

Des essais virtuels à la réalité - essais de compression diagonale sur des panneaux en maçonnerie

Louis COLLIN^{1,2}

1. Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette, France
2. ERMES, EDF R&D, 91120 Palaiseau, France

ABSTRACT Lors de séismes, les murs de remplissage en maçonnerie sont sollicités en cisaillement dans le plan, ce qui se traduit par des contraintes de traction et de compression le long de leurs diagonales. L'essai de compression diagonale, normalisé par l'ASTM, reproduit ces sollicitations sur des panneaux en maçonnerie afin d'analyser les mécanismes de rupture et de déterminer leur résistance. Traditionnellement, les déformations sont mesurées avec des capteurs LVDT, mais cette méthode locale reste limitée pour des matériaux hétérogènes comme la maçonnerie. La corrélation d'images numériques (CIN), méthode sans contact, s'impose comme une alternative permettant d'étudier les champs de déplacement et de quantifier la propagation des fissures de manière plus précise. Lors des essais, les fissures s'amorcent typiquement le long des joints de mortier, formant un motif en escalier. La taille de l'éprouvette nécessite une configuration multicaméra : deux caméras captent la cinématique 3D globale, tandis que trois autres se concentrent sur des zones spécifiques, au niveau des conditions aux limites et dans la région centrale où les fissures s'amorcent. Cette approche multiéchelle améliore la résolution des mesures. En parallèle, des simulations numériques sont réalisées avec le code Cast3M, utilisant un modèle basé sur une description détaillée des blocs et joints. Une étape clé consiste à identifier les paramètres des modèles en intégrant les données expérimentales. Pour cela, des expériences virtuelles sont simulées au préalable dans Blender, un logiciel d'animation, permettant d'optimiser le positionnement des caméras, de mener des analyses de sensibilité pour valider a priori l'identifiabilité des paramètres ainsi que les incertitudes de mesure avant de réaliser les essais proprement dits.

Keywords dialogue essai-calcul, corrélation d'images numériques, analyse de sensibilité, incertitudes, modèle non-linéaire

I. INTRODUCTION

Le comportement des structures en maçonnerie est hétérogène, avec des fissures se formant généralement dans les joints de mortier (**Dhanasekar et al. [1985]**, **Dais et al. [2021]**). Caractériser ce comportement mécanique au niveau des joints constitue un défi majeur. Diverses configurations expérimentales ont été développées à différentes échelles, telles que les essais de cisaillement sur triplets, les essais de compression diagonale sur des panneaux et le chargement dans le plan d'un mur. Cet article se concentre exclusivement sur les essais de compression diagonale sur un panneau en maçonnerie, conformément à la norme ASTM (**ASTM International [2010]**). Ce test consiste à appliquer une force F le long d'une diagonale du panneau (Figure 1). La rupture est attribuée à une fissure amorcée au centre du panneau, une zone clé pour analyser l'état de contrainte dans le mur.

Les mesures expérimentales effectuées le long des diagonales verticale et horizontale permettent d'évaluer les déformations et d'étudier leur évolution en fonction de la force appliquée, afin d'en déduire la résistance

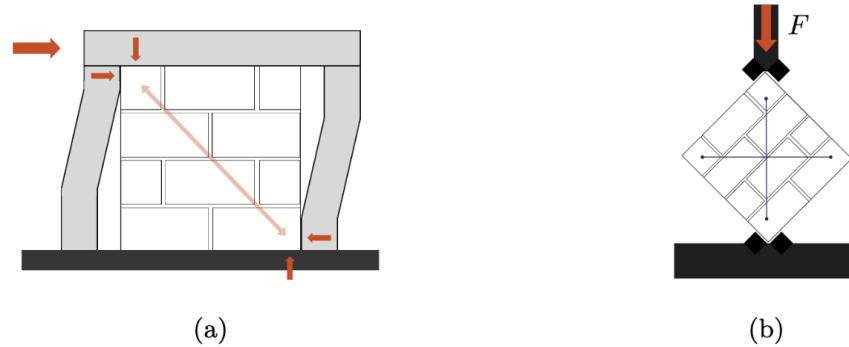


FIGURE 1. Sollicitations en cisaillement dans le plan (a) et essai de compression diagonale (ASTM International [2010]) (b)

au cisaillement de la maçonnerie (Basili et al. [2019], Bhat et al. [2023]). Pour cela, les capteurs les plus courants sont des traducteurs différentiels variables linéaires (LVDTs). Ils ne fournissent cependant que des mesures locales moyennées sur la longueur de la diagonale, ce qui peut être limitant pour l'étude des matériaux hétérogènes comme la maçonnerie. Pour répondre à cet enjeu et mieux suivre l'évolution des champs de déformations ainsi que la propagation des fissures dans le matériau, cette étude met en œuvre des systèmes multivues basés sur la corrélation d'images numériques (CIN). Cette technique permet d'observer à différentes résolutions les structures sollicitées (Fedele et al. [2013]). Une approche multiéchelle, combinant des observations globale et locale, réduit les incertitudes et augmente la sensibilité aux paramètres non-linéaires dans les zones critiques (Passieux et al. [2015], Hamadouche et al. [2024], Collin et al. [2025]).

Le travail présenté ici constitue une première étape d'une campagne expérimentale intégrant la CIN multivue (CIN-M) et l'identification de paramètres par la mise à jour de modèles par éléments finis (FEMU). Il propose une méthodologie robuste pour la préparation des essais, en s'appuyant sur des simulations virtuelles (Vitse et al. [2021]), dont l'application à la maçonnerie a été détaillée dans des études précédentes (Collin et al. [2024, 2025]). La nouveauté réside ici dans l'adaptation et l'extension de cette méthode aux essais de compression diagonale, incluant des analyses de sensibilité et l'optimisation de la configuration expérimentale.

La partie 2 présente une première approche de modélisation par éléments finis pour le test de compression diagonale. Dans la partie 3 sont introduites les équations de la CIN-M, suivies de la méthodologie des essais virtuels et des résultats obtenus. Dans la partie 4 sont proposées une analyse de sensibilité suivie d'une quantification des incertitudes.

II. MODELISATION DU COMPORTEMENT DE LA MAÇONNERIE

Les essais de compression diagonale sont simulés à l'aide du code par éléments finis Cast3M [<https://www-cast3m.cea.fr/>]. Une modélisation mésoscopique est choisie dans cette étude, avec une approche continue afin d'analyser le comportement en plasticité et endommagement des éléments de mortier et de bloc.

A. Lois de comportement

Dans les essais de compression diagonale présentés dans la littérature (Basili et al. [2019], Bhat et al. [2023]), l'endommagement se produit généralement à l'interface entre le mortier et les blocs de maçonnerie,

à l'intérieur du mortier par rupture en cisaillement et traction, ou dans les blocs de maçonnerie avec une rupture en compression au niveau des semelles ou en extension. Une fois que la fissure a traversé de haut en bas l'éprouvette, un comportement frottant peut être observé dans certains cas, avant une rupture complète du panneau. Le mortier et le bloc sont tous les deux modélisés à l'aide du même modèle d'endommagement isotrope prenant en compte les effets unilatéraux et de frottement, en supposant une adhérence parfaite à l'interface. Le modèle non-linéaire développé par Vassaux et al. (Vassaux et al. [2015]) est retenu pour sa capacité à décrire le comportement cyclique de matériaux quasi-fragiles comme le béton. Le comportement mécanique est séparé entre la matrice (modélisée comme un milieu continu endommagé) et les fissures

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^m + \boldsymbol{\sigma}^f \quad (1)$$

La matrice est modélisée à l'aide d'un modèle d'endommagement isotrope

$$\boldsymbol{\sigma}^m = (1 - D(\sigma_t, a_{tra})) \mathbf{C} : \boldsymbol{\epsilon} \quad (2)$$

avec D la variable d'endommagement, \mathbf{C} le tenseur de Hooke, et $\boldsymbol{\epsilon}$ le tenseur des déformations infinitésimales. L'évolution de la variable d'endommagement D suit un critère de Mazars. Pour les fissures, l'évolution de $\boldsymbol{\sigma}^f$ est décrite par

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}^f = \vartheta(\boldsymbol{\epsilon}^f, q_p) \mathbf{C} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^f \quad (3)$$

avec ϑ un scalaire décrivant la part de rigidité restaurée lors de la fermeture des fissures. Un modèle de plasticité parfaite avec un critère de Drucker-Prager est enfin utilisé pour décrire le frottement aux surfaces des fissures

$$\varphi^f = \sqrt{J_2(\boldsymbol{\sigma}^f) + c_f I_1(\boldsymbol{\sigma}^f)} \quad (4)$$

Les paramètres en entrée du modèle sont donc le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν pour la phase linéaire. L'introduction des non-linéarités conduit à considérer des termes spécifiques introduits dans les précédentes lois d'évolution : σ_t est la contrainte limite élastique, a_{tra} est lié à l'énergie d'amorçage des fissures, q_p au taux de fermeture des fissures et c_f est le coefficient de frottement au niveau des fissures. Les valeurs de ces paramètres décrits dans le Tableau 1 sont issues d'essais de caractérisation sur des éprouvettes standard pour E , ν et σ_t , et de données de la littérature et de cas tests pour a_{tra} , q_p et c_f (Vassaux et al. [2015]). En pratique, le coefficient de frottement du mortier, noté $c_{f,j}$, pourra être déterminé expérimentalement à partir des essais de cisaillement sur des triplets.

TABLE 1. Paramètres mécaniques pour la modélisation des blocs et du mortier

Paramètres	E (Pa)	ν	σ_t (Pa)	a_{tra}	q_p	c_f
Bloc	40×10^9	0.2	4.5×10^6	4×10^{-3}	6.5	2.89
Mortier	22×10^9	0.19	8.4×10^5	4×10^{-3}	6.5	2.89

B. Résultats numériques

Les paramètres utilisés pour la modélisation des essais de compression diagonale sont décrits dans le Tableau 1. Le panneau en maçonnerie de dimension $0.82 \times 0.83\text{m}^2$ a été maillé à l'aide d'éléments cubiques de dimensions environ $2 \times 2 \times 2\text{cm}^3$. Un déplacement variant de 0 à 1.2 mm est appliqué au sabot supérieur dans l'axe de la diagonale, tandis que le sabot inférieur est supposé encastré. Les déplacements suivant la direction normale de l'éprouvette ne sont pas autorisés.

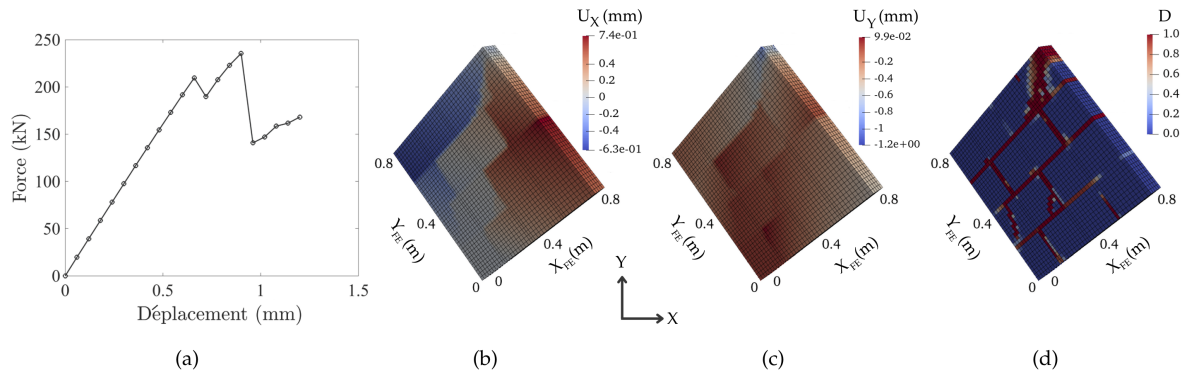


FIGURE 2. Courbe force-déplacement (a), champ de déplacement selon les directions horizontale X (b) et verticale Y (c) et carte d'endommagement (d) à rupture ($F = 240$ kN).

La courbe force-déplacement obtenue numériquement (Figure 2(a)) montre un comportement plutôt fragile de la maçonnerie, avec un pic d'effort observé à 240 kN. La cinématique observée est celle attendue, avec un fort gradient de déplacement au niveau des joints après rupture (Figure 2(b, c)). La carte d'endommagement (Figure 2(d)) confirme une dégradation majoritairement localisée dans les joints, avec un motif en escalier le long de la diagonale.

III. ESSAIS VIRTUELS

A. Positionnement des caméras

La conception virtuelle d'une expérience permet de créer un modèle numérique précis de la zone de test, de définir et de valider toutes les configurations utilisées (Vitse et al. [2021], Collin et al. [2025]). Pour les essais de compression diagonale, tous les composants comme les sabots en L ou les éléments du portique ont été importés dans Blender, un logiciel open source d'animation et de visualisation [<https://www.blender.org/>]. Dans la phase de conception, cela permet de s'assurer du bon assemblage des différents éléments entre eux et de leur fixation sur la plateforme d'essai.

Le second avantage est de pouvoir positionner les caméras et les éclairages dans la zone d'essai (Figure 3(a)). Chaque caméra est définie par une matrice de projection $[\mathbf{\Pi}^{(c)}]$. Le modèle de stenopé utilisé permet de projeter un point 3D de la scène $\{\mathbf{X}\}$ vers ses coordonnées 2D dans le plan de l'image de la caméra c $\{\mathbf{x}^{(c)}\}$. L'utilisateur définit dans le logiciel les paramètres intrinsèques $[\mathbf{K}^{(c)}]$ et extrinsèques $[\mathbf{\Theta}^{(c)}, \mathbf{t}^{(c)}]$ de chacune des caméras (Sutton et al. [2009], Collin et al. [2025]). Le logiciel en déduit les matrices de projection et génère les images virtuelles de la zone d'essai (Figures 3(b-f)).

L'intérêt d'une telle disposition des caméras est de pouvoir mesurer les déplacements 3D de l'éprouvette grâce aux caméras 1 et 2 ayant deux angles d'observation distincts. Les trois caméras supplémentaires permettent de zoomer sur certaines zones d'intérêt, en particulier les conditions limites en parties inférieure (caméra 3) et supérieure (caméra 4), et le centre de l'éprouvette (caméra 5) où est attendu l'amorçage de la première fissure.

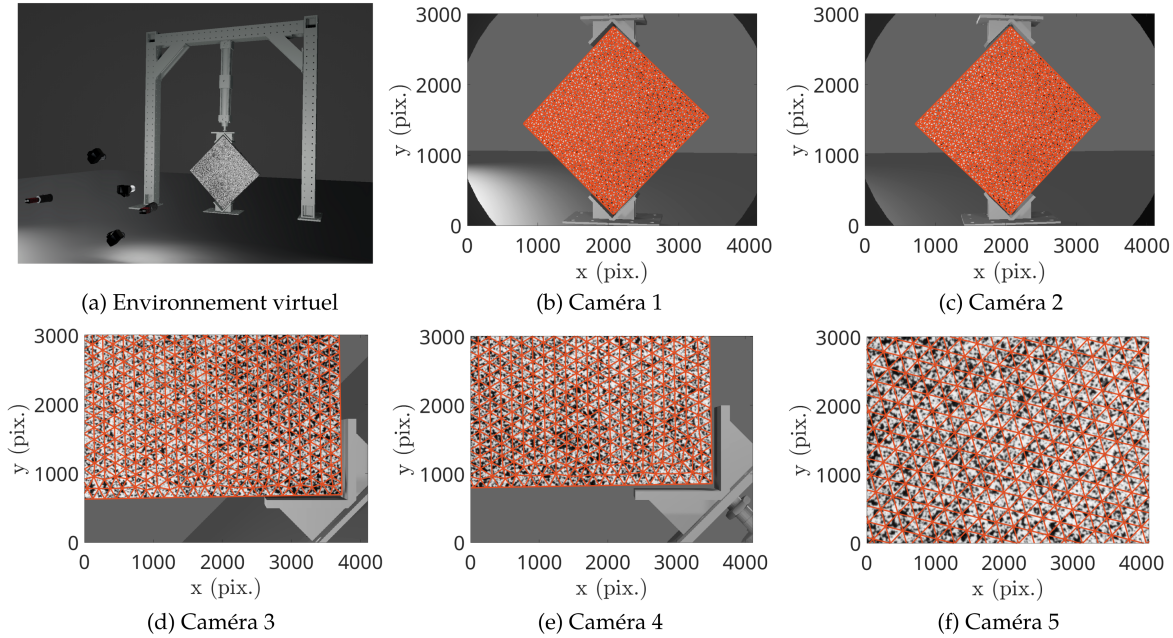


FIGURE 3. Dispositif expérimental avec les caméras et les éclairages (a) et zones d'intérêt des caméras 1 à 5, respectivement de (b) à (f) avec projection du maillage pour le calcul de CIN.

B. Formulation de la CIN multivue

La CIN monovue vise à déterminer le champ de déplacement $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ qui relie l'image déformée g à son image de référence f . La conservation des niveaux de gris s'écrit (Grédiac and Hild [2012])

$$\forall \mathbf{x} \in R, f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})) \quad (5)$$

où R désigne la région d'intérêt de la caméra. La fonction coût associée à ce problème de minimisation est définie par

$$\Phi_{CIN}^2 = \frac{1}{2\sigma^2} \int_R [f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x}))]^2 d\mathbf{x} \quad (6)$$

et dépend du bruit d'acquisition (écart type σ) de chaque caméra.

En CIN-M, la cohérence des niveaux de gris entre les N_c caméras permet de définir un motif intrinsèque $\hat{f}(\mathbf{X})$, moyenne des niveaux de gris de toutes les caméras (Dufour et al. [2015]). En notant $f_U^{(c)}$ l'image déformée de la caméra c à l'instant t , la fonction coût globale peut s'écrire (Chang et al. [2024], Collin et al. [2025])

$$\Phi_{CIN-M}^2 = \sum_{c=1}^{N_c} \frac{1}{2\sigma_c^2} \int_{R^{(c)}} \left(\hat{f}(\mathbf{X}) - f_U^{(c)} \left(\mathbf{x}^{(c)} \left(\boldsymbol{\Pi}^{(c)}, \mathbf{X} \right) \right) \right)^2 d\mathbf{X} \quad (7)$$

avec $R^{(c)}$ la région d'intérêt de chacune des caméras, visibles dans le cas présent sur les Figures 3(b-f).

C. Résultats des essais virtuels

Les simulations numériques, réalisées à partir du modèle décrit précédemment, génèrent une courbe force-déplacement ainsi que des champs de déplacement pour chaque point de la courbe. Ces champs sont ensuite

intégrés dans Blender, où l'extension open source `BlenDIC` [<https://gitlab.com/sciviz/blendic>] est utilisée pour appliquer virtuellement les déplacements simulés à l'échantillon, en tenant compte du mouchetis. Grâce au système multicaméra préconfiguré, ces déplacements sont capturés lors de l'essai virtuel, permettant de produire des images virtuelles qui reproduisent les résultats attendus d'un essai réel. Il y a donc au final autant d'images que de points sur la courbe force-déplacement (Figure 2(a)).

Un premier test virtuel est réalisé. Les paramètres utilisés pour la simulation Cast3M sont ceux décrits dans le Tableau 1. Pour chaque caméra, il est nécessaire de projeter le maillage éléments finis sur l'image (Figures 3(b-f)). Les résultats observés sont cohérents avec la cinématique obtenue numériquement (Figures 2(b-c)). Les Figures 4(a-b) mettent en évidence les gradients de déplacement marqués avec une fissuration au niveau des joints. La Figure 4(c) montre que les déplacements dans la direction perpendiculaire à l'éprouvette sont principalement dus aux incertitudes de mesure.

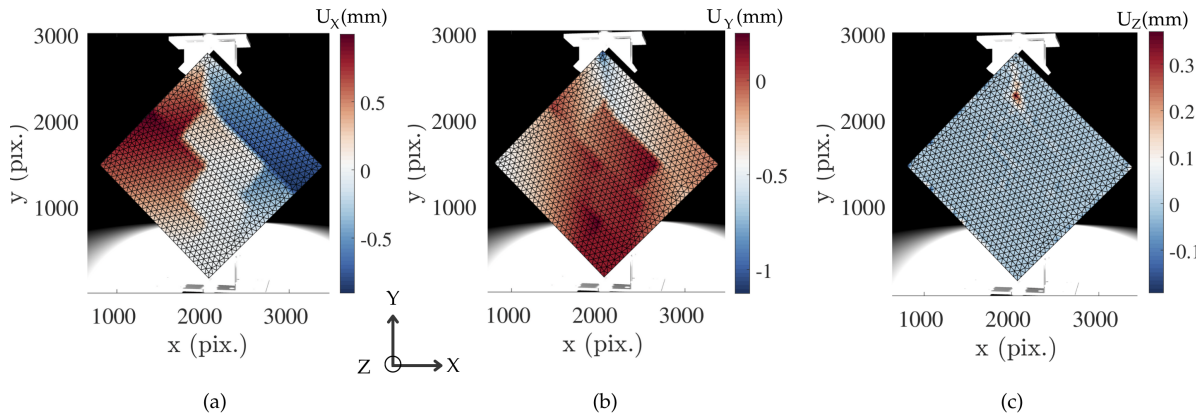


FIGURE 4. Champs de déplacement U_x (a), U_y (b) et U_z (c) mesurés par CIN-M à la photo 17.

IV. ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET QUANTIFICATION DES INCERTITUDES

À partir d'un ensemble initial de n_p paramètres $\{\mathbf{p}_0\}$, $n_p + 1$ simulations sont réalisées en augmentant, pour la simulation (i) , la valeur du i^e paramètre de 1%. La $(n_p + 1)^e$ simulation correspond au calcul de référence (Vargas et al. [2023]). L'objectif est de déterminer in fine l'identifiabilité de chacun des paramètres en prenant en compte les incertitudes liées à l'ensemble de la chaîne de mesure, en particulier celles liées au système optique utilisé pour la CIN-M (Collin et al. [2025]).

A. Rapport signal sur bruit

À partir de ces simulations, deux matrices sont définies afin d'évaluer le niveau du rapport signal-bruit (SNR), l'une pour la force \mathbf{F} et l'autre pour le champ de déplacement \mathbf{u}_{FE} . Ces matrices sont normées par l'incertitude de mesure, avec γ_F et γ_u représentant respectivement l'écart type pour la force et le déplacement. Ces matrices, adimensionnées, indiquent, à chaque instant t , combien de fois les fluctuations varient par rapport à l'incertitude de mesure

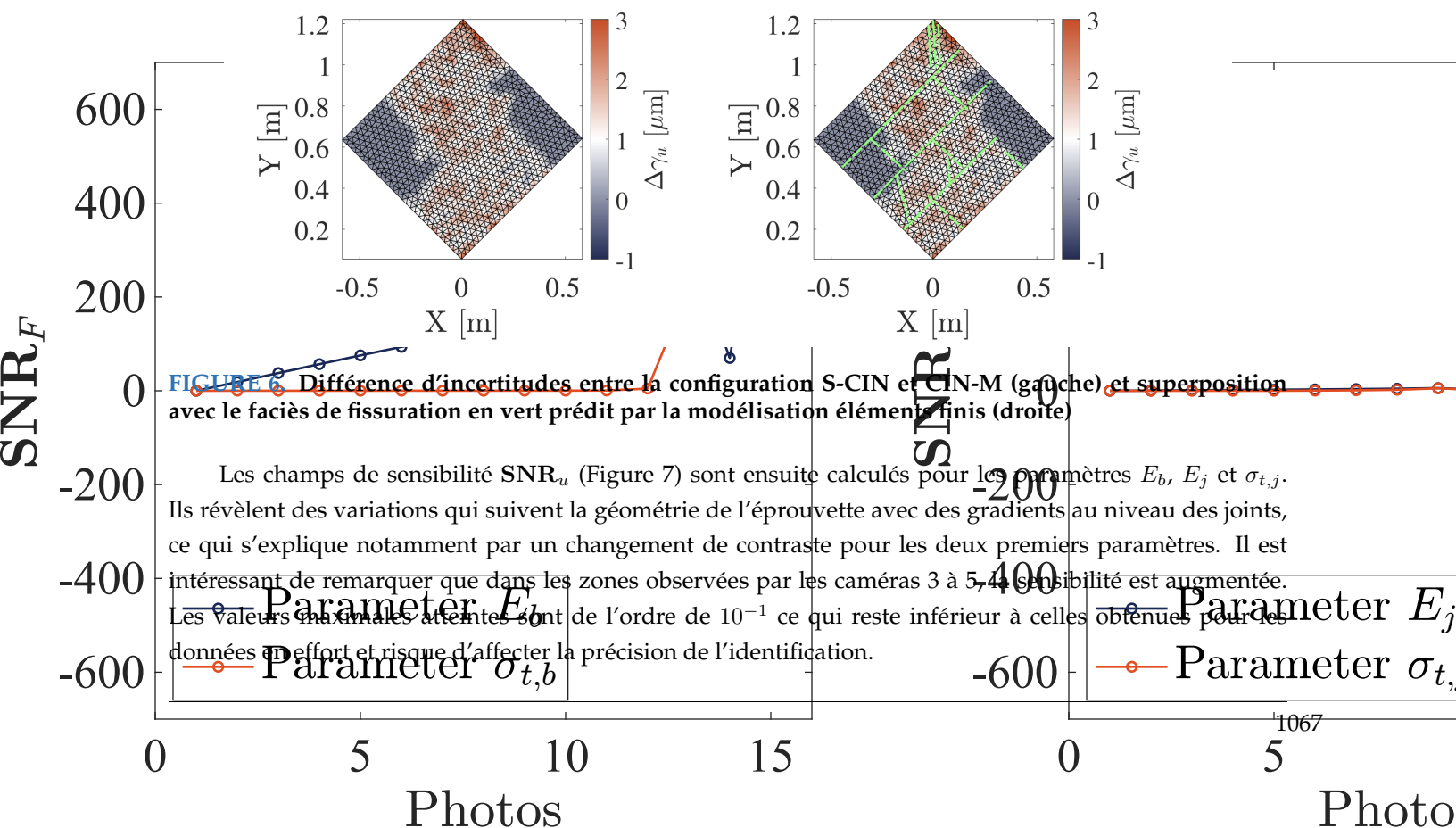
$$SNR_F^{(i)}(t) = \frac{F^{(i)}(t, \{\mathbf{p}^{(i)}\}) - F^{(n_p+1)}(t, \{\mathbf{p}^{(0)}\})}{\gamma_F}; \{SNR_u^{(i)}(t)\} = \frac{\{\mathbf{u}_{FE}^{(i)}(t, \{\mathbf{p}^{(i)}\})\} - \{\mathbf{u}_{FE}^{(n_p+1)}(t, \{\mathbf{p}^{(0)}\})\}}{\{\gamma_u\}} \quad (8)$$

La Figure 5 présente les SNR_F pour les paramètres E_b et $\sigma_{t,b}$ (Figure 5(a)), E_j et $\sigma_{t,j}$ (Figure 5(b)), $q_{p,j}$ et $c_{f,j}$ (Figure 5(c)) avec une incertitude $\gamma_F = 10$ N. Seules les sensibilités jusqu'à l'instant 16 sont présentées, le

modèle présentant des difficultés de convergence après la rupture fragile à l’instant 17. Chaque paramètre montre une sensibilité au moins 80 fois supérieure à l’incertitude de mesure, avec une activation en premier des paramètres élastiques suivis des paramètres non linéaires. Ces premiers résultats garantissent une identification fine malgré les incertitudes de mesure.

FIGURE 5. Courbes de sensibilité SNR_F pour 6 paramètres

Pour le calcul de SNR_u , les images virtuelles sont numériquement bruitées par un bruit blanc gaussien d’écart type $\sigma_c = 2$ niveaux de gris, ce qui correspond à un niveau classique de caméra. L’incertitude de mesure γ_u est ensuite calculée sur une série de 10 images bruitées, permettant de comparer les incertitudes de mesure entre une configuration avec les caméras 1 et 2 (S-CIN) et la configuration CIN-M avec les caméras 1 à 5. On trouve une incertitude moyenne de $11.3 \mu\text{m}$ pour la S-CIN contre $10.1 \mu\text{m}$ pour la CIN-M. La Figure 6(a) obtenue en calculant $\Delta\gamma_u = \gamma_u^{S-CIN} - \gamma_u^{CIN-M}$ montre que la CIN-M permet de réduire l’incertitude de mesure spécifiquement dans les régions d’intérêt où sont placées les caméras 3 à 5 correspondant aux conditions limites et aux zones où le modèle numérique prédit de l’endommagement (Figure 6(b)) (Hamadouche et al. [2024], Collin et al. [2025]).



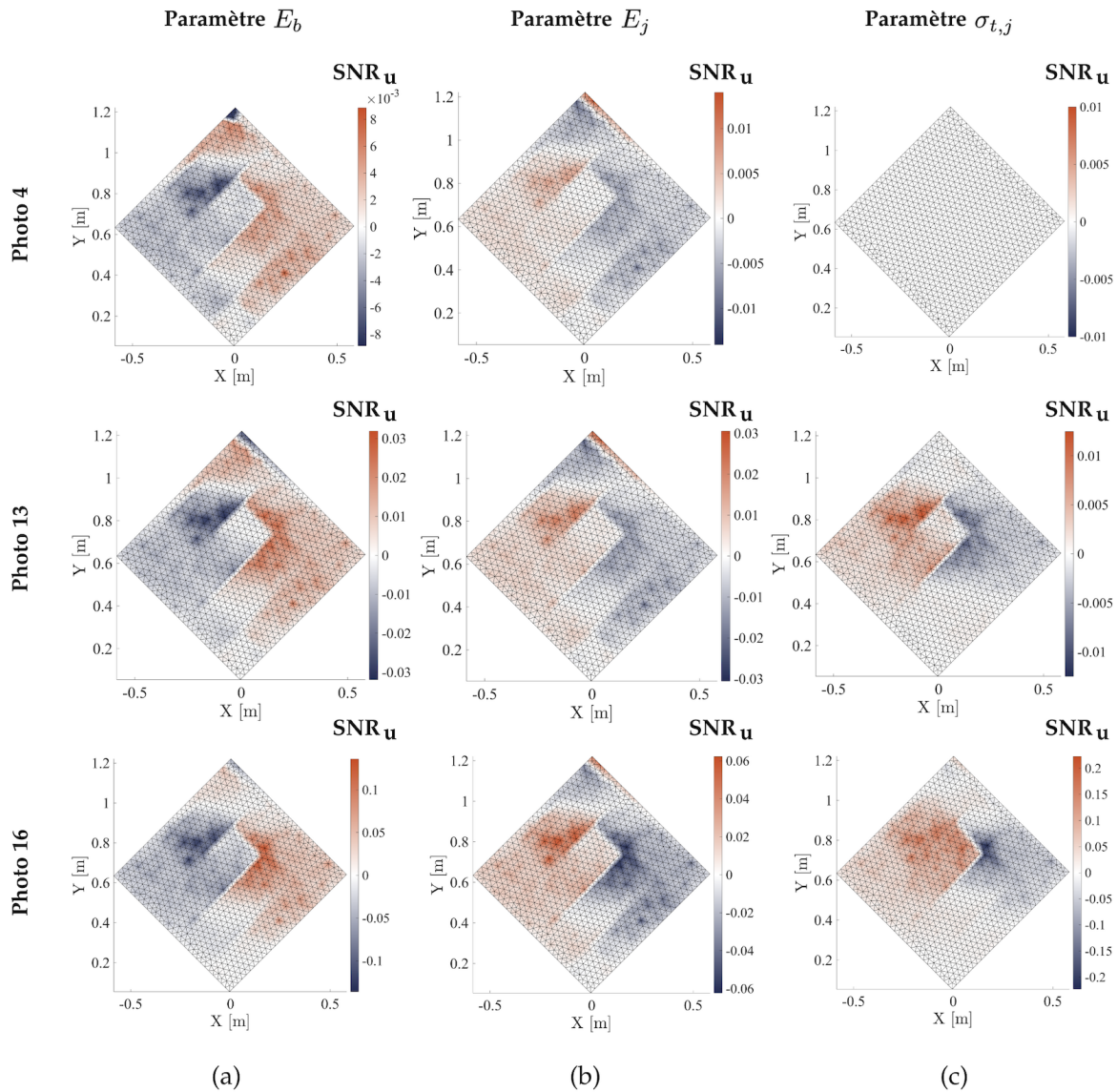


FIGURE 7. Courbes de sensibilité SNR_u . Chaque colonne montre le champ de sensibilité pour les paramètres E_b , E_j et $\sigma_{t,j}$ (de gauche à droite), pour plusieurs photos : 4, 13 et 16 (de haut en bas).

B. Identifiabilité des paramètres

Pour identifier les paramètres du modèle, une méthode classiquement utilisée est la mise à jour des paramètres du modèle ou Finite Element Model Updating (**Pagnacco et al. [2013]**). L'objectif est de minimiser la différence entre les données expérimentales mesurées et simulées. En particulier, la fonction coût peut être vue comme une combinaison de deux contributions, l'une portant sur la force, l'autre sur les données en déplacement

$$\chi^2(\{\mathbf{p}\}) = \chi_F^2(\{\mathbf{p}\}) + \chi_u^2(\{\mathbf{p}\}) \quad (9)$$

$$\chi_{\mathbf{F}}^2(\{\mathbf{p}\}) = \frac{1}{N_{t,F}} (\{\mathbf{F}_{exp}\} - \{\mathbf{F}_{sim}\}(\{\mathbf{p}\}))^T \frac{1}{\gamma_F^2} (\{\mathbf{F}_{exp}\} - \{\mathbf{F}_{sim}\}(\{\mathbf{p}\})) \quad (10)$$

$$\chi_{\mathbf{u}}^2(\{\mathbf{p}\}) = \frac{1}{N_{dof,u} N_{t,u}} \sum_t \left(\{\mathbf{u}_{exp}\}_t - \{\mathbf{u}_{sim}\}_t(\{\mathbf{p}\}) \right)^T \times \frac{[\mathbf{M}_{DIC}]}{2\sigma^2} \left(\{\mathbf{u}_{exp}\}_t - \{\mathbf{u}_{sim}\}_t(\{\mathbf{p}\}) \right) \quad (11)$$

avec $N_{t,F}$ le nombre de points de données de force acquis, $N_{t,u}$ et $N_{dof,u}$ respectivement le nombre de points de données de déplacement en temps et en espace, $[\mathbf{M}_{DIC}]$, la matrice hessienne de la CIN, qui est symétrique et positive semi-définie (Hild and Roux [2012]). La solution du problème de minimisation est obtenue à l'aide de la méthode de Gauss-Newton, qui fournit l'incrément de paramètre $\{\delta\mathbf{p}\}$ à chaque étape d'itération, jusqu'à atteindre la convergence

$$(w_f[\mathbf{H}_F] + w_u[\mathbf{H}_u]) \{\delta\mathbf{p}\} = w_f[\mathbf{B}_F] + w_u[\mathbf{B}_u] \quad (12)$$

$$[\mathbf{H}_F] = [\mathbf{S}_F]^T \frac{1}{\gamma_F^2} [\mathbf{S}_F]; w_f = \frac{1}{N_{t,F}}; [\mathbf{B}_F] = \frac{1}{\gamma_f^2} [\mathbf{S}_F]^t (\{\mathbf{F}_{ref}\} - \{\mathbf{F}_{sim}\}(\{\mathbf{p}\})) \quad (13)$$

$$[\mathbf{H}_u] = [\mathbf{S}_u]^T \frac{[\mathbf{M}_{DIC}]}{2\sigma^2} [\mathbf{S}_u]; w_u = \frac{1}{N_{t,u} N_{dof,u}}; [\mathbf{B}_u] = \frac{1}{2\sigma^2} [\mathbf{S}_u]^t [\mathbf{M}_{DIC}] (\{\mathbf{u}_{ref}\} - \{\mathbf{u}_{sim}\}(\{\mathbf{p}\})) \quad (14)$$

Les sensibilités des paramètres peuvent être étudiées en analysant le terme de gauche à inverser dans l'équation (12). Une variation de 1% ayant été appliquée à chacun des paramètres, il est possible de normer les expressions précédentes et étudier par la suite les matrices hessiennes $[\hat{\mathbf{H}}_F]$ et $[\hat{\mathbf{H}}_u]$ (Collin et al. [2025]). Les résultats sont présentés en Figure 8. On ne s'intéresse ici qu'aux paramètres E_b et $\sigma_{t,b}$ pour les blocs, E_j , $\sigma_{t,j}$, $q_{p,j}$ et $c_{f,j}$ pour le mortier.

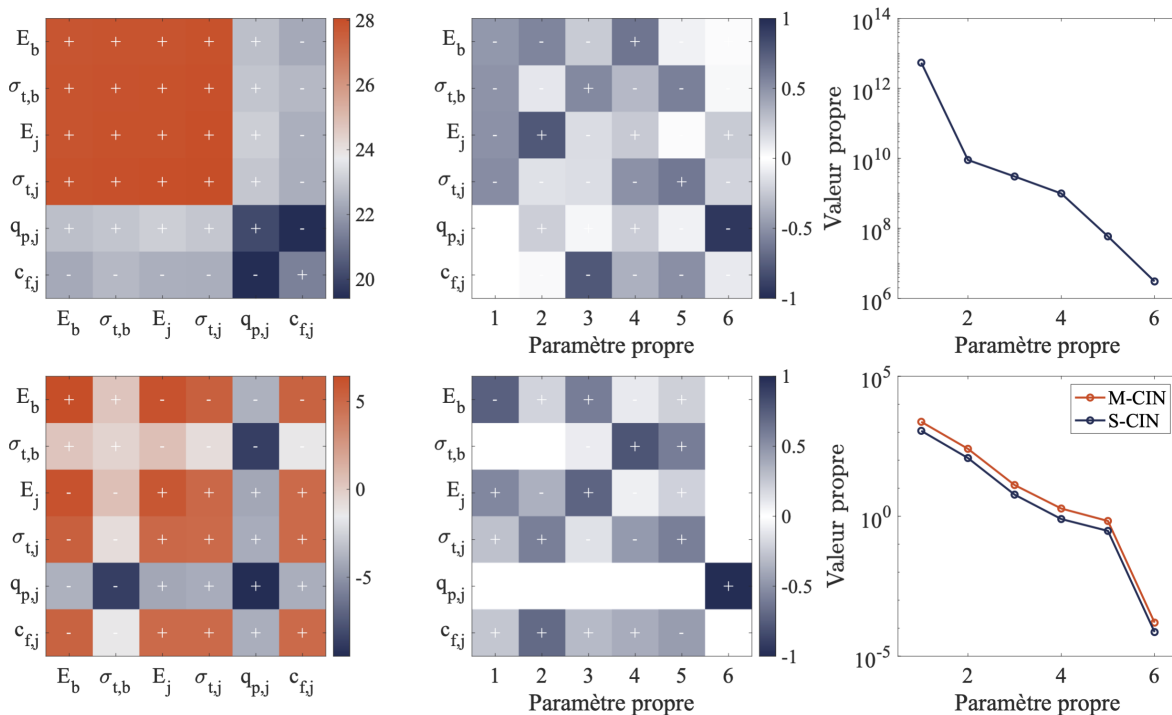


FIGURE 8. Matrices hessiennes normées $[\hat{\mathbf{H}}_F]$ (haut gauche) et $[\hat{\mathbf{H}}_u]$ (bas gauche) en logarithme décimal, avec leur décomposition en paramètres propres (centre) et leurs valeurs propres (droite).

La matrice hessienne statique $[\hat{\mathbf{H}}_F]$ montre une forte sensibilité à tous les paramètres et un conditionnement proche de 6, assurant une identification stable (Figure 8(haut)). L'analyse des vecteurs propres met

en évidence des corrélations assez fortes entre paramètres propres. La matrice hessienne en déplacement $[\hat{\mathbf{H}}_u]$ montre au contraire des valeurs propres d'ordres beaucoup plus faibles (Figure 8(bas)). Le conditionnement de 7.2 est plus élevé et les corrélations entre paramètres sont différentes de celles pour les données en effort. Comparée à une configuration avec uniquement les caméras 1 et 2, la CIN-M permet d'obtenir des valeurs propres supérieures avec les mêmes corrélations, mais les ordres de grandeur restent inférieurs à ceux de la matrice $[\hat{\mathbf{H}}_F]$. Il est donc préférable de favoriser les données de force dans la phase d'identification, en raison de leur plus grande sensibilité. La CIN-M restera cependant fondamentale pour la mesure des conditions limites.

C. Quantification des incertitudes

La suite de l'étude vise à quantifier a priori les incertitudes associées à l'identification de chaque paramètre en prenant en compte uniquement les données en effort. Il est supposé que les incertitudes sur les données en effort $\{\delta\mathbf{F}\}$ suivent une loi gaussienne de variance γ_f^2 . La matrice de covariance des paramètres $[\mathbf{C}_p]$ est définie telle que

$$\{\delta\mathbf{p}\} = ([\mathbf{S}_F]^T[\mathbf{S}_F])^{-1}[\mathbf{S}_F]^T\{\delta\mathbf{F}\} \quad (15)$$

$$[\mathbf{C}_p] \equiv \langle\{\delta\mathbf{p}\} \otimes \{\delta\mathbf{p}\}\rangle = \gamma_f^2 ([\mathbf{S}_F]^T[\mathbf{S}_F])^{-1} = \gamma_f^2 ([\mathbf{V}]^T[\mathbf{D}][\mathbf{V}])^{-1} \quad (16)$$

Les matrices $[\mathbf{V}]$ des paramètres propres et $[\mathbf{D}]$ des valeurs propres sont introduites. La variance du paramètre p_k est finalement obtenue en écrivant (Gras et al. [2015])

$$\sigma_{p_k}^2 = \gamma_f^2 \sum_i \frac{V_{k,i}^2}{D_{i,i}} \quad (17)$$

TABLE 2. Quantification des écarts types pour une identification en effort

Paramètres	E_b (Pa)	$\sigma_{t,b}$ (Pa)	E_j (Pa)	$\sigma_{t,j}$ (Pa)	$q_{p,j}$	$c_{f,j}$
Valeur	40×10^9	4.5×10^6	22×10^9	8.4×10^5	6.5	2.89
σ_p	1.2×10^7	3.6×10^3	3.1×10^7	1.2×10^3	3.5×10^{-2}	2.6×10^{-3}

Les écarts types présentés dans le Tableau 2 sont faibles. Les paramètres identifiés avec le plus de précision sont E_b et $\sigma_{t,b}$ tandis que le paramètre $q_{p,j}$ est celui qui est identifié avec la plus grande incertitude. Ces résultats confirment que tous les paramètres peuvent être a priori identifiés à partir des mesures de force, atteignant ainsi l'objectif de la phase de conception virtuelle. À ce stade, il est enfin possible de faire évoluer la méthodologie de test, notamment pour augmenter la sensibilité au paramètre $q_{p,j}$. Lors de la campagne expérimentale, le chargement ne sera pas monotone mais se fera plutôt avec des cycles de charge et décharge autour de l'effort à partir duquel $q_{p,j}$ est activé (200 kN d'après les résultats précédents).

V. CONCLUSION

Ce travail met en évidence l'intérêt des essais virtuels comme outil complémentaire dans le cadre de campagnes expérimentales complexes, notamment pour l'étude du comportement mécanique des matériaux hétérogènes en génie civil. L'approche s'appuie sur la corrélation d'images numériques multivues (CIN-M), qui s'est révélée particulièrement pertinente pour l'analyse multiéchelle des essais de compression diagonale. Comparée aux mesures ponctuelles obtenues à l'aide de LVDTs le long des diagonales, cette configuration permet de mesurer les champs de déformation et de suivre la propagation des fissures au

sein du matériau. Bien que cette méthode implique une instrumentation plus complexe et une calibration rigoureuse, la phase de conception virtuelle permet d'en optimiser la mise en œuvre.

L'utilisation du logiciel Blender pour modéliser l'ensemble de la chaîne de mesure (caméras, éclairage, mouchetis) offre la possibilité de générer des images virtuelles du dispositif expérimental et d'évaluer les incertitudes. Il a notamment été montré que la corrélation d'images numériques multivues (CIN-M) réduit significativement les incertitudes de mesure dans les zones d'intérêt, en particulier au niveau des conditions aux limites, ce qui est essentiel pour les prendre en compte dans les simulations numériques. Une perspective prometteuse consiste également à optimiser certains paramètres expérimentaux, tels que la taille du mouchetis, afin de minimiser les incertitudes de mesure. Les motifs ainsi optimisés pourront être appliqués directement sur les échantillons physiques, renforçant la robustesse et la fiabilité de la démarche expérimentale.

Les essais virtuels permettent également une analyse de sensibilité approfondie, utile à l'évaluation de l'identifiabilité des paramètres du modèle. Dans le cas étudié, il a été démontré que le couplage entre les mesures de force et de champs de déplacement n'apportait pas de bénéfice significatif, les données de déplacement ne présentant pas une sensibilité suffisante. L'approche par essais virtuels dépend cependant fortement du choix du modèle numérique choisi, qui doit être au préalable capable de reproduire fidèlement le comportement mécanique dans diverses conditions d'essai.

Enfin, les travaux futurs s'orientent vers la mise en œuvre complète d'un algorithme de type FEMU (Finite Element Model Updating), visant à assurer la convergence vers une solution de référence à partir d'un jeu initial de paramètres. Ces derniers sont déterminés à partir d'essais de caractérisation sur matériaux élémentaires, ce qui permettra de restreindre l'espace de recherche et favoriser l'unicité de la solution. L'analyse de sensibilité et le conditionnement de la matrice hessienne servent à évaluer la stabilité du problème d'identification. Une régularisation de Tikhonov peut également être introduite afin de converger vers une solution unique.

VI. REMERCIEMENTS

Le Département ERMES d'EDF R&D et l'École Normale Supérieure Paris-Saclay (ENS Paris-Saclay) sont remerciés pour leur soutien financier. Les recherches présentées dans cet article ont été en partie soutenues par l'Institut SEISM Paris-Saclay. Les remerciements vont également à Fabrice Gatuingt, Cédric Giry et François Hild pour leur précieux soutien.

References

ASTM International. *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*. ASTM E519/E519M-10. 2010.

Michela Basili, Fabrizio Vestroni, and Giancarlo Marcari. Brick masonry panels strengthened with textile reinforced mortar: experimentation and numerical analysis. *Construction and Building Materials*, 227:117061, December 2019. ISSN 0950-0618.

Zeeshan Manzoor Bhat, Yogendra Singh, and Pankaj Agarwal. Characterization of mechanical behavior of different types of masonry with a detailed investigation of full-field strain using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 407:133502, December 2023. ISSN 0950-0618.

- X. Chang, C. Le Gourriérec, F. Hild, and S. Roux. Brightness and contrast corrections for stereocorrelation: Global and instantaneous formulation with spatial regularization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 208:111057, 2024. doi: 10.1016/j.ymssp.2023.111057.
- L. Collin, F. Gatuingt, C. Giry, and G. Hervé-Secourgeon. Establishing a test-calculation dialogue for shear tests on masonry triplets. *Academic Journal of Civil Engineering*, 42(1):426–436, 2024.
- L. Collin, F. Gatuingt, C. Giry, and F. Hild. Virtual design of masonry triplet shear tests using digital image correlation. Submitted for publication, 2025.
- D. Dais, I. E. Bal, E. Smyrou, and V. Sarhosis. Automatic crack classification and segmentation on masonry surfaces using convolutional neural networks and transfer learning. *Automation in Construction*, 125:103606, 2021. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103606.
- M. Dhanasekar, A. W. Page, and P. W. Kleeman. The failure of brick masonry under biaxial stresses. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 79(2):295–313, 1985.
- J. E. Dufour, F. Hild, and S. Roux. Shape, displacement and mechanical properties from isogeometric multi-view stereocorrelation. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 50(7):470–487, 2015.
- R. Fedele, L. Galantucci, and A. Ciani. Global 2d digital image correlation for motion estimation in a finite element framework: a variational formulation and a regularized, pyramidal, multi-grid implementation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 96(12):739–762, 2013.
- R. Gras, H. Leclerc, F. Hild, S. Roux, and J. Schneider. 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, 2015.
- M. Grédiac and F. Hild, editors. *Full-field measurements and identification in solid mechanics*. John Wiley & Sons, 2012.
- I. Hamadouche, D. M. Seyed, and F. Hild. Damage detection and quantification via multiview dic at varying scales. *Experimental Mechanics*, 64(5):675–689, 2024.
- F. Hild and S. Roux. Comparison of local and global approaches to digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 52(9):1503–1519, 2012.
- E. Pagnacco, A. S. Caro-Bretelle, and P. Ienny. Parameter identification from mechanical field measurements using finite element model updating strategies. In *Full-field Measurements and Identification in Solid Mechanics*, pages 247–274. 2013.
- J. C. Passieux, F. Bugarin, C. David, J. N. Périé, and L. Robert. Multiscale displacement field measurement using digital image correlation: Application to the identification of elastic properties. *Experimental Mechanics*, 55:121–137, 2015.
- M. A. Sutton, J. J. Orteu, and H. Schreier. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media, 2009.
- R. Vargas, R. B. Canto, B. Smaniotto, and F. Hild. Calibration of cohesive parameters for a castable refractory using 4d tomographic data and realistic crack path from in-situ wedge splitting test. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(2):676–691, 2023.

- M. Vassaux, B. Richard, F. Ragueneau, and A. Millard. Regularised crack behaviour effects on continuum modelling of quasi-brittle materials under cyclic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 149:18–36, 2015.
- M. Vitse, M. Poncelet, A. E. Iskef, J. E. Dufour, R. Gras, A. Bouterf, and S. Roux. Toward virtual design and optimization of a structural test monitored by a multi-view system. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 56(2):112–128, 2021.