

Sur le dialogue essais-calcul dans les essais structuraux complexes

J. Serra, J.E. Pierré, J.N. Périé, J.C Passieux, C. Bouvet, B. Castanié

Institut Clément Ader (ICA), Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées, CNRS UMR 5312-INSA-ISAE-Mines Albi-UPS, Toulouse, Fr.

Résumé — Des essais de structures composites entaillées sous sollicitations combinées sont réalisés sur un banc spécifique développé dans le cadre de l'ANR Vertex. La réponse est d'ordre structural et l'éprouvette est intrinsèque à la structure et interagit avec le banc. Ces essais sont instrumentés par la Stéréo-CIN-EF qui permet de capturer les conditions aux limites sur l'éprouvette lors de l'essai et un échange de données est effectuée avec un modèle avancé d'endommagement des structures composites de type DPM.

Mots clés — Essais structuraux, Grandes coupures, Endommagement, Composites

1. Introduction

La certification des structures composites aéronautique s'effectue aujourd'hui grâce à la pyramide des essais (Fig. 1a). Lors de récents programmes, ce sont plusieurs dizaines de milliers de ces essais qui ont été nécessaires. De plus l'essentiel de ces essais, que ce soit au niveau coupon ou au niveau structure, s'effectue sous sollicitations uniaxiales alors que les structures réelles sont soumises à des chargements plus complexes (Fig. 1b). Aussi, pour diminuer les coûts de cette démarche, sécuriser la conception mais aussi démontrer la maturité des modèles d'endommagement composite, une démarche de validation des structures composites sous sollicitations complexes a été développée dans l'ANR Vertex [1]. Cette démarche s'inscrit pleinement dans l'approche « *Predictive Virtual Testing* ». La méthodologie d'essai, basée sur l'expérience passée des auteurs [2], est détaillée dans le paragraphe suivant. Le support scientifique choisi est l'étude des grandes coupures dans les stratifiées [3,4].

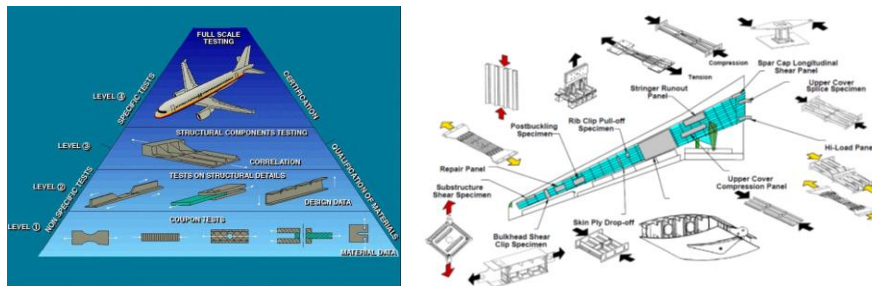


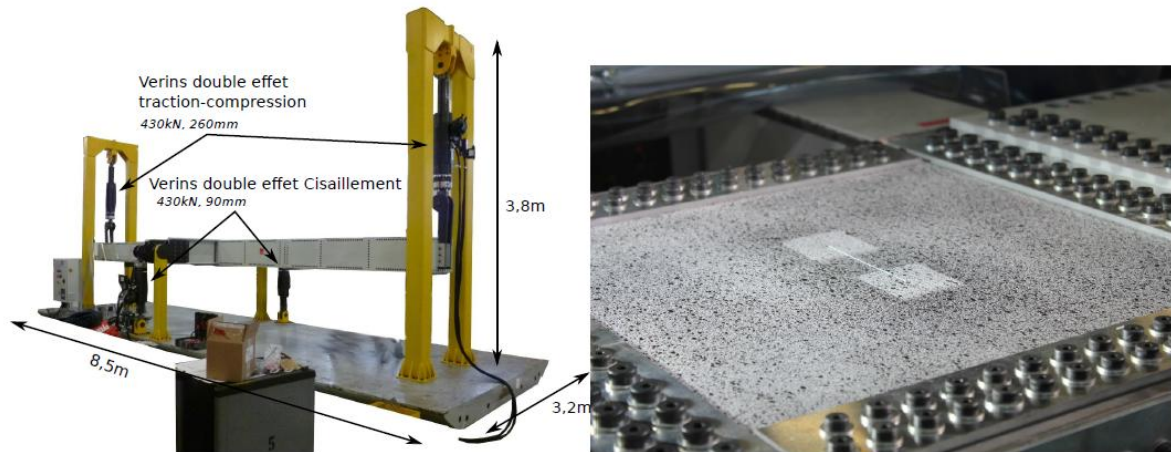
Figure 1 – (a) Pyramide des essais (source : Airbus); Essais de certification d'un caisson de voilure carbone (source : NASA)

Le dialogue essai/calcul est un point central des études à ces échelles. En effet, dans la conception des essais, l'éprouvette fait partie intégrante de la structure et interagit avec. Or, pour les essais structuraux, il est d'autant plus difficile d'obtenir les chargements des éprouvettes du fait de la complexité des structures, donc de la redondance des chemins d'efforts. De plus, ces derniers sont évolutifs en cours d'essai. Ceci est dû essentiellement aux réponses non-linéaires (géométriques ou matériaux) des structures testées et plus rarement aux plastifications localisées du banc d'essai. Aussi, en termes de validation de modèles comme d'analyse des essais, il convient d'accéder à des conditions aux limites de l'éprouvette in-situ et non à des conditions aux limites idéalisées [5-7]. A cet effet une démarche spécifique basée sur la SCIN-EF (Section 3) a été développée et sera présentée.

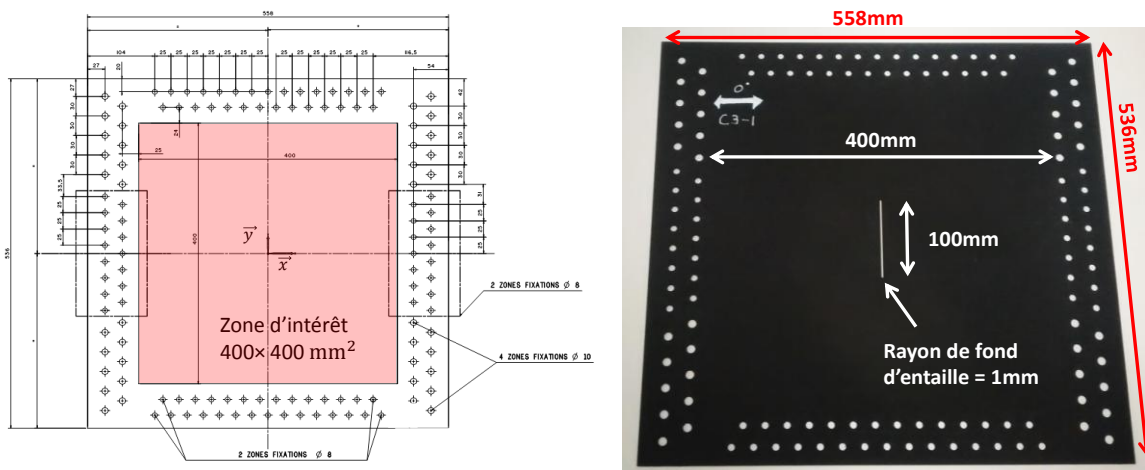
L'utilisation d'une régularisation mécanique permet un dialogue calcul/essai amélioré. Les options choisies et la corrélation essai/calcul seront présentées en suivant.

2. Dispositif expérimental

Le montage est décrit Figure 2. Il s'agit d'une structure caisson qui peut être sollicitée en flexion 4 points par les vérins extrémités et en torsion dans sa partie centrale. L'éprouvette est fixée sur la partie supérieure du caisson central par 128 vis et est soumise respectivement à de la traction/compression par les premiers vérins cités ou du cisaillement par les seconds [1, 2].



L'éprouvette de dimensions $558 \times 536 \text{ mm}^2$ constitue la partie supérieure du caisson central et est fixée sur les cornières à l'aide de 128 vis (Figure 3).



Les stratifiés composites étudiés sont élaborés à partir de plis unidirectionnels carbone/époxy (T700/M21) d'épaisseur 0.125mm. Ces derniers sont munis d'une entaille de longueur 100mm et de rayon de fond d'entaille 1mm. Les trois drapages considérés sont symétriques et équilibrés, ils contiennent 23% de plis à 0° :

- C3-1 [45/-45/X/X/X/90/0/90/X/X/X/-45/45],

- C3-2 [X/X/X/X/0/90/0/90/0/X/X/X/X],
- C3-3 [X/X/X/X/X/0/0/0/X/X/X/X].

La confidentialité nous empêchant de révéler complètement les drapages utilisés, l'orientation de certains plis est masquée (symbole « X »). Chaque stratifié comporte 13 plis, l'épaisseur globale est donc de 1.625mm.

3. Instrumentation

Dans ce projet, on s'oriente vers l'utilisation de la Stéréo Corrélation d'Images Numériques avec un formalisme Eléments-Finis (Stéréo-CIN-EF ou SCIN-EF). Elle permet de fournir (a) des champs cinématiques mesurés à comparer aux champs cinématiques calculés en vue de la validation et (b) une information (partielle) des conditions aux limites à imposer au modèle.

Une méthode de mesure de champs éléments finis. Les champs fournis par les codes commerciaux de SCIN et d'analyse par élément finis (FEA) sont très différents. Par exemple, les logiciels éléments finis expriment le déplacement comme les degrés de liberté aux nœuds d'un maillage éléments finis. De leur côté, les logiciels de CIN commerciaux expriment le déplacement comme des valeurs ponctuelles sur un nuage de point dans un repère différent de celui de maillage. La difficulté supplémentaire réside dans le fait que les domaines de définition de ces champs diffèrent, puisque, par exemple, les logiciels actuels en CIN ne permettent pas de s'approcher des bords, ou tout simplement parce que des contraintes expérimentales conduisent parfois à n'observer qu'une partie seulement de l'éprouvette.

Quantifier la distance entre un champ mesuré par SCIN et un champ simulé n'est pas une tâche évidente. Dans ce projet, une méthode de SCIN basée sur les éléments finis a été développée pour permettre d'unifier les descriptions des champs simulés et mesurés. Une formulation du problème de conservation des niveaux de gris est écrite dans le repère du maillage en se basant sur des modèles non-linéaires de caméra [7].

Estimation des conditions aux limites pour la simulation. En effet, en SCIN, seul le déplacement de la peau visible est mesuré, mais le déplacement à cœur n'est pas accessible directement. Ainsi Réthoré [8] propose de faire l'hypothèse de l'homogénéité du déplacement dans l'épaisseur de l'éprouvette, ce qui est envisageable dans des cas d'éprouvettes de faible épaisseur avec des chargements uni-axiaux, ce qui n'est pas le cas ici. Dans cette étude, pour aller plus loin dans le dialogue essais/calculs, l'objectif est de mesurer directement les conditions aux limites à appliquer à la simulation (déplacements et rotations ou déplacements dans l'épaisseur selon la modélisation). Pour ce faire, on se propose de s'appuyer sur un modèle EF réputé fiable pour régulariser la mesure Stéréo-CIN [7].

Mesure de champs multiéchelles. Pour estimer ces conditions aux limites, le champ de vision doit impérativement visualiser la plus grande partie de l'éprouvette. Cependant, compte tenu de la finitude de la définition des capteurs CCD, ce choix fixe la résolution de mesure. Dans le cas de structures de grande taille, cette résolution s'avère souvent insuffisante. On se propose donc d'instrumenter l'essai avec au moins deux bancs de deux caméras, ce qui permet de lever ce compromis et réduire les incertitudes de mesure et d'identification [3].



Figure 3 - Instrumentation de l'essai par Stéréo CIN : grappe de 6 caméras et 3 régions d'analyses correspondantes

4. Modèle DPM

La simulation du comportement des éprouvettes entaillées est réalisée à l'aide du « *Discrete Ply Model* », dont les caractéristiques sont détaillées en [4]. De nombreuses configurations (drapage/sollicitation) ont été testées expérimentalement. La simulation numérique n'a pour le moment été effectuée que pour les sollicitations de traction et de cisaillement sur le drapage C3-1.

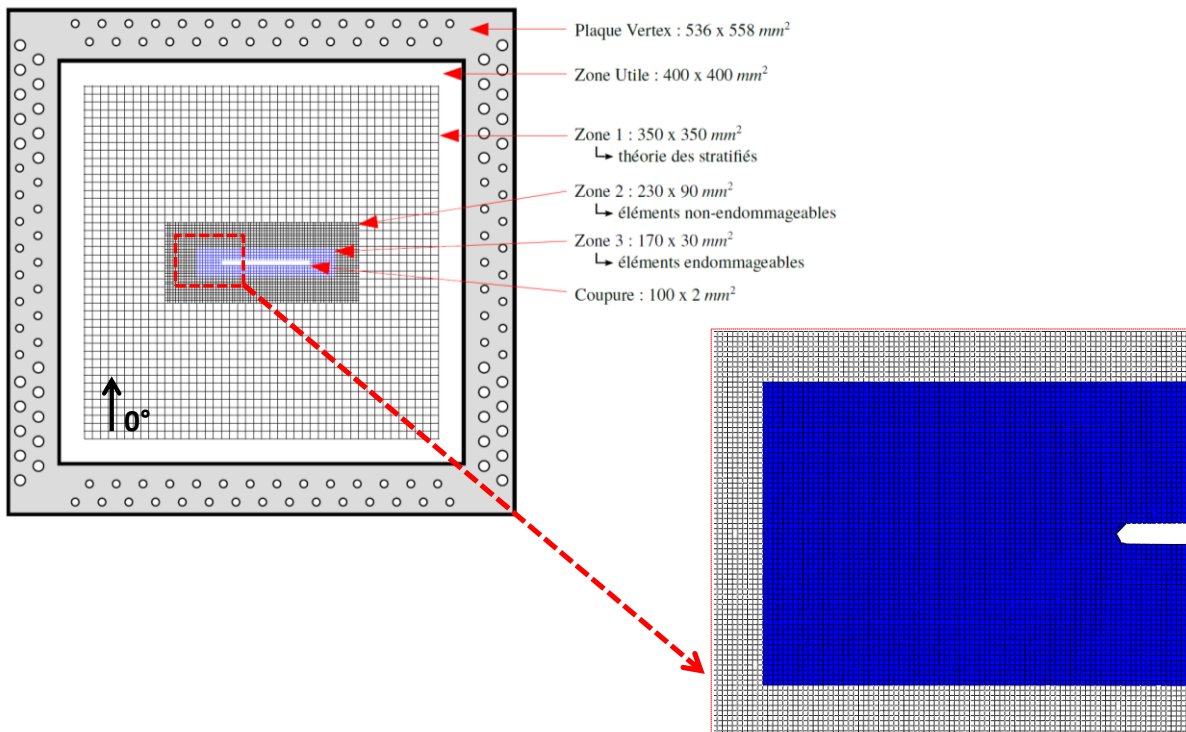


Figure 4 - Modèle numérique (3 zones) d'une éprouvette VERTEX

Le maillage adopté est très similaire à celui utilisé en [3], il comprend trois zones différentes (Figure 4) :

- une zone avec des éléments SC8R (non-endommageables) aux dimensions $10 \times 10 \times 3.25 \text{ mm}^3$: un seul élément dans l'épaisseur du stratifié (Zone 1) ;
- une zone avec des éléments C3D8R (non-endommageables) aux dimensions $0.5 \times 0.5 \times 0.25 \text{ mm}^3$: un seul élément dans l'épaisseur du pli (Zone 2) ;
- une zone avec des éléments C3D8 et COH3D8 (endommageables) aux dimensions $0.5 \times 0.5 \times 0.25 \text{ mm}^3$: un seul élément dans l'épaisseur du pli (Zone 3).

5. Dialogue Essai/calcul

5.1. Principe

La mesure du champ de déplacement est alors effectuée dans la Zone 1 (Figure 4) et les conditions limites sont imposées sur le bord de la Zone 1bis (trois déplacements) ainsi que sur 3 rangées de nœuds supplémentaires (déplacement hors plan) selon la méthode développée par [10]. La zone utile (Zone 1bis), c'est-à-dire celle utilisée pour le calcul par éléments finis (Figure 5) est plus petite ($300 \times 300 \text{ mm}^2$) que la portion de la plaque observée (Zone 1). Cela permet de réduire les effets de bords liés à la régularisation de la mesure par S-CIN-EF [6].

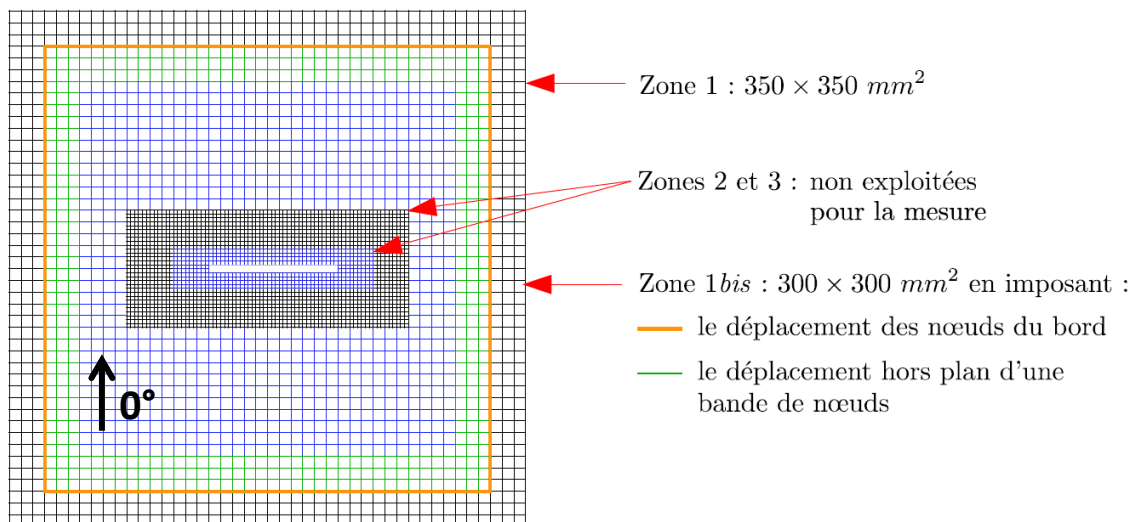


Figure 5 - Zones de la plaque composite utilisées pour la mesure et pour la mise en place des conditions limites lors de la modélisation DPM

La mesure par stéréovision s'effectue en plusieurs étapes (Figure 6). D'abord la mesure de forme initiale est réalisée (courbure de la plaque), ensuite les déformations associées à la fixation de la plaque sur le bâti sont déterminées en comparant les images avant et après serrage, enfin les variations des déplacements liées aux véritables étapes de chargement sont évaluées.

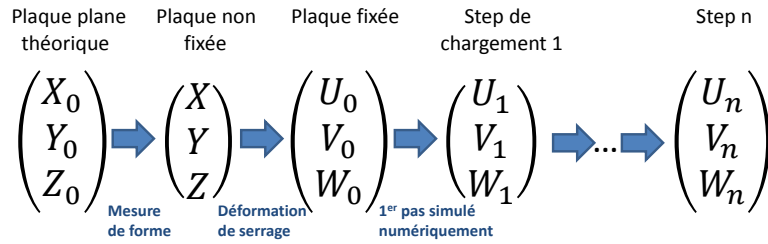


Figure 6 - Les différentes étapes de mesure d'un essai VERTEX

Le passage de la plaque non fixée à la plaque fixée inclut un mouvement de corps solide non négligeable. De plus, un changement dans l'éclairage entre les deux photos (plaque non fixée et plaque fixée) a souvent été observé lors des différents essais. Cette variation d'intensité lumineuse est très probablement due à un léger déplacement du spot lumineux utilisé pour éclairer la plaque, survenu lors des nombreuses manutentions nécessaires à son installation (serrage de nombreuses vis et câblage des jauges de déformation). Ces deux facteurs ont généré des erreurs de mesure. L'image de « référence » choisie pour la détermination des conditions limites utiles à la simulation numérique est donc l'image de la plaque fixée.

Numériquement, le calcul est donc divisé en « n » pas de calcul correspondant aux « n+1 » images fournies par les caméras de stéréocorrélation. Une variation linéaire des déplacements est appliquée entre les différents états déterminés. Une approximation du chargement (discretisation en « n » segments de droite) est donc inhérente à la méthode proposée.

5.2 Résultats

Dans la présentation, nous montrerons que la courbe Contrainte/Déformation déterminée numériquement qui est très similaire à celle déterminée expérimentalement dans le cas de l'essai de traction. Le comportement global du stratifié semble correctement représenté. Le premier endommagement détecté en surface du stratifié composite est bien retranscrit par le modèle numérique qui simule correctement les fissurations matricielles orientées à 45° en pointe de coupure. La comparaison des champs de déplacement observés en surface montre que le DPM simule de manière très correcte le comportement observé expérimentalement, en particulier l'initiation de la flexion locale autour de la coupure. La propagation de dommage semble se faire dans un premier temps selon une direction orientée à 45° puis de manière horizontale (orthogonale à la direction de traction). Un scénario similaire est obtenu à l'aide du modèle numérique. Les résultats associés à la modélisation du comportement en cisaillement sont aussi très cohérents avec l'expérience.

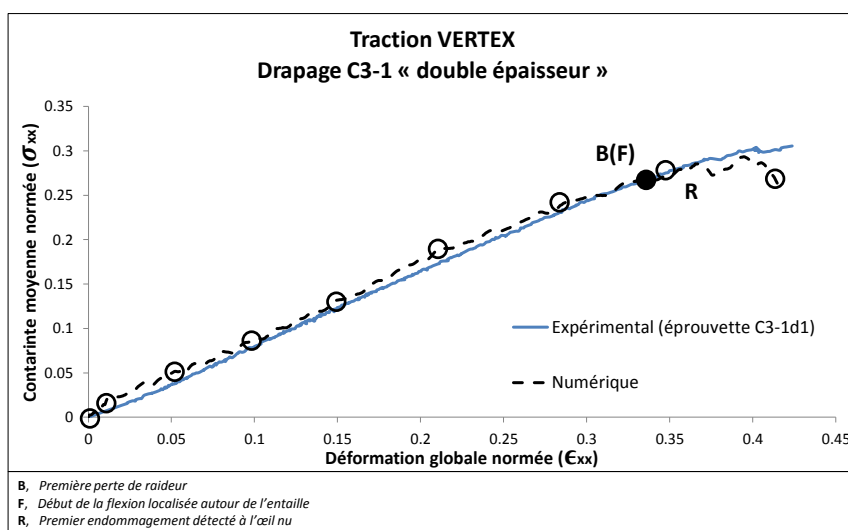


Figure 7 - Courbes Contrainte/Déformation de la plaque composite soumise à de la traction
Comparaison numérique/expérimental

6. Conclusion

Des essais structuraux sous sollicitations complexes ont été réalisés et ont démontré leur efficacité. Une méthodologie de mesure par Stéréo-CIN-EF spécifique à cette problématique a été développée et permet un dialogue essai/calculs cohérent car utilisant le même maillage. Enfin, une méthode de calcul des endommagements composites qui a démontré son efficacité sur un grand nombre de problématiques à l'échelle du coupon (Impacts, CAI, Impact sur champ, rupture trouée et entaillée) a pu être étendue à des problématiques structurales. Ce travail ouvre des perspectives en termes de modélisation à des échelles supérieures mais aussi ouvre la possibilité de modifier profondément la pyramide des essais actuelle en développant le « Predictive Virtual Testing ».

7. Références bibliographiques

- [1] <http://www.institut-clement-ader.org/vertex/>
- [2] B. Castanié, J.-J. Barrau, J.-P. Jaouen, S. Rivallant. Combined shear/compression structural testing of asymmetric sandwich structures, *Experimental Mechanics*, Vol 44, n°5, 2004.
- [3] J. Serra, C. Bouvet, B. Castanié, C. Petiot. Etude expérimentale et numérique de la propagation de coupure dans des stratifiés composites soumis à de la traction simple, *CSMA* 2017.
- [4] J. Serra, C. Bouvet, B. Castanié, C. Petiot. Scaling effect in notched composites: The Discrete Ply Model approach, *Composite Structures*, 148, 127-143, 2016.
- [5] M. Meuwissen, C. Oomens, F. Baaijens, R. Petterson, J. Janssen. Determination of the elasto-plastic properties of aluminium using a mixed numerical-experimental method, *Journal of Materials Processing Technology*, 75(1):204-211, 1998.
- [6] J.-E. Pierré, J.-C. Passieux, J.-N. Périé. Element Stereo Digital Image Correlation: framework and mechanical regularization, Submitted to *Experimental Mechanics*, 06/2016.
- [7] J.-C. Passieux, F. Bugarin, C. David, J.-N. Périé, L. Robert. Multiscale displacement field measurement using digital image correlation: Application to the identification of elastic properties, *Experimental Mechanics*, 55(1):121-137, 2015.
- [8] J. Réthoré. A fully integrated noise robust strategy for the identification of constitutive laws from digital images. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 83(6): 631-660, 2010