de faibles déformations est contextualisé, expliqué, et on propose une solution pour en minimiser l'effet. Enfin, l'apport de la GM dans le cadre de l'étude d'un matériau fortement hétérogène est présenté.

Sommaire

1	Principe de la méthode de la grille	14
1.1	D'une paire d'images de grille au déplacement	15
1.2	Quelques éléments de métrologie	17
2	Minimisation du repliement de spectre	18
2.1	Introduction d'un filtre fréquentiel	19
2.2	Compréhension de l'origine des franges parasites : le phénomène de repliement de spectre	21
2.3	Proposition d'une solution pour minimiser le repliement de spectre	22
3	Illustration d'une application de la GM	23
4	Bilan et perspectives	28

Originellement, la méthode de la grille ou “grid method” (GM) est une technique s’appuyant sur le marquage régulier d’une grille afin de facilement localiser les intersections entre lignes et colonnes, pour en suivre leur position au cours du temps, *cf* [Parks, 1969]. Cette méthode a rapidement été supplantée par la DIC grâce à l’émergence des caméras numériques et à l’accroissement régulier de la puissance de calcul des ordinateurs, sans oublier sa facilité de mise en oeuvre. La GM telle qu’on l’entend aujourd’hui n’est plus une méthode de suivi de points mais une méthode spectrale de mesure de champs cinématiques. Dans la partie suivante, le principe de la méthode est rappelé de manière succincte, plus de détails étant disponibles dans [ACL10]. Les propriétés métrologiques de la GM sont aussi rappelées. La deuxième partie met en évidence le phénomène de repliement de spectre, conséquence de l’échantillonnage d’une grille. Deux solutions sont alors proposées : l’une consiste en un post-traitement des cartes de déformation obtenues et l’autre introduit une solution pratique afin de minimiser leur importance. Enfin, la dernière partie s’intéresse à une application de la GM pour l’étude d’un matériau fortement hétérogène : l’asphalt.

1 Principe de la méthode de la grille

En plus d’éléments bibliographique, cette partie s’appuie sur des travaux réalisés dans le cadre d’une collaboration entre permanents (projet TIMEX), valorisés par [ACL10, ACL14].

La GM s’appuie sur des images prises en lumière blanche d’une surface texturée avec un motif régulier, plus particulièrement une grille, comme illustré figure 2.1.

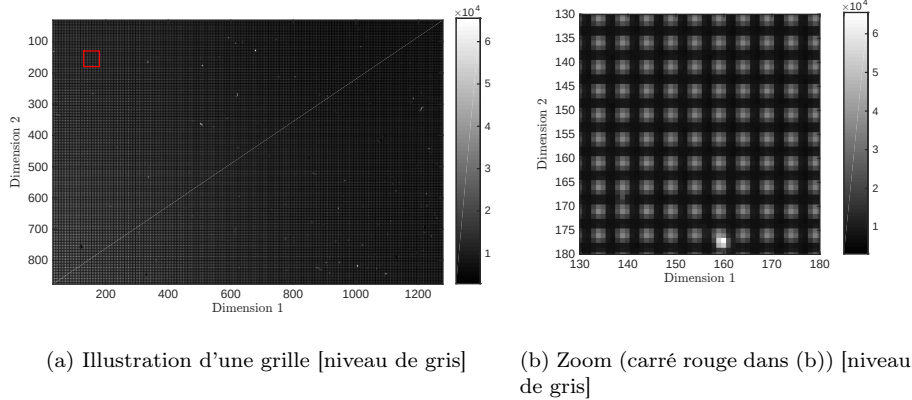


FIGURE 2.1 – Illustration d’une image de grille (extraite de [ACL8]).

De la même manière que les méthodes optiques de métrologie basées sur l’analyse de franges, telles que les bancs d’interférométrie ou la profilométrie utilisant la projection de franges, la GM s’appuie sur l’analyse de phase. En focalisant sur les techniques utilisant l’analyse fréquentielle d’images de grille, la plupart des travaux utilisent toute l’information fréquentielle pour mener à bien cette analyse de phase, comme par exemple [Hÿch et Potez, 1997, Dai *et al.*, 2014]. Surrel, dans [Surrel, 1996], émet l’hypothèse selon laquelle l’information fréquentielle est principalement concentrée autour de la fréquence de la distribution de franges, cette distribution est alors considérée comme la porteuse. C’est sur cette hypothèse qu’est construite la méthode actuelle de la GM, rappelée dans la partie suivante.

1.1 D'une paire d'images de grille au déplacement

On définit p comme étant la période (ou le pas) du motif de base d'une grille. Ce motif est représenté par la fonction unidimensionnelle "Frng" définie de $[0, 2\pi]$ vers $[0, 1]$. On admet que le signal perçu par la caméra vérifie l'équation suivante en tout pixel $\mathbf{p}$ de coordonnées $\underline{m}_{\mathbf{p}}$

$$S_t(\underline{m}_{\mathbf{p}}) = \frac{\mathcal{A}}{2} \left[2 + \gamma \sum_{k \in \{1,2\}} \text{Frng} \left(\left(\frac{2\pi \underline{m}_{\mathbf{p}}}{p} + \underline{\varphi}_t(\underline{m}_{\mathbf{p}}) \right) \cdot \underline{e}_k^{\text{grid}} \right) \right], \quad (2.1)$$

où

- $(\underline{e}_k^{\text{grid}})_{k \in \{1,2\}}$ correspond aux deux directions de la porteuse, c'est-à-dire de la grille par rapport au repère du capteur $(\underline{e}_x, \underline{e}_y)$. On note α l'angle entre ces deux repères : $\alpha = (\underline{e}_x, \underline{e}_1^{\text{grid}})$;
- $\underline{\varphi}_t(\underline{m}_{\mathbf{p}}) = \varphi_{t,1}(\underline{m}_{\mathbf{p}}) \underline{e}_1^{\text{grid}} + \varphi_{t,2}(\underline{m}_{\mathbf{p}}) \underline{e}_2^{\text{grid}}$ correspond à la modulation de phase de la porteuse, c'est-à-dire de la grille, au pixel $\underline{m}_{\mathbf{p}}$;
- $\mathcal{A}$ correspond à l'intensité moyenne du signal;
- γ correspond au contraste du signal.

Dans [Sur et Grédiac, 2014b], les auteurs démontrent que la modulation de phase $\underline{\varphi}_t$ peut être extraite de S_t , en utilisant la transformée de Fourier fenêtrée discrète F_{w_h} localisée sur la fréquence de la grille (c'est-à-dire $1/p$) telle que pour tout point $\underline{m}_{\mathbf{p}}$

$$\arg \left(F_{w_h}(S_t) \left(\underline{m}_{\mathbf{p}}, \frac{1}{p} \underline{e}_{\theta} \right) \right) = \left((\underline{\varphi}_t \cdot \underline{e}_{\theta}) * w_h \right) (\underline{m}_{\mathbf{p}}) + c, \quad (2.2)$$

avec

- $F_{w_h}(S_t)(\underline{m}_{\mathbf{p}}, \frac{1}{p} \underline{e}_{\theta})$ est la transformée de Fourier fenêtrée discrète F_{w_h} localisée sur la fréquence de la grille (c'est-à-dire $1/p$) :

$$F_{w_h}(S_t) \left(\underline{m}_{\mathbf{p}}, \frac{1}{p} \underline{e}_{\theta} \right) = \sum_{\underline{m}_{\mathbf{p}}^* \in \text{RoI}} S_t(\underline{m}_{\mathbf{p}}^*) \times w_h(\underline{m}_{\mathbf{p}} - \underline{m}_{\mathbf{p}}^*) \times e^{i \frac{1}{p} \underline{m}_{\mathbf{p}} \cdot \underline{e}_{\theta}}. \quad (2.3)$$

- w_h est une fonction fenêtre de largeur h . Une étude des principales fonctions fenêtres est proposée dans [Sur et Grédiac, 2016]. Ses formes les plus courantes sont les suivantes :
 - Elle peut être définie comme une fonction triangle (de base h) telle que :

$$w_h(\underline{m}_{\mathbf{p}}) = w_t \left(\frac{\underline{m}_{\mathbf{p}}}{h} \right) \text{ avec } \forall \underline{m} \in \mathbb{R}^2, w_t(\underline{m}) = \begin{cases} \frac{1}{3}(1 - \|\underline{m}\|_{\infty}) & \text{si } \|\underline{m}\|_{\infty} < 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}; \quad (2.4)$$

- On utilise plus souvent une enveloppe gaussienne d'écart-type h :

$$w_h(\underline{m}_{\mathbf{p}}) = w_g \left(\frac{\underline{m}_{\mathbf{p}}}{h} \right) \text{ avec } \forall \underline{m} \in \mathbb{R}^2, w_g(\underline{m}) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2} \|\underline{m}\|_2^2}. \quad (2.5)$$

Le support de l'enveloppe Gaussienne étant infini, il est tronqué dans la pratique à $\pm 4a$ pour des questions évidentes de coût de calcul.

Le choix du type de la fonction fenêtre et de sa largeur impacte directement les performances métrologiques de la mesure [Sur et Grédiac, 2016]. Les atouts de l'utilisation d'une enveloppe Gaussienne réside dans son caractère isotrope et dans l'absence de contrainte sur h . En effet, toute valeur de h supérieure au pas de la grille convient. Au contraire, avec une fenêtre triangle, h doit être choisi comme un multiple du pas de la grille. Or, dans la pratique, le pas de la grille ne reste pas constant car celle-ci se déforme. On observe alors la remontée d'harmoniques vers les champs de phase.

- $\underline{e}_\theta$ est un vecteur unitaire donnant la direction d'extraction définie par l'angle θ . Celle-ci est dictée par l'orientation de la grille, soit $\underline{e}_\theta = \underline{e}_k^{\text{grid}}$, $k \in \{1, 2\}$;
- $*$ correspond au produit de convolution. La méthode proposée permet donc le calcul de la projection sur $\underline{e}_\theta$ de la modulation de phase $\underline{\varphi}_t$, convoluée avec la fonction fenêtre de la transformée de Fourier fenêtrée ;
- c est une constance.

Des travaux [Grédiac *et al.*, 2013, Sur et Grédiac, 2014b] introduisent des outils de déconvolution pour remonter à la vraie modulation de phase. Le recours à ces outils est particulièrement délicat car dans la pratique, seule une version bruitée du signal S_t est connu. Il s'agit aujourd'hui d'un problème ouvert, et dans l'attente de futurs travaux la modulation de phase est le plus souvent approchée par sa forme convoluée :

$$\underline{\varphi}_t \cdot \underline{e}_\theta \approx (\underline{\varphi}_t \cdot \underline{e}_\theta) * w_h. \quad (2.6)$$

Le calcul de la modulation de phase vectorielle revient à calculer ses deux composantes portées par les deux directions de la grille. On a donc

$$\underline{\varphi}_t = \varphi_{t,1} \underline{e}_1^{\text{grid}} + \varphi_{t,2} \underline{e}_2^{\text{grid}} \text{ avec } \begin{cases} \varphi_{t,1} = \underline{\varphi}_t \cdot \underline{e}_1^{\text{grid}} \approx (\underline{\varphi}_t \cdot \underline{e}_1^{\text{grid}}) * w_h \\ \varphi_{t,2} = \underline{\varphi}_t \cdot \underline{e}_2^{\text{grid}} \approx (\underline{\varphi}_t \cdot \underline{e}_2^{\text{grid}}) * w_h \end{cases}. \quad (2.7)$$

Enfin, le lien entre modulation de phase φ_τ de S_τ pour $\tau \in [0, t]$ et déplacement $\underline{u}_t$ en un pixel $\underline{m}_p$ s'écrit simplement à partir de la conservation de la phase du signal S_t comme illustré figure 2.2. En effet, bien que le signal soit modulé, la phase suit le mouvement physique du matériau.

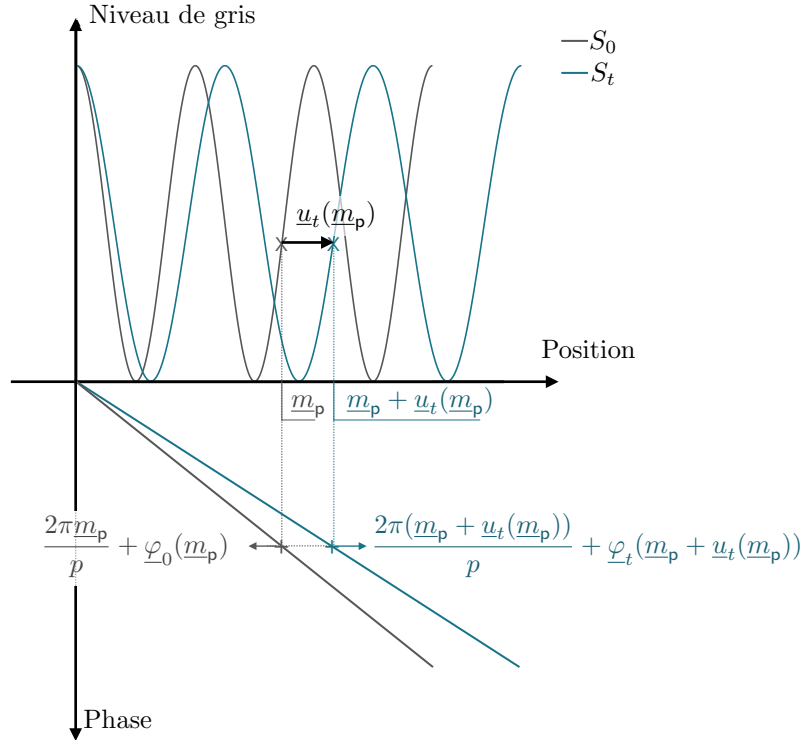


FIGURE 2.2 – Représentation schématique 1D d'une transformation et interprétation sur la phase de la porteuse.

Cette condition s'écrit :

$$\frac{2\pi m_p}{p} + \varphi_0(m_p) = \frac{2\pi m_p + u_t(m_p)}{p} + \varphi_t(m_p + u_t(m_p)). \quad (2.8)$$

On obtient alors le lien suivant entre déplacement et variation de modulation de phase :

$$u_t(m_p) = -\frac{p}{2\pi}(\varphi_t(m_p + u_t(m_p)) - \varphi_0(m_p)). \quad (2.9)$$

Le déplacement u_t apparaît deux fois dans l'équation précédente et son calcul ne peut donc être direct. Toutefois, sa régularité mathématique permet de résoudre ce problème avec un simple algorithme de point fixe qui converge rapidement, comme démontré dans [ACL10].

1.2 Quelques éléments de métrologie

Les seuls travaux qui s'intéressent aux performances métrologiques de la GM sont [Zhao et Surrel, 1997, Grédiac *et al.*, 2013, Grédiac et Sur, 2014, Sur et Grédiac, 2014b, Sur et Grédiac, 2015a, Sur et Grédiac, 2015b]. Ces travaux proposent des estimateurs des deux caractéristiques introduites dans Sec.(2), c'est-à-dire la résolution de mesure σ_h^{GM} et la résolution spatiale $\ell_{h,\lambda}^{\text{GM}}$ pour un biais λ fixé. La seule origine du bruit considérée dans ces travaux est le bruit du capteur, modélisé ici comme un bruit blanc Gaussien d'écart-type σ^S . En ne s'intéressant qu'au seul cas d'extraction avec une fenêtre Gaussienne, on a :

$$\sigma_{h,i}^{\text{GM}} = \frac{p}{2hK_i(2\pi)^{3/2}} \times \sigma^S \text{ avec } K_i = \frac{1}{2}|C_i|\gamma A \text{ et } i \in \{1, 2\} \quad (2.10)$$

et

$$\ell_{h,\lambda}^{\text{GM}} = \frac{\sqrt{2\pi}h}{\sqrt{-\log(1-\lambda)}}, \quad (2.11)$$

avec $|C_i|$, $i \in \{1, 2\}$, le module du premier terme non constant de la décomposition en série de Fourier de la fonction du motif périodique Frng (*cf* Eq.(2.1)). On trouve dans [Sur et Grédiac, 2016] les estimations associées aux autres fenêtres d'extraction.

On peut noter que la formule Eq.(2.10) a été confrontée avec des données expérimentales dans [Grédiac *et al.*, 2013]. Cette confrontation a tout d'abord mis en avant la non-validité de l'hypothèse émise sur le modèle du bruit de capteur au sein de la communauté des photomécaniciens : le bruit de capteur n'est pas un bruit blanc Gaussien. Il s'agit en effet d'un bruit dit Poisson-Gaussien, c'est-à-dire que son écart-type dépend du niveau d'éclairage. Les auteurs font donc appel à la "Generalized Anscombe Transform" (GAT) afin de normaliser la variance au sein des images. On peut noter que cette étape de prétraitement des images de grille peut introduire un biais, qui toutefois n'est pas quantifié dans ce travail.

Le second point soulevé par la confrontation prediction-observation est le non-respect d'une hypothèse forte par les données expérimentales : le calcul de la résolution observée est réalisée sur un jeu de 100 paires d'images de grille, correspondant chacune à un état de référence et à un état courant. Les 100 images de références (et courantes) sont censées correspondre exactement à la même situation, or un petit déplacement est observable d'image à image. Il s'agit simplement d'une vibration basse fréquence entre la machine d'essai sur laquelle est fixée l'éprouvette et la caméra. Les auteurs proposent un outil dans [Sur et Grédiac, 2015b], appelé "Non-Random Signal Reduction" (NRSR), qui s'appuie sur la régularité des images de grilles afin de supprimer ce micro-mouvement des 100 images de référence (et courantes).

La résolution observée sur les paires d'images, une fois celles-ci corrigées avec la GAT et la NRSR, correspond à celle estimée avec Eq.(2.10) et permet de valider cette dernière.

Enfin, l'indicateur d'efficacité métrologique s'écrit comme le produit entre la résolution de mesure et la résolution spatiale, *cf* [ACL14] :

$$\alpha_{\lambda,i} = \sigma_{h,i}^{\text{GM}} \times \ell_{h,\lambda}^{\text{GM}} = \frac{p}{4K_i \sqrt{-\pi \log(1-\lambda)}} \times \sigma^S, i \in \{1, 2\}. \quad (2.12)$$

Un élément intéressant de cet indicateur est sa non-dépendance à la taille de la fenêtre d'extraction h . En effet, choisir h plus grand permettra d'améliorer la résolution de mesure, *cf* Eq.(2.10), mais au détriment de la résolution spatiale, *cf* Eq.(2.11).

Des formules analogues sont disponibles quand une fenêtre triangle ou autre est utilisée, *cf* [Grédiac et Sur, 2014, Sur et Grédiac, 2016], et la valeur prise par l'indicateur d'efficacité métrologique est très proche. Aussi, non détaillées ici, des outils d'estimation des performances métrologiques propres à la mesure des cartes de déformation existent dans la littérature, *cf* [Grédiac et Sur, 2014].

2 Minimisation du repliement de spectre

Cette partie s'appuie sur des essais réalisés dans le cadre d'un projet de Master ([MAST2]), repris ensuite dans le cadre d'une collaboration entre permanents (projet TIMEX), valorisés par [ACL5, ACL11].

Lors de l'encadrement du mémoire de Master d'I. Ben Cheikh [MAST2], on s'est intéressé à l'observation de bandes dites de Portevin-le Châtelier (PLC) au sein d'alliages d'aluminium. La GM a principalement été utilisée. De plus, l'échelle des déformations observées a mis en exergue un phénomène de franges parasites.

À titre d'illustration, une carte typique du taux de déformation associé à la propagation d'une bande PLC est illustrée figure 2.3. Une queue de franges parasites vient nettement polluer la bande PLC. On peut noter que la signature fréquentielle de ces franges est différente du signal et nous a donc amenés à proposer un filtre fréquentiel afin de corriger les cartes de taux de déformation.

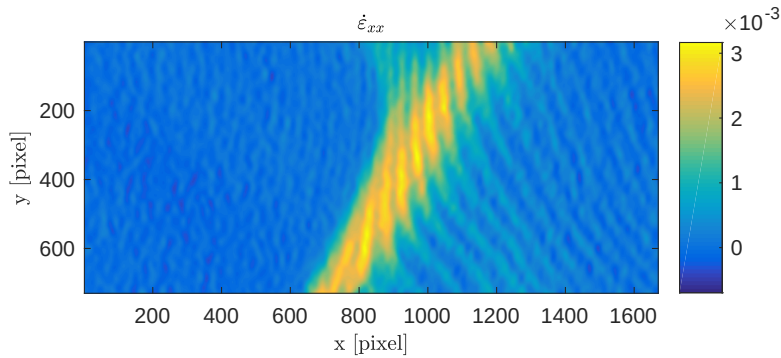


FIGURE 2.3 – Illustration de franges parasites lors d'un essai de traction à taux de déformation imposé sur un alliage d'aluminium (extraite de [ACL5]). La carte de déformation longitudinale est représentée. On localise très distinctement la bande PLC au sein de l'éprouvette, mais celle-ci entraîne une queue de franges parasites.

2.1 Introduction d'un filtre fréquentiel

On note $F(\dot{\varepsilon})$ la transformée de Fourier discrète du taux de déformation longitudinale $\dot{\varepsilon}$. Celle-ci s'écrit :

$$F(\dot{\varepsilon})(\underline{f_p}) = \sum_{\underline{m_p}} \dot{\varepsilon}(\underline{m_p}) e^{2\pi i \underline{f_p} \cdot \underline{m_p}}. \quad (2.13)$$

avec $\underline{f_p}$ les fréquences d'évaluation du spectre, définies à partir de la fréquence d'échantillonnage $f_0 = 1 \text{ [pixel}^{-1}]$ telles que

$$\forall i \in \{x, y\}, f_{p,i} = \frac{k}{N_i} f_0 \text{ avec } k \in \mathbb{Z} \text{ et } |k| \leq \frac{N_i - 1}{2} \quad (2.14)$$

$N_i, i \in \{x, y\}$ correspond à la taille de l'image, choisie impaire pour des raisons de commodité. Les deux cas pair et impair sont traités dans [ACL5].

Le calcul de la transformée de Fourier discrète $F(\dot{\varepsilon})$ sur le domaine réduit $[-1/2, 1/2]^2$ s'explique par le fait que le spectre $F(\dot{\varepsilon})$ est par définition $N_i \text{ [pixel}^{-1}]$ -périodique, $i \in \{x, y\}$. De plus, le domaine est symétrique car le taux de déformation $\dot{\varepsilon}$ est à valeurs réelles. Par conséquence, son spectre $F(\dot{\varepsilon})$ est aussi symétrique. La figure 2.4 représente la partie centrale du module du spectre $F(\dot{\varepsilon})$ associée à la carte $\dot{\varepsilon}$ illustrée figure 2.3. Sur cette figure, les termes associés aux franges sont ceux qui sont non alignés avec le pic central du premier cadran.

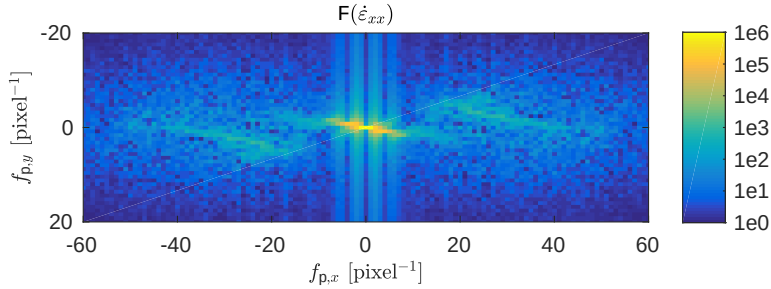


FIGURE 2.4 – Partie centrale du spectre du taux de déformation $\dot{\varepsilon}_{xx}$ illustré figure 2.3, en échelle logarithmique. Les termes qui sont non-alignés avec le pic central sont ceux qui sont à l'origine des franges.

Afin de corriger ces cartes, on introduit dans [ACL5] 7 filtres fréquentiels. Une fois définie de manière empirique la zone du spectre associée aux franges parasites, ces filtres viennent modifier localement l'amplitude. La figure 2.5 illustre 3 de ces filtres :

- le filtre moyen (filtre 2a) est illustré figure 2.5a&b. Ce filtre agit en substituant les valeurs de la zone du spectre concernée par sa valeur moyenne ;
- le filtre bilinéaire (filtre 4) est illustré figure 2.5c&d. Ce filtre agit en substituant les valeurs de la zone du spectre concerné par une interpolation bilinéaire de sa frontière ;
- le filtre Gaussien (filtre 5) est illustré figure 2.5e&f. Ce filtre est un filtre de Gauss proposé dans [Aizenberg et Butakoff, 2008] avec $(\sigma_{f_1} = 45, \sigma_{f_2} = 15 \text{ et } \theta = -\pi/2)$.

L'implémentation sous une forme de filtre de cette première approche permettant d'éliminer des cartes de déformation les franges parasites est très facile à mettre en oeuvre. Toutefois, cette approche apporte aussi des limitations : tout d'abord la définition des zones où le filtre doit être

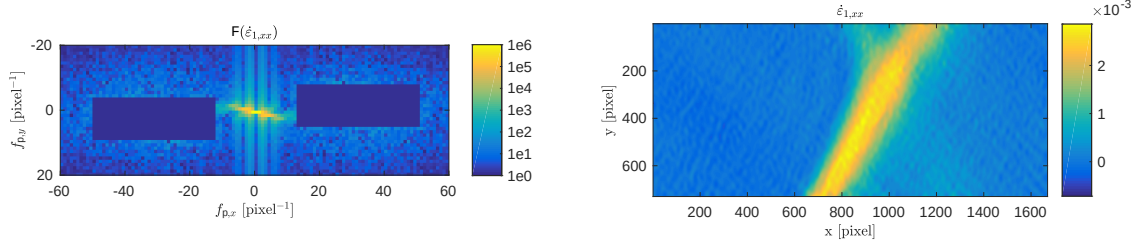
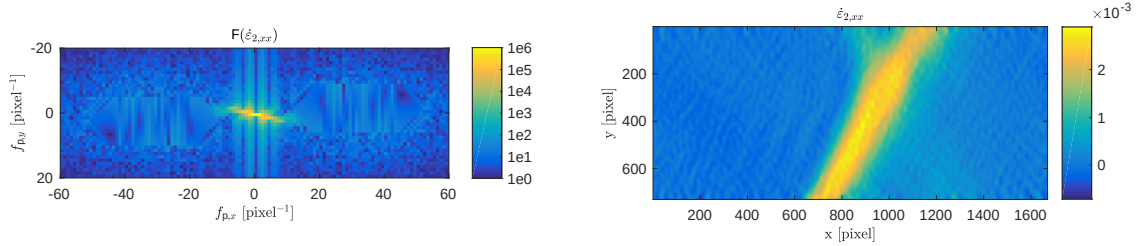
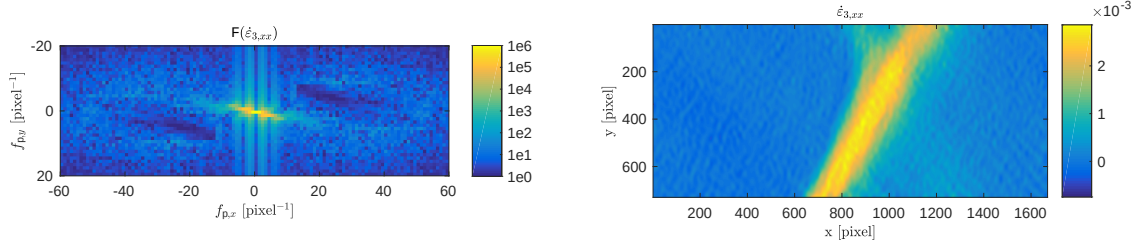
(a) Partie centrale du spectre $F(\dot{\epsilon}_{1,xx})$ après application du filtre moyen(b) Carte $\dot{\epsilon}_{1,xx}$ correspondant à $F(\dot{\epsilon}_{1,xx})$ (c) Partie centrale du spectre $F(\dot{\epsilon}_{2,xx})$ après application du filtre bilinéaire(d) Carte $\dot{\epsilon}_{2,xx}$ correspondant à $F(\dot{\epsilon}_{2,xx})$ (e) Partie centrale du spectre $F(\dot{\epsilon}_{3,xx})$ après application du filtre Gaussien(f) Carte $\dot{\epsilon}_{3,xx}$ correspondant à $F(\dot{\epsilon}_{3,xx})$

FIGURE 2.5 – Illustration de l'utilisation de différents filtres fréquentiels. (a), (c) et (e) présentent la partie centrale des différents spectres une fois les filtres appliqués, et (b), (d) et (f) illustrent les cartes de déformation associées.

appliqué est malaisée. En effet, ces zones ont été ici définies à la main, et nous n'avons pas réussi à introduire un critère fiable sur les termes du spectre afin de les définir automatiquement. Le second point est directement associé au fait que ce filtre est appliqué aux données de sortie de la GM. Le filtre agit sur les cartes de déformation. Par conséquent, la déformation, une fois filtrée, peut contenir de l'information dont l'origine n'est pas forcément liée à un phénomène mécanique. Par exemple, le phénomène de ringing introduit des nouvelles franges parasites. Enfin, nous avons préféré comprendre le phénomène à l'origine de ces franges et chercher à en minimiser *a priori* l'apparition plutôt que de les corriger *a posteriori*.

2.2 Compréhension de l'origine des franges parasites : le phénomène de repliement de spectre

Mise en évidence analytique du repliement de spectre Lors de l'acquisition d'une image de grille, celle-ci est échantillonnée par le capteur de la caméra. Dans [ACL11], on montre que cet échantillonnage est responsable de l'apparition du repliement de spectre. En effet, en reprenant le modèle continu S_t introduit dans Eq.(2.1) pour représenter l'image correspondant à une grille, sa transformée de Fourier $\mathcal{F}(S_t)$ s'écrit

$$\mathcal{F}(S_t)(\underline{f}) = \mathcal{F}(\mathcal{A}) + \frac{\gamma}{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \sum_{l \in \{1,2\}} C_k \times \mathcal{F}(\mathcal{A}) * \left(\mathcal{F}(e^{ik\varphi_l \cdot \underline{e}_l^{\text{grid}}}) \left(\underline{f} - \frac{k}{p} \underline{e}_l^{\text{grid}} \right) \right), \quad (2.15)$$

avec $(C_k)_{k \in \mathbb{Z}}$ les coefficients complexes de la décomposition en série de Fourier du motif de base de la grille, c'est-à-dire de la fonction "Frng". On s'intéresse ici à des mesures de déformation bornées, on peut donc introduire les bornes suivantes $(E_i^j)_{(i,j) \in \{1,2\}^2}$, telles que

$$E_i^j = \max_{\text{RoI}} ({}^t \underline{e}_j^{\text{grid}} \cdot \underline{\nabla}(\underline{u}_t) \cdot \underline{e}_i^{\text{grid}}) = \frac{p}{2\pi} \max_{\text{RoI}} ({}^t \underline{e}_j^{\text{grid}} \cdot \underline{\nabla}(\varphi_t) \cdot \underline{e}_i^{\text{grid}}). \quad (2.16)$$

Le support de $\mathcal{F}(S_t)$, dont une représentation schématique est donnée figure 2.6, s'exprime alors comme la réunion des intervalles suivants :

- un pic central associé au terme $\mathcal{F}(\mathcal{A})$;
- un ensemble de domaines fermés définis tels que :
 - dans la direction $\underline{e}_1^{\text{grid}}$,

$$\left[-\frac{|k|}{p} E_1^1 + \frac{k}{p}, \frac{|k|}{p} E_1^1 + \frac{k}{p} \right] \times \left[-\frac{|k|}{p} E_1^2, \frac{|k|}{p} E_1^2 \right]; \quad (2.17)$$

- dans la direction $\underline{e}_2^{\text{grid}}$,

$$\left[-\frac{|k|}{p} E_2^2, \frac{|k|}{p} E_2^2 \right] \times \left[-\frac{|k|}{p} E_2^1 + \frac{k}{p}, \frac{|k|}{p} E_2^1 + \frac{k}{p} \right]. \quad (2.18)$$

On s'intéresse maintenant à la version échantillonnée d'une grille, c'est-à-dire au signal capturé par la caméra. On montre que les termes $\mathcal{F}(S_t)$ de sa décomposition en série de Fourier s'écrivent, pour toute fréquence $\underline{f}_{\text{p}}$ définie par l'Eq.(2.14), on a

$$\mathcal{F}(S_t)(\underline{f}_{\text{p}}) = \mathcal{F}(S_t)(\underline{f}_{\text{p}}) + \sum_{(m,n) \in \mathbb{Z}^{*2}} \mathcal{F}(S_t) \left(\underline{f}_{\text{p}} + \begin{bmatrix} m \\ n \end{bmatrix} \right). \quad (2.19)$$

Le support de la transformée de Fourier discrète s'écrit donc comme le support de la fonction continue usuelle, auquel viennent se rajouter des copies de celui-ci décalées d'un multiple de la fréquence f_0 dans chacune des directions, comme illustré figure 2.7a. Des données des copies adjacentes du spectre continu peuvent ainsi se superposer aux données originales. Cela arrive dès que le signal continu contient des informations de fréquences supérieures à $f_0/2$ pour la direction $\underline{e}_1^{\text{grid}}$ ou $\underline{e}_2^{\text{grid}}$, et qui dépassent donc la condition de Nyquist.

Dans le cas d'une image de grille, l'information fréquentielle est extrêmement concentrée au niveau des fréquences $1/p \times [m, n]$, $(m, n) \in \mathbb{Z}^2$. Si les repères grille et capteur sont alignés, il y a très vite recouvrement entre spectre original et l'une de ses copies, ce qui crée du repliement de spectre, d'autant plus qu'usuellement, on calibre nos caméras afin de s'assurer que l'on encode l'image sur 5 [pixel] par pas p de grille. Dans le cas montré sur la figure 2.7a, le troisième pic d'une copie du spectre central, de fréquence $f = 1 - (3/5)$ vient directement se superposer sur le second pic du spectre central, de fréquence $f = 2/5$. Le repliement de spectre a donc ici un maximum d'impact.

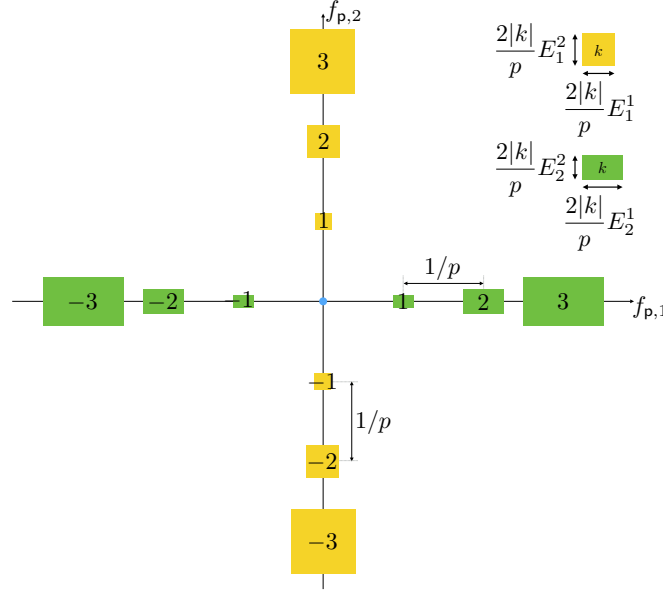


FIGURE 2.6 – Représentation schématique du support du spectre d’une image de grille de pas $1/p$. Les majorants $(E_i^j)_{(i,j) \in \{1,2\}^2}$, définis Eq.(2.16), sont liés aux maxima des composantes du tenseur des déformations.

Pourquoi une rotation de la grille minimise-t-elle le repliement de spectre ? Le fait de tourner le signal, c’est-à-dire la grille, conduit à la rotation du spectre. En effet, toute rotation d’un angle α de $(\underline{e}_1^{\text{grid}}, \underline{e}_2^{\text{grid}})$ par rapport au repère du capteur $(\underline{e}_x, \underline{e}_y)$ se traduit aussi par une rotation d’angle α du spectre. Cette rotation a pour effet d’éloigner les pics du spectre central des pics de ses copies, comme illustré sur la figure 2.7b. Certes l’information copiée reste dans le spectre, mais elle ne vient alors pas directement s’ajouter sur la signature du signal original.

Afin de mettre en lumière l’impact d’une rotation de la grille sur le phénomène à l’origine des franges parasites, un essai de traction d’une éprouvette trouée a été réalisé. La particularité de l’instrumentation de cet essai consiste en le dépôt de deux grilles sur sa surface : une grille dont les directions sont alignées avec celle des pixels du capteur de la caméra, et une autre, de pas identique, tournée d’un angle arbitraire de 19° . L’éprouvette est illustrée figure 2.8a.

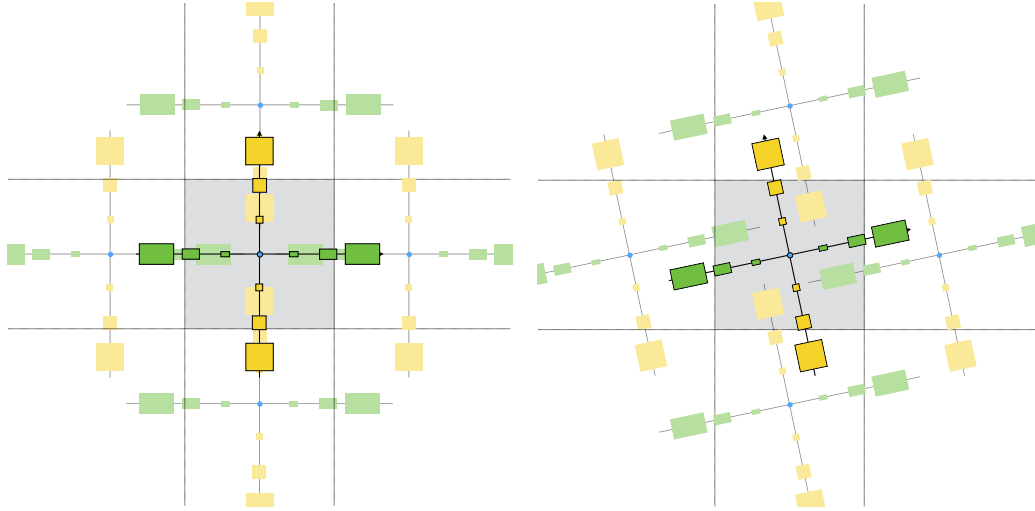
La carte de déformation de la surface de cette éprouvette, mesurée sous effort, est présentée figure 2.8b. On peut y remarquer que des franges parasites n’apparaissent que du côté de l’éprouvette où la grille est alignée avec le capteur. Afin de s’assurer que le phénomène à l’origine des franges parasites n’est pas lié à la GM mais à l’acquisition des images, les mêmes données expérimentales ont été post-traitées avec un outil de DIC. Les cartes de déformation contenaient les mêmes franges parasites.

2.3 Proposition d’une solution pour minimiser le repliement de spectre

Dans [ACL11], on propose une méthode pour trouver l’angle optimal à respecter afin de minimiser l’impact du repliement de spectre. Un critère basé sur la distance D entre les premiers pics du spectre principal et les pics les plus proches de ses copies adjacentes est introduit. Cette distance s’écrit :

$$D(\alpha)^2 = \frac{1}{p^2} \left(\left\{ \frac{\cos(\alpha)}{p} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sin(\alpha)}{p} \right\}^2 \right) \quad (2.20)$$

où $\{x\} = x - [x]$ traduit la distance entre un réel x et l’entier le plus proche $[x]$.



(a) Illustration du phénomène de repliement de spectre dans le cas d'une grille alignée avec le capteur (b) Illustration de l'impact d'une rotation sur le repliement de spectre

FIGURE 2.7 – Illustrations schématiques du phénomène de repliement de spectre, c'est-à-dire de la superposition du spectre original et de ses copies. L'impact d'une rotation de la grille est illustré figure (b).

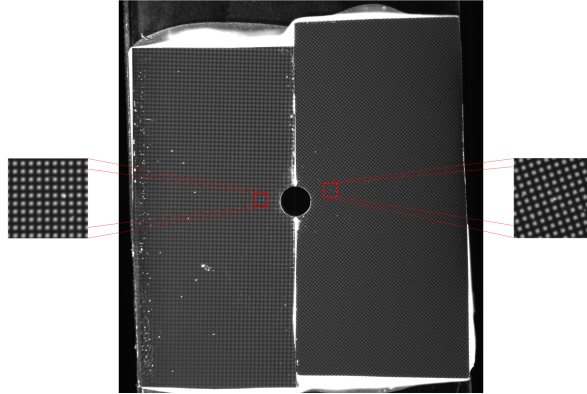
À partir de cette formule, pour un encodage du pas fixé, on peut considérer que l'angle α qui minimise le repliement de spectre est celui maximisant $D(\alpha)^2$.

3 Illustration d'une application de la GM

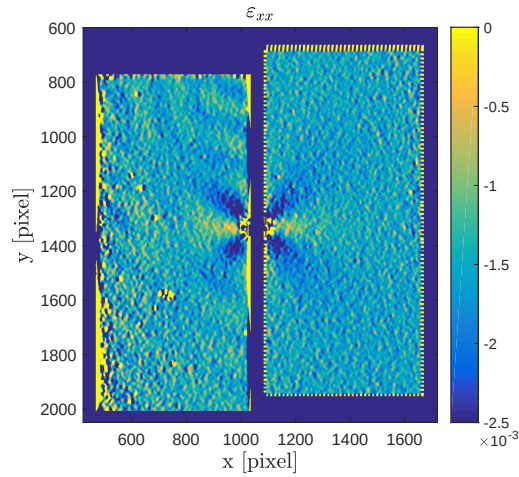
Cette partie s'appuie sur les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de M. Cheikh Teguedi [THES1], valorisés par [ACL9, acl1].

J'ai choisi d'illustrer les performances métrologiques de la GM en m'appuyant sur les travaux de M. Cheikh Teguedi publiés dans [ACL9]. J'ai co-encadré cet étudiant avec M. Grédiac et E. Toussaint pendant son doctorat cf [THES1]. M. Cheikh Teguedi s'est intéressé durant sa thèse au comportement d'enrobés bitumineux, en traction, en compression ainsi qu'à leur comportement au gel. De plus, il a étudié plusieurs mélanges, la plupart des enrobés bitumineux étant aujourd'hui réalisés à partir de la récupération et du concassage d'anciens enrobés. On parle de "Recycled Asphalt Pavement" (RAP). J'ai focalisé ici sur ses premiers travaux, qui concernent le comportement de différents enrobés bitumineux en compression.

Contexte Quatre paires d'éprouvettes cylindriques de rayon 40 [mm] et de hauteur 90 [mm] ont été réalisées. Chaque paire est constituée d'un mélange d'asphalt vierge et de RAP, les rapports entre chaque constituant changeant d'une paire à l'autre. Ainsi, une paire étalon est constituée uniquement d'asphalt vierge tandis que les autres contiennent respectivement 20%, 40% et 100% de RAP. Dans le cas de cette dernière, un faible pourcentage de bitume neuf, c'est-à-dire 0.7%, est toutefois ajouté afin d'assurer le maintien du RAP. Un méplat a été réalisé sur chaque éprouvette afin de pouvoir y déposer une grille. La zone observée est donc considérée comme plane. Ses dimensions sont d'environ 6.5×7 [cm]². Toutes les éprouvettes ont été soumises à un essai de compression à vitesse de déplacement imposée de 0.01 [mm].[s]⁻¹ jusqu'à perte de rigidité, la seconde partie de l'essai étant un essai de relaxation.



(a) Éprouvette bi-instrumentée pour mettre en exergue le phénomène de repliement de spectre



(b) Cartes de la déformation transverse ε_{xx} sous effort

FIGURE 2.8 – Illustration de l’essai réalisé afin de comprendre le phénomène de repliement de spectre : une éprouvette trouée soumise à un effort de traction est instrumentée avec deux grilles identiques, mais dont l’une est volontairement non-alignée avec la grille capteur (a). Sous effort, l’effet du repliement de spectre est observable uniquement sur la grille alignée (b).

Les réponses macroscopiques des essais sont illustrées sur la figure 2.9. On peut remarquer que le rapport asphalt neuf - asphalt recyclé influence bien la réponse macroscopique des éprouvettes. Il y a certes une disparité entre les éprouvettes de même constitution mais celle-ci est inférieure à celle observable entre les différents mélanges. Les agrégats recyclés ne se comportent donc pas comme le matériau neuf. La compréhension des mécanismes mis en oeuvre nécessite donc une observation locale, c’est-à-dire à l’échelle des granulats. Cette observation est rendue possible grâce à l’utilisation de la GM.

Illustration du comportement à l’échelle locale du bitume On s’intéresse ici à une unique éprouvette constituée d’agrégats 100% RAP. L’objectif est de mettre en avant le comportement du bitume au sein d’une éprouvette où la part de bitume vierge est relativement faible, fixée à 0,7%. Les cartes des déformations à effort maximal, exprimées dans le repère de l’éprouvette, sont

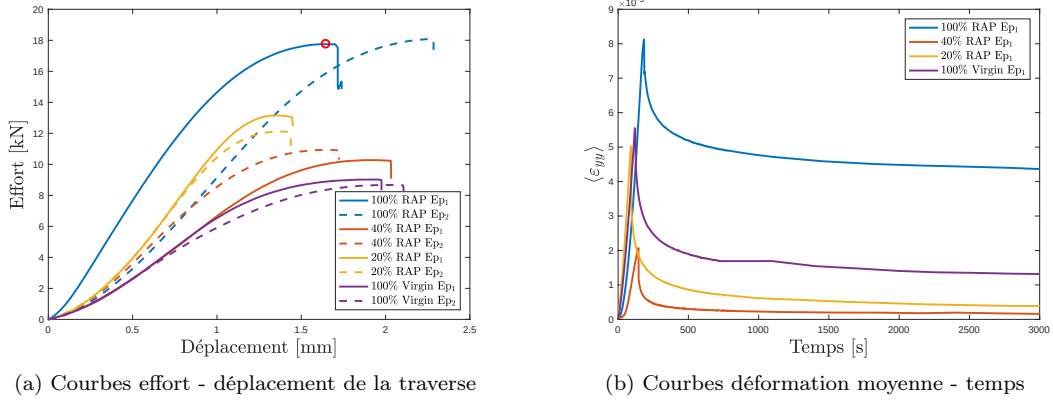


FIGURE 2.9 – Résultats macroscopiques des essais de compression pour les éprouvettes de différents rapports RAP - asphalt vierge. (a) évolution de l'effort mesuré en fonction du déplacement imposé. Seule la partie compression de l'essai est représentée ; (b) évolution de la déformation macroscopique de l'éprouvette en fonction du temps.

données figure 2.10. Sur ces cartes, l'image de l'éprouvette avant le dépôt de la grille est superposée aux déformations afin mettre en valeur le lien entre microstructure et réponse mécanique.

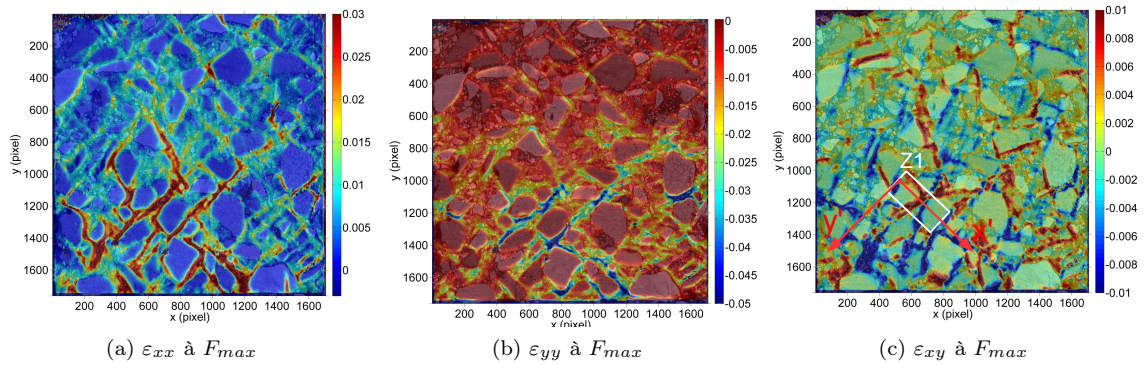
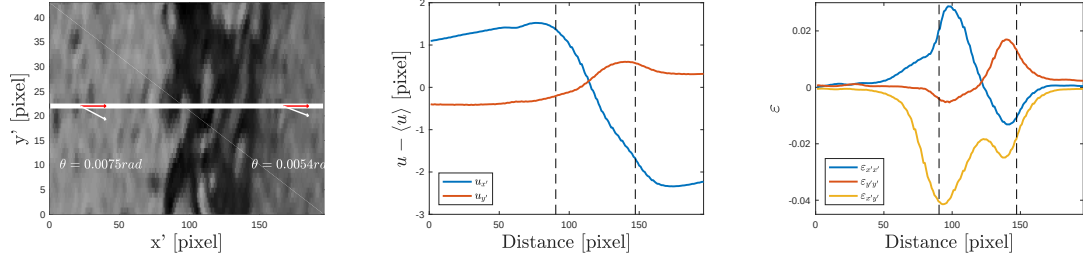


FIGURE 2.10 – Cartes des déformations ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{xy} associées à une éprouvette 100% RAP à effort de compression maximal. Ces cartes correspondent au point rouge sur la courbe effort-déplacement macroscopique de la figure 2.9a.

Ces cartes nous renseignent directement sur le caractère hétérogène de la réponse : les agrégats se déforment imperceptiblement, ils se déplacent et toute la déformation est assurée par le bitume. Afin de mettre mieux en avant le comportement du bitume, on s'intéresse à une petite zone arbitraire entre deux agrégats. Celle-ci est illustrée figure 2.10c par le rectangle blanc. De plus, on définit un nouveau repère local, dirigé par le vecteur allant du gravier A vers le gravier B. La figure 2.11 présente l'image extraite de la surface du matériau au sein de cette zone (*cf* figure 2.11a), l'évolution du déplacement mesuré (*cf* figure 2.11b) et des déformations (*cf* figure 2.11c). Ces dernières quantités étant exprimées dans le repère local défini sur la figure 2.10c.

Ce zoom au niveau des mesures nous permet de mieux comprendre les phénomènes mis en oeuvre à l'échelle locale du matériau. En effet, le mouvement des deux agrégats est de sens opposé, comme illustré figure 2.11b. En ce qui concerne les déformations, celles-ci tendent à prendre



(a) Zoom de l'image sur le bitume entre les granulats A et B . La rotation de ces derniers est indiquée (b) Évolution du déplacement exprimé dans le repère local entre les points A et B (c) Évolution des déformations exprimées dans le repère local entre les points A et B .

FIGURE 2.11 – Évolution du déplacement et des déformations entre les deux agrégats A et B , exprimés dans le repère local dirigé par les deux centres des agrégats observés. Ces observations mettent en avant deux phénomènes : (i) le lissage des mesures à aux frontières agrégats/bitume (ii) la déformation de cisaillement pilote la transformation.

des valeurs nulles au sein des granulats et leurs maxima sont près des interfaces. De plus, on observe que la déformation pilotant le mouvement est ici celle de cisaillement. On retrouve donc un comportement d'écoulement visqueux du bitume entre les deux agrégats. La mesure de champs cinématique offre ici un regard à l'échelle locale du matériau. Plus particulièrement, elle permet de montrer qu'au sein d'une éprouvette 100% RAP, le bitume présente encore le comportement visqueux attendu.

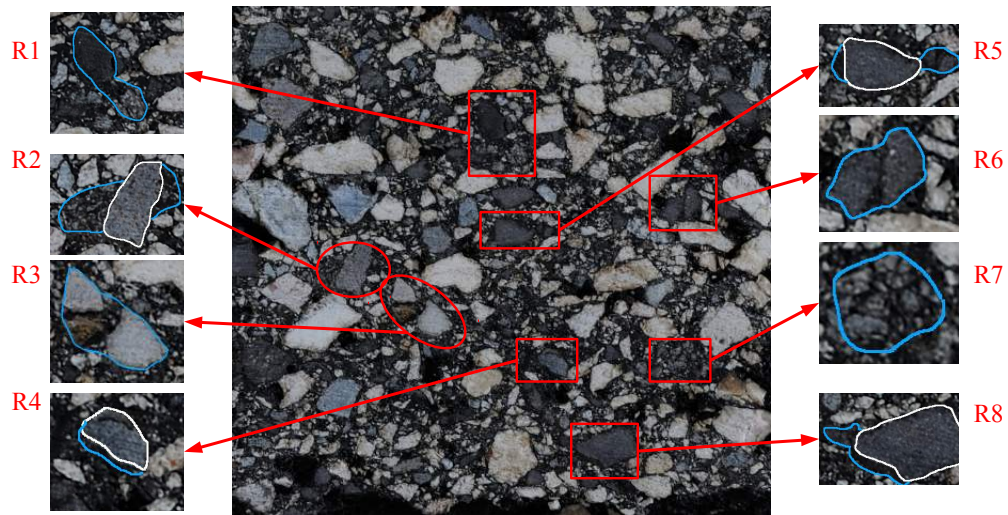
Un autre point mis en avant par ces mesures concerne un aspect des performances métrologiques de la mesure. En effet, l'allure des déformations est affectée par la convolution avec la fenêtre d'extraction utilisée pour la transformée de Fourier fenêtrée, cf Eq.(2.6). En effet, les déformations vraies sont quasiment nulles au sein des agrégats, de part leur rigidité bien plus élevée que celle de la matrice bitumineuse. Les déformations mesurées illustrent parfaitement la notion de résolution spatiale : avec la fenêtre choisie (ici une fenêtre gaussienne avec $h = 5$ [pixel]), la convolution agit comme un filtre qui inhibe les fréquences spatiales élevées et adoucit le signal vrai.

Mise en évidence de paquets d'agrégats recyclés Le mécanisme avancé dans la littérature des asphalts recyclés conduisant à l'accroissement de la rigidité des RAP est le fait que le concassage n'est pas parfaitement réalisé et que des ensembles de différents agrégats recyclés se comportent comme un unique agrégat, cf [Roque *et al.*, 2015, Bressi *et al.*, 2015]. Toutefois, ce phénomène n'a pas été clairement observé. La figure 2.12 présente une photo d'une éprouvette 40% RAP ainsi que sa contrainte équivalente au sens de von Mises lorsqu'elle est soumise à son chargement maximal. Comme illustré sur la figure 2.12a, des agrégats (zones blanches) forment des paquets (zones bleues) qui se comportent alors comme des agrégats, c'est-à-dire qu'ils ne se déforment pas sous effort, cf figure 2.12b.

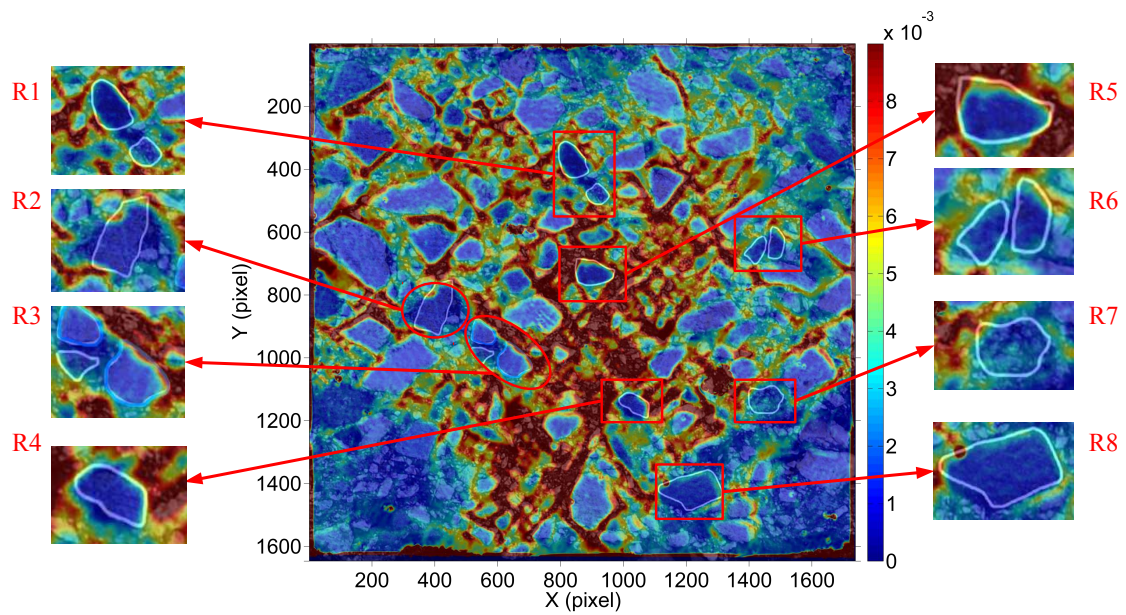
La mesure de champs cinématiques, plus particulièrement la GM, permet donc d'observer distinctement le phénomène de cohésion entre agrégats RAP, ce qui induit un accroissement de la rigidité macroscopique de l'éprouvette.

Utilisation de la richesse des champs données Dans les deux exemples précédents, on a utilisé les cartes de déformations pour mettre en exergue les propriétés locales du matériau observé. Un autre atout des mesures de champs réside dans la richesse des mesures. En effet, les images traitées contiennent $\approx 1700 \times 1700$ pixels et cette grande quantité d'information peut être utilisée sous forme statistique.

Ces données peuvent par exemple servir pour mettre en exergue l'influence de l'utilisation de



(a) Photo de la face observée avant le dépôt de la grille



(b) Carte de la déformation équivalente au sens de von Mises sous chargement maximal

FIGURE 2.12 – Illustration du phénomène d'agglomération de plusieurs agrégats recyclés au sein de RAP. (a) photo de la face observée d'une éprouvette 40% RAP, au sein des zooms, les zones blanches correspondent aux agrégats recyclés et les zones bleues aux zones à déformation nulle ; ces dernières sont déterminées par l'étude de la carte de la déformation équivalente (b).

RAP sur l'irréversibilité du comportement du liant bitume. Dans ce qui suit, parmi tous les pixels, on ne retient que ceux qui correspondent à des mesures associées au comportement du bitume. De plus, on s'intéresse à la distribution de la différence entre déformation équivalente sous chargement maximal et résiduelle. La déformation résiduelle correspond à la déformation irréversible mesurable en fin d'essai. La figure 2.13 présente l'histogramme de cette différence, adimensionnée par sa valeur spatiale moyenne pour trois types d'éprouvette, l'une est composée d'enrobé vierge, les deux autres de respectivement 40% et 100% de RAP. Cet histogramme traduit deux phénomènes : son écart à la valeur unitaire traduit l'irréversibilité du comportement et sa dispersion l'hétérogénéité de la réponse.

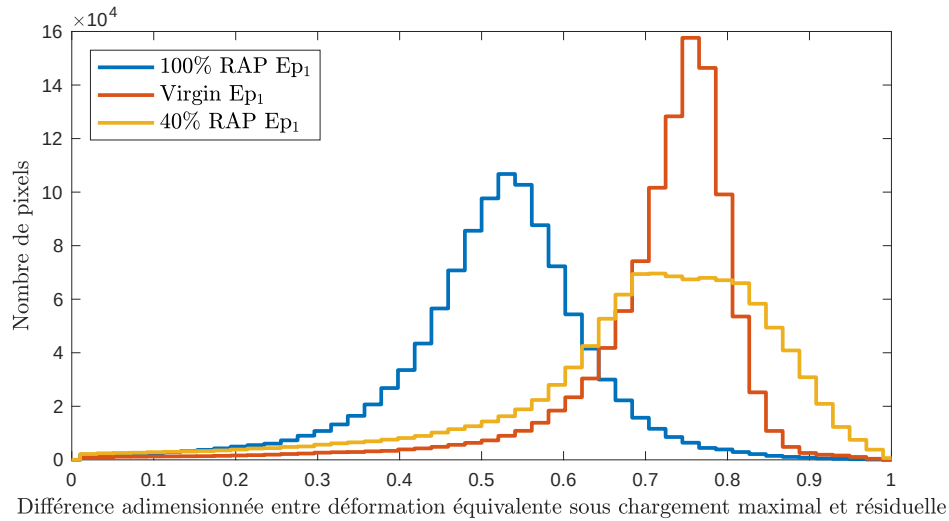


FIGURE 2.13 – Histogramme de la différence adimensionnée entre déformation équivalente sous chargement maximal et déformation résiduelle. L'écart à la valeur unitaire traduit l'irréversibilité du comportement et la dispersion l'hétérogénéité de la réponse.

Bien que ces données soient extraites d'un unique essai à chaque fois, les résultats sont analogues pour les différentes éprouvettes de même composition. Elles traduisent bien un comportement matériau. La quantité de données permet en effet de régulariser ses propriétés statistiques. La déformation résiduelle est plus importante au sein de l'éprouvette RAP 100% car celle-ci subit plus d'endommagement que les autres. En effet, une observation de cette éprouvette au microscope a permis de mettre en avant l'apparition de nombreuses fissures à sa surface, plus de détails sont donnés dans [ACL9]. Les mélanges vierges et à 40% de RAP présentent une plus faible déformation résiduelle. De plus l'utilisation de RAP a un impact positif : la moyenne des données est légèrement décalée vers l'unité, synonyme d'un gain de réversibilité du comportement. En effet, bien que le pourcentage de bitume vierge soit le même pour les deux mélanges, une part du bitume de l'asphalt recyclé peut être réactivé lors de la préparation du RAP. Toutefois, cette amélioration est obtenue au prix d'une dispersion plus élevée, traduisant une l'hétérogénéité aussi élevée de la réponse mécanique.

4 Bilan et perspectives

J'ai tout d'abord rappelé succinctement dans ce chapitre le principe de la GM, mais aussi ses performances métrologiques ; ces deux points concernant principalement des travaux de l'équipe que j'ai intégrée à l'Institut Pascal. Dans un second temps, j'ai mis en avant l'une de mes contributions

à la GM, plus spécifiquement au phénomène des franges parasites. Les travaux d'un mémoire de Master [MAST2] ont en effet mis à la lumière le phénomène de repliement de spectre. Ce phénomène est visible dès lors que l'on s'intéresse à des petites déformations. Son origine vient de l'échantillonnage nécessaire pour l'acquisition d'une image de grille. Après la présentation d'un outil de filtrage permettant de "nettoyer" les cartes de déformation de ces franges [ACL5], on propose une solution permettant de minimiser leur apparition [ACL11]. Cette solution est relativement simple puisqu'elle consiste à introduire un angle entre la grille observée et le repère du capteur de la caméra. Enfin, j'ai illustré l'apport de la GM pour la compréhension des mécanismes de dégradation au sein d'un matériau fortement hétérogène, à savoir les enrobés bitumineux [ACL9]. Cette illustration est tirée des travaux d'un doctorant que j'ai encadré [THES1]. Cet apport est ici présenté sous deux aspects : l'observation de ces phénomènes à l'échelle locale de la structure et l'utilisation sous forme de statistique de la grande quantité de mesures offertes.

La mise en oeuvre pratique de la GM est nontriviale. En effet, une préparation spécifique de la surface imagée est nécessaire afin d'y déposer une grille la plus parfaite possible. Bien que ce dépôt soit maîtrisé au sein du laboratoire, il limite largement la diffusion de la méthode. Cet effort à réaliser lors de la préparation des essais est toutefois payant au regard des performances de la GM. La technique s'appuie en effet principalement sur la transformée de Fourier discrète, dont les outils sont grandement développés et utilisés par la communauté du traitement d'images. Par conséquent, le coût de calcul nécessaire au calcul d'une carte déplacement est extrêmement faible au regard de sa richesse : cette carte est définie en chaque pixel, sans interpolation. De plus, sur marquage identique, ses performances métrologiques sont légèrement meilleures que pour la DIC, cf [ACL14], bien qu'aucune information mécanique ne soit injectée afin de régulariser la solution.

La GM semble donc la méthode d'observation des mécanismes de réponse des matériaux sous sollicitation par excellence. Toutefois, la méthode peut encore être le support de nombreuses améliorations afin de faciliter sa mise en oeuvre, se rapprocher des problématiques d'identification ou élargir son champ d'application. Les perspectives à court et moyen termes sont les suivantes :

- La méthode actuelle de dépôt de grille, détaillée dans [Piro et Grédiac, 2004], s'appuie sur le transfert d'une grille imprimée sur un film plastique vers la surface de l'éprouvette à l'aide d'une colle époxyde. Cette méthode présente plusieurs inconvénients : le transfert n'est pas toujours réussi et nécessite donc plusieurs tentatives ; la grille y est considérée comme un consommable ; la couche de colle peut impacter la mesure (pontage d'une fissure par exemple)... Une piste est de s'appuyer sur une méthode de transfert par lithographie. Une telle approche permettrait de standardiser le dépôt, de s'affranchir de la couche de colle et par ailleurs du nombre limité de tailles de pas de grille aujourd'hui disponibles. En effet, un jeu de masques de grilles de différents pas suffirait. Des travaux sont en cours afin de mettre en oeuvre cette nouvelle méthode de marquage (par exemple [MAST6]). Toutefois, le contraste obtenu n'est pas d'aussi bonne qualité qu'avec la méthode de transfert traditionnelle.
- Une autre perspective de recherche consiste à étudier la possibilité d'enrichir le calcul du déplacement au sein de la GM avec de l'information mécanique. L'introduction d'un filtre post-traitant la solution GM ou directement contraindre le schéma actuel sont deux pistes d'investigations. Par exemple, au sein de ses travaux de thèse, M. Cheikh Teguedi, cf [THES1] s'est intéressé à la compression d'asphalte dans le domaine élastique. Dans ce cas particulier, une régularité très forte de la solution est attendue et pourrait être injectée au sein de la GM. Le cadre fonctionnel reste toutefois à découvrir.
- La GM est l'une des rares méthodes de mesure de champs à offrir une carte de même densité d'information que les images traitées : le déplacement est défini en chaque pixel sans interpolation. Cette richesse d'information n'est actuellement pas vraiment prise en compte par les différentes méthodes inverses propres à la thématique d'identification, et qui nécessitent l'introduction d'un support d'intégration discret. Dans ce cadre, travailler directement avec les méthodes d'identification basées sur la discrétisation au pixel et qui s'appuient sur les outils d'analyse d'image, cf [Bellis et Moulinec, 2016, Bellis *et al.*, 2017], en allant même jusqu'à coupler les deux approches, semble constituer une piste prometteuse.

- Enfin, le formalisme actuel de la GM, réduit à la seule mesure d'un déplacement dans son plan d'une surface plane, est extrêmement réducteur. Des premiers travaux utilisent des propriétés attendues du champ de déformation observé pour déduire de la mesure un champ 3D à l'aide d'une analyse complète de l'information fréquentielle [Wen *et al.*, 2017]. Reprendre les méthodes de projection déjà introduites pour la stéréocorrélation d'image [Sutton *et al.*, 2009] afin d'étendre la GM à la mesure 3D consitue une perspective très prometteuse. Le support de l'information, c'est-à-dire la grille, peut, de plus, directement servir de mire d'étalonnage pour le calibrage du système optique avant essai. Des premiers travaux vont dans ce sens pour caractériser les distortions optiques, par exemple, [Coudert *et al.*, 2004].

Chapitre 3

Corrélation d'images numériques

Dans ce chapitre, le principe de base de la DIC est rappelé succinctement. Sa mise en oeuvre algorithmique et ses performances métrologiques sont aussi abordées. Un outil de génération d'images synthétiques est présenté dans un deuxième temps, car les études théoriques portant sur la DIC nécessitent souvent l'utilisation d'images virtuelles. Enfin, trois applications sont présentées : d'abord son couplage avec une cinématique hautement spécifique, dédiée à la caractérisation du délaminage ; ensuite son utilisation dans le contexte contraignant qu'est l'usinage et enfin son usage pour la caractérisation de l'état de santé d'un biofilm. Ces trois illustrations, mues par la volonté d'apporter la mesure la plus robuste possible, ont nécessité de développer des codes DIC dédiés.

Sommaire

1	Principe de la DIC	32
1.1	DIC - algorithmique	33
1.2	DIC - performances métrologiques	36
2	Création de mouchetis synthétiques	42
3	Applications	45
3.1	DIC dédiée à la caractérisation du délaminage en mode I	45
3.2	Utilisation de la DIC dans un cadre d'usinage	50
3.3	Utilisation de la DIC pour la caractérisation de l'état de santé d'un biofilm	55
4	Bilan et perspectives	57

M Sutton a introduit la corrélation d'images numériques, ou “digital image correlation” (DIC) en anglais, dans les années 80 au sein des laboratoires de mécanique expérimentale [Sutton *et al.*, 1983, Chu *et al.*, 1985, Sutton *et al.*, 1986]. Sur le fond, il s'agit d'une technique présentant une formulation similaire à la “Particule image velocimetry” (PIV). L'accroissement des performances des caméras numériques et des ordinateurs à coût décroissant ont aidé à sa diffusion. Sa facilité d'implémentation et d'utilisation y ont aussi particulièrement contribué. En effet, la DIC est une méthode basée sur la comparaison de l'amplitude du signal. Elle s'appuie donc sur les niveaux de gris des images. Les zones observées ne nécessitent pas une préparation particulière, sauf pour améliorer le contraste de leur texture avec de la peinture (échelle macroscopique) ou un dépôt de particules (échelle microscopique), *cf* [Dong et Pan, 2017].

Bien qu'introduite il y a une trentaine d'année, le développement de la DIC est encore aujourd'hui au coeur de nombreux travaux de recherche. On peut tout d'abord noter que les progrès technologiques des techniques d'imagerie ont enrichi régulièrement le champ d'application de la DIC. Les microscopes à balayage électronique [Vendroux et Knauss, 1998], la tomographie [Bay *et al.*, 1999, Réthoré *et al.*, 2011], ou encore tout simplement le nombre en constante augmentation de pixels des caméras de mesure [Marty *et al.*, 2015] ont en effet permis d'améliorer les applications ou les performances de cette technique de mesure. Ces nouvelles techniques d'imagerie ont aussi nécessité un travail de fond sur la DIC afin d'utiliser de la manière la plus cohérente possible ces nouvelles technologies. En parallèle, de nombreux travaux s'intéressent à la formulation de la DIC. La version initiale de la DIC, très proche de la PIV et appelée ici “locale”, utilise une formulation locale du problème de corrélation pour remonter aux cartes de déplacement. On trouve dans la littérature des travaux qui revisitent chaque étape de cette formulation afin d'en améliorer les performances; ainsi la définition de son support local [Wang *et al.*, 2015], de la cinématique qui y est injectée [Wang et Pan, 2015], de l'interpolation nécessaire [Tong, 2013a] ou encore de l'écriture du résidu de corrélation [Pan *et al.*, 2010] sont encore étudiés aujourd'hui. Au début des années 2000, une équipe du LMT Cachan a introduit la version “globale” de la DIC [Besnard *et al.*, 2006]. La nouveauté de cette formulation réside principalement sur l'élargissement du support du critère de corrélation, au prix d'un enrichissement de la cinématique sous-jacente. Cette approche permet d'initier un dialogue très riche avec l'étape souvent associée à la mesure de champs : la caractérisation mécanique des champs observés [Hild et Roux, 2006, Roux et Hild, 2006, Réthoré *et al.*, 2008a]. En effet, simulation et observation peuvent être réunies au sein de ce formalisme. Enfin, une question particulièrement d'actualité et pas encore complètement close concerne l'étude des performances métrologiques de la DIC.

Dans ce chapitre, le principe de la DIC est d'abord présenté. Le formalisme choisi convient aussi bien aux approches locale que globale. Les aspects algorithmiques sont développés, en s'attachant à préciser les hypothèses souvent introduites. Les outils d'estimation des performances métrologiques sont ensuite discutés, plus particulièrement la résolution spatiale associée au seul bruit de capteur et le biais de mesure associé au choix cinématique pour la DIC locale. Ces études théoriques nécessitant la génération d'images synthétiques parfaitement maîtrisée, un outil dédié à la création d'images virtuelles sans biais est ensuite introduit. Enfin, trois illustrations d'utilisations très spécifiques de la DIC sont présentées.

1 Principe de la DIC

La formulation de la DIC s'appuie sur la conservation des niveaux de gris entre les deux instants auxquels les images S_0 et S_t sont enregistrées. En d'autres termes, il s'agit de la conservation du flux optique [Horn et Schunck, 1981] intégrée sur $[0, t]$. Avec $\underline{u}_t(\underline{m}_p)$ le déplacement aux coordonnées pixels $\underline{m}_p$ à l'instant t , cette conservation est illustrée figure 3.1. Elle s'écrit :

$$S_0(\underline{m}_p) \approx S_t(\underline{m}_p + \underline{u}_t(\underline{m}_p)). \quad (3.1)$$

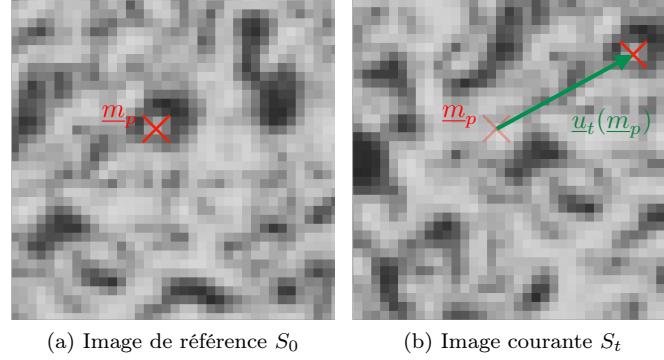


FIGURE 3.1 – Illustration de la conservation des niveaux de gris entre l’état de référence (a) et l’état courant (b). L’intensité du point $\underline{m}_p$ sur l’image de référence S_0 se retrouve sur l’image courante au point $\underline{m}_p + \underline{u}_t(\underline{m}_p)$.

Retrouver en tout pixel le déplacement $\underline{u}_t(\underline{m}_p)$ à partir de l’équation Eq.(1.1) est un problème mal posé. Il est donc nécessaire de le régulariser afin de mener à bien sa résolution. La partie suivante présente les régularisations régulièrement utilisées dans la littérature. Le schéma numérique associé au calcul du déplacement est aussi détaillé. Les performances métrologiques de la DIC sont ensuite étudiées.

1.1 DIC - algorithmique

En plus d’éléments bibliographiques, cette partie s’appuie sur des travaux réalisés lors de mon post-doctorat, valorisés dans [ACL6].

Une présentation détaillée de l’implémentation de la DIC est donnée dans [Sutton *et al.*, 2009]. Toutefois, afin d’introduire les notations nécessaires mais aussi de mettre en avant les points clés de la DIC, ses principales lignes sont rappelées ici. L’équation forte de la conservation du flux optique Eq.(1.1) est affaiblie afin de formuler le problème central de la DIC. Les principales hypothèses sont :

- **régularisation spatiale** – En effet, la condition est reformulée sous la forme d’un potentiel Ψ défini sur le résidu optique $\mathbf{r}_t$. Ce résidu traduit la non-vérification de la conservation des niveaux de gris sur les N_p pixels de la RoI, tel que :

$$\Psi(\underline{u}_t) = \|\mathbf{r}_t\|^2$$

avec $\forall \underline{m}_p \in \text{RoI}, \exists \mathbf{p} \in \{1, \dots, N_p\} \mid [\mathbf{r}(\mathbf{a})]_{\mathbf{p}} = S_0(\underline{m}_p) - S_t(\underline{m}_p + \underline{u}_t(\underline{m}_p, \mathbf{a}))$. (3.2)

Ce potentiel, basé sur la norme 2 du résidu, est appelé “Sum of Squared Difference” (SSD). Il correspond à la formulation la plus simple de la conservation des niveaux de gris sur la RoI. On trouve dans la littérature de nombreuses alternatives à cette écriture, comme la “Sum of Absolute Difference” (SAD), la “Parametric Sum of Squared Difference” (PSSD) ou encore la “Zero-mean Normalized Sum of Squared Difference” (ZNSSD) [Pan *et al.*, 2010]. Ces différentes formulations peuvent permettre, par exemple, de palier la difficulté d’assurer un éclairage homogène et constant au cours du temps. Toutefois, bien que la convergence puisse être aisée par certaines formulations, la solution est identique à convergence [Pan *et al.*, 2010].

- **régularisation cinématique** – Avec la DIC, il est nécessaire de définir l’espace cinématique auquel appartient le déplacement. Cette étape consiste à définir *a priori* une cinématique sur la RoI. On note $\mathcal{U}$ l’espace cinématique de recherche. De plus, on introduit un paramétrage

$\mathbf{a}$ tel que le déplacement s'écrive

$$\underline{u} \in \mathcal{U} \Rightarrow \exists \mathbf{a} \mid \forall \underline{m}_p \in \text{RoI}, \underline{u}_t \text{ est approché par } \underline{u}(\underline{m}_p, \mathbf{a}). \quad (3.3)$$

$\mathbf{a}$ est un vecteur de dimension $N_{ddl} \times 1$, N_{ddl} étant le nombre de degrés de liberté (ou de paramètres) nécessaires pour exprimer le déplacement approché en tout point de la RoI. Ces degrés de libertés peuvent aussi bien correspondre au déplacement en un pixel, à toute grandeur cinématique qu'à un paramétrage plus général.

Enfin, au déplacement approché $\underline{u}$, on associe la transformation $\underline{\phi}$ Eq.(3.2) telle que :

$$\begin{aligned} \underline{\phi} : \text{RoI} \times \mathbb{R}^{N_{ddl}} &\rightarrow \mathbb{R}^2 \\ (\underline{m}_p, \mathbf{a}) &\rightarrow \underline{m}_p + \underline{u}(\underline{m}_p, \mathbf{a}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Cette écriture permet de redéfinir le résidu de corrélation $\mathbf{r}$ tel que, pour tout ddl i et en tout pixel $\mathbf{p}$:

$$[\mathbf{r}(\mathbf{a})]_p = S_0(\underline{m}_p) - S_t \circ \underline{\phi}(\underline{m}_p, \mathbf{a}) \text{ ou } \mathbf{r}(\mathbf{a}) = \mathbf{s}_0 - \phi(\mathbf{a}) \mathbf{s}_t, \quad (3.5)$$

où $\phi(\mathbf{a})$ (resp. $\mathbf{s}_t$) correspond au vecteur colonne contenant toutes les valeurs de l'image S_0 (resp. S_t), c'est-à-dire que pour tout pixel $\mathbf{p}$ $[\mathbf{s}_t]_p = S_t(\underline{m}_p)$.

La formulation du potentiel de corrélation Eq.(3.5) met en avant un élément important nécessaire à son évaluation : une interpolation de l'image courante S_t est nécessaire. En effet, les coordonnées $\underline{m}_p$ correspondent à des pixels entiers, et l'image de référence S_0 est donc utilisée telle quelle. L'image courante S_t est en revanche évaluée aux coordonnées liées à la transformation $\underline{\phi}$ qui n'ont donc plus de raison de correspondre à des valeurs de pixel entières. Il existent différentes écritures du résidu afin d'interpoler soit l'image de référence (schéma dit "backward"), soit courante ("forward") ou les deux. Une review des différents schémas est donnée dans [Tong, 2013a]. Cette interpolation joue un rôle central dans la DIC puisqu'elle introduit un biais de mesure [Sutton *et al.*, 2009]. Toutefois, le choix du schéma permet d'apporter des propriétés intéressantes à la mesure en termes de biais de mesure dû au bruit de capteur [Pan et Wang, 2016, Tong, 2013b].

On trouve dans la littérature deux écoles pour la formulation de la DIC : la version la plus répandue consiste à ne considérer qu'une petite RoI, associée à une définition cinématique relativement pauvre. Ce calcul est répété un grand nombre de fois sur l'image entière, puis les déplacements obtenus sont considérés comme autant de mesures indépendantes et interpolés afin d'obtenir un champ cinématique. Cette version s'appelle la DIC locale [Sutton *et al.*, 2009]. L'autre approche s'appuie au contraire sur une RoI la plus grande possible, associée à une cinématique beaucoup plus riche. La notion de champ cinématique est alors par essence liée à la méthode. On appelle cette approche la DIC globale [Besnard *et al.*, 2006]. Plus récemment, des approches encore plus dédiées de la DIC globale permettent de choisir une cinématique au plus près des mécanismes observés, celle-ci s'appuyant sur des solutions numériques [Réthoré *et al.*, 2008b] ou analytiques [Mathieu *et al.*, 2012a]. On les appelle DIC intégrée [Roux et Hild, 2006]. Enfin, la DIC globale offre une grande souplesse à la régularisation cinématique, ce qui a permis d'introduire par exemple des approches de régularisation mixtes basées sur des simulations éléments finis [Réthoré, 2010], des approches multi-échelles [Passieux *et al.*, 2014] ou encore une méthode d'enrichissement adaptative [Neggers *et al.*, 2017].

Enfin, il faut préciser que les deux méthodes sont complémentaires puisqu'elles peuvent toutes les deux s'appuyer sur les mêmes images. Dès lors que l'on s'intéresse à un matériau dont on n'a *a priori* pas d'informations sur sa réponse, il peut être pertinent d'utiliser la DIC locale dans une approche plus phénoménologique quitte à développer ensuite une approche globale ou même intégrée à des fins de caractérisation.

Le problème central de la DIC s'écrit donc :

$$\underline{u}_t^{\text{opti}}(\underline{m}_p) = \underline{u}(\underline{m}_p, \mathbf{a}^{\text{opti}}) \text{ avec } \mathbf{a}^{\text{opti}} = \text{Arg Min}_{\mathbf{a}^*} \left\{ \|\mathbf{r}(\mathbf{a}^*)\|^2 \right\}. \quad (3.6)$$

La résolution de ce problème, c'est-à-dire la détermination de $\mathbf{a}^{\text{opti}}$, est effectuée à l'aide d'un algorithme de Gauss-Newton [Baker et Matthews, 2004]. À partir d'une valeur initiale $\mathbf{a}^0$, on calcule la correction $\Delta \mathbf{a}^{\text{it}}$ minimisant la norme $\|\mathbf{r}(\mathbf{a}^{\text{it}} + \Delta \mathbf{a}^{\text{it}})\|^2$. Cette correction $\Delta \mathbf{a}^0$ est supposée petite devant $\Delta \mathbf{a}^{\text{it}}$. Le résidu $\mathbf{r}$ est alors linéarisé :

$$\mathbf{r}(\mathbf{a}^{\text{it}} + \Delta \mathbf{a}^{\text{it}}) = \mathbf{r}(\mathbf{a}^{\text{it}}) + \mathbf{J}_{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{it}}) \Delta \mathbf{a}^{\text{it}}, \quad (3.7)$$

où $\mathbf{J}_{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{it}})$ est la matrice jacobienne du résidu $\mathbf{r}$ en $\mathbf{a}^{\text{it}}$. Cette matrice, de dimension $N_{ddl} \times N_{\mathbf{p}}$ s'écrit de la manière suivante pour tout ddl i et en tout pixel $\mathbf{p}$:

$$[\mathbf{J}_{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{it}})]_{i,\mathbf{p}} = -\nabla(S_t) \circ \underline{\phi}(\underline{m}_{\mathbf{p}}, \mathbf{a}^{\text{it}}) \cdot \frac{\partial \underline{u}}{\partial [\mathbf{a}]_i}(\underline{m}_{\mathbf{p}}, \mathbf{a}^{\text{it}}). \quad (3.8)$$

La minimisation de $\Psi(\mathbf{a}^{\text{it}} + \Delta \mathbf{a}^{\text{it}})$ constitue un problème classique de minimisation au sens des moindres carrés, dont la solution satisfait l'équation normale suivante :

$$\mathbf{M}^{\text{it}} \Delta \mathbf{a}^{\text{it}} = \mathbf{b}^{\text{it}} \text{ avec } \begin{cases} \mathbf{M}^{\text{it}} = {}^t \mathbf{J}_{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{it}}) \mathbf{J}_{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{it}}) \\ \mathbf{b}^{\text{it}} = -\mathbf{J}_{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{it}}) \mathbf{r}(\mathbf{a}^{\text{it}}) \end{cases}. \quad (3.9)$$

On appelle $\mathbf{M}^{\text{it}}$ l'opérateur tangent et $\mathbf{b}^{\text{it}}$ le second membre. Afin de mener à bien le calcul de l'opérateur tangent $\mathbf{M}^{\text{it}}$, il est nécessaire de connaître la matrice jacobienne du résidu $\mathbf{J}_{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{it}})$. $\mathbf{M}^{\text{it}}$ doit donc être mis à jour à chaque itération, ce qui peut conduire à un coût de calcul prohibitif. Toutefois, certaines hypothèses permettent d'éviter ce problème :

- *choix d'une cinématique linéaire* – La description cinématique adoptée dans la plupart des cas repose sur une base vectorielle. L'espace $\mathcal{U}$ est ainsi défini à partir d'une famille libre de N_{ddl} fonctions de formes $(\underline{\psi}_i)_{1 \leq i \leq N_{ddl}}$ tel que

$$\mathcal{U} = \text{Vect} \left[(\underline{\psi}_i)_{1 \leq i \leq N_{ddl}} \right]. \quad (3.10)$$

Le déplacement $\underline{u}(\underline{m}_{\mathbf{p}}, \mathbf{a})$ s'écrit alors comme la somme des N_{ddl} fonctions de formes, pondérées par les ddl $(a_i)_{1 \leq i \leq N_{ddl}}$. Les fonctions d'influence s'écrivent donc pour tout pixel $\mathbf{p}$ et pour tout ddl i

$$\frac{\partial \underline{u}}{\partial [\mathbf{a}]_i}(\underline{m}_{\mathbf{p}}, \mathbf{a}^{\text{it}}) = \underline{\psi}_i(\underline{m}_{\mathbf{p}}). \quad (3.11)$$

- *hypothèse des petites perturbations* – Le calcul de la matrice jacobienne du résidu $\mathbf{J}_{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{it}})$ fait aussi intervenir le gradient de l'image courante, évalué aux coordonnées transformées par $\underline{\phi}$. Dans [ACL6], on montre que ce terme peut se réécrire en faisant intervenir le gradient $\underline{F}$ de la transformation :

$$\nabla(S_t) \circ \underline{\phi} = \underline{F}^{-1} \nabla(S_t \circ \underline{\phi}). \quad (3.12)$$

À convergence et avec une description cinématique contenant le déplacement vrai, l'image courante S_t transformée par $\underline{\phi}$ correspond à l'image de référence S_0 . De plus, sous l'hypothèse des petites perturbations, $\underline{F}$ est approché par l'opérateur identité.

Avec ces deux hypothèses, la matrice jacobienne du résidu $\mathbf{J}_{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{it}})$ ne dépend plus de la valeur prise par $\mathbf{a}^{\text{it}}$ à chaque itération. Elle est donc approchée par le terme constant défini par :

$$[\mathbf{J}_{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{it}})]_{i,\mathbf{p}} \approx -\nabla(S_0) \cdot \underline{\psi}_i(\underline{m}_{\mathbf{p}}). \quad (3.13)$$

Ces deux hypothèses sont discutées dans [ACL6]. Un résultat intéressant concerne la vitesse de convergence. Comme illustré figure 3.2, choisir la définition de la matrice jacobienne du résidu pour son calcul, cf Eq.(3.8), assure le meilleur taux de convergence. Celui-ci est détérioré dès lors qu'on utilise sa forme approchée Eq.(3.13). De plus, la figure 3.2 met en avant le comportement à convergence en 2 régimes de l'algorithme de la DIC : le premier correspond à l'évaluation grossière de la solution tandis que le second traduit le comportement à convergence. On observe alors que des formulations mixtes permettent de conserver le meilleur comportement à convergence tout en assurant un premier régime plus réduit.

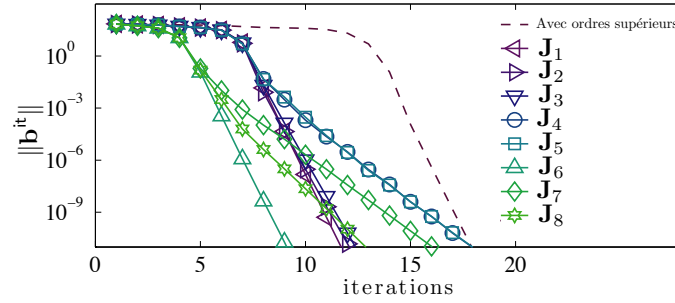


FIGURE 3.2 – Comportement de l'algorithme de DIC en fonction du choix de calcul pour la matrice Jacobienne du résidu. J_1 correspond à la définition Eq.(3.8), tandis que les autres sont des approximations. Pour plus d'information se référer à [ACL6].

1.2 DIC - performances métrologiques

Cette partie s'appuie sur des travaux réalisés dans le cadre d'une collaboration entre permanents (projet TIMEX), valorisés par [ACL7, ACL8, ACL14].

La DIC est un outil de mesure de champs d'informations mécaniques, et donc très rapidement et conjointement au développement de la méthode en elle même, ses performances métrologiques ont été étudiées. La plupart des études s'intéressent à la résolution de mesure, mais on peut relever aussi quelques travaux propres à la résolution spatiale (à biais donné). Ces deux points sont discutés dans ce qui suit.

Résolution de mesure La résolution de mesure associée aux cartes de déplacements offertes par la DIC a commencé à être étudiée durant la dernière décennie, avec toutefois des approches différentes dans le cadre de la DIC locale (par exemple, cf [Wang *et al.*, 2007, Sutton *et al.*, 2009, Wang *et al.*, 2009, Ke *et al.*, 2011, Wang *et al.*, 2011, Tong, 2013b]) et dans le cadre de la DIC globale, (par exemple, cf [Besnard *et al.*, 2006, Roux et Hild, 2006, Réthoré *et al.*, 2008a, Réthoré *et al.*, 2008b, Hild et Roux, 2012]). Ces études s'intéressent aux paramètres intrinsèques et extrinsèques à la DIC qui impactent sa résolution de mesure. La qualité de la texture imagée et le bruit de capteur comptent parmi ces paramètres. La texture est en effet la porteuse de l'information mécanique, elle joue donc par essence un rôle crucial [Lecompte *et al.*, 2006]. Certains travaux proposent des techniques afin d'optimiser la géométrie de la texture [Bossuyt, 2013, Bomarito *et al.*, 2017]. En ce qui concerne le bruit de capteur, c'est un sujet largement traité depuis longtemps par la communauté dite de traitement d'images [Holst, 1998], et plus récemment au sein de la communauté de photomécanique [Sur et Grédiac, 2015a]. Si on ne s'intéresse qu'au seul impact du bruit de capteur sur la résolution de mesure, les premiers travaux associés à la DIC globale proposent une estimation de la résolution spatiale moyenne sur la RoI [Besnard *et al.*, 2006, Roux et Hild, 2006]. Cette estimation est ensuite revisitée afin d'offrir une estimation locale [Réthoré *et al.*, 2008a, Réthoré *et al.*, 2008b, Hild et Roux, 2012]. Toutefois ces estimations n'ont d'une part pas été rigoureusement confrontées à des mesures expérimentales, et d'autre part ne prennent pas en compte l'effet de l'interpolation Eq.(3.5).

En ce qui concerne la DIC locale, la littérature est plus large [Wang *et al.*, 2007, Pan *et al.*, 2008, Sutton *et al.*, 2009, Wang *et al.*, 2009, Ke *et al.*, 2011, Wang *et al.*, 2011, Tong, 2013b]. Toutefois, ces estimations n'ont elles aussi jamais été confrontées à des données expérimentales réalistes. Seuls [Ke *et al.*, 2011, Wang *et al.*, 2011] comparent leur estimation avec des mesures, mais celles-ci, réalisées sur une table optique, ne correspondent pas au cadre d'un laboratoire de mécanique expérimentale.

L'objet des articles [ACL7] et [ACL8] est d'une part de proposer une estimation de la résolution de mesure prenant en compte les effets de l'interpolation avec un formalisme commun aux DIC locale et globale. D'autre part, une confrontation avec des données expérimentales permet de valider cette estimation. Des outils particuliers ont alors été utilisés afin que les hypothèses nécessaires à l'élaboration de la formule prédictive soient satisfaites par les données expérimentales. Ces hypothèses sont les suivantes :

- le bruit de capteur est considéré comme un *bruit gaussien*. On considère une image réelle, notée $\tilde{S}_0$ (resp. $\tilde{S}_t$), comme la somme d'une image sans bruit S_0 (resp. S_t) et d'une perturbation δS_0 (resp. δS_t). Avec la notation vectorielle, on a :

$$\tilde{\mathbf{s}}_0 = \mathbf{s}_0 + \delta \mathbf{s}_0 \text{ et } \tilde{\mathbf{s}}_t = \mathbf{s}_t + \delta \mathbf{s}_t. \quad (3.14)$$

Ainsi $\delta \mathbf{s}_0$ et $\delta \mathbf{s}_t$ sont deux vecteurs aléatoires de moyenne nulle et d'écart-type σ^S . Dans la pratique, comme précisé dans la partie Sec.(1.2), le bruit de capteur est Poisson-Gaussien. L'utilisation de la GAT, déjà présentée dans le chapitre précédent, permet de corriger les images en normalisant la variance du bruit qu'elles contiennent [Grédiac et Sur, 2014]. Toutefois, dans le cadre de la DIC, il est possible de définir localement, c'est-à-dire en chaque pixel, les propriétés du bruit et ainsi de s'affranchir de la GAT, cf [ACL8].

Enfin, des mouvements de solide rigide entre caméra et éprouvette viennent perturber les mesures. En effet, la résolution observée est biaisée par ces mouvements. On peut utiliser la NRSR afin de corriger une série d'images en prenant en compte ces mouvements [Sur et Grédiac, 2015b]. Toutefois cette méthode ne s'applique que sur un marquage régulier, comme une grille.

- le bruit présent au sein des images *ne change pas en moyenne la solution* à convergence de la DIC. On peut donc considérer l'impact du bruit comme une perturbation $\delta \mathbf{a}$ autour de la solution optimale. En d'autres termes :

$$\tilde{\mathbf{a}}^{\text{opti}} = \mathbf{a}^{\text{opti}} + \delta \mathbf{a}. \quad (3.15)$$

- Pour chaque état, une série d'images est prise. Des images moyennes, construites à partir de chacune de ces séries, peuvent être considérées comme sans bruit. On identifie *le gradient des images bruitées par celui calculé sur ces images sans bruit* :

$$\underline{\nabla}(\tilde{S}_0) \approx \underline{\nabla}(\langle \tilde{S}_{0i} \rangle_{\text{série}}) \text{ et } \underline{\nabla}(\tilde{S}_t) \approx \underline{\nabla}(\langle \tilde{S}_{ti} \rangle_{\text{série}}), \quad (3.16)$$

où " $\langle \square_i \rangle_{\text{série}}$ " traduit l'opérateur moyenne sur la série $\square_i$.

- l'impact du bruit de capteur est *négligeable sur l'interpolation*. Soit :

$$\tilde{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{opti}}) = \tilde{\mathbf{s}}_0 - \phi(\mathbf{a}^{\text{opti}}) \tilde{\mathbf{s}}_t. \quad (3.17)$$

En introduisant la notation $\mathbf{A} = -\mathbf{M}^{-1} {}^t \mathbf{J}_{\mathbf{r}}(\mathbf{a}^{\text{opti}})$, les hypothèses énoncées permettent d'introduire la résolution de mesure pour tout degrés de liberté i :

$$\sigma_h^{\text{DIC}}(a_i) = \sigma^S \times \sqrt{[\mathbf{A}(\mathbf{Id} + \phi(\mathbf{a}^{\text{opti}})^t \phi(\mathbf{a}^{\text{opti}})) {}^t \mathbf{A}^t]_{ii}}. \quad (3.18)$$

La démonstration est donnée dans [ACL7]. La notation h traduit ici une longueur caractérisant la taille du support cinématique. Dans le cas de la DIC locale, il s'agit de la demi-longueur de la RoI utilisée. Dans le cas de la DIC globale sur cinématique éléments finis, il s'agit de la taille moyenne des éléments.

En négligeant l'effet de l'interpolation, c'est-à-dire en considérant $\phi(\mathbf{a}^{\text{opti}}) \approx \mathbf{Id}$, et en utilisant l'approximation Eq.(3.13), on retrouve la formule donnée dans [Réthoré et al., 2008a, Réthoré et al., 2008b, Hild et Roux, 2012] :

$$\sigma_h^{\text{DIC}}(a_i) = \sigma^S \times \sqrt{[2\mathbf{M}^{-1}]_{ii}}. \quad (3.19)$$

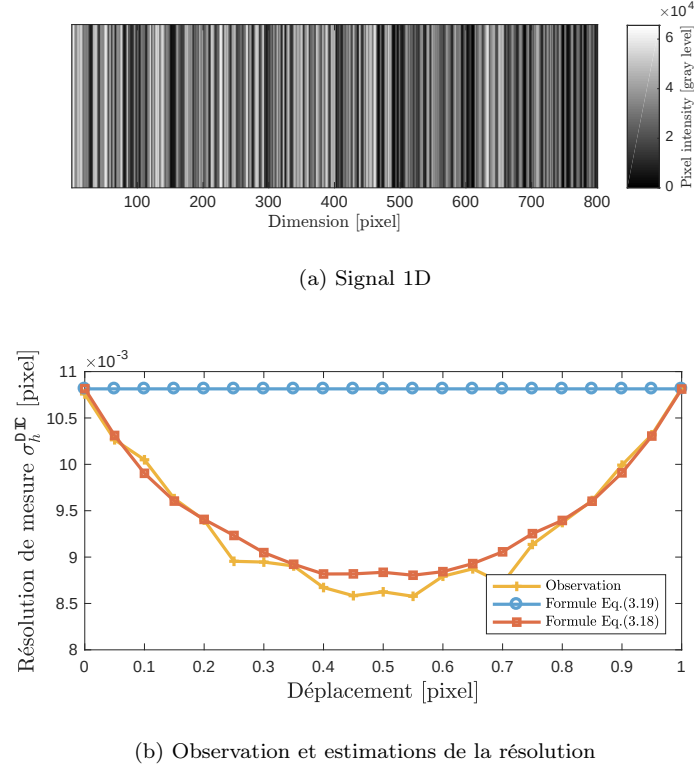


FIGURE 3.3 – Observation et estimation de la résolution de mesure sur un cas de translation d'un signal 1-D. Le signal de référence est illustré figure 3.3a, et les différentes résolutions de mesures figure 3.3b. L'estimation proposé dans [ACL7], cf Eq.(3.18), prend parfaitement en compte le déplacement sous-pixelique.

A titre d'illustration, la figure 3.3 présente une première étude, tirée de [ACL7], validant numériquement la formule Eq.(3.18). Une ligne d'une image est extraite afin de définir un signal 1-D. Un déplacement sous-pixelique est imposé virtuellement à ce signal et un bruit est ajouté artificiellement. Des séries d'images sont donc créées. Elles constituent un jeu de données synthétiques. En appliquant un algorithme de DIC sur celles-ci, avec pour unique cinématique un déplacement homogène, on peut comparer les estimations de la résolution de mesure Eq.(3.18) et Eq.(3.19) avec une observation sur ces données maîtrisées. Comme attendu, l'estimation Eq.(3.19) ne prend pas en compte les effets de l'interpolation. L'estimation Eq.(3.18) correspond par contre aux observations.

On s'intéresse maintenant à la validation de cette estimation à l'aide de données réelles. Pour cela, une éprouvette trouée est instrumentée à l'aide d'une grille, comme illustré sur la figure 3.4b. L'utilisation d'une grille est ici nécessaire afin de corriger à l'aide de la NRSR les séries images des mouvements de solide rigide qui biaisent les mesures, cf [ACL8]. Cette éprouvette est soumise à un essai de traction et sa réponse est hétérogène, comme illustré par les figures 3.4c & d.

Deux séries de 100 images sont prises : une série correspond à l'état de référence tandis que la seconde est associée à l'état courant (avec un effort de 2500 [N]). Une première validation concerne la version locale de la DIC. Une taille de RoI de 21×21 pixels est choisie (c'est-à-dire $h = 10$), avec une cinématique d'ordre 1 (mouvements de solide rigide et déformations homogènes dans la RoI). Les figures 3.5a et 3.5c illustrent la résolution de mesure observée. La figure 3.5e présente l'histogramme du rapport entre l'estimation de la résolution de mesure et son observation. Seuls les points de calculs, c'est-à-dire les centres des RoI, sont utilisés. Le moyenne du rapport est proche

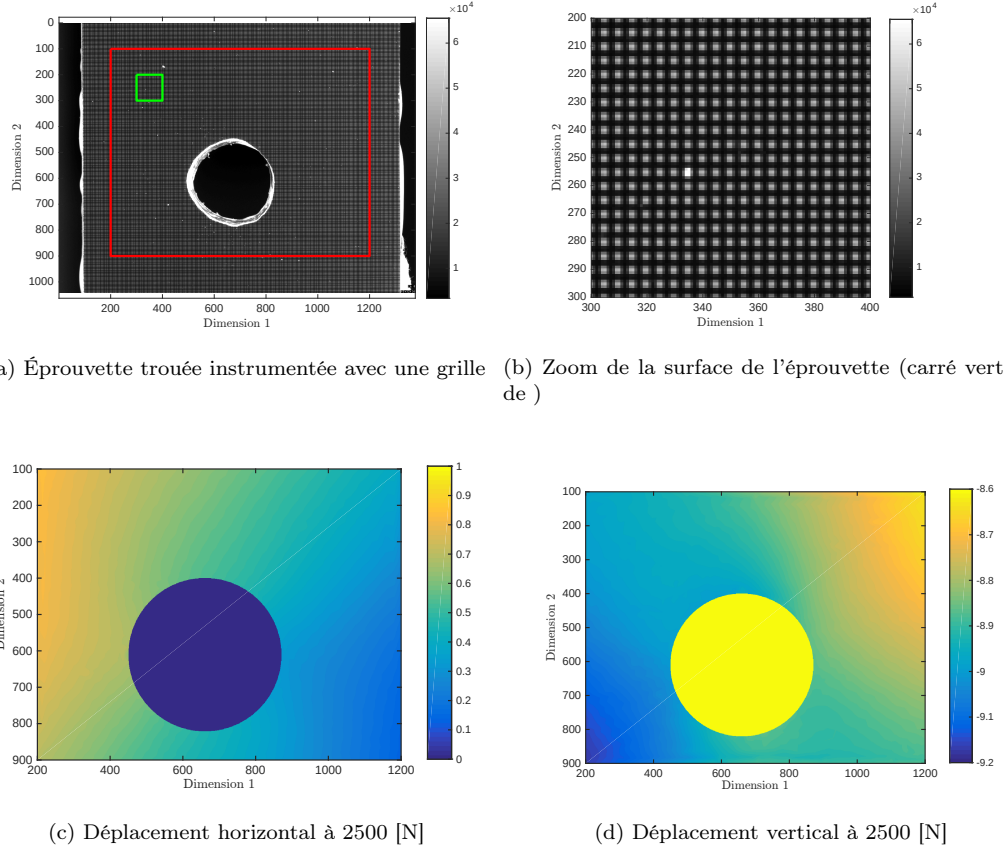


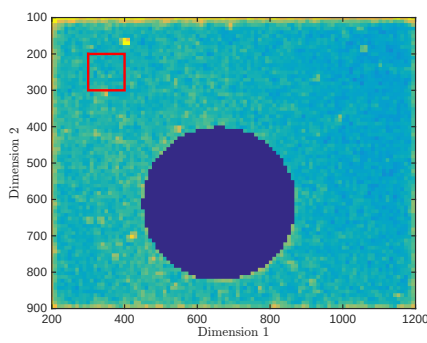
FIGURE 3.4 – Illustration de l'éprouvette utilisée pour la validation de l'estimation de la résolution de mesure. Cette éprouvette est instrumentée avec une grille, cf (a) et (b), et sa réponse en déplacement à 2500 [N] est présentée en (c) et (d).

de l'unité et son écart-type est faible. Ce premier résultat permet de valider la formule proposé.

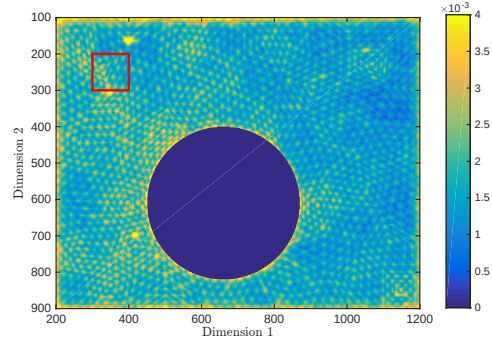
Les mêmes images ont été utilisées avec une version globale de la DIC. La RoI associée est définie par le rectangle rouge de la figure 3.4b (excepté le trou), et une cinématique d'ordre 1 de type éléments finis est implémentée. Le maillage est choisi de telle sorte que la taille des éléments soit à peu près du même ordre de grandeur que la taille des RoI utilisées pour la DIC locale ($h = 20$). Les figures 3.5b et 3.5d illustrent la résolution observée. Le maillage est aussi représenté figure 3.5d. Le calcul de la résolution est ici réalisé en tout pixel. Afin d'obtenir la résolution de mesure en tout pixel, il est nécessaire de généraliser la formule Eq.(3.18), celle-ci estimant la résolution de mesure associés aux seuls degrés de libertés, Introduite dans [ACL7], cette généralisation s'écrit :

$$\sigma_h^{\text{DIC}}(u_i(\underline{m}_p)) = \sigma^S \times \sqrt{[\varphi_{i,h} \mathbf{A} (\mathbf{Id} + \phi(\mathbf{a}^{\text{opti}})^t \phi(\mathbf{a}^{\text{opti}}))^t \mathbf{A}^t \varphi_{i,h}]_{pp}}, \text{ avec } i \in \{x, y\}, \quad (3.20)$$

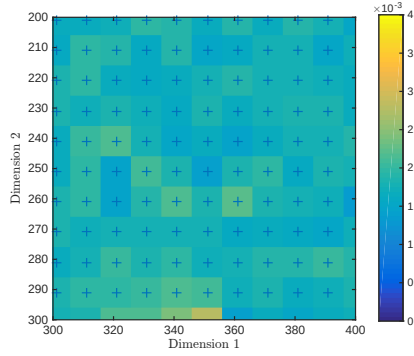
où $\varphi_{i,h}$, $i = \{x, y\}$ correspond à la notation matricielle des fonctions de projection entre les déplacements nodaux et le déplacement en tout pixel. La figure 3.5f illustre l'histogramme du rapport entre résolution observée et résolution estimée. De la même manière que pour la DIC locale, la moyenne du rapport est proche de l'unité et son écart-type est faible. La généralisation Eq.(3.20) et la formule Eq.(3.18) sont donc validées.



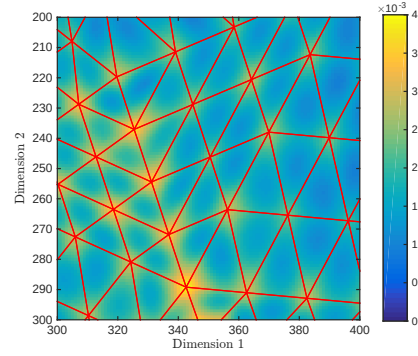
(a) DIC locale : résolution de mesure observée



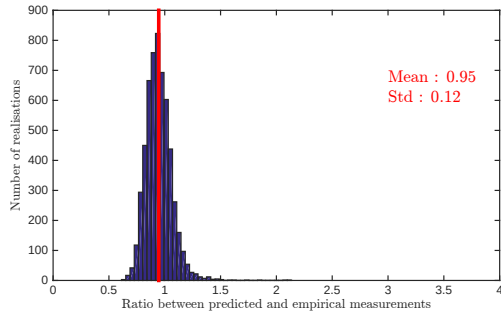
(b) DIC globale : résolution de mesure observée



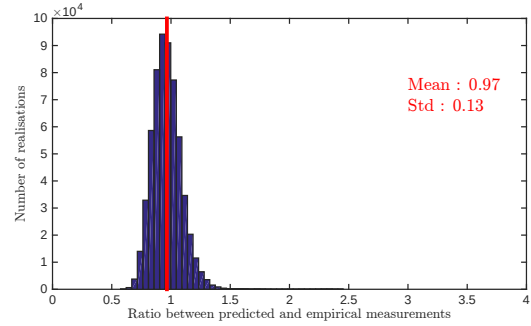
(c) Détail du carré rouge de (a)



(d) Détail du carré rouge de (b)



(e) DIC locale : Histogramme du rapport entre résolution observée et résolution estimée avec Eq.(3.18)



(f) DIC globale : Histogramme du rapport entre résolution observée et résolution estimée avec Eq.(3.20)

FIGURE 3.5 – Validation expérimentale de l'estimation Eq.(3.18) appliquée aux versions locale et globale de la DIC : (a), (b), (c) (d) résolutions observées ((c) et (d) correspondent aux zones rouges illustrées sur (a) et (b)). On voit bien sur (c) la taille des différentes RoI, les croix correspondants en leur centre; (e) rapport entre résolution observée et résolution estimée et sur (b) le maillage utilisé pour décrire la cinématique. (e) et (f) illustrent les histogrammes des rapports entre résolutions observées et résolutions estimées. L'unité correspond à l'égalité entre les résolutions prédite et observée.

Biais En ce qui concerne la DIC, le biais de mesure n'a été regardé que pour sa seule version locale. Les premiers travaux sont ceux de [Schreier et Sutton, 2002], mais son étude reste marginale. L'étude de comparaison GM - DIC locale [ACL14] les reprend toutefois. L'approche retenue pour l'étude du biais est la suivante :

- Le biais de mesure ne prend pas en compte l'effet de l'interpolation supplémentaire entre points distants nécessaire à l'obtention d'un champ de déplacement. Cette interpolation est utilisée quand le calcul DIC n'est pas réalisé en tout pixel mais sur une grille plus large. Dans [ACL14], un biais supplémentaire est introduit afin de quantifier l'effet de cette interpolation.
- Le signal est considéré comme parfait au regard de la DIC, son impact sur la solution n'est ainsi pas pris en compte. Le biais de mesure est donc considéré comme l'écart entre le déplacement vrai et sa projection sur la base cinématique choisie.

Sous ces hypothèses, l'effet de la DIC sur le déplacement vrai peut être interprété comme l'effet d'un filtre de Savitzky-Golay [Savitzky et Golay, 1964]. On l'illustre ici en considérant le déplacement uniquement horizontal et sa décomposition en série de Fourier. Ainsi, on s'intéresse au biais de mesure associé à un déplacement harmonique de fréquence f :

$$u_t(\underline{m}_p) = u_f \sin(\underline{m}_p f) \text{ devient } u(\underline{m}_p, \mathbf{a}^{\text{opti}}) = \widehat{u}_f \sin(\underline{m}_p f), \quad (3.21)$$

avec $\widehat{u}_f$ l'amplitude correspondante à un signal de fréquence f et d'amplitude u_f après application d'un filtre de Savitzky-Golay. Pour un déplacement de fréquence f , le biais de mesure λ est donc défini tel que :

$$\lambda^{\text{DIC}}(f) = 1 - \frac{\widehat{u}_f}{u_f} = 1 - \widehat{\mathcal{H}}(f), \quad (3.22)$$

avec $\widehat{\mathcal{H}}(f)$ la fonction de transfert associée au filtre de Savitzky-Golay, donnée dans [Savitzky et Golay, 1964]. La figure 3.6 illustre ce biais pour différentes taille h de RoI associées à une cinématique d'ordre 1. L'axe des abscisses correspond à la période des harmoniques, c'est-à-dire $1/f$. Les courbes en pointillés sont associées à des résultats de DIC appliquées sur des images synthétiques tandis que les lignes continues traduisent l'expression analytique du filtre. Plus d'informations sont disponibles dans [ACL14].

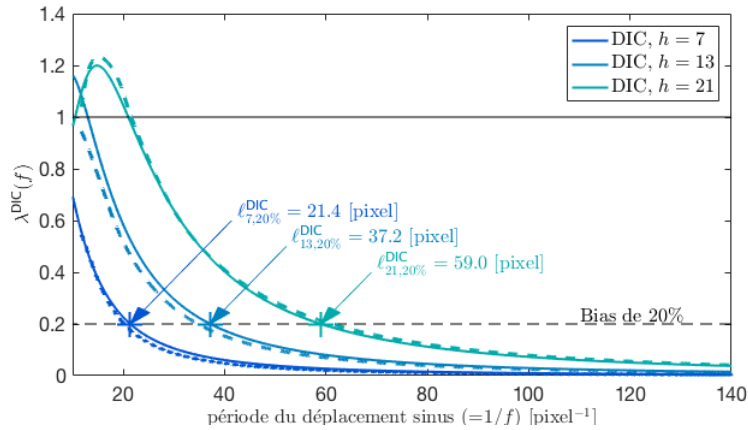


FIGURE 3.6 – Prédications du biais de mesure associé à la DIC à l'aide du filtre de Savitzky-Golay (traits continus) et résultats sur images synthétiques (traits pointillés), pour différentes tailles de RoI. h correspond à la largeur de la RoI.

Tout d'abord, on peut relever la justesse de l'estimation du biais à l'aide de la formule Eq.(3.22) vis-à-vis de son observation sur données synthétiques. Ensuite, un point important est le fait que le

biais peut être supérieur à l'unité pour les déplacements de fréquences élevées. Ceci se traduit par la mesure d'un déplacement singulièrement faux. Toute mesure DIC doit donc être associée avec son domaine de validité fréquentielle. Non présenté ici mais disponible dans [ACL14], le biais associé à une cinématique d'ordre 2 est étudiée. Une telle cinématique présente de meilleures performances, mais son implémentation reste actuellement rare.

Enfin, cette étude sur le biais permet de définir la notion de résolution spatiale pour la DIC. Comme illustré figure 3.6, un biais de 20% conduit par exemple à une résolution spatiale de 37.2 pixel pour une RoI définie avec $h = 13$.

2 Création de mouchetis synthétiques

Cette partie s'appuie sur des travaux réalisés dans le cadre d'une collaboration entre permanents (projet TIMEX), valorisés par [acl2].

Dès lors que l'on s'intéresse à la validation théorique de propriétés propres à la DIC, la première étape porte toujours sur l'analyse d'images synthétiques. Cette étape est aussi nécessaire lors du développement d'approches DIC très spécifiques. Leur haute spécificité nécessite en effet de porter une attention particulière à leur validation avant leur mise en oeuvre, cf [ACL4] ou [Réthoré *et al.*, 2013]. Dans tous les cas, les images synthétiques satisfont des propriétés maîtrisées et sont alors les candidats parfaits à l'étude de propriétés particulières. Ainsi, que ce soit pour l'étude de la propagation du bruit ou celle du biais de mesure présenté section Sec.(1.2), les estimations proposées sont comparées en premier lieu à des cas d'études où la DIC est appliquée sur des images synthétiques. Dans [ACL14], des images synthétiques sont utilisées afin de valider l'estimation du biais de mesure associé à la DIC locale. Toutefois, les images sont dans ce cas particulier volontairement des images de grilles. En effet, l'objet du papier est de comparer DIC et GM, cette dernière nécessitant une image de grille. Ainsi, ce cas spécifique est aisé car l'expression analytique d'une grille est utilisée pour définir la texture des images. Au contraire, dans [ACL7], on s'intéresse à la validation théorique de la résolution de mesure pour la DIC, ainsi des mouchetis sont utilisés. Pour gagner en réalisme, ceux-ci sont construits à partir d'une image réelle. Des mouchetis 1D et 2D sont ainsi utilisés pour mettre en avant l'impact de l'interpolation sur la résolution de mesure, et les déplacements sous-jacents sont ainsi sous-pixeliques. Afin de minimiser l'impact de l'interpolation nécessaire à la déformation d'une image synthétique pour décrire l'état courant, la méthode de création de ces mouchetis utilise des images intermédiaires sur-résolues. La méthode utilisée est la suivante :

- i) une image réelle est interpolée sur une représentation 4 fois plus fine que celle voulue. Elle définit l'image sur-résolue ;
- ii) l'image synthétique de référence est construite en faisant la moyenne de l'image sur-résolue par paquets de 4×4 pixels ;
- iii) l'image sur-résolue est virtuellement déformée pour définir un état courant sur-résolu ;
- iv) l'image synthétique courante est construite en calculant la moyenne de l'image virtuellement déformée sur-résolue par paquets de 4×4 pixels.

Des approches comparables sont aussi utilisées dans la littérature, comme par exemple dans [Wang *et al.*, 2016] où l'image sur-résolue est 25 fois plus dense dans chaque direction. La taille de l'image sur-résolue limite alors la taille des images synthétiques utilisées pour l'étude DIC. De plus leur manipulation est souvent coûteuse en termes de puissance de calcul. Enfin, une interpolation est toujours nécessaire pour le calcul de l'image déformée. La communauté photomécanique est donc demandeuse d'un outil de création de mouchetis synthétiques sans interpolation. Dans la littérature, un outil est souvent utilisé pour générer des mouchetis synthétiques, TexGen [Orteu *et al.*, 2006]. Toutefois, l'outil proprement dit n'est pas disponible et son fonctionnement non détaillé. L'objet de [acl2] est de proposer un outil de création de mouchetis synthétiques, décrivant les états de référence et courant sans avoir recours à une étape d'interpolation.

La démarche proposée s’inspire de la géométrie stochastique [Schneider et Weil, 2018, Serra, 1980, Stoyan *et al.*, 1987]. Déjà utilisée par exemple pour l’analyse de texture [Serra, 1982], la modélisation de la distribution d’arbres au sein d’une forêt [Gallego *et al.*, 2015] ou encore l’ajout de grains à des images numériques [Newson *et al.*, 2016b, Newson *et al.*, 2016a], cette approche se prête bien au cadre des mouchetis. Dans un premier temps, on définit une image continue et binaire. Sa version discrète est déduite de celle-ci dans un second temps. Le calcul d’une paire d’images de référence et courante se fait à partir de la même image continue. L’image de référence est directement déduite de l’image continue tandis que l’image de référence en est la composition avec l’inverse de la transformation ϕ désirée.

Définition d’une image continue Afin de ressembler à son pendant réel peint, le mouchetis de référence est défini comme la somme de N_ω formes rondes noires distribuées sur un fond blanc. La première étape consiste en l’introduction de l’expression analytique $\mathcal{S}_0$ du mouchetis de référence défini sur le domaine $\Sigma \subset \mathbb{R}^2$. Cette forme analytique définit l’image continue, elle prend la valeur 1 pour le fond ou la valeur 0 sur les disques. Elle est définie telle que

$$\forall \underline{m} \in \Sigma, \mathcal{S}_0(\underline{m}) = \begin{cases} 0 & \text{si } \underline{m} \in \Omega \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}, \quad (3.23)$$

avec Ω l’espace défini par la réunion de tous les supports $(\omega_i)_{1 \leq i \leq N_\omega}$ des disques. Ces supports sont définis à partir de leur centre $(\mu_i)_{1 \leq i \leq N_\omega}$ et de leur rayon $(\rho_i)_{1 \leq i \leq N_\omega}$. Les variables aléatoire N_ω , $(\mu_i)_{1 \leq i \leq N_\omega}$ et $(\rho_i)_{1 \leq i \leq N_\omega}$ sont définies telles que

- N_ω suit une loi de Poisson de paramètre η ;
- $(\mu_i)_{1 \leq i \leq N_\omega}$ satisfait une loi uniforme sur le domaine Σ ;
- $(\rho_i)_{1 \leq i \leq N_\omega}$ vérifie une loi exponentielle de moyenne $\langle \rho \rangle$.

On montre, dans [acl2], que l’intensité moyenne $\langle \mathcal{S}_0 \rangle$ et le contour des disques $\partial\omega$ de l’image continue $\mathcal{S}_0$ sont donnés par

$$\langle \mathcal{S}_0 \rangle = e^{-2\pi\eta\langle \rho \rangle^2} \text{ et } \partial\omega = 2\pi\eta\langle \rho \rangle \text{mes}(\Sigma)e^{-2\pi\eta\langle \rho \rangle^2}, \quad (3.24)$$

où $\text{mes}(\square)$ renvoie l’aire du domaine $\square$. Ces deux formules aident au choix du couple de paramètres $(\eta, \langle \rho \rangle)$ nécessaire à une définition réaliste de l’image continue Eq.(3.23). Toutefois, cette image est binaire, c’est-à-dire qu’elle prend des tons soit blanc soit noir, et de plus définie sous une forme continue, c’est-à-dire en tout point de Σ .

Image discrète L’outil de création d’images synthétiques se doit de proposer des images les plus réalistes possible. Il est donc nécessaire de prendre en compte d’une part les propriétés optiques des systèmes d’acquisition habituellement utilisés, mais aussi de traduire les phénomènes d’échantillonnage du signal lumineux en signal numérique. Le modèle courant [Morel et Yu, 2009] pour décrire ces transformations est le suivant :

$$\mathcal{S}_0 = \mathcal{Q} \mathcal{S} \mathcal{W} \mathcal{H} \mathcal{S}_0. \quad (3.25)$$

L’opérateur $\mathcal{H}$ est souvent exprimé à l’aide du modèle caméra dit de sténopé [Rogatto *et al.*, 1993]. Il traduit le positionnement du repère caméra par rapport à la scène observée, ainsi que la projection de cette dernière sur le plan du capteur. $\mathcal{W}$ traduit l’effet du système optique [Beyer, 1992]. Il consiste en un biais dû aux distortions optiques et à l’effet de la PSF (“Point Spread Function” en anglais). $\mathcal{S}$ et $\mathcal{Q}$ correspondent à l’échantillonnage spatial et à intensité du signal.

On s’intéresse au cas parfait où la surface observée est parallèle au plan du capteur et où le système optique n’introduit aucune distortion. Les opérateurs $\mathcal{S}$ et $\mathcal{W}$ peuvent être modélisés par l’utilisation d’une unique convolution entre la PSF de caméra, notée w_{APN} , et l’image continue. Ainsi, on a en tout pixel $\underline{m}_p$

$$\mathcal{S}_0(\underline{m}_p) = \mathcal{Q} \left(\gamma (w_{\text{APN}} * \mathcal{S}_0)(\underline{m}_p) \right), \quad (3.26)$$

γ traduit le contraste du signal observé ($0 < \gamma < 1$). $\mathbf{Q}$ discrétise le signal analogique sur b bits ($b = 8, 12, 14$ ou 16) et w_{APN} est modélisé par une enveloppe gaussienne d'écart-type h_{APN} .

La convolution entre la PSF w_{APN} et l'image continue est approché par une intégration de Monte Carlo. Ainsi, un ensemble Σ_{MC} de N_{MC} tirages satisfaisant la loi gaussienne w_{APN} est introduit et le produit de convolution s'écrit :

$$(w_{\text{APN}} * \mathcal{S}_0)(\underline{m}_p) \approx \frac{1}{N_{MC}} \sum_{\underline{m} \in \Sigma_{MC}} \mathcal{S}_0(\underline{m}_p + \underline{m}) = \langle \mathcal{S}_0(\underline{m}_p + \underline{m}) \rangle_{\underline{m}_p \in \Sigma_{MC}}. \quad (3.27)$$

Cette approche a déjà été utilisée pour simuler le grain des films argentiques, cf [Newson *et al.*, 2016b]. Toutefois, les auteurs l'utilisent pour estimer le produit de convolution Eq.(3.26) afin d'obtenir un aspect final acceptable à l'œil nu. Dans le cadre de la création d'images synthétiques pour la validation en photomécanique, un critère plus poussé est introduit dans [acl2]. Il s'agit de prendre un nombre suffisant de tirages N_{MC} tel que l'erreur d'intégration soit inférieure à l'erreur de quantification ϵ associée à l'échantillonnage $\mathbf{Q}$. On a :

$$N_{MC} = \left\lceil \frac{2^{2b+1}\gamma^2}{\pi\epsilon^2} \left(\langle \mathcal{S}_0(\underline{m}_p + \underline{m})^2 \rangle_{\underline{m} \in \Sigma_{MC}} - \langle \mathcal{S}_0(\underline{m}_p + \underline{m}) \rangle_{\underline{m} \in \Sigma_{MC}}^2 \right) \right\rceil, \quad (3.28)$$

où $\lceil \square \rceil$ désigne la partie entière de $\square$. On peut remarquer que pour des images encodées sur un nombre élevé de bits b , ϵ est petit et ainsi N_{MC} tend vers des valeurs élevées. Il est alors nécessaire d'optimiser le calcul de la somme Eq.(3.27) pour ne pas que la construction d'une image discrète ne devienne trop coûteuse. À cette fin, deux approches complémentaires sont proposées dans [acl2] : (i) à chaque pixel est attribuée une collection de disques que Σ_{MC} est susceptible de contenir. En effet, chaque évaluation de l'équation Eq.(3.23) nécessite un test sur tous les N_ω disques. Le caractère local de la PSF w_{APN} peut être utilisé afin de réduire ces tests aux seuls disques concernés ; (ii) la seconde optimisation proposée porte sur le portage du calcul sur processeur GPU. Ceux-ci sont en effet particulièrement optimisés pour les calculs massivement parallèles comme ici. Toutefois, les processeurs GPU ne permettent souvent que les calculs en simple précision. Dans le cas d'images 8 ou 12 bit, cette moindre précision n'affecte pas les résultats, cf [acl2].

Avec la démarche proposée il est donc possible de générer une image discrète d'une image continue. On s'est particulièrement attaché à maîtriser parfaitement les erreurs numériques introduites pour son calcul, afin de ne pas introduire de biais au sein des images.

Calcul de l'image courante Le calcul de l'image courante S_t est réalisé de la même manière que l'image de référence. L'image continue associée à l'état courant est déduite de l'image continue de l'état de référence et de la transformation ϕ désirée. Définie Eq.(3.4), cette transformation correspond à l'identité plus le déplacement imposé : en tout point $\underline{m}$, on a $\phi(\underline{m}) = \underline{m} + \underline{u}(\underline{m})$. Alors la conservation des niveau de gris donne :

$$\mathcal{S}_t \circ \phi(\underline{m}) = \mathcal{S}_0(\underline{m}) \text{ ou } \mathcal{S}_t(\underline{m}) = \mathcal{S}_0 \circ \phi^{-1}(\underline{m}). \quad (3.29)$$

En tout point $\underline{m}$ de Σ , on a alors

$$\mathcal{S}_t(\underline{m}) = \mathcal{S}_0 \circ \phi^{-1}(\underline{m}) = \mathcal{S}_0(\phi^{-1}(\underline{m})) = \begin{cases} 0 & \text{si } \phi^{-1}(\underline{m}) \in \Omega \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{avec } \Omega = \cup_{i=1}^{N_\omega} \omega_i. \quad (3.30)$$

L'élaboration de l'image discrète courante se fait aussi comme la composition de l'image discrète courante avec l'inverse de la transformation. Elle s'écrit

$$S_t(\underline{m}_p) = \mathbf{Q} \left(\gamma (w_{\text{APN}} * (\mathcal{S}_0 \circ \phi^{-1}))(\underline{m}_p) \right). \quad (3.31)$$

Enfin, le même schéma d'intégration numérique que le calcul de l'image de référence est utilisé. La figure 3.7 illustre l'outil de génération de mouchetis synthétiques proposé, avec le jeu de paramètres suivant :

$$\eta = 4,000, \langle \rho \rangle = 2, \langle \mathcal{S}_0 \rangle = 0.67, \partial\omega = 16,811, \gamma = 0.8 \text{ et } b = 8. \quad (3.32)$$

De plus, l'écart-type de la PSF w_{APN} est fixé à 1 pixel. L'image de référence est illustrée figure 3.7a. Avec le déplacement sinusoïdal vertical présenté figure 3.7b, on génère l'image courante figure 3.7c.

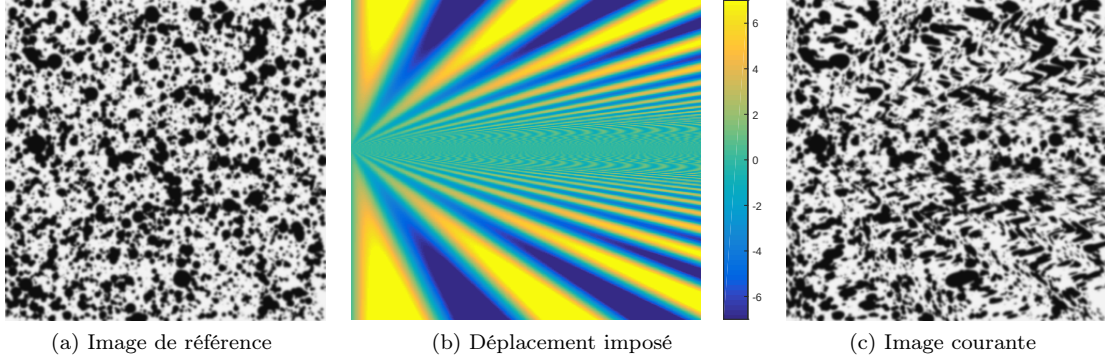


FIGURE 3.7 – Illustration d’images de référence (a) et courante (c), avec le déplacement imposé vertical (b). Les paramètres de génération des images sont donnés Eq.(3.32).

3 Applications

Dans ce chapitre, trois applications de la DIC sont présentées : son utilisation pour la caractérisation d’interfaces cohésives, son utilisation dans l’environnement contraignant qu’est celui de l’usinage et son utilisation afin de caractériser l’état de santé d’un biofilm. Ces trois applications, de part leur grande spécificité, ont nécessité de développer des approches DIC dédiées.

3.1 DIC dédiée à la caractérisation du délaminage en mode I

Cette partie s’appuie sur des travaux réalisés dans le cadre de mon post-doctorat, valorisés par [ACL4].

La première illustration présente le développement d’une méthode de caractérisation robuste du délaminage. On appelle le délaminage le phénomène physique qui conduit à la perte des propriétés mécanique d’une interface. En effet, celles-ci constituent le maillon faible de tout assemblage [Hutchinson et Suo, 1992, Evans et Hutchinson, 1995]. Il est donc de première importance de les considérer avec attention lors des étapes de dimensionnement de toute structure. Avant rupture, deux étapes sont à étudier : l’initiation d’un défaut sur une interface et sa propagation. Le cadre de l’étude présentée dans [ACL4] se réduit uniquement à la propagation.

Aujourd’hui, la simulation numérique du délaminage est maîtrisée, en particulier grâce au modèle dit de zone cohésive, comme par exemple [Hillerborg *et al.*, 1976, Needleman, 1987, Mohammed et Liechti, 2000, Van den Bosch *et al.*, 2006]. Introduit dans [Dugdale, 1960, Barenblatt, 1962], ce modèle consiste à représenter l’interface comme un ensemble de deux surfaces cohésives, liées entre elles par des efforts de cohésion. Le lien entre cinématique et effort est modélisé par la loi d’ouverture. Toutefois, la caractérisation fine de cette loi passe par son observation à une échelle aussi fine. Sauf cas particulier, les échelles cinématiques mises en jeu sont excessivement faibles, ce qui présente un premier verrou. En effet, dans le cadre par exemple d’un collage fragile, l’ouverture à rupture est la plupart du temps de l’ordre de grandeur de l’épaisseur de l’adhésif. Cette ouverture est donc rapidement hors de portée des outils de mesure traditionnels.

Dans la littérature, plusieurs approches s’intéressent à la caractérisation des interfaces. Les premières techniques s’appuient sur des quantités macroscopiques telles que l’énergie dissipée ou

la position de la zone d'endommagement de l'interface [Mohammed et Liechti, 2000, Kafkalidis et Thouless, 2002, Tan *et al.*, 2005] mesurés sur des essais plutôt simples à mettre en oeuvre. Toutefois, ces approches nécessitent des choix empiriques sur la forme de la loi d'ouverture ou sur l'initialisation des différents paramètres qui peuvent conduire à biaiser leur caractérisation [Shen et Paulino, 2011, Chandra *et al.*, 2002, Park et Paulino, 2012]. Dans le même temps, des approches directes ont été développées, comme par exemple [Ivankovic *et al.*, 2004, Sørensen, 2002, Andersson et Stigh, 2004]. Néanmoins ces approches nécessitent une mise en oeuvre expérimentale difficile, ce qui limite leur diffusion.

La facilité d'utilisation des méthodes de mesure de champs, particulièrement de la DIC, a rapidement changé les techniques de caractérisation du délaminage. Plus particulièrement, les méthodes de recalage par éléments finis, "Finite Element Method Updating" en anglais (FEMU), ont rapidement été utilisées afin de retrouver les paramètres des modèles cohésifs implémentés [Fedele *et al.*, 2009, Valoroso et Fedele, 2010, Gain *et al.*, 2011, Shen et Paulino, 2011]. Toutefois, ces approches reposent sur une description *a priori* de la loi d'ouverture. Elles s'appuient de plus sur deux problèmes d'optimisation successifs : le calcul du champ de déplacement DIC et ensuite la résolution du problème FEMU. Par conséquent, le choix de la loi d'ouverture limite la polyvalence de la méthode. De surcroît, ses deux étapes peuvent agir comme deux filtres successifs [Ruybalid *et al.*, 2016].

Dans ce contexte, il apparaît donc particulièrement intéressant de proposer un outil qui, d'une part, regroupe les problèmes direct et DIC sous la forme d'une corrélation d'image intégrée (I-DIC) mais aussi s'appuie sur une description cinématique ne nécessitant pas la formulation *a priori* de la loi d'ouverture de l'interface. Enfin, la haute spécificité de cette démarche nécessite le choix en amont de l'essai mécanique auquel elle sera associée. L'essai Double Cantilever Beam (DCB) illustré figure 3.8a est retenu, celui-ci étant relativement simple à mettre en oeuvre. La partie suivante présente la cinématique introduite, alors dédiée à l'étude de l'essai DCB. Son implémentation au sein d'une approche I-DIC est ensuite expliquée. Enfin la validation numérique de la méthode est étudiée.

3.1.1 Choix d'une description cinématique

La première étape porte sur le choix du paramétrage mécanique de l'interface. On choisit ici de paramétrer la distribution des efforts. En effet, la mesure DIC offre aussi, de par sa formulation, une mesure de la cinématique. À partir de la distribution d'efforts à l'interface et de la cinématique, il est aisé de reconstruire la loi d'ouverture comme illustré figure 3.8c. Les notations nécessaires à la compréhension du problème sont présentées figure 3.8. Ainsi l'éprouvette DCB est définie comme deux couches notées "−" pour $y < y_0$ et "+" pour $y > y_0$. Celles-ci sont collées par une interface parallèle à l'axe horizontal $\underline{e}_x$ et localisée en $y = y_0$. En réaction au couple d'efforts verticaux d'ouverture (F^-, F^+) exercé sur les deux branches en $x = x_L$, la couche supérieure exerce sur la couche inférieure un effort à l'interface noté $t(x)$.

De l'effort interfacial à la cinématique complète On veut que la résolution du problème direct permettant d'obtenir une réponse cinématique pour une distribution d'interface donnée soit légère en terme de coût de calcul. En effet, cette résolution sera appelée un grand nombre de fois par l'algorithme DIC et le coût total de la caractérisation doit rester maintenu. Le modèle poutre d'Euler-Bernoulli est donc utilisé. Ainsi, l'éprouvette est modélisée par deux poutres de propriétés géométriques $(S^i, I^i)_{i \in \{-, +\}}$ et de modules d'Young $(E^i)_{i \in \{-, +\}}$. Pour un jeu d'efforts $(F^i, t^i)_{i \in \{-, +\}}$ connus, ce modèle donne directement les flèches $(v^i)_{i \in \{-, +\}}$ et les rotations des sections $(\theta^i)_{i \in \{-, +\}}$ perpendiculaires aux fibres neutres des deux poutres. Le calcul de la cinématique en tout point de la RoI, nécessaire pour l'étape DIC, est réalisé en utilisant d'une part l'hypothèse de Bernoulli mais aussi un prenant en compte le déplacement horizontal dû à la flexion $(u_{\text{flex}}^i)_{i \in \{-, +\}}$. Ce dernier s'appuie sur l'hypothèse que les poutres ne travaillent pas en traction et

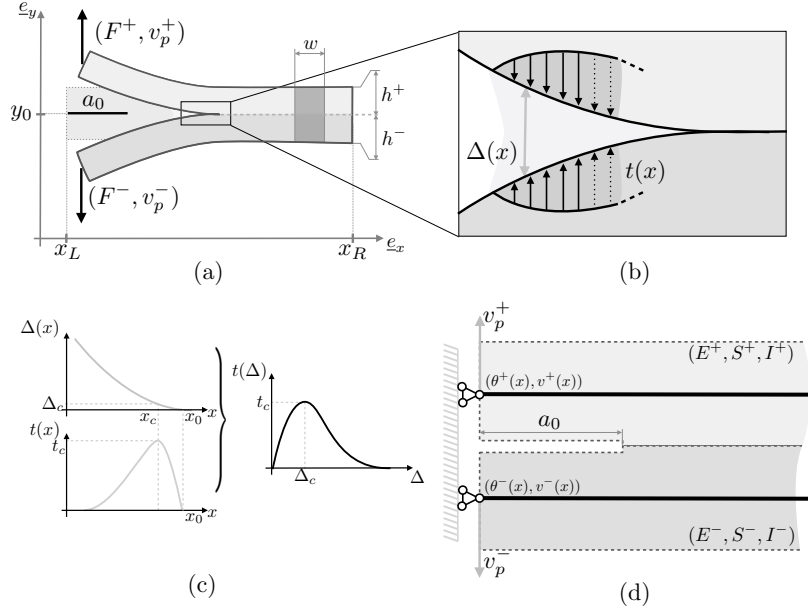


FIGURE 3.8 – Illustration de l’essai DCB (a). La zone de délaminage est caractérisée par une ouverture Δ et un effort de réaction t (b). La détermination de l’effort d’interface t et la mesure de la réponse cinématique permet de remonter à la loi d’ouverture (c). L’éprouvette est modélisée comme deux poutres satisfaisant l’hypothèse d’Euler-Bernoulli (d).

que leur longueur est conservée. Le déplacement en tout point $\underline{m}$ de l’éprouvette vérifie alors :

$$\underline{u}(\underline{m}, \mathbf{a}^t) = \begin{bmatrix} u_x(\underline{m}, \mathbf{a}^t) = u_{\text{rot}}^i(\underline{m}, \mathbf{a}^t) + u_{\text{flex}}^i(\underline{m}, \mathbf{a}^t) \\ u_y(\underline{m}, \mathbf{a}^t) = v^i(\underline{m}, \mathbf{a}^t) + v_{\text{rot}}^i(\underline{m}, \mathbf{a}^t) \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

L’exposant i correspond à “+” si $\underline{m}$ est un point de la couche supérieure de l’éprouvette et à “−” sinon. Le déplacement $u_{\text{rot}}^i \underline{e}_x + u_{\text{rot}}^i \underline{e}_y$ est induit par la rotation de la section droite de la poutre i . Enfin, le vecteur $\mathbf{a}^t$ contient les paramètres nécessaires à la description de l’effort interfacial.

Description de l’effort interfacial Le paramétrage de la distribution des efforts d’interface doit être choisis avec attention car la robustesse de la méthode de caractérisation en dépend particulièrement. En effet, une description très polyvalente nécessitera d’introduire un grand nombre de paramètres et pourra être facilement sensible au bruit ou non-unique. Une bonne manière de limiter le nombre d’inconnues consiste à ajouter de l’information mécanique. À cette fin, l’interface est divisée en deux domaines, comme illustré figure 3.9.

Les deux domaines sont séparés par un point nommé point de fissure et noté x_0 . Il s’agit du point à partir duquel le comportement de l’interface est considéré comme endommagé. En amont de ce point, la réponse de l’interface est modélisée par un comportement linéaire élastique ; on appelle ce domaine la zone non-endommagée (“undamaged region” en anglais). La solution analytique de Winkler est utilisée pour exprimer l’effort interfacial au sein de cette zone. Cette solution s’écrit en fonction d’un paramètre d’amplitude t_w^0 et d’amortissement λ_w telle que :

$$\text{pour } x > x_0, t(x) = t_w^0 e^{-\lambda_w(x-x_0)} \sin(\lambda_w(x-x_0)). \quad (3.34)$$

En aval de x_0 , au sein de la zone d’ouverture (ou “fracture process zone” en anglais) le comportement de l’interface s’endommage. Il est vérifié alors la loi d’ouverture. Afin de ne pas introduire de modèle *a priori* sur cette dernière, une description polynomiale de degrés 3 est introduite pour représenter

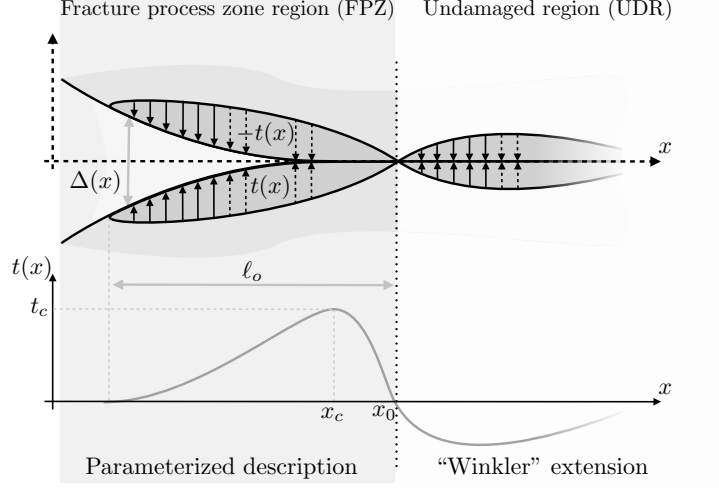


FIGURE 3.9 – La description des efforts d’interface est séparée en deux domaines : en amont de la pointe de fissure, on considère le comportement de l’interface comme non-endommagé et linéaire élastique et on s’appuie sur la solution analytique associée dites de Winkler ; tandis qu’une description paramétrique est introduite en aval.

l’effort d’interface. Son paramétrage consiste en l’effort d’interface maximal t_{fpz} , sa position x_{fpz} et la longueur de la zone cohésive ℓ_{fpz}

$$\text{pour } x > x_0 - \ell_{fpz} \text{ et } x < x_0, t(x) = t_{fpz} \frac{(x - x_0)(x - (x_0 - \ell_{fpz}))^2}{(x_{fpz} - x_0)(x_{fpz} - (x_0 - \ell_{fpz}))^2}. \quad (3.35)$$

Par construction, on a $x_{fpz} = x_0 - \ell_{fpz}/3$.

La définition complète du profil de traction interfacial s’exprime donc en fonction des 5 paramètres $(x_0, \ell_{fpz}, t_{fpz}, t_w^0, \lambda_{fpz})$. L’écriture de l’équilibre statique de l’une des deux poutres de l’éprouvette DCB permet de réduire ce nombre à 3. On ne retient donc que celle caractérisant la distribution d’effort interfacial au sein de la zone d’ouverture, soit $\mathbf{a}^t = (x_0, \ell_{fpz}, t_{fpz})$. Son extension au sein de la zone non-endommagée sera réalisée à l’aide de la solution de Winkler permettant de satisfaire l’équilibre statique. Enfin, les deux descriptions ne sont pas compatibles en pointe de fissure. En effet, elles n’impliquent pas la continuité de la rigidité d’interface en ce point. Une correction auto-équilibrée est donc rajoutée afin qu’elle le satisfasse. Plus d’information est donnée dans [\[ACL4\]](#).

3.1.2 Implémentation I-DIC

Comme présenté dans la partie Sec.(1.1), l’espace cinématique est souvent défini sous la forme d’un espace vectoriel construit autour des fonctions de formes (*cf* Eq.(3.10)). Cette approche est adaptée aux cas où peu d’information mécanique est injectée dans l’approche DIC. Par exemple, la DIC locale [Sutton *et al.*, 2009] ou la DIC globale sur cinématique éléments finis [Besnard *et al.*, 2006] respectent bien cette formulation. Toutefois, la DIC globale sur base éléments finis offre l’opportunité d’enrichir directement la description cinématique en rajoutant du contenu mécanique [Réthoré *et al.*, 2008b, Roux *et al.*, 2008, Neggers *et al.*, 2017]. Elle est aussi particulièrement adaptée à l’introduction d’une régularisation mécanique [Réthoré *et al.*, 2013, Marty *et al.*, 2015, Réthoré, 2015, Lachambre *et al.*, 2015, Passieux *et al.*, 2014, Passieux *et al.*, 2015, Duval *et al.*, 2015, Pierré *et al.*, 2016]. Enfin, la DIC globale peut aussi être directement formulée avec une cinématique analytique linéaire [Mathieu *et al.*, 2012a, Mathieu *et al.*, 2012b].

Toutes ces formulations s'appuient donc sur l'écriture d'un espace cinématique $\mathcal{U}$ défini sur une famille indépendante. Cette écriture n'est pas possible dans le cas présent à cause de la haute non-linéarité entre le paramétrage de la cinématique et celui de sa réponse. Comme détaillé dans la partie Sec.(1.1), la résolution itérative du problème central de la DIC (*cf* Eq.(3.6)) nécessite la connaissance du déplacement associé à un jeu de paramètres $\mathbf{a}^{\text{it}}$ et des fonctions d'influence correspondantes, rassemblées dans la matrice jacobienne du résidu $\mathbf{J}_r(\mathbf{a}^{\text{it}})$ défini dans l'équation Eq.(3.8). Dans [ACL4], on propose de calculer numériquement la matrice jacobienne à partir de différentes évaluations du déplacement. Ainsi, en tout pixel $\underline{m}_p$ et pour tout ddl i , on a

$$[\mathbf{J}_r(\mathbf{a}^{\text{it}})]_{i,p} \approx -\nabla(S_0) \cdot \frac{u(\underline{m}_p, \mathbf{a}^{\text{it}}) - u(\underline{m}_p, \mathbf{a}^{\text{it}})}{\epsilon[\mathbf{a}^{\text{it}}]_i}, \text{ avec } \begin{cases} [\tilde{\mathbf{a}}^{\text{it}}]_k = [\mathbf{a}^{\text{it}}]_k \forall k \neq i \\ [\tilde{\mathbf{a}}^{\text{it}}]_i = [\mathbf{a}^{\text{it}}]_i(1 + \epsilon) \end{cases}. \quad (3.36)$$

Une telle définition de la matrice Jacobienne nécessite sa mise à jour à chaque itération. De plus cette mise à jour requiert plusieurs calculs de la réponse cinématique complète de l'éprouvette. La procédure d'identification complète exige donc la résolution du problème direct un très grand nombre de fois, ce qui explique la volonté de maîtriser son coût numérique.

Dans [Neggers *et al.*, 2015], cette même approche est utilisée afin de construire des fonctions d'influence aussi bien en espace qu'en temps, permettant de traiter une série temporelle d'images. On trouve dans la littérature des approches encore plus poussées de cette écriture. Par exemple, cette dérivation est réalisée analytiquement en sein même de la formulation éléments finis dans [Leclerc *et al.*, 2009].

3.1.3 Validation numérique de la robustesse de la méthode

Afin de valider la méthode proposée, une simulation éléments finis d'un essai DCB a été réalisée. En s'appuyant sur un code éléments finis développé par l'équipe "Mechanics of Materials" d'Eindhoven [Samimi *et al.*, 2009], plusieurs lois ont été implémentées afin de vérifier la polyvalence de l'approche proposée. Ces lois sont illustrées en pointillé figure 3.10.b. Les solutions en déplacement

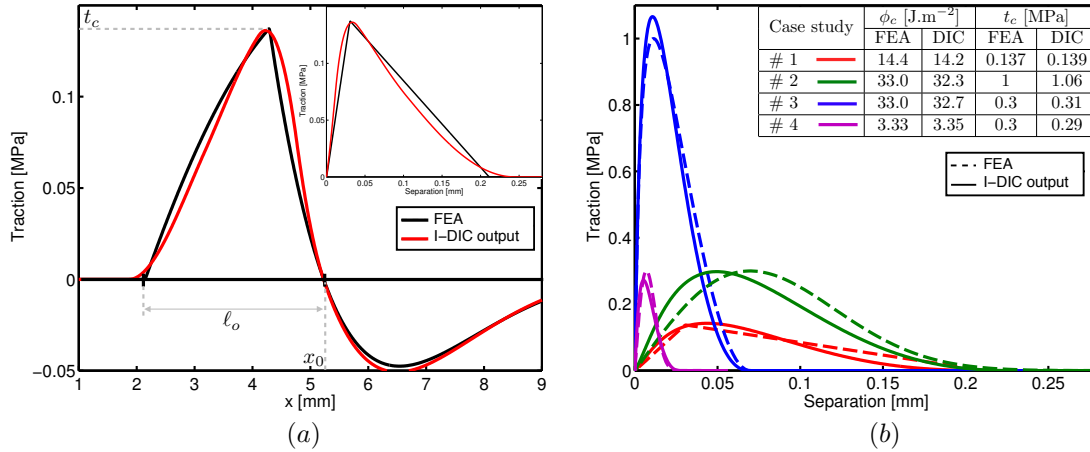


FIGURE 3.10 – Comparaison entre simulations et observations. Des essais DCB sont simulés avec plusieurs lois d'ouverture, les solutions cinématiques obtenues permettent de créer des paires d'images synthétiques sur lesquelles la procédure DIC proposée est testée. La figure (a) illustre la différence entre la distribution d'effort à l'interface entre la simulation (ligne noire) et l'effort mesuré à l'aide de l'outil I-DIC (ligne rouge) dans le cas d'une loi bilinéaire. La figure (b) illustre toutes les lois d'ouverture implémentées ainsi que leur pendant observées. Des plus, le tableau présente les grandeurs macroscopiques associées.

de ces simulations permettent de générer des paires d'images synthétiques. Cette base d'images est utilisée pour valider l'approche I-DIC proposée. Les lois d'ouverture identifiées sont aussi tracées sur la figure 3.10.b. Les lois utilisées pour les simulations et les lois observées sont visuellement très semblables. De plus, les grandeurs macroscopiques mises en jeux, données dans le tableau de la figure 3.10.b, correspondent bien. La figure 3.10.a illustre le cas où *a priori*, l'écart entre simulation et observation devrait être le plus grand. En effet, la loi d'ouverture utilisée est une loi bilinéaire. Elle présente donc une singularité au maximum de l'effort. On s'attend donc à ce que la distribution d'effort le long de l'interface présente lui aussi une singularité et que celle-ci ne soit pas bien décrite par la description polynomial implémentée. Toutefois, comme le mettent en avant les deux courbes, il y a une excellente correspondance entre la simulation et l'observation.

Une validation plus poussée de la procédure d'identification est présentée dans [ACL4]. Son comportement à l'ajout de bruit dans les images ou à son initialisation y est par exemple détaillé.

3.2 Utilisation de la DIC dans un cadre d'usinage

Cette partie s'appuie principalement sur des travaux réalisés dans le cadre de la thèse de G. Rebergue [THEC2] (projet ANR SimpAéro), valorisés par [acl3].

La deuxième illustration s'appuie sur la multidisciplinarité de l'Institut Pascal. En effet, la proximité avec la thématique "Mécanismes, Machines et Système Industriel" de l'axe "Mécanique, Matériaux et Structures" a permis de s'intéresser à un cadre nouveau pour la DIC. Plus particulièrement lors du travail de thèse de S. Hassini [Hassini, 2015], la nécessité d'effectuer des mesures *in situ* pendant l'usinage de pièces de grandes dimensions s'est avérée primordiale. Le projet FUI Ophélia associé à la thèse de S. Hassini a soulevé des problématiques plus amont au cadre FUI et a amené à la proposition du projet ANR SimpAéro. La thèse de G. Rebergue s'inscrit dans ce projet [THEC2]. L'objectif du projet est d'apporter une méthodologie pour minimiser la non-conformité géométrique des pièces de grandes dimensions de l'aéronautique. En effet, la très grande part de matériau enlevé lors de l'usinage de ces pièces (jusqu'à 80 %) conduit à une réorganisation des contraintes résiduelles auxquelles s'associe une déformation élastique. Ce phénomène, associé à la grande dimension des pièces, peut conduire à la non-conformité géométrique de la pièce une fois finie. S. Hassini propose dans ses travaux de thèse une optimisation de la gamme d'usinage en s'appuyant sur la mesure sur marbre des pièces usinées. L'idée d'utiliser la DIC au cours de l'usinage est alors apparue comme une excellente opportunité pour mieux suivre les conséquences de la réorganisation des contraintes résiduelles à chaque enlèvement de matière. De plus, un autre volet du projet ANR SimpAéro porte sur la validation d'un modèle prédictif de l'effet de l'usinage sur le brut. La mesure de champs offerte par l'utilisation de la DIC permet de nourrir au mieux le dialogue essai-simulation. Toutefois, certaines contraintes de la DIC expliquent son utilisation encore rare en situation industrielle :

- il est nécessaire d'avoir un certain dégagement autour des pièces à observer ;
- les mouvements entre la surface à observer et la caméra doivent être réduits ;
- comme détaillé dans le chapitre Sec.(1), la DIC s'appuie sur la conservation du flux optique, défini par le marquage réalisé sur la pièce. Elle est vérifiée quand la surface observée est éclairée de manière homogène.

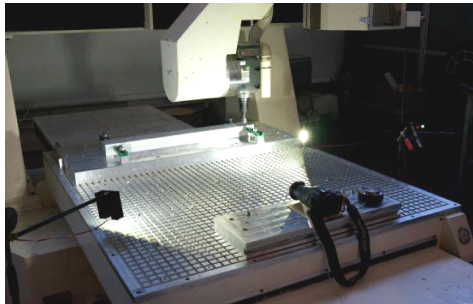
L'accumulation de ces contraintes explique la difficulté d'appliquer cette méthode dans un environnement d'usinage, car l'espace disponible au sein d'un centre d'usinage est réduit et pollué par des projections d'huile et de copeaux. De plus, la pièce usinée peut être placée sur un axe en mouvement de la machine, situé ou non dans le plan d'observation de la caméra. Enfin, l'enlèvement de matière peut produire une élimination du marquage des surfaces. Toutefois, on peut noter dans la littérature quelques travaux spécifiques où l'observation fine de la déformation d'une pièce pendant son usinage est réalisée. Les premiers travaux s'appuient sur une approche PIV, utilisée pour observer les grandes déformations plastiques lors d'une opération de rabotage [Lee *et al.*, 2006]. Le cas particulier du rabotage, où l'outil est fixe et la pièce mobile, se prête bien à l'utilisation de la PIV. Toutefois, le champ observé est relativement faible (quelques [mm²]).

Afin de comprendre les mécanismes associés à la formation du copeau, d'autres approches recréent les conditions d'usinage en dehors du centre d'usinage. Par exemple, dans [Hor *et al.*, 2013], les auteurs s'intéressent à la caractérisation de l'écoulement plastique qui a lieu durant le forgeage ou l'usinage. Les conditions d'usinage sont recrées à l'aide de barres de Hopkinson (vitesse rapide) ou d'essai de micro-traction (vitesse lente, sous microscope électronique à balayage, MEB). Les images du MEB sont analysées alors à l'aide d'une méthode de corrélation d'image.

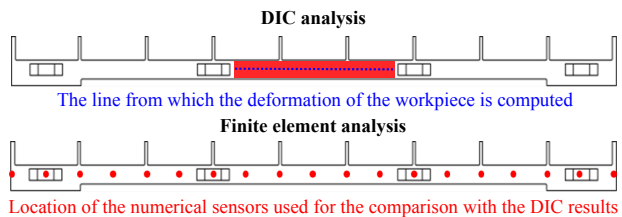
Enfin, les travaux de [Wehbe, 2010] portent sur l'analyse de mesures DIC en conditions réelles d'usinage. L'étude porte sur la mesure des vibrations d'une plaque lors de son fraisage. La zone d'intérêt concerne la majeure partie de la plaque de quelques $[cm^2]$, mais la DIC est utilisée comme seul outil de mesure de déplacement hors-plan afin de retrouver les premiers modes de vibrations. En 2015, une première étude de faisabilité de l'application de la DIC à des échelles plus grandes afin d'obtenir des mesures quantitatives de la distorsion de la pièce lors de son usinage a été réalisée [ACL12]. Conduite dans le cadre du projet Ophélie, les premiers résultats prometteurs ont surtout mis en avant la nécessité de travailler sur les bases de la méthode DIC afin de proposer un outil de mesure robuste et aux performances métrologiques maîtrisées [acl3] dans le cadre des travaux de thèse de G. Rebergue [THEC2] (projet ANR SimpAero).

3.2.1 Étude de faisabilité

Un brut d'une tôle forte de l'alliage d'aluminium AIRWARE®2050-T84 est placé dans le centre d'usinage CRENO, comme illustré figure 3.11a. 9 poches sont réalisées dans ce brut en une séquence de 63 étapes détaillées dans [ACL12]. Entre chaque étape, le centre d'usinage est mis en pause et des clichés de l'une des faces de la pièce sont réalisés. L'appareil photo, un Nikon D3 avec un objectif Nikkor 85 mm, est fixé directement sur la table d'usinage afin d'assurer une distance constante entre la surface observée et l'appareil photo. En effet, la table est un des axes du centre d'usinage, ce qui implique que la pièce n'est pas fixe par rapport au sol du laboratoire. La RoI est illustrée figure 3.11a. L'éclairage est assuré par un ensemble de leds, fixés sur trépieds et reposant donc en dehors de la table d'usinage. Lors de ces premiers essais, les éclairages et l'appareil photo étaient simplement protégés par des cartons durant les phases d'usinage. La même gamme d'usinage est



(a) Le centre d'usinage CRENO, l'éclairage et l'appareil photo utilisé pour la faisabilité



(b) La pièce usinée, la RoI de la DIC et la localisation des capteurs virtuels

FIGURE 3.11 – (a) Illustration du centre d'usinage CRENO utilisé dans le cadre des projet FUI Ophélie et ANR SimpAéro. Ici, un mouchetis a été peint sur une face de l'éprouvette, et l'appareil photo est fixé sur la table d'usinage; (b) Représentation schématique de la pièce usinée, de la RoI associée au mesures DIC (haut) et des points de sortie des simulations (bas).

simulée à l'aide du logiciel FORGE® [Cerutti et Mocellin, 2015]. Des capteurs virtuels sont placés sur la même face de la pièce que celle observée avec la DIC, comme illustré sur la figure 3.11b afin d'initier le dialogue simulations/mesures.

La DIC utilisée ici est une DIC globale basée sur la description cinématique suivante : outre les déplacements de solide rigide et des déformations homogènes traduisant un léger changement de

focus de l'appareil photo, on émet l'hypothèse que le déplacement est uniquement vertical, suivant la déformation de la ligne neutre finale (*cf* traits pointillés sur la figure 3.11b). Une description polynomiale d'ordre 5 est retenue pour la ligne neutre.

À titre d'exemple, les données issues des simulations (traits continus) et des observations (traits pointillés) sont présentées figure 3.12. Le déplacement de la ligne neutre est représenté au début de chacune des étapes 22 à 42 de la gamme d'usinage. Ces premiers résultats attestent de la pertinence d'utiliser la DIC comme outil de mesure *in situ* dans un contexte d'usinage mais ils valident aussi le modèle prédictif implémenté par l'équipe du CEMEF, partenaire au sein des projet Ophélie et SimpAero. En effet, les mesures sont en excellente adéquation avec les simulations. Les tendances sont identiques, même si un léger offset est observable. L'objet des travaux de thèse de G. Rebergue [THEC2] est d'en comprendre les origines afin de rendre la mesure la plus robuste et fiable possible.

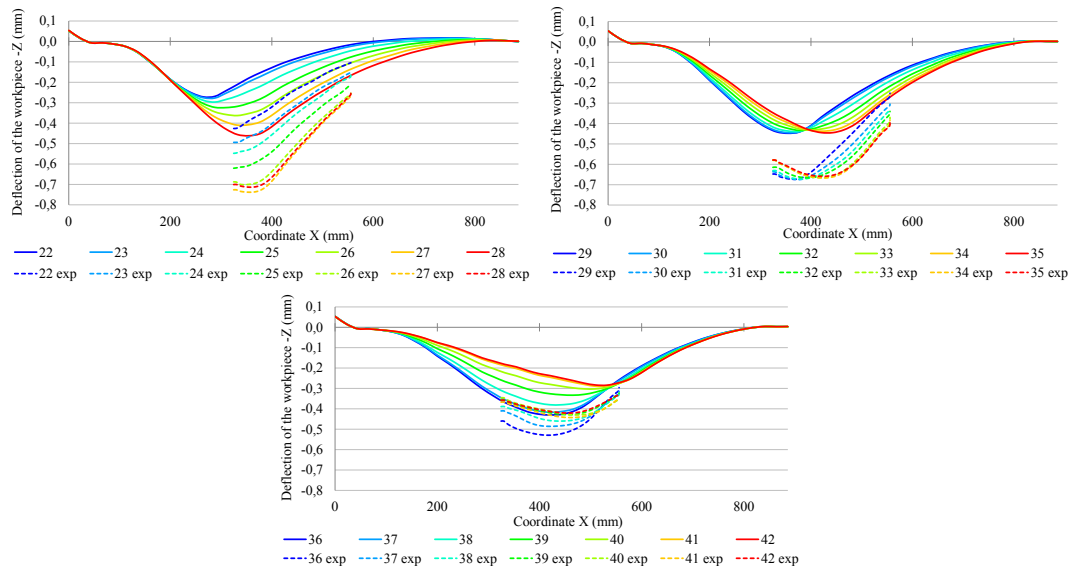


FIGURE 3.12 – Comparaison brute des calculs éléments finis (traits continus) avec les mesures DIC (traits pointillés) pour les étapes 22 à 42 de la séquence d'usinage.

3.2.2 Mise en oeuvre

Avant tout, le support et l'éclairage ont été retravaillés comme illustré figure 3.13 afin d'une part d'assurer une fixation plus robuste de l'appareil photo sur la table, mais aussi de limiter les interventions. Le choix s'est arrêté sur un éclairage led approprié au contexte d'usinage qui ne nécessite par exemple aucune protection particulière. De plus, des supports solidaires de la table ont été ajoutés en deux endroits du plan d'observation et des mouchetis y ont été peints (rectangles verts sur la figure 3.14). Une DIC globale ayant pour cinématique les seuls mouvements de solide rigide permet de mesurer un quelconque mouvement non désirable entre l'appareil photo et la pièce observée. Ce mouvement est ensuite pris en compte pour toute mesure sur la pièce.

Au regard de la largeur de la RoI d'environ 80 [cm], le recul de l'appareil de 1 [m] est relativement faible. L'utilisation d'une focale courte permet de respecter cette contrainte mais nécessite de prendre des précautions quant aux distortions optiques. Elle impose donc le calibrage de notre système optique. Toutefois, l'utilisation d'une mire optique ne semble pas optimale dans le présent contexte au vu de l'espace disponible dans le plan d'étude mais aussi de l'environnement, d'autant plus que l'objectif de ces travaux consiste en la proposition d'une technique de calibrage facile

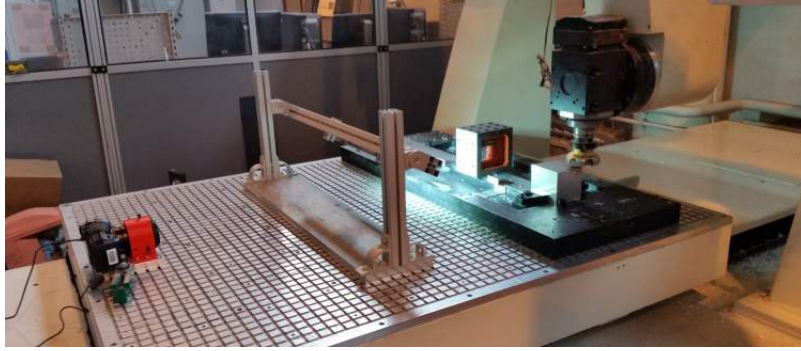


FIGURE 3.13 – Nouveau support (rouge) et nouvel éclairage (portique) fixé sur la table du centre d’usinage CRENO.

à mettre en oeuvre dans un centre d’usinage. On propose alors au contraire de considérer le centre d’usinage comme un atout et de l’utiliser afin de calibrer notre système optique. En effet, le plupart des centres d’usinage disposent d’un ou de deux axes de translation pour le porte-outils. La procédure de calibrage introduite s’appuie sur ces translations, dont les axes sont particulièrement bien maîtrisés, ceci afin de mesurer le biais introduit par les distortions optiques. La figure 3.14 montre la pièce et le porte outil sur lequel un mouchetis est fixé.

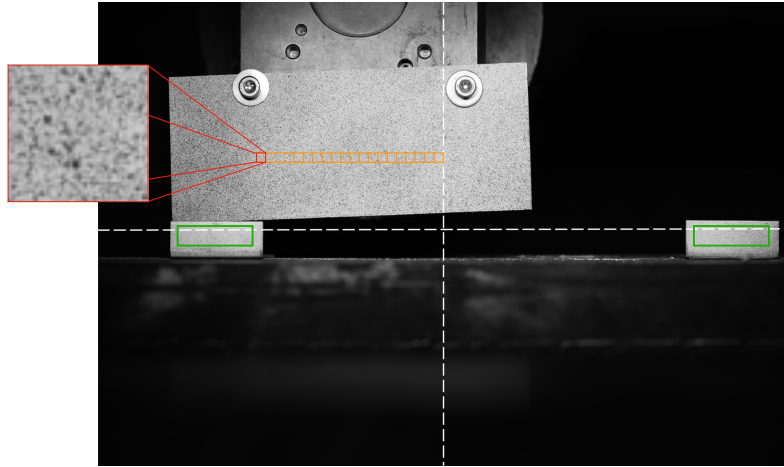


FIGURE 3.14 – Illustration du mouchetis collé sur la broche. Les rectangles verts correspondent aux marquages introduits pour le calcul des mouvements de solide rigide, l’ensemble des carrés orange représente l’ensemble des RoI de 100×100 pixels où les calculs DIC sont réalisés.

La figure 3.15 illustre la variation des mesures DIC du mouvement de la broche lors du balayage horizontal en fonction de la position de la RoI au sein d’une image. La DIC utilisée ici est une version locale de RoI de taille 100×100 pixels et de cinématique d’ordre 0. Le déplacement mesuré décrit très clairement une forme parabolique fonction de la position de la RoI sur l’image. Cette courbe correspond au biais de mesure due à la distortion radiale du système optique.

Dans [acl3], on propose de revisiter l’écriture de la DIC afin de prendre en compte ce biais. Les distortions optiques sont modélisées avec le modèle proposé dans [Brown, 1966, Brown, 1971], où seule la composante radiale est prise en compte. On note $\widetilde{m}_p$ les coordonnées des pixels du

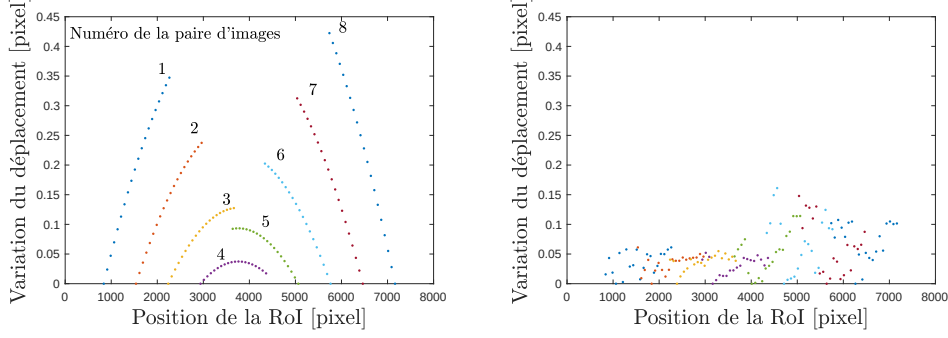


FIGURE 3.15 – (a) Mesure DIC locale de la variation de déplacement de la broche en fonction de la position de la RoI au sein de l'image. Chaque série de points correspond aux résultats associés à une même paire d'images. Au déplacement de chaque RoI est soustrait le déplacement de la RoI la plus éloignée du centre optique de la série concernée. (b) Même jeu de données après correction de la distorsion radiale.

capteurs. À ceux-ci correspondent des pixels virtuels, de coordonnées $\underline{m}_p$, non affectés par les distorsions radiales $\underline{d}$. On a

$$\underline{\widetilde{m}}_p = \underline{m}_p + \underline{d}(\underline{m}_p) \text{ avec } \begin{cases} \underline{d}(\underline{m}_p) = d_x(\underline{m}_p) \underline{e}_x + d_y(\underline{m}_p) \underline{e}_y \\ d_x(\underline{m}_p) = d(x_p - x_c) \left((x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2 \right) \\ d_y(\underline{m}_p) = d(y_p - y_c) \left((x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2 \right) \end{cases} \quad (3.37)$$

d traduit l'amplitude des distorsions et $\underline{m}_c = (x_c, y_c)$ correspond au centre optique. En notant $\widetilde{\phi}$, la transformation Eq.(3.4) prenant en compte les distorsions, celle-ci s'écrit en chaque pixel $\underline{\widetilde{m}}_p$

$$\widetilde{\phi}(\underline{\widetilde{m}}_p, \mathbf{a}) = \underline{\widetilde{m}}_p + \underline{u}(\underline{\widetilde{m}}_p, \mathbf{a}) + \underline{d}(\underline{\widetilde{m}}_p + \underline{u}(\underline{\widetilde{m}}_p, \mathbf{a})). \quad (3.38)$$

Les images décrivant le balayage horizontal, générées à l'aide du mouvement de la broche, sont utilisées pour calibrer les paramètres $(d, \underline{m}_c)$ propres aux distorsions radiales. Toutefois, la taille réduite du mouchetis fixé sur la broche ne met en exergue, avec une paire d'images, qu'une partie de l'effet des distorsions (*cf* figure 3.15). Une série d'images est considérée au sein d'une version globale de DIC, avec pour inconnues les paramètres d et $\underline{m}_c$ ainsi qu'une cinématique de mouvement de solide rigide entre chaque paire d'images. Le résidu DIC $\mathbf{r}_d$ associé est défini tel que :

$$\mathbf{r}_d(d, \underline{m}_c, \mathbf{u}_{\text{broche}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{\tau_0} - \widetilde{\phi}(d, \underline{m}_c, \mathbf{u}_{\text{broche}}^{\tau_0 \rightarrow \tau_1}) \mathbf{s}_{\tau_1} \\ \mathbf{s}_{\tau_1} - \widetilde{\phi}(d, \underline{m}_c, \mathbf{u}_{\text{broche}}^{\tau_1 \rightarrow \tau_2}) \mathbf{s}_{\tau_2} \\ \dots \\ \mathbf{s}_{\tau_{n_\tau-1}} - \widetilde{\phi}(d, \underline{m}_c, \mathbf{u}_{\text{broche}}^{\tau_{n_\tau-1} \rightarrow \tau_{n_\tau}}) \mathbf{s}_{\tau_{n_\tau}} \end{bmatrix}, \quad (3.39)$$

où d et $\underline{m}_c$ correspondent aux paramètres des distorsions radiales, et $\mathbf{u}_{\text{broche}}$ rassemble les n_τ paires de degrés de libertés $(\mathbf{u}_{\text{broche}}^{\tau_{i-1} \rightarrow \tau_i})_{1 \leq i \leq n_\tau}$ associées aux mouvements de solide rigide entre chaque paire d'images $(S_{\tau_{i-1}}, S_{\tau_i})_{1 \leq i \leq n_\tau}$. Comme la transformation $\widetilde{\phi}$ est non-linéaire par rapport aux paramètres de distorsions, un changement de variables est introduit et un algorithme de point fixe utilisé pour identifier les coordonnées du centre optique $\underline{m}_c$. Plus de détails sont donnés dans [acl3]. Après calibrage, la transformation Eq.(3.38) est utilisée au sein d'une approche similaire à la DIC locale utilisée pour mesurer la translation de la broche, *cf* figure 3.15, dont les résultats sont illustrés figure 3.15. L'effet de la distorsion est bien identifié et bien corrigé avec la méthode de calibrage proposé.

Les premiers résultats de l'application de la DIC adaptée au cadre spécifique de l'usinage sont illustrés figure 3.16. On peut voir qu'après chaque opération d'enlèvement de matière, la réorganisation des contraintes résiduelles induit une déformation de la pièce non-négligeable. Ces

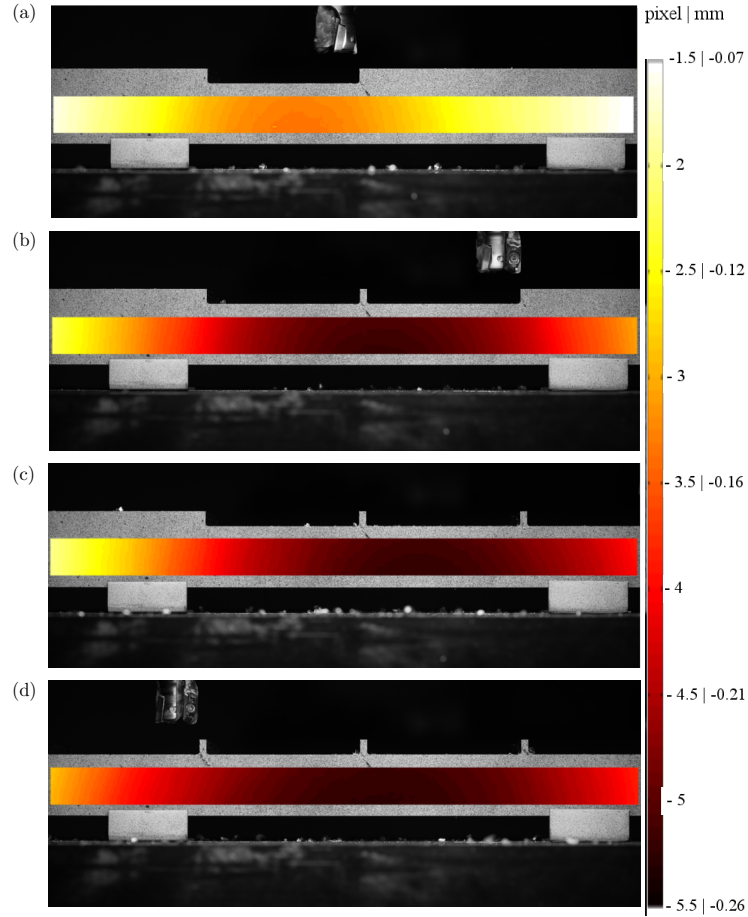


FIGURE 3.16 – Carte du déplacement vertical après les 4 premières opérations d'enlèvement de matière. On peut voir que la pièce fléchit au droit de la poche usinée à chaque étape.

premières mesures sont maintenant à comparer avec leur pendant numérique, objet de travaux futurs. De plus, des travaux sont aussi en cours afin de ne pas obliger l'arrêt du centre d'usinage lors de l'acquisition d'une image. Une procédure de définition "à la volée" de la RoI afin de ne pas prendre en compte les perturbations dues aux copeaux est en cours de développement.

3.3 Utilisation de la DIC pour la caractérisation de l'état de santé d'un biofilm

Cette partie s'appuie sur des travaux en cours de réalisation dans le cadre de la thèse de H. Boudarel [THEC2] (projet CorImaBio), dont la valorisation est en cours.

La troisième application s'intéresse au développement d'une technique d'imagerie quantitative dédiée à l'étude des biofilms. Ceux-ci sont constitués d'un enchevêtrement structural de communautés bactériennes qui, à la manière du corail, construisent une matrice polymère. Les biofilms sont en quelque sorte des forteresses que construisent les bactéries en état de stress. L'étude des

biofilms est capital pour la santé publique. Par exemple, l'effet d'un antibiotique sur une bactérie est complètement dépendant du biofilm que cette dernière a constitué pour se protéger. L'étude des propriétés mécaniques des biofilms est intéressante pour la communauté de microbiologie. En effet, il est établi dans la littérature que l'état de santé d'un biofilm est lié à ses propriétés mécaniques [Stoodley *et al.*, 2002, Brindle *et al.*, 2011, Rühs *et al.*, , Jones *et al.*, 2011].

La société Biofilm Control, partenaire du projet CorImaBio, propose actuellement le BioFilm Ring Test® [Chavant *et al.*, 2007]. Ce test, dont la mise en oeuvre est aisée, permet de savoir si un biofilm est présent ou non au sein d'un mélange. Son principe est illustré sur la figure 3.17. Les résultats qu'il offre restent à ce jour qualitatifs, ceux-ci consistant en la connaissance du développement ou non d'un biofilm. Le projet CorImaBio a pour objectif d'enrichir significativement les résultats du BioFilm Ring Test® en les rendant quantitatifs et plus seulement qualitatifs, ceci sans complexifier la mise en oeuvre.

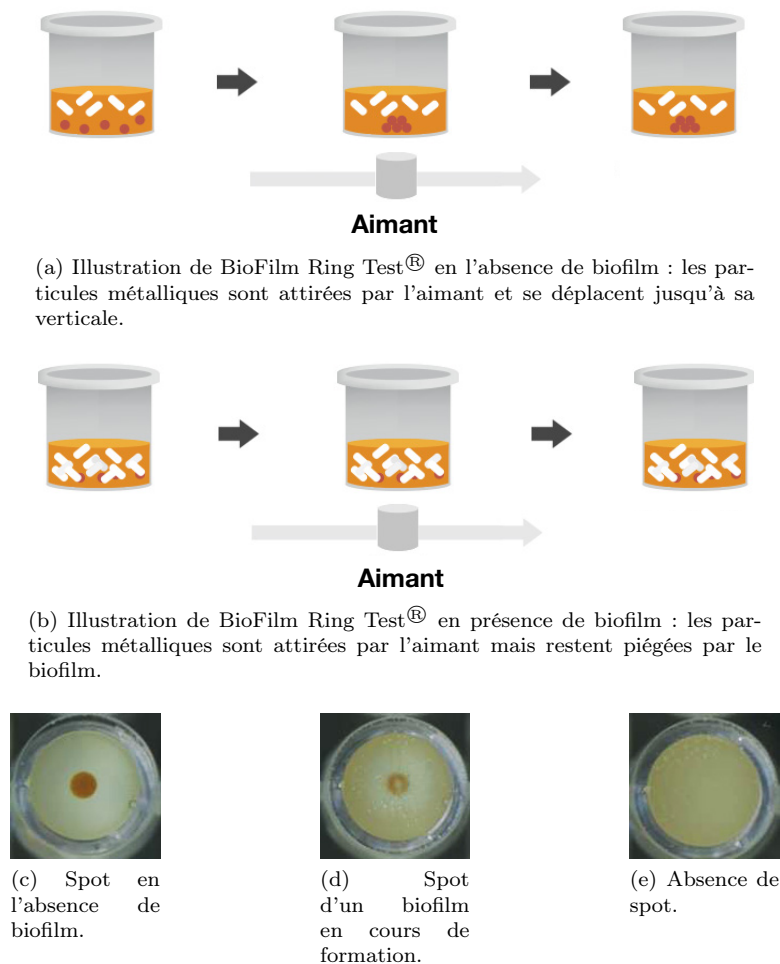


FIGURE 3.17 – Illustration du principe du BioFilm Ring Test®. (a) et (b) : des particules métalliques sont mélangées au milieu à tester. Après un temps d'incubation, le mélange est placé au dessus d'un aimant. Attirées par le champ magnétique, les particules se déplacent au dessus de l'aimant en l'absence de biofilm (a), ou elles restent bloquées par celui-ci (b). Une fois regroupées au dessus de l'aimant, les particules forment un amas visible (c-e), qui traduit donc la présence d'un biofilm ou non. [www.biofilmcontrol.com]

Afin de répondre aux objectifs du projet, on propose de conserver le concept de l'essai support du BioFilm Ring Test[®]. De cette manière, des particules métalliques sont mélangées avec le milieu à caractériser avant incubation. Après incubation, le mouvement des particules en présence d'un champ magnétique permet la caractérisation du milieu. Toutefois, l'observation qui est faite de cet essai est changée, afin d'enrichir l'instrumentation et d'en affiner les conclusions. D'une part l'échelle d'observation choisie est beaucoup plus petite. À l'aide d'un microscope inversé, le mouvement d'une particule ou d'un ensemble de particules est observé. D'autre part, l'observation est dynamique : on s'intéresse au mouvement de ces particules au cours du temps. Une approche DIC est ainsi implémentée afin de suivre un ensemble de particules au cours du temps. La formulation choisie est celle de la version globale de la DIC. En effet, il est plus aisé d'y définir conjointement les mouvements de chacune des particules considérées et leur mouvement d'ensemble. Cette sur-définition cinématique est alors régularisée en contraignant les déplacements moyens et leur évolution temporelle.

Ces travaux sont en cours de réalisation. De plus, ils sont soumis à un accord de confidentialité avec l'entreprise partenaire du projet. Ces deux points limitent leur valorisation à l'heure actuelle.

4 Bilan et perspectives

Au sein de cette partie, j'ai dans un premier temps rappelé le cadre mathématique de la DIC. Bien qu'il soit sujet de très nombreux travaux de recherche au sein des communautés de vision, son développement encore relativement jeune au sein de la communauté de la mécanique permet de revisiter certaines de ses hypothèses. La mesure de déplacements sous-pixelles et surtout de déformations d'ordres de grandeur de $10^{-3} - 10^{-4}$ n'est en effet pas la problématique des communautés de traitement des images. Par exemple, l'algorithme de type Gauss-Newton modifié pour résoudre le problème central de la DIC est communément implémenté. L'opérateur tangent y est alors défini sur le gradient de l'image initial, introduisant l'hypothèse silencieuse des petites perturbations communément utilisée en mécanique [ACL6].

J'ai ensuite illustré mon apport sur la maîtrise des performances métrologiques de la DIC. La prise en compte de l'effet de l'interpolation de l'image courante permet d'offrir une excellente estimation de l'erreur de mesure, validée sur des données synthétiques maîtrisées dans [ACL7]. La validation de cette estimation sur des données expérimentales dans [ACL8] a pu être réalisée grâce aux travaux récents de mon équipe au sein de l'Institut Pascal, plus particulièrement de leur maîtrise du contexte expérimental. L'étude du biais de mesure permet aussi d'introduire un indicateur des performances métrologiques, de la même manière que pour la GM [ACL14].

Que ce soit pour valider une approche DIC innovante [ACL4] ou pour vérifier une formule propre aux performances métrologiques [ACL7, ACL14], il est commode de s'appuyer sur une paire d'images synthétiques maîtrisées. Toutefois, il n'existait pas d'outil de génération d'images synthétiques documenté dans la littérature. Dans [acl2], on a donc introduit un tel outil, en s'attachant particulièrement à annuler ou à maîtriser tout biais d'échantillonnage ou d'interpolation.

Enfin, trois applications dédiées de la DIC sont présentées. La première application porte sur la proposition d'un outil d'identification I-DIC des propriétés d'interface [ACL4]. Construit pour un essai relativement simple à mettre en oeuvre, à savoir l'essai DCB, l'outil introduit s'appuie sur la réponse d'une cinématique poutre à une distribution des efforts d'interface. Le principal avantage de l'approche proposée est de ne pas introduire de loi d'ouverture *a priori*. Celle-ci s'obtient par post-traitement de l'identification couplée des efforts interfaciaux et de la cinématique de l'essai. La deuxième application s'intéresse au développement d'un outil de mesure de déformation d'une pièce en situation d'usinage [acl3]. La taille non-usuelle de la région d'intérêt, le volume disponible pour disposer le matériel optique, les conditions vibratoires, le déplacement de l'objet imagé sont entre autres la sources de nombreuses contraintes qui ont nécessité le développement d'un outil DIC spécifique. Plus spécifiquement, une procédure de calibrage a été introduite afin de prendre en compte les distortions optiques du système optique. La dernière application, qui est en cours

de réalisation, porte sur le développement d'une méthode de caractérisation des propriétés mécaniques d'un biofilm. Une particularité de l'approche proposée consiste en le fait que les particules métalliques incorporées au milieu étudié assurent aussi bien le contraste nécessaire à l'utilisation de la DIC que le chargement mécanique sur le milieu étudié.

De part sa très grande polyvalence, la DIC est utilisée dans de très nombreux domaines. Les développements récents propres à sa version globale permettent vraiment de personnaliser la technique de mesure en fonction de l'essai observé ou des objectifs d'identification à atteindre. Dans cet esprit, les perspectives à court et moyen termes sont les suivantes :

- Une première piste de recherche, cadre de la thèse de S. Boukhtache [THEC3] qui va démarrer en octobre 2017, porte sur le développement d'une caméra intelligente dédiée aux mesures de champs. Ce travail s'articule à la frontière entre mon équipe et l'équipe DREAM de l'Institut Pascal. Cette dernière est spécialisée sur l'intégration matérielle d'outils de traitement du signal. Un premier projet de master [MAST4] a permis de faire remonter les problématiques soulevées par la telle intégration d'une analyse DIC.
- Une deuxième piste de recherche porte sur l'étude du support de l'information qu'est le mouchetis. On trouve dans la littérature quelques travaux marginaux proposant des mouchetis dit optimaux, [Lecompte *et al.*, 2006, Bossuyt, 2013, Dong et Pan, 2017]. Toutefois, la principale difficulté réside dans la reproduction du mouchetis optimisé sur la surface de la pièce à imager. Les techniques de transfert de grille, maîtrisées au sein du laboratoire, peuvent alors permettre de contourner cette limite. Un autre point intéressant à étudier concerne non pas l'optimisation du marquage directement mais du couple marquage/cinématique implémenté au coeur de l'approche DIC. En effet, la matrice jacobienne du résidu joue un rôle crucial au cours de la minimisation, *cf* Eq.(3.9). Or celle-ci est définie comme la projection du gradient de l'image sur la cinématique, *cf* Eq.(3.13).
- À plus long terme, il n'existe actuellement pas d'études du biais associé aux mesures offerte par toutes les versions globale de DIC. En effet, les choix très spécifiques des cinématiques complexifient considérablement toute étude théorique. Une piste de recherche consiste donc à s'intéresser d'abord aux formulations éléments finis de la DIC globale afin de généraliser ensuite les formules proposées. La dépendance au marquage des solutions constitue aussi une piste à investiguer.
- Enfin, la promiscuité avec l'équipe "Mécanismes, Machines et Système Industriel" au sein de l'Institut Pascal présente un contexte particulièrement intéressant pour la DIC. L'utilisation de la DIC non plus comme moyen de contrôle mais comme mesure de commande lors de l'usinage apparaît comme un véritable défi. En effet, beaucoup d'efforts sont aujourd'hui déployés pour développer des modèles prédictifs de la déformation des pièces pendant leur usinage. S'en passer pour ne s'appuyer que sur leur mesure afin de mettre à jour le chemin d'usinage présente un grand intérêt pour la communauté de la fabrication mécanique.

Chapitre 4

Utilisation des mesures de champs

L'objet de ce chapitre est de présenter quelques utilisations de mesures de champs cinématiques à des fins de caractérisation des matériaux. Un état des lieux non exhaustif est dans un premier temps proposé. Deux applications basées sur l'utilisation de l'erreur en comportement sont ensuite étudiées.

Sommaire

1	Caractérisation des matériaux à partir de mesures de champs	60
1.1	Énoncé du problème direct	60
1.2	Quelques méthodes d'identification associées à la mesure de champs cinématiques	61
2	Cadre non-linéaire - identification en élasto-plasticité	63
3	Cadre linéaire - Reformulation du comportement en élasticité	66
4	Bilan et perspectives	68

1 Caractérisation des matériaux à partir de mesures de champs

La caractérisation du comportement des matériaux constitue une thématique primordiale en ingénierie mécanique. En effet, les modèles prédictifs abondamment utilisés dans l'industrie nécessitent un calibrage fin de leurs paramètres afin d'être pertinents. C'est d'autant plus vrai que la puissance de calcul toujours croissante des ordinateurs a permis le développement de lois de comportement complexes afin que simulation et réalité correspondent aux mieux. Certes de telles lois permettent de mieux modéliser le comportement des matériaux mais elles dépendent de nombreux paramètres qui doivent être identifiés. Grâce à la richesse des mesures qu'elles offrent, les techniques de mesures de champs cinématiques sont bien adaptées à la caractérisation de ces lois. Dans un premier temps, le contexte propre à la formulation d'un problème de mécanique des milieux continus est rappelé, permettant d'introduire les notations nécessaires et de faire un état de l'art non exhaustif des principales méthodes inverses en mécanique expérimentale. Un travail plus complet est disponible dans [Grédiac et Hild, 2013] ou [Avril *et al.*, 2008].

1.1 Énoncé du problème direct

On considère la structure Ω illustrée figure 4.1. Celle-ci est soumise à un effort volumique f . Sa frontière est divisée en deux parties : $\partial_u\Omega$ (resp. $\partial_f\Omega$) satisfait des conditions aux limites de Dirichlet (resp. Neuman). Les modèles prédictifs, couplés par exemple à un solveur éléments finis, permettent de résoudre le problème direct en déterminant la réponse de cette structure sous sollicitations. Cette réponse est caractérisée par son déplacement $\underline{u}$ et sa contrainte $\underline{\sigma}$ en tout point $\underline{M}$ et à tout instant t de l'intervalle d'étude $[0, T]$.

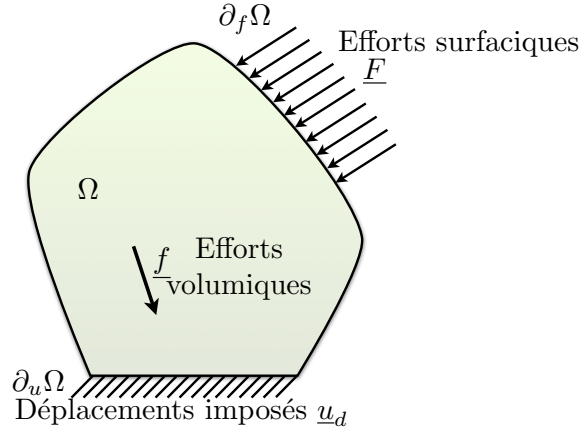


FIGURE 4.1

Le problème direct s'écrit :

$$\text{Trouver pour tout } (\underline{M}, t) \in \Omega \times [0, T] : \begin{cases} (\underline{u}(\underline{M}, t), \underline{\sigma}(\underline{M}, t)) \in \mathcal{U}_\Omega^{ad}(t) \times \mathcal{C}_\Omega^{ad}(t) \\ \underline{\sigma}(\underline{M}, t) = \mathcal{A}_a(\underline{\varepsilon}(\underline{u}(\underline{M}, \tau)), \tau \in [0, t]) \end{cases}, \quad (4.1)$$

où l'opérateur $\mathcal{A}_a$ traduit le modèle de comportement utilisé, de paramètres $\mathbf{a}$; $\mathcal{U}_\Omega^{ad}(t)$ est l'espace des champs cinématiques admissibles à l'instant t , soit :

$$\mathcal{U}_\Omega^{ad}(t) = \left\{ \underline{u} \in (\mathcal{H}_1(\Omega))^3 \mid \forall \underline{M} \in \partial_u\Omega, \underline{u}(\underline{M}) = \underline{u}_d(\underline{M}, t) \right\}; \quad (4.2)$$

et $\mathcal{C}_\Omega^{ad}(t)$ est l'espace des champs de contraintes (statiquement) admissibles à l'instant t , défini tel

que :

$$\mathcal{C}_\Omega^{ad}(t) = \left\{ \underline{\sigma} \in \mathcal{M}_s(3) \cap (\mathcal{L}_2(\Omega))^6 \mid \forall \underline{M} \in \Omega, \underline{\text{div}}(\underline{\sigma}) + \underline{f}(t) = \underline{0} \text{ et } \forall \underline{M} \in \partial_f \Omega, \underline{\sigma}(\underline{M}) \underline{n} = \underline{F_d}(\underline{M}, t) \right\}. \quad (4.3)$$

La régularité en temps des champs de déplacement et de contrainte peut être choisie telle que ces champs soient dérivables par morceaux. Pour plus d'information quant à la définition fonctionnelle de la solution dans le cadre des systèmes dissipatifs standards, on peut se référer à [Laborde et Nguyen, 1990].

Enfin, on introduit les espaces d'admissibilité à zéro tels que :

$$\mathcal{U}_\Omega^{ado}(t) = \left\{ \underline{u} \in (\mathcal{H}_1(\Omega))^3 \mid \forall \underline{M} \in \partial_u \Omega, \underline{u}(\underline{M}) = \underline{0} \right\} \quad (4.4)$$

et

$$\mathcal{C}_\Omega^{ado}(t) = \left\{ \underline{\sigma} \in \mathcal{M}_s(3) \cap (\mathcal{L}_2(\Omega))^6 \mid \forall \underline{M} \in \Omega, \underline{\text{div}}(\underline{\sigma}) = \underline{0} \text{ et } \forall \underline{M} \in \partial_f \Omega, \underline{\sigma}(\underline{M}) \underline{n} = \underline{0} \right\}. \quad (4.5)$$

L'objet des différentes approches inverses présentées ici est la détermination des paramètres $\mathbf{a}$ de la loi $\mathcal{A}_a$ afin que le modèle corresponde du mieux possible à son observation pendant essai. Ces méthodes s'appuient donc sur la réalisation du problème continu et de son instrumentation. De cette manière, les approches inverses permettent la caractérisation d'un modèle de comportement à partir de la connaissance du chargement, c'est-à-dire $(\underline{u}_d, \underline{F_d}, \underline{f})$ et de la mesure du champ de déplacement $\underline{u}^{mes}$ de la partie $\partial_{mes} \Omega$ de la frontière de la structure aux différents temps $(\tau_i)_{0 \leq i \leq n_t}$:

$$\forall (\underline{M}, \tau) \in \partial_{mes} \Omega \times \{0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}, \underline{u}^{mes}(\underline{M}, \tau) = \underline{u}(\underline{M}, \tau). \quad (4.6)$$

Cette description de l'essai est ici supposée parfaitement correspondre au modèle continu. Ainsi, le déplacement observé correspond exactement au déplacement au sein de l'éprouvette. De plus, le chargement $(\underline{u}_d, \underline{F_d}, \underline{f})$ du modèle continu est supposé parfaitement correspondre à celui imposé.

1.2 Quelques méthodes d'identification associées à la mesure de champs cinématiques

Les méthodes d'identification des propriétés matériaux les plus communément utilisées sont détaillées dans cette partie. Un travail plus complet est disponible dans [Grédiac et Hild, 2013].

La *méthode de recalage par éléments finis* est de loin la méthode la plus utilisée pour la caractérisation des matériaux en mécanique expérimentale. Introduite pour l'analyse des matériaux dans les années 90, cf [Farhat et Hemez, 1993, Ladeveze *et al.*, 1994], cette méthode s'appuie sur la minimisation de la distance entre la mesure $\underline{u}^{mes}$ et le calcul de la solution $\underline{u}_{\mathbf{a}^*}^{FE}$ du modèle éléments finis du problème direct construit autour du jeu de paramètres matériau $\mathbf{a}^*$:

$$\mathbf{a}^{\text{opti}} = \underset{\mathbf{a}^*}{\text{Arg Min}} \left\{ \|\underline{u}^{mes} - \underline{u}_{\mathbf{a}^*}^{FE}\|_{\partial_{mes} \Omega \times (\tau_i)_{0 \leq i \leq n_t}}^2 \right\}. \quad (4.7)$$

Le lien direct entre simulation et mesures a grandement facilité la diffusion de cette méthode. On trouve des applications dans le cadre de matériaux non-linéaires, cf [Meuwissen, 1998] [Meuwissen *et al.*, 1998], ou non-isotrope, cf [Lecompte *et al.*, 2007].

Toutefois, l'utilisation d'une résolution numérique de type éléments finis du problème direct apporte des limites à la méthode. Son coût en est la première. En effet, dès que l'on s'intéresse à des lois complexes, le coût numérique de cette résolution "explose". La détermination des paramètres mécaniques optimaux nécessite la résolution du problème de minimisation donné par l'équation Eq.(4.7). Chaque évaluation du potentiel à minimiser fait appel à la résolution du problème direct. Ceci limite directement la complexité de la loi caractérisable. L'autre limite porte sur l'erreur

de discrétisation accompagnant la solution du problème direct. En effet, la résolution n'est pas exacte. Elle s'accompagne d'approximations. La solution numérique donnée par le calcul éléments finis est dépendante du maillage choisi pour représenter la structure étudiée. Elle définit sa réponse cinématique. Ce maillage peut être source de localisations non-physiques, ou être simplement mal adapté à la description fine de l'essai. Ces approximations peuvent alors biaiser le résultats.

Introduite au sein de la thématique de vérification afin de contrôler l'erreur de discrétisation associée avec la solution éléments finis d'un problème direct, [Ladeveze et Leguillon, 1983, Ladeveze et Pelle, 2001], l'*erreur en relation de comportement* a aussi été utilisée dans le cadre de la caractérisation [Constantinesc, 1995]. Le problème inverse s'écrit :

$$\mathbf{a}^{\text{opti}} = \underset{\mathbf{a}^*}{\text{Arg Min}} \left\{ \int_{\partial_{mes}\Omega \times [0, T]} (\underline{\underline{\varepsilon}}^{cad} - \underline{\underline{\varepsilon}}^{sad}) : \left(\mathcal{A}_{\mathbf{a}^*} (\underline{\underline{\varepsilon}}^{cad}(\tau), (\tau) \in [0, t]) \right. \right. \\ \left. \left. - \mathcal{A}_{\mathbf{a}^*} (\underline{\underline{\varepsilon}}^{sad}(\tau), (\tau) \in [0, t]) \right) dt dM \right\}, \quad (4.8)$$

où le couple $(\underline{\underline{\varepsilon}}^{cad}, \underline{\underline{\sigma}}^{cad})$ correspond à une solution cinématiquement admissible du problème direct et $(\underline{\underline{\varepsilon}}^{sad}, \underline{\underline{\sigma}}^{sad})$ à une solution statiquement admissible. Puisque la méthode des éléments finis est une approche en déplacement, une résolution du problème direct avec un jeu de paramètres $\mathbf{a}^*$ donné permet l'obtention d'une solution vérifiant les conditions d'admissibilité cinématique données dans l'équation Eq.(4.2). Cette solution peut ensuite être prolongée afin d'en obtenir une vérifiant les conditions d'admissibilité statique Eq.(4.3), cf [Ladeveze et Pelle, 2001]. Un algorithme de minimisation est alors implémenté afin de trouver les paramètres optimaux du comportement.

Bien que le coût numérique de l'approche inverse soit encore élevé car chaque itération de minimisation nécessite la résolution du problème direct, la force de cette formulation est de porter l'accent sur le point le plus faible du modèle : le comportement matériau. Cette méthode a été utilisée, entre autres, pour des problème d'identification en élasticité à l'échelle de l'éprouvette [Geymonat *et al.*, 2002, Geymonat et Pagano, 2003] ou à une échelle plus fine [Florentin et Lubineau, 2011] et [ACL3] mais aussi pour les modèles matériau non-linéaires comme la plasticité cf [Latourte *et al.*, 2008] et [ACL1].

La *méthode des champs virtuels*, introduite à la fin des années 80 [Grédiac, 1989], repose sur l'écriture de l'équilibre sous sa forme variationnelle, en substituant la contrainte par la déformation mesurée par l'intermédiaire du comportement paramétré avec $\mathbf{a}^*$:

$$\forall \underline{\underline{u}}^* \in \mathcal{U}_{\Omega}^{ad_0} \quad \int_{\Omega} \underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{\underline{u}}^*) : \mathcal{A}_{\mathbf{a}^*} (\underline{\underline{\varepsilon}}^{mes}(\tau), (\tau) \in [0, t]) d\Omega = \int_{\Omega} \underline{\underline{u}}^* \cdot \underline{\underline{f}} d\Omega + \int_{\partial_f \Omega} \underline{\underline{u}}^* \cdot \underline{\underline{F}}_d d\Omega. \quad (4.9)$$

La méthode consiste à prendre un jeu de champs virtuels $\underline{\underline{u}}^*$ choisis afin de faire travailler le comportement et d'obtenir autant d'équations que de paramètres $\mathbf{a}$. Dans le cadre de l'élasticité, [Avril *et al.*, 2004] introduit les champs virtuels optimaux afin de minimiser le transport du bruit de mesure vers les paramètres matériau. Réduit au cadre élastique, le choix de champs virtuels particuliers permet de décrire, avec cette approche, toutes les méthodes de caractérisation, cf [Avril et Pierron, 2007]. Enfin, des travaux récents s'intéressent aux cas non-linéaires, comme les grandes déformations [Rossi *et al.*, 2016] ou la plasticité [Fu *et al.*, 2016]. Plus de détails sont donnés dans [Grédiac *et al.*, 2006, Pierron et Grédiac, 2012].

La *méthode de l'écart à l'équilibre*, introduite dans [Claire *et al.*, 2004] pour la caractérisation de l'endommagement, s'appuie sur la continuité du champ de contrainte en tout point de Ω . Toute irrégularité des champs de déformation est alors associée à un changement local du comportement matériau. Par exemple, une méthode d'identification du flambage de poutres d'acier est proposé

dans [Hild *et al.*, 2011]. Un modèle analytique poutre est utilisé pour formuler la condition d'équilibre sur les champs cinématiques. Sa non-vérification traduit alors directement le flambage de la structure observée. Dans [Crouzeix *et al.*, 2009], les auteurs s'intéressent à la caractérisation des matériaux composites. Il s'appuient sur un maillage éléments finis pour introduire la description d'interfaces. La continuité de la contrainte sur celles-ci est utilisée pour la procédure d'identification

Les outils de résolution introduits par Suquet propres aux techniques d'homogénéisations [Moulinec et Suquet, 1998] ont été récemment revisités pour la problématique d'identification, *cf* [Bellis et Moulinec, 2016, Bellis *et al.*, 2017]. L'utilisation d'*outils de déconvolution* issue de l'analyse d'images permet une résolution rapide du problème inverse, à l'échelle de l'image. Elle ne nécessite donc pas l'introduction de descriptions cinématiques particulières.

Les méthodes de *DIC intégrées*, comme détaillées dans la partie Sec.(3.1) sont aussi des approches de caractérisation. Faisant le pont directement entre les images et les paramètres matériau, ces méthodes permettent de limiter le transport du bruit, *cf* [Ruybalid *et al.*, 2016]. Elles sont toutefois dédiées à l'étude de comportements locaux ou singuliers. Elles ne sont en effet pas adaptées à l'étude de matériaux au comportement fortement hétérogène où l'on ne dispose que peu d'informations *a priori*.

Des différentes méthodes proposées dans la littérature, les travaux présentés dans ce document s'appuient sur l'erreur en comportement. Dans le prolongement de mes travaux de thèse, *cf* [ACL2], l'utilisation des outils développés dans un cadre de vérification se généralisent bien au cadre de l'identification.

2 Cadre non-linéaire - identification en élasto-plasticité

Cette partie s'appuie sur des travaux réalisés en parallèle de mon post-doctorat, en collaboration avec la "King Abdullah University of Science and Technology" (KAUST), valorisés par [ACL1].

Dans [ACL1], une méthode d'identification pour les matériaux élastoplastiques de type Prandtl-Reuss basée sur l'erreur en comportement a été introduite. Ce modèle de comportement, résumé dans la notation $\underline{\underline{\sigma}}(\underline{\underline{M}}, t) = \mathcal{A}_a(\underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{\underline{u}}(\underline{\underline{M}}, \tau)), \tau \in [0, t])$ de Eq.(4.1), s'écrit à l'aide d'une décomposition de la déformation en parties élastique $\underline{\underline{\varepsilon}}_e$ et plastique $\underline{\underline{\varepsilon}}_p$. Elle nécessite l'introduction des variables internes que sont la déformation plastique cumulée p et sa duale R traduisant l'écrouissage [Lemaitre *et al.*, 2009]. Le comportement s'écrit alors

$$\begin{aligned} & \bullet \underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}_e + \underline{\underline{\varepsilon}}_p \\ & \bullet \text{loi d'état : } \begin{cases} \underline{\underline{\sigma}} = 2\mu\underline{\underline{\varepsilon}}_e + \lambda\text{Tr}[\underline{\underline{\varepsilon}}_e]\underline{\underline{\text{Id}}} \\ R = k p \end{cases} \\ & \bullet \text{loi d'évolution : } \begin{cases} \dot{p} \geq 0 \\ \dot{p} f = 0 \text{ avec } f = \|\underline{\underline{\sigma}}\|_{vm} - (R + R_0) \\ \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}_p = \dot{p} \frac{\underline{\underline{\sigma}}_d}{R + R_0} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.10)$$

La norme $\|\square\|_{vm}$ correspond à la norme équivalente de von Mises et l'indice $\underline{\underline{\sigma}}_d$ traduit la partie déviatorique du tenseur concerné. Au sein d'un tel modèle, les paramètres matériau sont les suivants : (λ, μ) sont les coefficients de Lamé propre à la partie élastique du comportement, R_0 la limite initiale du domaine élastique et k le module d'écrouissage isotrope. La méthode d'identification introduite dans [ACL1] a pour but d'estimer les distributions spatiales de ces 4 paramètres matériaux (λ, μ, R_0, k) à partir de la mesure du déplacement $\underline{\underline{u}}^{mes}(t)$ sur une partie $\partial_{mes}\Omega$ de la surface d'une éprouvette soumise à des conditions aux limites de Neumann.

La mesure de la non-satisfaction du comportement est basée, dans ce cadre non-linéaire, sur l'erreur en dissipation introduite dans [Ladevèze, 2008] dans un contexte de vérification. Cette quantité s'écrit :

$$E_{RdC}(\underline{\varepsilon}_p, \underline{\sigma}, R, p) = - \int_{\Omega} \left(\min_{(\underline{u}^*, \underline{\sigma}^*, R^*, p^*) \in RdC_0} \int_0^T \int_0^t (\underline{\sigma}^* - \underline{\sigma}) : (\dot{\underline{\varepsilon}}_p^* - \dot{\underline{\varepsilon}}_p) - (R^* - R)(\dot{p}^* - \dot{p}) \frac{d\tau dt}{T} \right) d\Omega, \quad (4.11)$$

où l'espace RdC_0 correspond aux solutions vérifiant le comportement Eq.(4.10) et dont les variables internes sont nulles à l'instant initial. Dans le cadre élastoplastique, le problème de minimisation en chaque point admet une solution analytique, cf [Ladevèze, 2008], et l'erreur en comportement s'écrit alors

$$E_{RdC}(\underline{\varepsilon}_p, \underline{\sigma}, R, p) = \int_{\Omega \times [0, T]} \int_0^t (R + R_0) \|\dot{\underline{\varepsilon}}_p\|_{vm} - \underline{\sigma} : \dot{\underline{\varepsilon}}_p + R(\dot{p} - \|\dot{\underline{\varepsilon}}_p\|_{vm}) \frac{d\tau}{T} dt d\Omega \quad (4.12)$$

Le problème d'identification s'écrit quant à lui :

$$(\lambda, \nu, R_0, k) = \underset{(\lambda^*, \nu^*, R_0^*, k^*) \in Re^{+4}}{\text{Arg Min}} \left\{ E_{RdC}(\underline{\varepsilon}_p^{SA}, \underline{\sigma}^{SA}, R^{SA}, p^{SA}) \right\}, \quad (4.13)$$

où la solution $(\underline{\varepsilon}_p^{SA}, \underline{\sigma}^{SA}, R^{SA}, p^{SA})$ correspond à la solution statiquement admissible construite à partir des mesures $\underline{u}^{mes}$ en utilisant les propriétés matériau $(\lambda^*, \nu^*, R_0^*, k^*)$. Introduite dans le contexte de vérification, la procédure suivante est utilisée :

1. *Construction de la contrainte admissible* : $\underline{\sigma}^{SA}$ est calculée à partir de la solution en contrainte du problème direct éléments finis avec le jeu de paramètres $(\lambda^*, \nu^*, R_0^*, k^*)$, prolongée afin qu'elle satisfasse les conditions d'admissibilité, cf [ACL1];
2. *Construction de la déformation élastique* : $\underline{\varepsilon}_e^{SA}$ est l'image de la contrainte admissible par la loi d'état ;
3. *Construction de la déformation plastique* : $\underline{\varepsilon}_p^{SA} = \underline{\varepsilon}^{mes} - \underline{\varepsilon}_e^{SA}$;
4. *Construction de la déformation plastique cumulée* : p^{SA} est construite en utilisant une méthode analogue à celle proposée dans [Ladevèze et Moës, 1997]. À chaque pas de temps t_i , on a

$$p^{SA}(\underline{m}, t_i) = p^{SA}(\underline{m}, t_{i-1}) + (t_i - t_{i-1}) \underset{\pi^* \in \Pi_{t_{i-1}}}{\text{Arg Min}} \left(\dot{\pi} - \|\dot{\underline{\varepsilon}}_p^{SA}(\underline{m}, t)\| \right) \\ \text{avec } \Pi_{t_{i-1}} = \left\{ \pi^* \in \mathbb{R}^* \mid \pi^* \leq \frac{1}{k^*} (\|\underline{\sigma}^{SA}\|_{vm} - R_0) \text{ et } \dot{\pi}^* = \frac{\pi^* - p^{SA}(\underline{m}, t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \geq \|\dot{\underline{\varepsilon}}_p\|_{vm} \right\} \quad (4.14)$$

5. *Construction de la variable d'écrouissage* : R^{SA} est simplement définie par la loi d'état, c'est-à-dire $R^{SA} = kp^{SA}$.

Dans [ACL1], la procédure d'identification est validée sur des essais synthétiques. Ces essais correspondent à des simulations réalisées sur des maillages très fins, dont une partie des déplacements d'une face sont utilisés comme mesures pour nourrir la méthode inverse. La connaissance de la solution vraie permet de valider la méthode proposée. Un exemple est repris ici, il s'agit d'une structure 2D sollicitée en flexion, sous l'hypothèse des contraintes planes, voir la figure 4.2. Au sein d'une matrice élastoplastique de module d'Young $E = 200$ [MPa], de coefficient de Poisson $\nu = 0.3$ [-], de limite d'élasticité $R_0 = 1$ [MPa] et de coefficient d'écrouissage $k = 10$ [MPa], une inclusion plus rigide est insérée. Son coefficient de Poisson et sa limite d'élasticité sont identiques mais son module d'Young vaut $E = 250$ [MPa] et son coefficient d'écrouissage prend la valeur $k = 12$ [MPa].

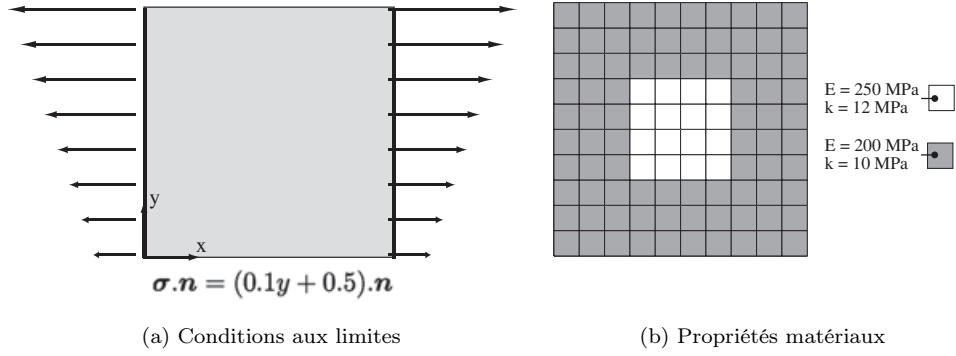


FIGURE 4.2 – Illustration du problème continu utilisé pour valider la méthode d'identification proposée. Ce problème est résolu à l'aide d'un code éléments finis s'appuyant sur un maillage très fin (100×100 éléments Quad à 8 noeuds), et une partie de la solution (grille de 21×21 points) sont considérés comme mesures pour nourrir l'approche inverse.

Le déplacement éléments finis est projeté sur une grille de 31×31 points. Il est ensuite injecté dans l'approche inverse, où seul les distributions de module d'Young E et de coefficient d'écrouissage k sont supposées inconnues. Les cartes des paramètres identifiés sont illustrées figure 4.3, tandis que leur écart par rapport à la solution est synthétisé dans le tableau TAB.(4.1). La moyenne, l'écart-type et le maximum de l'erreur relative entre les paramètres identifiés et les paramètres vrais y sont retranscrits. Ces premiers résultats permettent de valider la méthode d'identification proposée. Une étude plus complète est proposée dans [ACL1]. Par exemple, l'identification de toutes les propriétés matériaux ou la dépendance de la solution à la densité de mesure sont discutées.

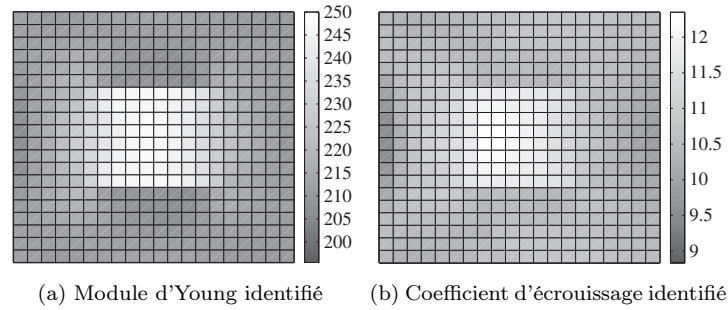


FIGURE 4.3 – Cartes de propriétés de rigidité élastique E et plastique k obtenues à l'aide de l'approche inverse proposée, à comparer avec la solution vraie, cf figure 4.2b.

	k	E
Moyenne de l'erreur	0.0277	0.022
écart-type de l'erreur	0.0250	0.027
Maximum de l'erreur	0.1180	0.138

TABLE 4.1 – Propriétés de l'erreur relative sur les paramètres (E, k) identifiés.

Bien que la méthode d'identification introduite permette de retrouver les propriétés du matériaux élastoplastiques à partir d'une mesure de champs, sa formulation présente quelques points

faibles. Le plus important concerne la nécessité de résoudre le problème direct pour chaque itération du problème de minimisation Eq.(4.13). En effet, la construction d'une solution admissible s'inspire des outils propres à la vérification et s'appuie donc naturellement sur une solution éléments finis. Le coût numérique de chaque itération de minimisation de l'erreur en comportement est donc élevé. Par conséquent le coût numérique total de l'identification est lui aussi élevé. Une solution pour réduire ce coût consiste en la réécriture de l'erreur de comportement Eq.(4.12) au cadre d'identification. Cette approche est proposée dans le chapitre suivant, en s'intéressant à la caractérisation d'un matériau élastique.

3 Cadre linéaire - Reformulation du comportement en élasticité

Cette partie s'appuie sur des travaux réalisés en parallèle de mon post-doctorat, en collaboration avec le KAUST, valorisés par [ACL2].

Comme présenté dans la partie précédente, l'utilisation de l'erreur en comportement ou dissipation dans une problématique d'identification nécessite deux minimisations imbriquées : (i) la première porte sur la minimisation de l'écart en comportement afin de trouver les paramètres matériaux optimaux, (ii) l'objet de la seconde est la détermination d'une paire de solutions cinématiquement et statiquement admissibles, pour un matériau donné. Cette double minimisation est coûteuse en terme de puissance de calcul. Dans le cadre de l'élasticité linéaire, les travaux présentés dans [ACL3] proposent de réécrire le comportement et le problème de minimisation afin que la procédure inverse ne repose que sur une unique minimisation. Sous l'hypothèse de contrainte plane, le comportement peut s'écrire tel que

$$\mathcal{A}_{\mathbf{a}} = \sum_{i=1}^3 a_i \underline{\underline{P}}_i \otimes \underline{\underline{P}}_i$$

avec $\begin{cases} a_1 = 2(\lambda(1 - \lambda/(\lambda + 2\mu)) + \mu) \\ a_{2,3} = 2\mu \end{cases}$ et $\begin{cases} \underline{\underline{P}}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\underline{e}_x \otimes \underline{e}_x + \underline{e}_y \otimes \underline{e}_y) \\ \underline{\underline{P}}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(-\underline{e}_x \otimes \underline{e}_x + \underline{e}_y \otimes \underline{e}_y) \\ \underline{\underline{P}}_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\underline{e}_x \otimes \underline{e}_y + \underline{e}_y \otimes \underline{e}_x) \end{cases}$, (4.15)

avec λ et μ les coefficients de Lamé. Toute contrainte compatible avec la mesure de déformation $\underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{u}^{mes})$ et le comportement matériau s'écrit alors sous la forme :

$$\underline{\underline{\sigma}} = a_1 \underline{\underline{\varepsilon}}_1^{mes} + a_{23} \underline{\underline{\varepsilon}}_{23}^{mes} \text{ avec } \begin{cases} \underline{\underline{\varepsilon}}_i^{mes} = (\underline{\underline{\varepsilon}}^{mes} : \underline{\underline{P}}_i) \underline{\underline{P}}_i, \forall i \in \{1, 2, 3\} \\ \underline{\underline{\varepsilon}}_{23}^{mes} = \underline{\underline{\varepsilon}}_2^{mes} + \underline{\underline{\varepsilon}}_3^{mes}, a_{23} = a_2 (= a_3) \end{cases} \quad (4.16)$$

Cette écriture de la contrainte met directement en avant une condition de compatibilité sur le comportement. En effet, la contrainte doit appartenir au plan $(\underline{\underline{\varepsilon}}_1^{mes}, \underline{\underline{\varepsilon}}_{23}^{mes})$. L'écart en relation de comportement de la contrainte sur le domaine observé s'écrit alors sous la forme suivante :

$$E_{RdC}(\underline{\underline{\sigma}}^*) = \int_{\partial_{mes}\Omega} (\underline{\underline{\sigma}}^* : \underline{\underline{P}}^\perp)^2 dS \text{ avec } \underline{\underline{P}}^\perp \text{ le tenseur unitaire normal à } (\underline{\underline{\varepsilon}}_1^{mes}, \underline{\underline{\varepsilon}}_{23}^{mes}). \quad (4.17)$$

La minimisation de cette formulation de comportement sur l'espace des contraintes statiquement admissibles permet de formuler le problème d'identification en un unique process d'optimisation. La contrainte solution est alors projetée sur $\underline{\underline{\varepsilon}}_1^{mes}$ et $\underline{\underline{\varepsilon}}_{23}^{mes}$ pour en déduire les valeurs des paramètres matériaux.

L'écriture de la minimisation sous contrainte est réalisée de sorte que sa résolution soit peu coûteuse. Ainsi, la contrainte est séparée en deux termes tels que :

$$\underline{\underline{\sigma}}^* = \sum_{i=1}^{N_{\sigma,p}} \sigma_{p,i}^* \underline{\underline{\sigma}}_i^{p,i} + \sum_{i=1}^{N_{\sigma,0}} \sigma_{0,i}^* \underline{\underline{\sigma}}_i^{0,i} \quad (4.18)$$

avec $(\underline{\underline{\sigma}}_i^{p,i})_{1 \leq N_{\sigma,p}}$ une base permettant de décrire une solution particulière, c'est-à-dire statiquement admissible, et $(\underline{\underline{\sigma}}_i^{0,i})_{1 \leq N_{\sigma,0}}$ une base associée à une solution homogène, c'est-à-dire statiquement admissible à zéro. L'espace $(\underline{\underline{\sigma}}_i^{p,i})_{1 \leq N_{\sigma,p}}$ est généré à partir des résolutions éléments finis du problème direct dont la solution est prolongée afin de satisfaire les conditions d'admissibilité statique. Les degrés de libertés $(\sigma_{p,i}^*)_{1 \leq N_{\sigma,p}}$ associés à la solution particulière correspondent à la description des conditions aux limites de Neumann appliquées sur le problème direct. L'espace $(\underline{\underline{\sigma}}_i^{0,i})_{1 \leq N_{\sigma,0}}$ est de forme trigonométrique, découlant d'une fonction d'Airy sur $\partial_{mes}\Omega$ et satisfaisant les conditions aux limites de Neumann à 0. Plus de détails pratiques sont donnés dans [ACL3].

La minimisation sous contrainte de l'erreur en comportement Eq.(4.17) s'écrit alors directement comme un problème linéaire sur les degrés de libertés $(\sigma_{p,i}^*)_{1 \leq N_{\sigma,p}}$ et $(\sigma_{0,i}^*)_{1 \leq N_{\sigma,0}}$.

Afin de montrer des premiers résultats de l'approche proposée, un exemple issu de [ACL3] est illustré figure 4.4. Un essai est simulé à partir du problème continu présenté figure 4.4. Il permet de générer des cartes de déplacement virtuels. Afin de correspondre aux mesures usuelles de la DIC locale, seuls les déplacements sur une grille grossière sont retenus.

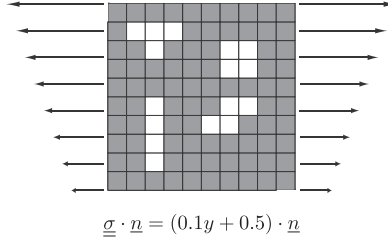


FIGURE 4.4 – Illustration du problème continu utilisé pour valider la méthode d'identification proposée. Un essai de traction/flexion est soumis à une plaque bi-matériau. Le module d'Young prend la valeur $E = 1$ [MPa] au sein de la matrice (noire) et $E = 2$ [MPa] pour les inclusions (blanches). Les deux matériaux ont même coefficient de Poisson $\nu = 0.3$.

À partir du déplacement sur une grille de 8×8 points, le champ de déformation $\underline{\underline{\varepsilon}}^{mes}$ est reconstruit par interpolation. Ce champ est utilisé pour construire le tenseur $\underline{\underline{P}}^\perp$ et la contrainte statiquement admissible minimisant l'erreur en comportement Eq.(4.17) est calculée. On en déduit les propriétés matériau (E^{mes}, ν^{mes}) dont les rapports avec les valeurs vraies sont illustrés figure 4.5. On trouve une bonne correspondance entre les valeurs mesurées des propriétés matériau et les valeurs utilisées pour générer les données synthétiques. Les écarts sont en grande partie liés à la faible quantité de données nourrissant l'approche inverse : seuls 8×8 points de mesures sont utilisés.

L'approche inverse proposée est une nouvelle fois réalisée, mais en s'appuyant sur 31×31 points de mesures. De plus le calcul de la base $(\underline{\underline{\sigma}}_i^{p,i})_{1 \leq N_{\sigma,p}}$ est réalisé à partir de conditions aux limites de Dirichlet. Dans ce cas, les paramètres matériau ne peuvent être directement estimés et l'approche proposée identifie des cartes de contraste. a_1 est défini comme une combinaison linéaire de deux cartes de contraste et a_{23} par une unique carte de contraste. Cette dernière est illustrée figure 4.6. Le rapport entre les valeurs prises par a_{23} au sein des deux matériaux constituant l'éprouvette synthétique correspond au ratio entre les deux valeurs vraies. Les différentes formes des inclusions sont elles aussi bien identifiées.

L'approche proposée permet donc de retrouver correctement la distribution des paramètres matériaux élastiques à partir de mesures de champs. De plus, le coût de l'approche inverse est maîtrisée par rapport à l'utilisation classique de l'erreur en comportement.

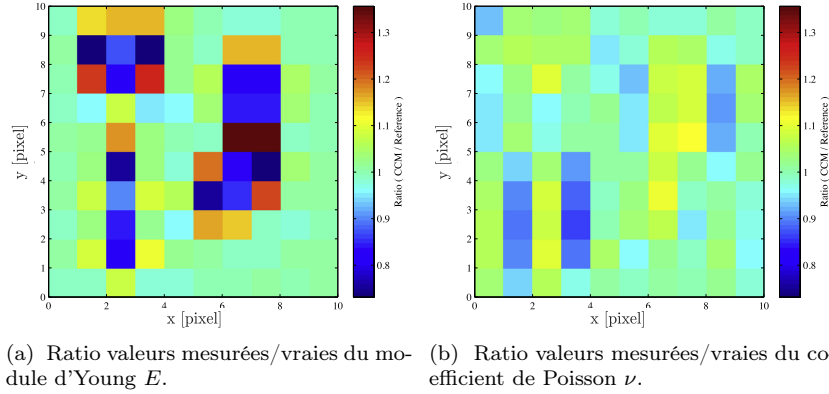


FIGURE 4.5 – Rapports entre valeurs mesurées et valeurs vraies du module d'Young E et du coefficient de Poisson ν . Les rapports proches de l'unité indique une bonne correspondance entre mesures et valeurs vraies, bien que le déplacement mesuré, défini sur une grille 8×8 , soit très pauvre en information.

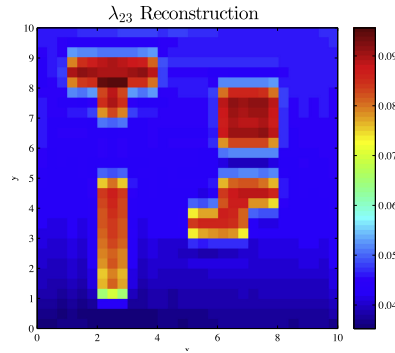


FIGURE 4.6 – Distribution spatiale du contraste du coefficient a_{23} obtenue par l'approche inverse proposée, en injectant 31×31 points de mesure de déplacement. On observe une excellente correspondance entre les contrastes des mesures et celui des valeurs vraies.

4 Bilan et perspectives

Dans la première partie de ce chapitre j'ai rappelé de façon succincte le formalisme d'un problème direct de mécanique. La plupart des hypothèses nécessaires à son écriture portent sur la formulation du comportement et sur le choix des valeurs des paramètres associés. Les outils de mesure de champs cinématiques apportent une richesse à l'instrumentation des essais qui permet d'identifier au mieux lois et paramètres. Les principes des méthodes d'identification les plus courantes sont rappelés dans ce chapitre. Il apparaît que la méthode la plus couramment utilisée, la méthode de recalage par éléments finis, est gourmande en terme de puissance de calcul et s'appuie sur une description *a priori* du matériau qui peut biaiser son résultat.

J'ai ensuite détaillé deux méthodes d'identification basées sur l'erreur en comportement. L'erreur en comportement, initialement introduite dans le contexte de la vérification des calculs numériques associés aux problèmes directs met l'accent sur ses hypothèses les moins fiables. La première méthode [ACL1] s'intéresse à la caractérisation d'un matériau élasto-plastique. Validée à l'aide de données synthétiques, cette méthode requiert la résolution de deux problèmes imbriqués : (i) la minimisation de l'erreur en comportement et (ii) le calcul d'une solution admissible pour un jeu

de paramètres matériaux. La seconde méthode [ACL3] porte sur la caractérisation d'un matériau élastique. Une nouvelle interprétation géométrique de l'erreur en comportement est introduite afin de réduire le coût numérique de la résolution du problème inverse. Cette écriture permet en effet de contraindre directement le calcul de la solution admissible et limite l'approche inverse globale à un unique problème.

Actuellement, mis à part les méthodes s'appuyant directement sur les images comme la DIC intégrée qui sont encore marginales ; la plupart des méthodes inverses n'utilisent pas pleinement la grande quantité de données offerte par les outils de mesure de champs cinématiques. L'explication principale tient dans la relative jeunesse de ces outils, et du manque de recul métrologique qui leur est associé. Dans ce contexte, les perspectives à plus ou moins long terme sont les suivantes :

- une première piste de recherche porte sur l'utilisation, dans un cadre expérimental, des outils proposés dans [ACL1, ACL2]. La mise en oeuvre de ces méthodes numériques sur des données à la limite des performances métrologiques des appareils de mesure permettrait de faire remonter leurs points faibles ainsi que leurs points forts. Ceci est particulièrement vrai pour l'étude des comportements élastiques, où les ordres de grandeur des déformations mises en jeux sont très faibles.
- un point à développer concerne la propagation des performances métrologiques des cartes cinématiques vers les propriétés matériaux. Les premiers travaux s'intéressant à la résolution de mesure associée aux paramètres identifiés concernent les approches DIC types intégrées, par exemple [Gras *et al.*, 2015, Réthoré *et al.*, 2013] où la méthode des champs virtuels [Avril *et al.*, 2004]. Toutefois, pour les autres méthodes d'identification, les performances métrologiques des grandeurs identifiées ne sont que rarement discutées. Ceci est encore plus vrai pour la notion de résolution spatiale des propriétés topologiques matériaux qui est aujourd'hui un problème ouvert.
- une autre piste de recherche concerne la généralisation des outils proposés dans ce document à d'autre type de matériaux. Plus particulièrement, la méthode géométrique de l'erreur en comportement pourrait être étendue au comportement élasto-plastique. Un effort particulier pourra être porté sur la construction des champs de contraintes admissibles. Les méthodes actuelles sont très souvent issues des outils de vérification et s'appuient alors sur la résolution éléments finis du problème direct. Cette méthodologie présente plusieurs inconvénients comme la nécessité d'introduire une discrétisation ou son coût numérique. En s'appuyant sur les outils proposés par Suquet [Moulinec et Suquet, 1998] récemment revisités dans le cadre de l'identification, cf [Bellis et Moulinec, 2016, Bellis *et al.*, 2017], on peut imaginer alors s'affranchir de l'utilisation de cette résolution éléments finis .
- il y a, au sein de l'équipe "Mécanique Expérimentale", une grande expertise en identification, plus particulièrement concernant la méthode des champs virtuels. La comparaison entre les performances de cette méthode et celle de l'erreur en comportement serait une piste de recherche intéressante. Ensuite, étendre la méthode des champs virtuels aux phénomènes locaux tel que la fissuration apparaît comme une piste de travail prometteuse.
- Enfin, une fois la meilleure méthode d'identification retenue, l'optimisation de l'essai dans son ensemble pourra aussi être investiguée. En effet, la plupart des essais réalisés dans la littérature à des buts d'identification sont des essais uni-axiaux, sur des éprouvettes dont la géométrie est relativement simple. Réfléchir à l'optimisation de l'éprouvette, ainsi que les sollicitations que l'on va lui prescrire pendant un essai pour tirer le plein bénéfice des mesures de champs cinématiques constitue une piste de recherche représentant un véritable challenge.

Conclusion

La voie ouverte par le tout numérique de ces dernières années trouve aujourd’hui son pendant en mécanique expérimentale. D’une part, les outils de mesure de champs cinématiques répondent parfaitement aux problématiques associées aux modèles complexes nécessaires pour que les approches prédictives soient au plus près de la réalité. Ils offrent en effet la richesse de mesure suffisante pour alimenter le dialogue alors nécessaire entre essais et simulations. Cependant cette richesse, synonyme ici de grande quantité de données, requiert par ailleurs l’utilisation de moyens initialement introduits en calcul de structure. Toutefois, travailler avec le réel et non ses modèles change la donne. Entre autres, il n’existe pas de mesure parfaite. En effet, toute mesure est accompagnée de bruit, de défauts, qu’il faut alors prendre en compte et maîtriser afin qu’elle soit pertinente. Ce cadre particulier est nouveau pour le numéricien.

Deux outils de mesure de champs sont abordés dans ce manuscrit, la méthode de la grille (GM) et la corrélation d’images numériques (DIC). Leurs performances métrologiques sont particulièrement étudiées, afin de donner un véritable crédit aux champs de mesures qu’elles offrent. Des formules prédictives donnant leur résolution de mesure sont ainsi rappelées, celles-ci ayant été validées dans le contexte de mécanique expérimentale. Leur biais de mesure est aussi discuté, permettant ensuite la définition de la résolution spatiale. Ces notions permettent de confronter objectivement les deux méthodes, donnant un léger avantage à la GM.

La GM est une approche fréquentielle. Elle s’appuie sur l’observation d’une grille déposée sur la surface observée. Cette spécificité complique la mise en oeuvre de la méthode et la rend sensible au phénomène de repliement de spectre. Une astuce est néanmoins proposée afin de minimiser son apparition. La GM a recours à des outils issus de la communauté du traitement du signal, ce qui permet un traitement rapide des images de grilles. Ce traitement est réalisé au pixel, direct et n’introduit pas l’interpolation des images. Il apparaît donc comme l’outil d’observation par excellence. L’illustration donnée dans ce manuscrit qui consiste à instrumenter un essai de compression sur un asphalt, tire profit de ses hautes performances métrologiques. D’un autre côté, la DIC présente une facilité de mise en oeuvre sans pareil. De plus, la DIC permet de fusionner les étapes qui se succèdent d’ordinaire : sa version intégrée permet de coupler mesure de champs cinématiques et identification. Une illustration de cette haute spécificité que permet la DIC est présentée dans ce manuscrit. De plus, le formalisme proposé dans la version globale permet de prendre en compte les contraintes particulières associées à son contexte d’utilisation et de faciliter le couplage avec les outils traditionnels de la communauté du calcul de structure. L’exemple de l’utilisation de la DIC en contexte d’usinage illustré dans ce manuscrit montre bien le potentiel de ce formalisme. Enfin, la DIC peut s’utiliser avec une texture qui, en apparence, est pauvre en information. Son utilisation dans le cadre de la caractérisation des propriétés mécaniques d’un biofilm illustre le large champ d’application de la DIC. Toutefois la DIC peut très bien traiter des images de grilles. D’autant plus que celles-ci présentent des gradients très élevés, ce qui est optimal au regard des performances métrologiques. Associer GM à l’observation phénoménologique puis DIC à l’identification apparaît donc comme une excellente solution pour tirer profit des avantages des deux techniques.

Ces deux outils de mesure de champs sont encore au centre de nombreux travaux de recherche. En effet, de nombreux problèmes ouverts subsistent. Par exemple, parmi toutes les pistes proposées dans ce manuscrit, on peut s'intéresser à court terme aux points suivants : (i) l'étude du biais de mesure pour la DIC. En effet, l'impact de la texture sur la solution n'est aujourd'hui que trop peu étudié dans la littérature. Cet impact est certes limité dès lors que l'on s'intéresse à des quantités globales, mais avoir la pleine maîtrise du marquage pourrait permettre d'en proposer l'optimum. L'étude de la texture prend d'autant plus tout son sens car l'équipe "Mécanique Expérimentale" de l'Institut Pascal possède une réelle expertise du dépôt de marquage quasi parfait, nécessaire à la GM ; (ii) la généralisation de la GM à la mesure 3D, elle est en effet actuellement strictement 2D ; enfin, (iii) la conception d'une caméra intelligente, permettant de traiter en direct les images. Cette dernière piste est aujourd'hui amorcée grâce à l'encadrement d'une thèse conjointement avec l'équipe "DREAM" de l'Institut Pascal.

L'autre volet de ce manuscrit présente l'utilisation des mesures de champs cinématiques à des fins d'identification. Deux illustrations sont traitées : la généralisation de l'erreur en comportement au contexte de l'identification dans un cadre élasto-plastique et sa reformulation afin de réduire les coûts de calcul dans le contexte de la plasticité. L'erreur en comportement a originellement été introduite afin d'apporter des outils de vérification pour le calcul de structure. Formulée sur les équations les moins fiables du problème direct, elle permet l'écriture de bornes garanties de l'erreur de discrétisation. Son formalisme se prête bien au cadre de l'identification, où elle permet d'extraire des distributions spatiales de propriétés matériaux. Toutefois, la nécessité de calculer des champs cinématiquement et statiquement admissibles la rend coûteuse, malgré des efforts afin de maintenir un coût global raisonnable.

Une autre technique d'identification, la méthode des champs virtuels, est maîtrisée au sein de l'équipe "Mécanique Expérimentale" de l'Institut Pascal. Assez naturellement, une première piste de recherche est de confronter les deux approches, afin d'en faire une comparaison objective. La méthode des champs virtuels semble prometteuse car elle n'implique pas la résolution du problème direct, ce qui en fait une des méthodes inverses les plus légères. Elle apparaît donc comme l'approche la plus à même de mener une réflexion sur l'optimisation des essais dans leur globalité : le design de l'éprouvette et son chargement. Enfin, une dernière piste de recherche porte sur la métrologie en identification. En effet, il s'avère capital de maîtriser le transport des propriétés métrologiques au sein de l'approche inverse jusqu'aux paramètres matériau identifiés.

Bibliographie propre

Articles soumis

- [acl4] H. Chanal, A. Benti, B. Blaysat et S. Durieux Computation of natural frequencies and associated modes of an over-constrained parallel kinematic machine using a beam model. Soumis, 2017.
- [acl3] G. Rebergue, B. Blaysat, H. Chanal et E. Duc. Advanced DIC for accurate part deflection measurement in machining environment. Soumis, 2017.
- [acl2] F. Sur, B. Blaysat, et M. Grédiac. Rendering deformed speckle images with a Boolean model. Soumis, 2017.
- [acl1] M. C. Teguedi, E. Toussaint, B. Blaysat, S. Moreira, S. Liandrat, et M. Grédiac. Towards the local expansion and contraction measurement of recycled asphalt pavements (RAP) exposed to freeze-thaw cycles. En révision, 2017.

Articles publiés

- [ACL14] M. Grédiac, B. Blaysat et F. Sur. A critical comparison of some metrological parameters characterizing local digital image correlation and grid method. *Experimental Mechanics*, 57(6) :871–903, 2017. 2017.
- [ACL13] F. Sur, B. Blaysat, et M. Grédiac. Towards Computational Photomechanics. *ERCIM news*, Jan. 2017.
- [ACL12] X. Cerutti, K. Mocellin, S. Hassini, B. Blaysat, et E. Duc. Methodology for aluminium part machining quality improvement considering mechanical properties and process conditions. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, available online, 2016.
- [ACL11] F. Sur, B. Blaysat, et M. Grédiac. Determining displacement and strain maps immune from aliasing effect with the grid method. *Optics and Lasers in Engineering*, 86 :317–328, 2016.
- [ACL10] M. Grédiac, F. Sur, et B. Blaysat. The grid method for in-plane displacement and strain measurement : A review and analysis. *Strain*, 52(3) :205–243, 2016. *Awarded by the BSSM Best Strain Paper Fylde Prize for 2016.*
- [ACL9] M. C. Teguedi, B. Blaysat, E. Toussaint, S. Moreira, S. Liandrat, et M. Grédiac. Applying a full-field measurement technique for studying the local deformation in reclaimed asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 121 :547–558, 9 2016.
- [ACL8] B. Blaysat, M. Grédiac et F. Sur. On the propagation of camera sensor noise to displacement maps obtained by DIC - an experimental study. *Experimental Mechanics*, 56(6) :919–944, 2016.
- [ACL7] B. Blaysat, M. Grédiac et F. Sur. Effect of interpolation on noise propagation from images to DIC displacement maps. *International Journal for Numerical Methods and Engineering*, 108(3) : 213-232, 2016.

- [ACL6] J. Neggers, B. Blaysat, J. P. M. Hoefnagels et M. G. D. Geers. On image gradients in Digital Image Correlation, *International Journal for Numerical Methods and Engineering*, 105(4) :243 – 260, 2016.
- [ACL5] M. Grédiac, F. Sur et B. Blaysat. Removing quasi-periodic noise in strain maps by filtering in the Fourier domain. *Experimental Techniques* 86 : 317-328, 2016.
- [ACL4] B. Blaysat, J. P. M. Hoefnagels, G. Lubineau, M. Alfano et M. G. D. Geers. Identification of cohesive zone models using integrated digital image correlation and a closed form analytical description of the DCB fracture test. *International Journal of Solids and Structures* 55 :79–91, 2015
- [ACL3] A. Moussawi, G. Lubineau, E. Florentin et B. Blaysat. The constitutive compatibility method for identification of material parameters based on full-field measurements *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 265 :1-14, 2013.
- [ACL2] P. Ladevèze, B. Blaysat et E. Florentin. Strict upper error bounds on computed outputs of interest for plasticity problems. *Computational Methods in Applied Mechanics Engineering* (245 :194-205) 2012
- [ACL1] B. Blaysat, E. Florentin, G. Lubineau et A. Moussawi. A Dissipation Gap Method for full-field measurement-based identification of elasto-plastic material parameters *International Journal for Numerical Methods and Engineering* 91(7) :685-704, 2012

Bibliographie

- [ASTM] (2010). *ASTM E2208-02(2010)e1, Standard Guide for Evaluating Non-Contacting Optical Strain Measurement Systems*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [Aizenberg et Butakoff, 2008] AIZENBERG, I. et BUTAKOFF, C. (2008). A windowed gaussian notch filter for quasi-periodic noise removal. *Image and Vision Computing*, 26(10):1347–1353.
- [Andersson et Stigh, 2004] ANDERSSON, T. et STIGH, U. (2004). The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces. *International Journal of Solids and Structures*, 41(2):413 – 434.
- [Avril et al., 2008] AVRIL, S., BONNET, M., BRETELLE, A.-S., GRÉDIAC, M., HILD, F., IENNY, P., LATOURTE, F., LEMOSSE, D., PAGANO, S., PAGNACCO, E. et PIERRON, F. (2008). Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements. *Experimental Mechanics*, 48:381–402.
- [Avril et al., 2004] AVRIL, S., GRÉDIAC, M. et PIERRON, F. (2004). Sensitivity of the virtual fields method to noisy data. *Computational Mechanics*, 34(6):439–452.
- [Avril et Pierron, 2007] AVRIL, S. et PIERRON, F. (2007). General framework for the identification of constitutive parameters from full-field measurements in linear elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 44(14–15):4978–5002.
- [Badulescu et al., 2009] BADULESCU, C., GRÉDIAC, M., MATHIAS, J. et ROUX, D. (2009). A procedure for accurate one-dimensional strain measurement using the grid method. *Experimental Mechanics*, 49:841–854. 10.1007/s11340-008-9203-8.
- [Baker et Matthews, 2004] BAKER, S. et MATTHEWS, I. (2004). Lucas-kanade 20 years on : A unifying framework. *International Journal of Computer Vision*, 56(3):221–255.
- [Barenblatt, 1962] BARENBLATT, G. I. (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in applied mechanics*, 7(1):55–129.
- [Bay et al., 1999] BAY, B. K., SMITH, T. S., FYHRIE, D. P. et SAAD, M. (1999). Digital volume correlation : Three-dimensional strain mapping using x-ray tomography. *Experimental Mechanics*, 39(3):217–226.
- [Bellis et Moulinec, 2016] BELLIS, C. et MOULINEC, H. (2016). A full-field image conversion method for the inverse conductivity problem with internal measurements. *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Science*, 472(2187).
- [Bellis et al., 2017] BELLIS, C., TRABELSI, M. et FRÉMY, F. (2017). Reconstructing material properties by deconvolution of full-field measurement images : The conductivity case. *Inverse Problems*, 33(3):035012.
- [Besnard et al., 2006] BESNARD, G., HILD, F. et ROUX, S. (2006). Finite-element displacement fields analysis from digital images : application to Portevin-Le Châtelier bands. *Experimental Mechanics*, 46(6):789–803.
- [Beyer, 1992] BEYER, H. A. (1992). Accurate calibration of ccd-cameras. In *Proceedings 1992 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 96–101.

- [Bomarito *et al.*, 2017] BOMARITO, G. F., RUGGLES, T. J., HOCHHALTER, J. D. et CANNON, A. H. (2017). *Investigation of Optimal Digital Image Correlation Patterns for Deformation Measurement*, pages 217–218. Springer International Publishing, Cham.
- [Bossuyt, 2013] BOSSUYT, S. (2013). Optimized patterns for digital image correlation. In *Proceedings of the 2012 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, volume Volume 3 : Imaging Methods for Novel Materials and Challenging Applications, pages 239–248. Springer New York.
- [Bressi *et al.*, 2015] BRESSI, S., DUMONT, A.-G. et PITTET, M. (2015). Cluster phenomenon and partial differential aging in rap mixtures. *Construction and Building Materials*, 99:288–297.
- [Brindle *et al.*, 2011] BRINDLE, E. R., MILLER, D. A. et STEWART, P. S. (2011). Hydrodynamic deformation and removal of staphylococcus epidermidis biofilms treated with urea, chlorhexidine, iron chloride, or dispersinb. *Biotechnology and Bioengineering*, 108(12):2968–2977.
- [Brown, 1966] BROWN, D. C. (1966). Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering*, 32:444–462.
- [Brown, 1971] BROWN, D. C. (1971). Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8):855–866.
- [Bruyneel *et al.*, 2014] BRUYNEEL, M., DELSEMME, J. P., a. C. GOUPIL, LEQUESNE, P. J. C., NAITO, T. et URUSHINIYAMA, Y. (2014). Damage modeling of laminated composites : Validation of the inter-laminar damage model of Samcef at the coupon level for UD plies. In *5th European Conference on Computational Mechanics*.
- [Cerutti et Mocellin, 2015] CERUTTI, X. et MOCELLIN, K. (2015). Parallel finite element tool to predict distortion induced by initial residual stresses during machining of aeronautical parts. *International Journal of Material Forming*, 8(2):255–268.
- [Chandra *et al.*, 2002] CHANDRA, N., LI, H., SHET, C. et GHONEM, H. (2002). Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces. *International Journal of Solids and Structures*, 39(10):2827–2855.
- [Chavant *et al.*, 2007] CHAVANT, P., GAILLARD-MARTINIE, B., TALON, R., HÉBRAUD, M. et BERNARDI, T. (2007). A new device for rapid evaluation of biofilm formation potential by bacteria. *Journal of Microbiological Methods*, 68(3):605–612.
- [Chu *et al.*, 1985] CHU, T. C., RANSON, W. F. et SUTTON, M. A. (1985). Applications of Digital-Image-Correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 25(3):232–244.
- [Claire *et al.*, 2004] CLAIRE, D., HILD, F. et ROUX, S. (2004). A finite element formulation to identify damage fields : the equilibrium gap method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 61(2):189–208.
- [Constantinesc, 1995] CONSTANTINESC, A. (1995). On the identification of elastic moduli from displacement-force boundary measurements. *Inverse Problems in Engineering*, 1(4):293–313.
- [Coudert *et al.*, 2004] COUDERT, S., TRICONNET, K., ZEBIRI, A. et SURREL, Y. (2004). Étalonnage transverse d’un objectif de caméra par la méthode de la grille. In *Photomechanics*.
- [Crouzeix *et al.*, 2009] CROUZEIX, L., PÉRIÉ, J. N., COLLOMBET, F. et DOUCHIN, B. (2009). An orthotropic variant of the equilibrium gap method applied to the analysis of a biaxial test on a composite material. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 40(11):1732–1740.
- [Dai *et al.*, 2014] DAI, X., XIE, H., WANG, H., LI, C., LIU, Z. et WU, L. (2014). The geometric phase analysis method based on the local high resolution discrete fourier transform for deformation measurement. *Measurement Science and Technology*, 25(2):025402.
- [Dong et Pan, 2017] DONG, Y. L. et PAN, B. (2017). A review of speckle pattern fabrication and assessment for digital image correlation. *Experimental Mechanics*, pages 1–21.

- [Dugdale, 1960] DUGDALE, D. S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2):100 – 104.
- [Duval *et al.*, 2015] DUVAL, M., PASSIEUX, J.-C., SALAÜN, M. et GUINARD, S. (2015). Non-intrusive coupling : recent advances and scalable nonlinear domain decomposition. *Archives of Computational Methods in Engineering*, page Online first.
- [Evans et Hutchinson, 1995] EVANS, A. G. et HUTCHINSON, J. W. (1995). The thermomechanical integrity of thin films and multilayers. *Acta Metallurgica et Materialia*, 43(7):2507 – 2530.
- [Farhat et Hemez, 1993] FARHAT, C. et HEMEZ, F. M. (1993). Updating finite element dynamic models using an element-by-element sensitivity methodology. *AIAA Journal*, 31(9):1702–1711.
- [Fedele *et al.*, 2009] FEDELE, R., RAKA, B., HILD, F. et ROUX, S. (2009). Identification of adhesive properties in glare assemblies using digital image correlation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 57(7):1003–1016.
- [Florentin et Lubineau, 2011] FLORENTIN, E. et LUBINEAU, G. (2011). Using constitutive equation gap method for identification of elastic material parameters : technical insights and illustrations. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 5(4):227–234.
- [Fu *et al.*, 2016] FU, J., BARLAT, F., KIM, J.-H. et PIERRON, F. (2016). Identification of nonlinear kinematic hardening constitutive model parameters using the virtual fields method for advanced high strength steels. *International Journal of Solids and Structures*, 102–103:30–43.
- [Gain *et al.*, 2011] GAIN, A. L., CARROLL, J., PAULINO, G. H. et LAMBROS, J. (2011). A hybrid experimental/numerical technique to extract cohesive fracture properties for mode-I fracture of quasi-brittle materials. *International Journal of Fracture*, 169:113–131.
- [Gallego *et al.*, 2015] GALLEGO, M., IBANEZ, M. et SIMÓ, A. (2015). Parameter estimation in non-homogeneous Boolean models : an application to plant defense response. *Image Analysis & Stereology*, 34(1):27–38.
- [Garcia, 2001] GARCIA, D. (2001). *Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Geymonat *et al.*, 2002] GEYMONAT, G., HILD, F. et PAGANO, S. (2002). Identification of elastic parameters by displacement field measurement. *Comptes Rendus Mécanique*, 330(6):403–408.
- [Geymonat et Pagano, 2003] GEYMONAT, G. et PAGANO, S. (2003). Identification of mechanical properties by displacement field measurement : A variational approach. *Meccanica*, 38(5):535–545.
- [Gras *et al.*, 2015] GRAS, R., LECLERC, H., HILD, F., ROUX, S. et SCHNEIDER, J. (2015). Identification of a set of macroscopic elastic parameters in a 3D woven composite : Uncertainty analysis and regularization. *International Journal of Solids and Structures*, 55:2–16.
- [Grédiac, 1989] GRÉDIAC, M. (1989). Principe des travaux virtuels et identification. *Comptes rendus de l'Académie des sciences.*, 309(1).
- [Grédiac et Hild, 2013] GRÉDIAC, M. et HILD, F. (2013). *Full-field measurements and identification in solid mechanics*. Wiley Online Library.
- [Grediac *et al.*, 2006] GREDIAC, M., PIERRON, F., AVRIL, S. et TOUSSAINT, E. (2006). The virtual fields method for extracting constitutive parameters from full-field measurements : a review. *Strain*, 42(4):233–253.
- [Grédiac et Sur, 2014] GRÉDIAC, M. et SUR, F. (2014). Effect of sensor noise on the resolution and spatial resolution of displacement and strain maps estimated with the grid method. *Strain*, 50(1):1–27.
- [Grédiac *et al.*, 2013] GRÉDIAC, M., SUR, F., BADULESCU, C. et MATHIAS, J.-D. (2013). Using deconvolution to improve the metrological performance of the grid method. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(6):716 – 734.

- [Hassini, 2015] HASSINI, S. (2015). *Qualification multi-critères des gammes d'usinage : application aux pièces de structure aéronautique en alliage Airware*. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale des Sciences pour l'ingénieur.
- [Healey et Kondepudy, 1994] HEALEY, G. et KONDEPUDY, R. (1994). Radiometric CCD camera calibration and noise estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(3):267–276.
- [Hild et Roux, 2006] HILD, F. et ROUX, S. (2006). Digital image correlation : from displacement measurement to identification of elastic properties—a review. *Strain*, 42(2):69–80.
- [Hild et Roux, 2012] HILD, F. et ROUX, S. (2012). Comparison of local and global approaches to digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 52:1503–1519.
- [Hild et al., 2011] HILD, F., ROUX, S., GUERRERO, N., MARANTE, M. E. et FLÓREZ-LÓPEZ, J. (2011). Calibration of constitutive models of steel beams subject to local buckling by using digital image correlation. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 30(1):1–10.
- [Hillerborg et al., 1976] HILLERBORG, A., MODÉER, M. et PETERSSON, P. E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, 6(6):773 – 781.
- [Holst, 1998] HOLST, G. C. (1998). *CCD Arrays Cameras and Displays*. JCD Publishing.
- [Hor et al., 2013] HOR, A., MOREL, F., LEBRUN, J. L. et GERMAIN, G. (2013). An experimental investigation of the behaviour of steels over large temperature and strain rate ranges. *International Journal of Mechanical Sciences*, 67(0):108 – 122.
- [Horn et Schunck, 1981] HORN, B. K. P. et SCHUNCK, B. G. (1981). Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 17:185–203.
- [Hutchinson et Suo, 1992] HUTCHINSON, J. W. et SUO, Z. (1992). Mixed mode cracking in layered materials. *Advances in Applied Mechanics*, 29(63):63–191.
- [Hÿch et Potez, 1997] HÿCH, M. J. et POTEZ, L. (1997). Geometric phase analysis of high-resolution electron microscopy images of antiphase domains : Example cu3au. *Philosophical Magazine A*, 76(6):1119–1138.
- [Ivankovic et al., 2004] IVANKOVIC, a., PANDYA, K. C. et WILLIAMS, J. G. (2004). Crack growth predictions in polyethylene using measured traction–separation curves. *Engineering Fracture Mechanics*, 71(4-6):657–668.
- [VIM] JCGM MEMBER ORGANIZATIONS (2012). *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, volume 200. BIPM.
- [Jones et al., 2011] JONES, W. L., SUTTON, M. P., MCKITTRICK, L. et STEWART, P. S. (2011). Chemical and antimicrobial treatments change the viscoelastic properties of bacterial biofilms. *Biofouling*, 27(2):207–215.
- [Kafkalidis et Thouless, 2002] KAFKALIDIS, M. S. et THOULESS, M. D. (2002). The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints. *International Journal of Solids and Structures*, 39(17):4367–4383.
- [Ke et al., 2011] KE, X. D., SCHREIER, H. W., SUTTON, M. A. et WANG, Y. Q. (2011). On error assessment in stereo-based deformation measurements. *Experimental Mechanics*, 51(4):423–441.
- [Laborde et Nguyen, 1990] LABORDE, P. et NGUYEN, Q. S. (1990). Etude de l'équation d'évolution des systèmes dissipatifs standards. *Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 24:67–84.
- [Lachambre et al., 2015] LACHAMBRE, J., RÉTHORÉ, J., WECK, A. et BUFFIERE, J.-Y. (2015). Extraction of stress intensity factors for 3d small fatigue cracks using digital volume correlation and x-ray tomography. *International Journal of Fatigue*, 71:3–10.
- [Ladevèze, 2008] LADEVÈZE, P. (2008). Strict upper error bounds on computed outputs of interest in computational structural mechanics. *Computational Mechanics*, 42(2):271–286.

- [Ladeveze et Leguillon, 1983] LADEVÈZE, P. et LEGUILLON, D. (1983). Error estimate procedure in the finite element method and applications. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 20(3):485–509.
- [Ladevèze et Moës, 1997] LADEVÈZE, P. et MOËS, N. (1997). A new a posteriori error estimation for nonlinear time-dependent finite element analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 157:45–68.
- [Ladeveze et al., 1994] LADEVÈZE, P., NEDJAR, D. et REYNIER, M. (1994). Updating of finite element models using vibration tests. *AIAA Journal*, 32(7):1485–1491.
- [Ladevèze et Pelle, 2001] LADEVÈZE, P. et PELLE, J. P. (2001). *La maîtrise du calcul en mécanique linéaire et non linéaire*. Hermes.
- [Latourte et al., 2008] LATOURTE, F., CHRYSOCHOOS, A., PAGANO, S. et WATTRISSE, B. (2008). Elastoplastic behavior identification for heterogeneous loadings and materials. *Experimental Mechanics*, 48(4):435–449.
- [Leclerc et al., 2009] LECLERC, H., PÉRIÉ, J.-N., ROUX, S. et HILD, F. (2009). *Integrated Digital Image Correlation for the Identification of Mechanical Properties*, pages 161–171. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Lecompte et al., 2006] LECOMPTE, D., SMITS, A., BOSSUYT, S., SOL, H., VANTOMME, J., HE-MELRIJCK, D. V. et HABRAKEN, A. (2006). Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 44(11):1132 – 1145.
- [Lecompte et al., 2007] LECOMPTE, D., SMITS, A., SOL, H., VANTOMME, J. et VAN HEMELRIJCK, D. (2007). Mixed numerical–experimental technique for orthotropic parameter identification using biaxial tensile tests on cruciform specimens. *International Journal of Solids and Structures*, 44(5):1643–1656.
- [Lee et al., 2006] LEE, S., HWANG, J., SHANKAR, M., CHANDRASEKAR, S. et DALE COMPTON, W. (2006). Large strain deformation field in machining. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(5):1633–1643.
- [Lemaitre et al., 2009] LEMAITRE, J., CHABOCHE, J. L., BENALLAL, A. et DESMORAT, R. (2009). *Mécanique des matériaux solides*. Dunod.
- [Marty et al., 2015] MARTY, J., RÉTHORÉ, J., COMBESURE, A. et CHAUDET, P. (2015). Finite strain kinematics of multi-scale material by digital image correlation. 55(9):1641–1656.
- [Mathieu et al., 2012a] MATHIEU, F., HILD, F. et ROUX, S. (2012a). Identification of a crack propagation law by digital image correlation. *International Journal of Fatigue*, 36(1):146 – 154.
- [Mathieu et al., 2012b] MATHIEU, F., HILD, F. et ROUX, S. (2012b). Image-based identification procedure of a crack propagation law. *Engineering Fracture Mechanics*, 103:48–59.
- [Meuwissen et al., 1998] MEUWISSEN, M. H. H., OOMENS, C. W. J., BAAIJENS, F. P. T., PETTERSON, R. et JANSSEN, J. D. (1998). Determination of the elasto-plastic properties of aluminium using a mixed numerical–experimental method. *Journal of Materials Processing Technology*, 75(1–3):204–211.
- [Meuwissen, 1998] MEUWISSEN, M. M. (1998). An inverse method for the mechanical characterisation of metals.
- [Mohammed et Liechti, 2000] MOHAMMED, I. et LIECHTI, K. M. (2000). Cohesive zone modeling of crack nucleation at bimaterial corners. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(4):735–764.
- [Morel et Yu, 2009] MOREL, J. et YU, G. (2009). Asift : A new framework for fully affine invariant image comparison. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2(2):438–469.
- [Moulinec et Suquet, 1998] MOULINEC, H. et SUQUET, P. (1998). A numerical method for computing the overall response of nonlinear composites with complex microstructure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 157(1):69–94.

- [Needleman, 1987] NEEDLEMAN, A. (1987). A continuum model for void nucleation by inclusion debonding. *Journal of Applied Mechanics*, 54:525.
- [Neggers *et al.*, 2015] NEGGERS, J., HOEFNAGELS, J. P. M., GEERS, M. G. D., HILD, F. et ROUX, S. (2015). Time-resolved integrated digital image correlation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 103(3):157–182.
- [Neggers *et al.*, 2012] NEGGERS, J., HOEFNAGELS, J. P. M., HILD, F., ROUX, S. et GEERS, M. G. D. (2012). A global digital image correlation enhanced full-field bulge test method. *Procedia IUTAM*, 4(0):73 – 81. IUTAM Symposium on Full-field Measurements and Identification in Solid Mechanics Cachan, France 4-8 July 2011.
- [Neggers *et al.*, 2017] NEGGERS, J., MATHIEU, F., HILD, F., ROUX, S. et SWIERGIEL, N. (2017). Improving full-field identification using progressive model enrichments. *International Journal of Solids and Structures*, pages –.
- [Newson *et al.*, 2016a] NEWSON, A., FARAJ, N., GALERNE, B. et DELON, J. (2016a). Realistic film grain rendering. Rapport technique, Image Processing On Line (preprint).
- [Newson *et al.*, 2016b] NEWSON, A., GALERNE, B. et DELON, J. (2016b). Stochastic modeling and resolution-free rendering of film grain. Rapport technique MAP5 2016-23, Université Paris Descartes.
- [Orteu *et al.*, 2006] ORTEU, J.-J., GARCIA, D., ROBERT, L. et BUGARIN, F. (2006). A speckle texture image generator. In *Proceedings SPIE*, volume 6341, pages 1–6.
- [Pan *et al.*, 2009] PAN, B., QIAN, K., XIE, H. et ASUNDI, A. (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement : a review. *Measurement Science and Technology*, 20(6):062001.
- [Pan et Wang, 2016] PAN, B. et WANG, B. (2016). Digital image correlation with enhanced accuracy and efficiency : A comparison of two subpixel registration algorithms. *Experimental Mechanics*, online first:1–15.
- [Pan *et al.*, 2010] PAN, B., XIE, H. et WANG, Z. (2010). Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching. *Appl. Opt.*, 49(28):5501–5509.
- [Pan *et al.*, 2008] PAN, B., XIE, H., WANG, Z., QIAN, K. et WANG, Z. (2008). Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Opt. Express*, 16(10):7037–7048.
- [Park et Paulino, 2012] PARK, K. et PAULINO, G. H. (2012). Cohesive Zone Models : A critical review of traction-separation relationships across fracture surfaces. *Applied Mechanics Reviews*, 64(6):060802.
- [Parks, 1969] PARKS, V. J. (1969). The grid method. *Experimental Mechanics*, 9(7):27N–33N.
- [Passieux *et al.*, 2014] PASSIEUX, J.-C., BUGARIN, F., DAVID, C., PÉRIÉ, J.-N. et ROBERT, L. (2014). Multiscale displacement field measurement using digital image correlation : Application to the identification of elastic properties. *Experimental Mechanics*, pages 1–17.
- [Passieux *et al.*, 2015] PASSIEUX, J.-C., PÉRIÉ, J. N. et SALAÜN, M. (2015). A dual domain decomposition method for finite element digital image correlation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 102(10):1670–1682.
- [Pierré *et al.*, 2016] PIERRÉ, J. E., PASSIEUX, J. C., PÉRIÉ, J. N., BUGARIN, F. et ROBERT, L. (2016). Unstructured finite element-based digital image correlation with enhanced management of quadrature and lens distortions. *Optics and Lasers in Engineering*, 77:44–53.
- [Pierron et Grédiac, 2012] PIERRON, F. et GRÉDIAC, M. (2012). *The Virtual Fields Method*. Springer.
- [Piro et Grédiac, 2004] PIRO, J. L. et GRÉDIAC, M. (2004). Producing and transferring low-spatial-frequency grids for measuring displacement fields with moiré and grid methods. *Experimental Techniques*, 28(4):23–26.

- [Réthoré, 2010] RÉTHORÉ, J. (2010). A fully integrated noise robust strategy for the identification of constitutive laws from digital images. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 84(6):631–660.
- [Réthoré, 2015] RÉTHORÉ, J. (2015). Automatic crack tip detection and stress intensity factors estimation of curved cracks from digital images. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 103(7):516–534.
- [Réthoré et al., 2008a] RÉTHORÉ, J., BESNARD, G., VIVIER, G., HILD, F. et ROUX, S. (2008a). Experimental investigation of localized phenomena using digital image correlation. *Philosophical Magazine*, 88(28-29):3339–3355.
- [Réthoré et al., 2008b] RÉTHORÉ, J., HILD, F. et ROUX, S. (2008b). Extended digital image correlation with crack shape optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 73(2):248–272.
- [Réthoré et al., 2011] RÉTHORÉ, J., LIMODIN, N., BUFFIÈRE, J.-Y., HILD, F., LUDWIG, W. et ROUX, S. (2011). Digital volume correlation analyses of synchrotron tomographic images. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 46(7):683–695.
- [Réthoré et al., 2013] RÉTHORÉ, J., MUHIBULLAH, ELGUEDJ, T., CORET, M., CHAUDET, P. et COMBESCURE, A. (2013). Robust identification of elasto-plastic constitutive law parameters from digital images using 3d kinematics. *International Journal of Solids and Structures*, 50(1):73 – 85.
- [Rogatto et al., 1993] ROGATTO, W. D., ACCETTA, J. S. et SHUMAKER, D. L. (1993). The infrared & electro-optical systems handbook. electro-optical components, volume 3,. Rapport technique, Defense Technical Information Center.
- [Roque et al., 2015] ROQUE, R., YAN, Y., COCCONCELLI, C. et LOPP, G. (2015). Perform an investigation of the effects of increased reclaimed asphalt pavement (rap) levels in dense graded friction courses. *Publication for Final Report FDOT BDU-77, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL*.
- [Rossi et al., 2016] ROSSI, M., PIERRON, F. et ŠTAMBORSKÁ, M. (2016). Application of the virtual fields method to large strain anisotropic plasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 97–98:322–335.
- [Roux et Hild, 2006] ROUX, S. et HILD, F. (2006). Stress intensity factor measurements from digital image correlation : post-processing and integrated approaches. *International Journal of Fracture*, 140:141–157.
- [Roux et al., 2008] ROUX, S., HILD, F., VIOT, P. et BERNARD, D. (2008). Three-dimensional image correlation from X-ray computed tomography of solid foam. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 39(8):1253–1265.
- [Rühs et al.,] RÜHS, P. A., BÖNI, L., FULLER, G. G., INGLIS, R. F. et FISCHER, P. In-situ quantification of the interfacial rheological response of bacterial biofilms to environmental stimuli. *PLoS ONE*, 8(11):e78524.
- [Ruybalid et al., 2016] RUYBALID, A. P., HOEFNAGELS, J. P. M., van der SLUIS, O. et GEERS, M. G. D. (2016). Comparison of the identification performance of conventional FEM updating and integrated DIC. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 106(4):298–320.
- [Samimi et al., 2009] SAMIMI, M., van DOMMELEN, J. A. W. et GEERS, M. G. D. (2009). An enriched cohesive zone model for delamination in brittle interfaces. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 80(5):609–630.
- [Savitzky et Golay, 1964] SAVITZKY, A. et GOLAY, M. J. E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8):1627–1639.
- [Schneider et Weil, 2018] SCHNEIDER, R. et WEIL, W. (2018). *Stochastic and Integral Geometry*. Springer.

- [Schreier et Sutton, 2002] SCHREIER, H. W. et SUTTON, M. A. (2002). Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. *Experimental Mechanics*, 42(3): 303–310.
- [Serra, 1980] SERRA, J. (1980). The Boolean model and random sets. *Computer Graphics and Image Processing*, 12(2):99–126.
- [Serra, 1982] SERRA, J. (1982). *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press.
- [Shen et Paulino, 2011] SHEN, B. et PAULINO, G. H. (2011). Direct extraction of cohesive fracture properties from digital image correlation : A hybrid inverse technique. *Experimental Mechanics*, 51(2):143–163.
- [Sørensen, 2002] SØRENSEN, B. F. (2002). Cohesive law and notch sensitivity of adhesive joints. *Acta Materialia*, 50(5):1053 – 1061.
- [Stoodley et al., 2002] STOODLEY, P., CARGO, R., RUPP, C. J., WILSON, S. et KLAPPER, I. (2002). Biofilm material properties as related to shear-induced deformation and detachment phenomena. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 29(6):361–367.
- [Stoyan et al., 1987] STOYAN, D., KENDALL, W., MECKE, J. et KENDALL, D. (1987). *Stochastic geometry and its applications*. John Wiley & Sons.
- [Sur et Grédiac, 2014a] SUR, F. et GRÉDIAC, M. (2014a). Sensor noise modeling by stacking pseudo-periodic grid images affected by vibrations. *IEEE Signal Processing Letters*, 21(4):432–436.
- [Sur et Grédiac, 2014b] SUR, F. et GRÉDIAC, M. (2014b). Towards deconvolution to enhance the grid method for in-plane strain measurement. *Inverse Problems and Imaging*.
- [Sur et Grédiac, 2015a] SUR, F. et GRÉDIAC, M. (2015a). Measuring the noise of digital imaging sensors by stacking raw images affected by vibrations and illumination flickering. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 8(1):611–643.
- [Sur et Grédiac, 2015b] SUR, F. et GRÉDIAC, M. (2015b). On noise reduction in strain maps obtained with the grid method by averaging images affected by vibrations. *Optics and Lasers in Engineering*, 66:210–222.
- [Sur et Grédiac, 2016] SUR, F. et GRÉDIAC, M. (2016). Influence of the analysis window on the metrological performance of the grid method. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 56(3):472–498.
- [Surrel, 1996] SURREL, Y. (1996). Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping. *Applied Optics*, 35(1):51–60.
- [Sutton et al., 1983] SUTTON, M., WOLTERS, W., PETERS, W., RANSON, W. et MCNEILL, S. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing*, 1(3):133–139.
- [Sutton et al., 2008] SUTTON, M., YAN, J., TIWARI, V., SCHREIER, H. et ORTEU, J. (2008). The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 46(10):746 – 757.
- [Sutton et al., 1986] SUTTON, M. A., MINGQI, C., PETERS, W. H., CHAO, Y. J. et MCNEILL, S. R. (1986). Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*, 4(3):143 – 150.
- [Sutton et al., 2009] SUTTON, M. A., ORTEU, J.-J. et SCHREIER, H. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements : Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer.
- [Tan et al., 2005] TAN, H., LIU, C., HUANG, Y. et GEUBELLE, P. H. (2005). The cohesive law for the particle/matrix interfaces in high explosives. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53(8):1892 – 1917.

- [Tong, 2013a] TONG, W. (2013a). Formulation of lucas–kanade digital image correlation algorithms for non-contact deformation measurements : A review. *Strain*, 49(4):313–334.
- [Tong, 2013b] TONG, W. (2013b). Reduction of noise-induced bias in displacement estimation by linear off-pixel digital image correlation. *Strain*, 49(2):158–166.
- [Valoroso et Fedele, 2010] VALOROSO, N. et FEDELE, R. (2010). Characterization of a cohesive-zone model describing damage and de-cohesion at bonded interfaces. sensitivity analysis and mode-I parameter identification. *International Journal of Solids and Structures*, 47(13):1666 – 1677.
- [Van den Bosch *et al.*, 2006] Van den BOSCH, M. J., SCHREURS, P. J. G. et GEERS, M. G. D. (2006). An improved description of the exponential xu and needleman cohesive zone law for mixed-mode decohesion. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(9):1220–1234.
- [Vendroux et Knauss, 1998] VENDROUX, G. et KNAUSS, W. G. (1998). Submicron deformation field measurements : Part 2. improved digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 38(2): 86–92.
- [Wang et Pan, 2015] WANG, B. et PAN, B. (2015). Random errors in digital image correlation due to matched or overmatched shape functions. *Experimental Mechanics*, 55(9):1717–1727.
- [Wang *et al.*, 2015] WANG, D., DIAZDELAO, F. A., WANG, W. et MOTTERSHEAD, J. E. (2015). Full-field digital image correlation with kriging regression. *Optics and Lasers in Engineering*, 67:105–115.
- [Wang *et al.*, 2016] WANG, Y., LAVA, P., REU, P. et DEBRUYNE, D. (2016). Theoretical analysis on the measurement errors of local 2d dic : Part i temporal and spatial uncertainty quantification of displacement measurements. *Strain*, 52(2):110–128.
- [Wang *et al.*, 2009] WANG, Y. Q., SUTTON, M. A., BRUCK, H. A. et SCHREIER, H. W. (2009). Quantitative error assessment in pattern matching : Effects of intensity pattern noise, interpolation, strain and image contrast on motion measurements. *Strain*, 45(2):160–178.
- [Wang *et al.*, 2011] WANG, Y. Q., SUTTON, M. A., KE, X. D., SCHREIER, H. W., REU, P. L. et MILLER, T. J. (2011). On error assessment in stereo-based deformation measurements. *Experimental Mechanics*, 51(4):405–422.
- [Wang *et al.*, 2007] WANG, Z. Y., LI, H. Q., TONG, J. W. et RUAN, J. T. (2007). Statistical analysis of the effect of intensity pattern noise on the displacement measurement precision of digital image correlation using self-correlated images. *Experimental Mechanics*, 47(5):701–707.
- [Wehbe, 2010] WEHBE, T. (2010). *Étude des vibrations de pièce mince durant l’usinage par stéréo corrélation d’images*. Thèse de doctorat, LGP (Tarbes, France).
- [Wen *et al.*, 2017] WEN, H., LIU, Z., LI, C., HE, X., RONG, J., HUANG, X. et XIE, H. (2017). Centrosymmetric 3d deformation measurement using grid method with a single-camera. *Experimental Mechanics*, 57(4):537–546.
- [Wittevrongel *et al.*, 2015] WITTEVRONGEL, L., BADALONI, M., BALCAEN, R., LAVA, P. et DEBRUYNE, D. (2015). Evaluation of methodologies for compensation of out of plane motions in a 2d digital image correlation setup. *Strain*, 51(5):357–369.
- [Zhao et Surrel, 1997] ZHAO, B. et SURREL, Y. (1997). Effect of quantization error on the computed phase of phase-shifting measurements. *Applied Optics*, 36(10):2070–2075.