

Apport de la corrélation d'images pour l'analyse d'essais de compression diagonale sur des panneaux en maçonnerie renforcés ou non

Louis COLLIN^{1,2}, Fabrice GATUINGT¹, Cédric GIRY^{1,3}, Tristan DESTRUHAUT¹, François HILD¹

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

3. EPF École d'Ingénieurs, 55 Av. du Président Wilson, 94230 Cachan, France

ABSTRACT En cas de séismes, le chargement dans le plan des murs de remplissage en maçonnerie induit principalement des contraintes de traction et de compression le long de leurs diagonales. Afin d'analyser ces sollicitations, des essais de compression diagonale ont été réalisés sur des panneaux en maçonnerie non renforcée et renforcée, permettant une comparaison directe de leurs résistances sous des conditions de chargement identiques. Traditionnellement, les déformations le long des diagonales verticale et horizontale sont mesurées à l'aide de capteurs à déplacement linéaire (LVDTs). Cependant, cette approche globale peut s'avérer limitante pour des matériaux hétérogènes comme la maçonnerie. Pour répondre à cet enjeu, la corrélation d'images (CIN) est utilisée dans cette étude pour mesurer les champs de déplacement avec l'avantage d'être une méthode sans contact. Les résultats du calcul permettent de suivre l'évolution des déplacements et la propagation des fissures au cours de l'essai. Un post-traitement avancé permet une visualisation plus fine des champs de déformation et des conditions aux limites réellement appliquées. L'utilisation de jauges virtuelles à partir des données de CIN facilite enfin la comparaison entre panneaux renforcés ou non, mettant en évidence l'influence du renforcement sur la réponse mécanique du panneau en maçonnerie.

Keywords dialogue essai-calcul, mesures de champ, jauges virtuelles, conditions aux limites

I. INTRODUCTION

Lors d'un séisme, les murs de remplissage en maçonnerie sont soumis à des sollicitations dans leur plan, générant principalement des contraintes de traction et de compression le long de leurs diagonales (**Figure 1(a)**). L'essai de compression diagonale, décrit dans la norme **ASTM (2010)**, reproduit ces conditions sur un panneau carré afin d'analyser les mécanismes de rupture et d'évaluer la résistance ultime à la compression diagonale. Ce test consiste à appliquer une force F le long d'une diagonale du panneau (**Figure 1(b)**). La rupture est généralement associée à l'amorçage d'une fissure au centre du panneau, zone clé pour caractériser l'état des contraintes.

Traditionnellement, les éprouvettes sont instrumentées avec deux capteurs LVDT le long des deux diagonales (**Figure 1 (b)**). Ces capteurs permettent de suivre l'évolution des déformations moyennées sur les diagonales en fonction de l'effort appliqué. La résistance à la compression diagonale est ensuite déduite

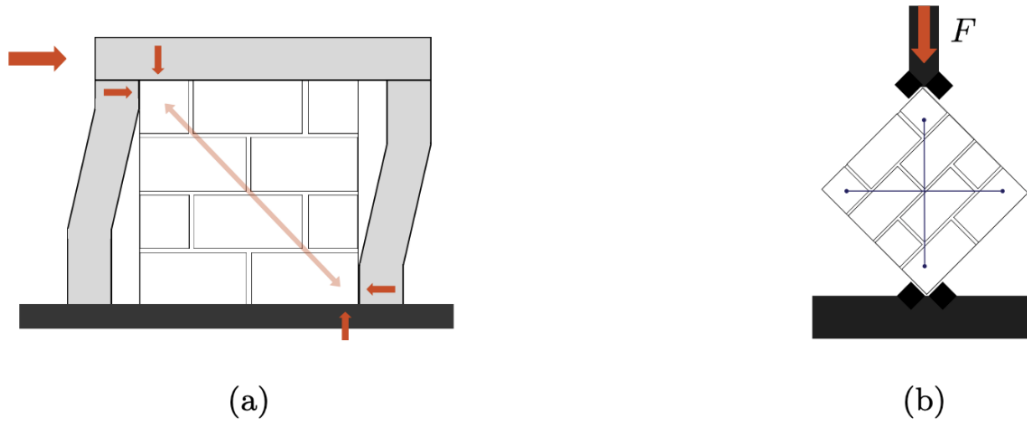


FIGURE 1. Sollicitations en cisaillement dans le plan (a) et essai de compression diagonale (ASTM (2010)) (b) (adapté de Collin (2025))

(ASTM (2010)). Ce type de dépouillement est couramment utilisé pour l'étude de la maçonnerie non armée (Petry et Beyer (2015); Casolo et al. (2019); Stazi et al. (2020)), mais également pour différentes configurations renforcées (Carpinteri et al. (2014); Basili et al. (2019); Ferretti et Mazzotti (2021)), permettant ainsi une comparaison entre les configurations sous des conditions de chargement équivalentes. Toutefois, l'utilisation de LVDTs peut s'avérer limitante pour une étude plus approfondie des matériaux hétérogènes tels que la maçonnerie, en raison notamment de leur rupture progressive et de gradients de contraintes.

La corrélation d'images numériques (CIN) apparaît alors comme une alternative intéressante, sans contact et non intrusive, permettant des mesures de champ. Dans le cadre d'essais de compression diagonale, Stazi et al. (2020) et Dehghani et al. (2015) ont montré son efficacité pour suivre la propagation des fissures, généralement localisées au centre de l'éprouvette. Bhat et al. (2023) ont, pour leur part, déterminé les déformations principales dans le panneau, offrant une compréhension plus fine de l'état de déformation interne. Enfin, Jing et al. (2023) ont utilisé un dispositif avec deux caméras, centrées sur cette zone, permettant de mesurer les déformations internes et de confronter ces résultats à ceux obtenus par LVDT.

Le travail présenté ici vise à mettre en évidence et à discuter les opportunités ainsi que les limites associées à l'instrumentation par CIN lors d'essais de compression diagonale sur des éprouvettes renforcées ou non. La partie 2 propose une synthèse de la campagne expérimentale réalisée, avec la description du dispositif mis en place. La partie 3 introduit les équations relatives à la CIN et présente les résultats obtenus, notamment grâce à l'utilisation de jauges virtuelles permettant de mesurer les déformations le long des diagonales et de comparer les différentes configurations entre elles. La partie 4 met en avant l'apport de la CIN pour l'actualisation des paramètres des modèles numériques, en particulier par la prise en compte des conditions limites mesurées expérimentalement. Enfin, la partie 5 résume et discute les principaux résultats afin de souligner les opportunités et les limites de la CIN dans le cadre des essais de compression diagonale.

II. Campagne expérimentale

La campagne expérimentale réalisée comprend huit essais de compression diagonale, dont quatre effectués sur des panneaux en maçonnerie non renforcée (URM) et quatre sur des panneaux en maçonnerie renforcée (RM).

A. Fabrication des panneaux

Les panneaux URM ont été réalisés à partir d'une unique rangée de blocs pleins en béton, assemblés au moyen d'un mortier de ciment. L'épaisseur nominale des joints était de 20 mm à l'horizontale et de 30 mm à la verticale. Le mode constructif est illustré en **Figure 2(a)** et est décrit en détail dans **Collin et al. (2025a)**. Les dimensions sont rappelées dans le **Tableau 1**. Les panneaux RM ont d'abord été construits selon la configuration URM. Le panneau RM₁ a ensuite été recouvert d'une couche de béton de 40 mm d'épaisseur appliquée sur les deux faces. Les panneaux RM₂, RM₃ et RM₄ ont, quant à eux, été renforcés par un treillis métallique soudé, fixé à l'aide de tiges d'acier traversant la maçonnerie et croisées afin d'assurer son maintien. Le revêtement en béton a ensuite été coulé sur chacune des faces de l'éprouvette en noyant le treillis (**Figure 2**). Les dimensions finales sont présentées dans le **Tableau 1**.

TABLE 1. Détail des éprouvettes pour les essais de compression diagonale

Essai	Panneau	Largeur l (mm)	Hauteur h (mm)	Épaisseur e (mm)	Treillis acier
DIAG_1	URM ₁	830	805	96	Non
DIAG_2	URM ₁	830	805	96	Non
DIAG_3	URM ₂	830	811	96	Non
DIAG_4	URM ₃	830	809	96	Non
DIAG_RM_1	RM ₁	830	805	180	Non
DIAG_RM_2	RM ₁	830	805	180	Non
DIAG_RM_3	RM ₂	830	811	180	Oui
DIAG_RM_4	RM ₃	830	809	180	Oui
DIAG_RM_5	RM ₄	830	809	180	Oui

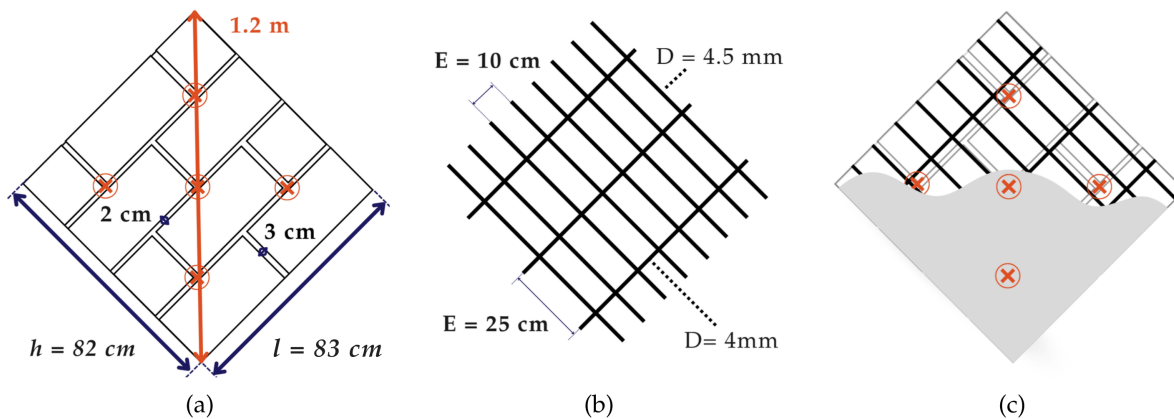


FIGURE 2. Dimensions des panneaux URM (a) avec indication en orange des aciers traversants. Dimensions du treillis soudé (D = diamètre, E = espacement) (b). Mode constructif des panneaux RM renforcés par treillis en acier (c).

B. Dispositif expérimental

Les panneaux sont testés 28 jours après leur fabrication. L'essai de compression diagonale a été conçu conformément à la norme **ASTM (2010)**. Des sabots métalliques en L ont été fabriqués et permettent d'imposer le déplacement sur toute une surface en haut et bas de l'éprouvette, évitant ainsi une rupture locale.

Compte tenu des dimensions importantes des éprouvettes, une machine d'essai spécifique a d'abord été développée avec des profilés métalliques Mokokit montés sur une plateforme isolée du reste du bâti-

ment (**Figure 3(a)**). Cette configuration initiale, limitée à 500 kN, a été utilisée pour les essais sur les panneaux URM. Pour les panneaux RM qui présentent une résistance plus importante, le dispositif a dû être remplacé par la machine MTS 250 T offrant une capacité de chargement supérieure.

Pour ces deux configurations, le dispositif de mesure par CIN est resté identique, sans modification des paramètres des caméras utilisées ou du type de mouchetis appliqué. Le positionnement de chacun de ces éléments avait été étudié au préalable dans un environnement virtuel (Collin (2025); Collin et al. (2025c)). En particulier, sur la face arrière, une caméra permet de mesurer les déplacements et déformations dans le plan de l'éprouvette. Cependant, dans le cadre des essais sur les panneaux RM, les colonnes verticales de la machine obstruent l'éprouvette sur les bords (**Figure 3(b)**). La région d'intérêt de la caméra a donc été réduite sur la zone centrale, où apparaît la fissuration (**Figure 5(b)**).

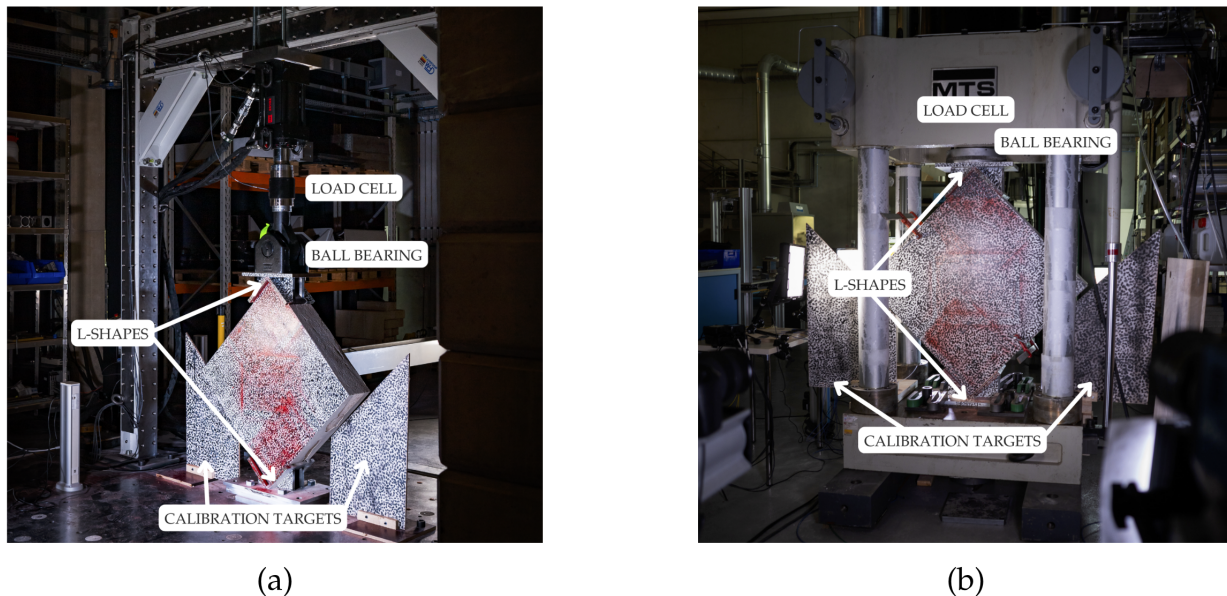


FIGURE 3. Dispositifs expérimentaux pour les essais de compression diagonale sur panneaux URM (a) et RM (b) selon la norme ASTM (2010)

Pour les essais sur panneaux URM, le chargement a été appliqué à l'aide d'un vérin hydraulique d'une capacité maximale de 500 kN, avec une vitesse de déplacement de $2 \mu\text{m/s}$. Des cycles de charge/décharge ont été réalisés uniquement pour les essais DIAG_3 et DIAG_4 durant la phase montante de l'effort, la rupture fragile ne permettant pas de les poursuivre après l'effort ultime atteint.

Pour les essais sur panneaux RM, le chargement cyclique a été imposé à l'aide d'un vérin hydraulique d'une capacité maximale de 2500 kN, avec une vitesse constante de $5 \mu\text{m/s}$.

C. Mesure de l'effort

Les essais de compression diagonale ont été instrumentés à l'aide d'une cellule d'effort installée au niveau du vérin. Le déplacement enregistré correspond à celui du vérin. Pour la suite de l'étude, l'analyse se concentre plus spécifiquement sur les résultats des essais DIAG_2, DIAG_RM_2 et DIAG_RM_5, représentatifs des autres essais, afin d'illustrer l'apport de la CIN dans l'étude de ces différentes configurations.

L'essai DIAG_2 a atteint un effort maximal de 225 kN pour un déplacement de 8.77 mm (**Figure 4(a)**). La rupture quasi-fragile observée présente une légère phase post-pic.

Pour les panneaux RM (**Figure 4(b)**), l'essai DIAG_RM_2 (sans acier) a atteint 1045 kN à 4.05 mm, avec une rupture quasi-fragile. L'essai DIAG_RM_5 (avec acier) a atteint 851 kN pour un déplacement de 5,25 mm, suivi d'une phase post-pic marquée, illustrant l'intérêt du treillis métallique pour coudrer les fissures.

En première conclusion, le renforcement par revêtement de béton accroît nettement la résistance par rapport aux panneaux URM, et la phase post-pic observée pour RM_5 confirme la capacité dissipative induite par le treillis en acier. Il serait enfin pertinent de comparer les déplacements mesurés entre les configurations URM et RM (**Figure 4**). Cependant, en raison de différences dans les dispositifs expérimentaux, les mesures de déplacement ne sont pas comparables. L'utilisation de la CIN permet cependant de mesurer les conditions aux limites réellement appliquées et donc d'en déduire le déplacement relatif (voir **Partie 4**).

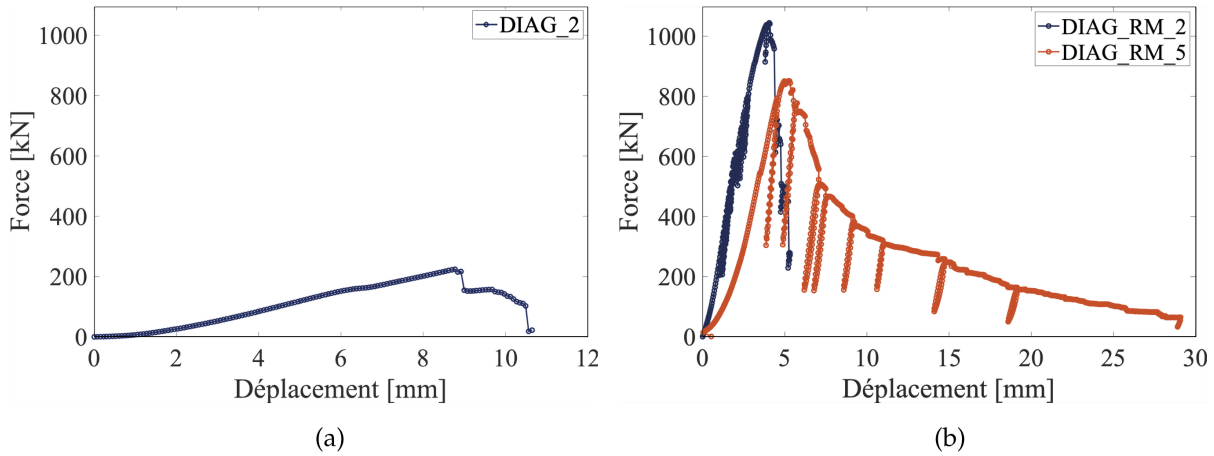


FIGURE 4. Courbes force-déplacement pour les essais sur panneaux URM (a) et RM (b)

III. Mesure des déplacements par CIN-2D et comparaisons entre configurations renforcées ou non

A. Mesures par CIN-2D

La CIN-2D vise à déterminer le champ de déplacement $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ qui relie l'image déformée g à son image de référence f (**Figure 5**). La conservation des niveaux de gris s'écrit (**Grédiac et Hild (2012)**)

$$\forall \mathbf{x} \in R, f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})) \quad (1)$$

où R désigne la région d'intérêt de la caméra. Le bruit d'acquisition (écart type σ) de chaque caméra est introduit. La fonction coût associée à ce problème de minimisation est définie par

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

Les matériaux quasi-fragiles, tels que la maçonnerie, présentent des non-linéarités locales pouvant apparaître même à de faibles niveaux de déformation. Deux défis majeurs se posent pour leur étude en utilisant la CIN-2D :

- La nécessité d'un maillage suffisamment fin pour mesurer ces non-linéarités et, par exemple, représenter avec précision le chemin des fissures. Cependant, la réduction de la taille des éléments accroît également les incertitudes de mesure (**Hild et Roux (2012)**), sauf si la régularisation mécanique est mise en place.

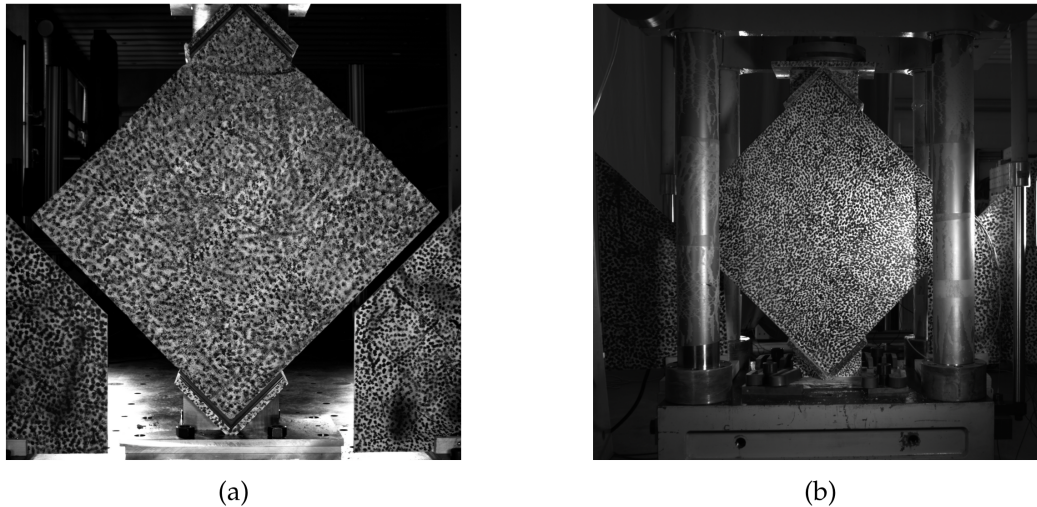


FIGURE 5. Images de référence pour les essais sur panneaux URM (a) et RM (b)

- L'utilisation de la régularisation mécanique présente l'inconvénient d'étaler les déformations aux éléments voisins, ce qui empêche la visualisation de forts gradients et de résultats réalistes, sauf si les éléments endommagés sont spécifiquement pénalisés lors de la régularisation mécanique (Hild et al. (2015)).

La solution détaillée du problème de CIN-2D, prenant en compte ces défis, est présentée dans (Collin et al. (2025a)). Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel *Correli 3.2*, développé au LMPS (Leclerc et al. (2015)). Les résultats permettent de suivre l'évolution des champs de déplacements et de déformations au cours de l'essai, dans le plan de l'éprouvette. Cette approche constitue toutefois une mesure de surface, qui n'est pas nécessairement représentative du comportement du panneau dans toute son épaisseur. Une bonne pratique, mise en œuvre lors des essais mais non détaillée dans cet article, consiste à comparer les mesures réalisées sur les faces avant et arrière de l'éprouvette.

Un post-traitement plus avancé permet de visualiser l'évolution des déformations principales ϵ_I correspondant à la direction d'extension. En particulier, à partir de l'effort maximal atteint, ce champ permet de visualiser finement la fissuration, bien localisée dans les éléments grâce à l'utilisation de la régularisation mécanique pénalisée (Figure 6).

Les valeurs de ϵ_I obtenues pour les configurations URM et RM à l'effort maximal sont présentées à la Figure 6. Les résultats mettent en évidence que la présence du treillis en acier permet de couder les fissures en limitant les déformations localisées, avec des valeurs de ϵ_I plus faibles (Figure 6(c)) que dans les autres configurations (Figure 6(a-b)). La présence du treillis évite ainsi l'apparition d'une rupture fragile, et explique notamment le comportement post-pic observé lors de l'essai DIAG_RM_5 (Figure 4(b)).

En perspective, il est possible de relier les mesures de déformation principale à l'ouverture moyenne de fissure par élément, et de quantifier de manière plus macroscopique l'évolution de l'endommagement dans le panneau (Sciuti et al. (2025); Collin et al. (2025b,a)).

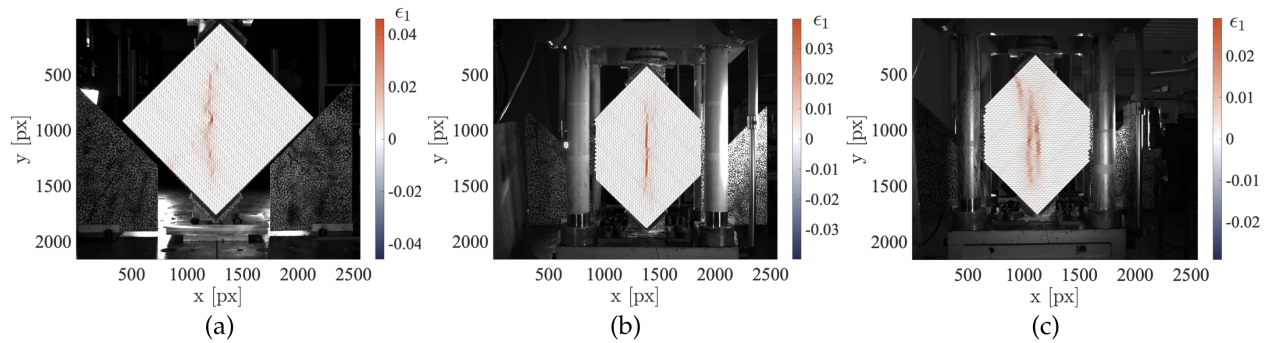


FIGURE 6. Champs de déformation principale ϵ_I mesuré à l'effort maximal, pour les essais DIAG_2 (a), DIAG_RM_2 (b) et DIAG_RM_5 (c)

B. Jauges virtuelles

Les mesures obtenues par CIN-2D permettent de reproduire les données fournies par des capteurs LVDT qui mesurent la déformation moyenne selon les deux diagonales (**Figure 1(b)**). De manière analogue, des jauges virtuelles sont définies en sélectionnant les éléments du maillage –utilisé pour le calcul de CIN-2D– situés le long de ces diagonales (**Figure 7(a)**). L'allongement de chaque jauge est ici calculé comme la moyenne des déformations sur chacun des éléments sélectionnés, reproduisant ainsi le comportement des LVDT tout en intégrant l'hétérogénéité du matériau. Les résultats pour l'essai DIAG_2 sont présentés en **Figure 7(b)**.

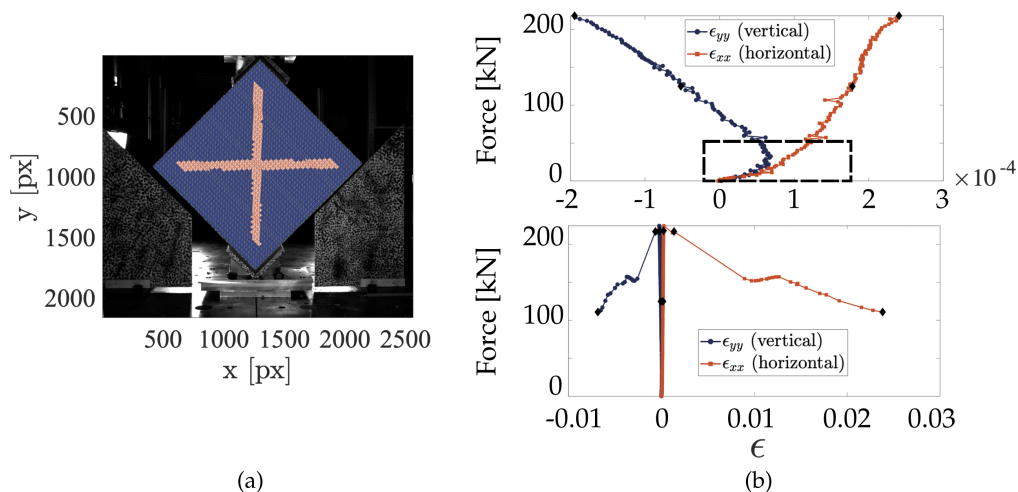


FIGURE 7. (a) Définition des jauges virtuelles. (b) Courbes force–déformation issues des jauges virtuelles : (bas) historique complet de chargement, (haut) zoom avant rupture.

Figure 7 (b,haut) montre que la pente des déformations verticales (contraction) est plus élevée que celle des déformations horizontales (extension), indiquant une capacité de contraction supérieure avant rupture. L'encadré illustre également l'influence des conditions aux limites sur la courbe force–déformation. Expérimentalement, des mouvements de corps rigides sont observés sur les premiers instants liés à la mise en place de l'échantillon imparfaitement carré et à l'utilisation d'une rotule en partie supérieure. Bien que les déplacements dans le plan soient corrigés, les déplacements hors plan ne sont pas pris en compte et

perturbent la mesure des déformations. À environ 50 kN, la charge appliquée permet de solliciter efficacement le panneau selon sa diagonale, avec une évolution linéaire des déformations. Au pic de charge, les déformations horizontales et verticales atteignent respectivement environ 0.02 % et 0.025 %. En phase résiduelle, les extensions horizontales atteignent 2.5 %, tandis que les contractions maximales atteignent 0.8 % (**Figure 7 (b,bas)**).

C. Approche normative

Dans l'approche normative **ASTM (2010)**, la résistance en compression diagonale de la maçonnerie $f_{dt,ASTM}$ est évaluée dans le régime élastique au centre de l'éprouvette, en supposant un état de cisaillement pur et uniforme. Elle est supposée égale à la contrainte principale de traction telle que

$$f_{dt,ASTM} = \frac{F_{peak}}{\sqrt{2}A_n}, \quad A_n = \frac{(l+h)}{2}e \quad (3)$$

où l et h sont la largeur et la hauteur du panneau et e son épaisseur (**Tableau 1**). Dans le cas des panneaux RM, la résistance diagonale en compression augmente en moyenne de 88%, principalement grâce à l'ajout du revêtement en béton sur les deux faces de l'éprouvette. La déformation de cisaillement γ , obtenue à partir des mesures des jauges virtuelles, s'écrit

$$\gamma = \epsilon_{xx}^{(g)} - \epsilon_{yy}^{(g)}. \quad (4)$$

Cette relation est valable sous l'hypothèse que $\epsilon_{xy} = 0$ au centre du panneau, ce qui peut être vérifié par les mesures de CIN-2D avant l'apparition des fissures. La **Figure 8** présente les courbes contraintes-déformations de cisaillement obtenues pour les trois essais.

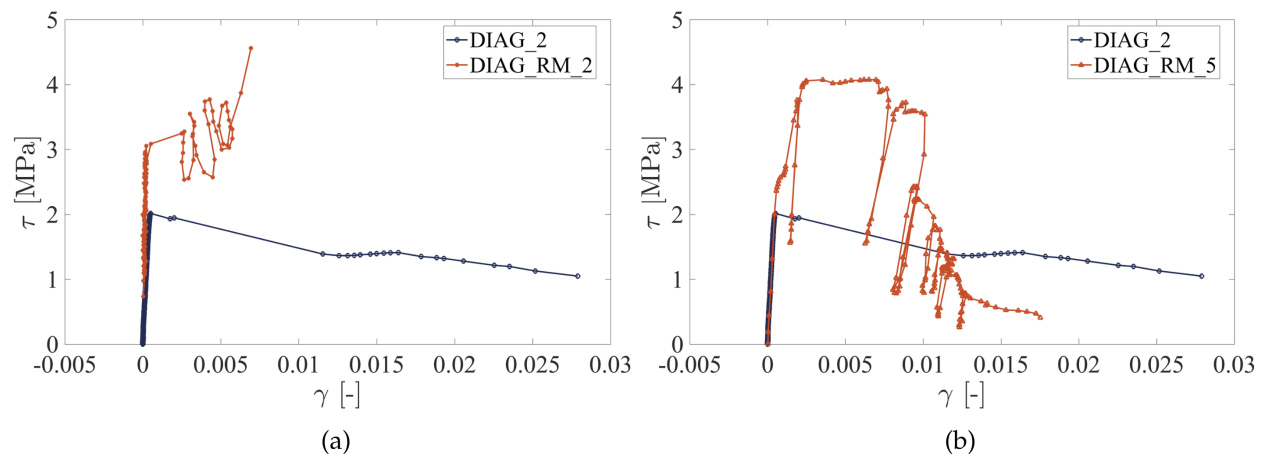


FIGURE 8. Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la déformation de cisaillement pour les essais **DIAG_2**, **DIAG_RM_2** (a) et **DIAG_RM_5** (b)

Pour l'essai **DIAG_2**, la contrainte de cisaillement maximale est atteinte pour une déformation d'environ 0,05%, avec une rupture survenant autour de 3,5%. L'ajout d'un renforcement sans treillis soudé (essai **DIAG_RM_2**) entraîne une augmentation significative de $\gamma = 0,71\%$ au pic, avec l'apparition d'un plateau avant une rupture fragile (**Figure 8(a)**). Une tendance similaire est observée pour l'essai **DIAG_RM_5** avec treillis en acier, où la déformation moyenne de cisaillement au pic atteint 0,65%, soit une multiplication par 12 par rapport au panneau URM (**Figure 8(b)**). Bien que le plateau au pic soit plus marqué pour

DIAG_RM_5, la contrainte de cisaillement diminue au-delà de $\gamma = 1\%$ et devient inférieure à celle de la configuration URM, traduisant une dégradation progressive de la raideur. Néanmoins, la présence du treillis soudé améliore significativement la capacité ultime en déformation de cisaillement et contribue à maintenir une cohésion structurelle plus importante.

En complément de cette approche normative, il est fréquent dans la littérature de définir le module de cisaillement (**ASTM (2010)**) et la ductilité (**Tawfik et al. (2014)**) de la maçonnerie étudiée afin de comparer les configurations entre elles. Sur l'ensemble des essais réalisés, il a été observé une augmentation de 33% du module de cisaillement et une augmentation de 20% de la ductilité si l'on considère les panneaux RM avec treillis par rapport aux panneaux URM. Ces résultats sont cohérents et montrent que l'emploi d'un tel renforcement améliore significativement à la fois la résistance et la ductilité de la maçonnerie sous sollicitation sismique.

Les mesures des jauges virtuelles obtenues par CIN permettent donc de comparer de manière fiable les différentes configurations de maçonnerie. L'influence des mouvements hors plan de l'éprouvette sur ces mesures est cependant discutée à travers l'analyse des conditions aux limites.

IV. Apport de la CIN dans l'identification des paramètres de modèles numériques

Pour établir un dialogue essai-calcul et identifier expérimentalement les paramètres de modèles numériques, il est nécessaire d'intégrer dans le modèle les conditions aux limites réellement mesurées par CIN-2D lors des essais. L'intérêt de la formulation aux éléments finis (EF) de la CIN-2D réside dans la correspondance directe entre le maillage utilisé pour la simulation EF et celui exploité pour le calcul CIN-2D. Ainsi, deux régions spécifiques, situées au niveau des sabots en L supérieurs et inférieurs de l'éprouvette, sont monitorés (**Figure 9(a)**). Afin de réduire l'influence du bruit de mesure, les déplacements nodaux mesurés en ces points sont interpolés par des fonctions polynomiales d'ordre cinq. Il devient alors possible de calculer la différence de déplacement vertical entre les deux supports ($\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2$) pour chaque essai. Les valeurs négatives correspondent à une extension du spécimen ($\mathbf{u}_1 < \mathbf{u}_2$), tandis que les valeurs positives traduisent une contraction ($\mathbf{u}_1 > \mathbf{u}_2$).

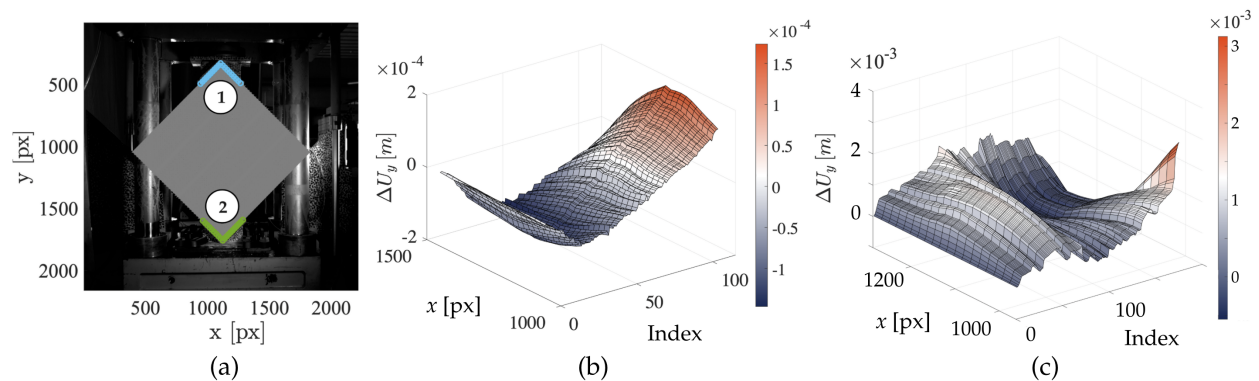


FIGURE 9. Définition des conditions limites (a). Déplacement relatif entre les deux appuis mesuré par CIN pour l'essai DIAG_2 (b) et DIAG_RM_5 (c)

Aux premiers instants de l'essai DIAG_2, des valeurs négatives sont observées, ce qui est incohérent avec la charge appliquée, celle-ci ne devant produire que de la contraction le long de la diagonale (**Figure 9(b)**). Cette observation traduit la présence de mouvements de corps rigide hors plan du spécimen

se développant lors du chargement. Dans ce cas, les mesures obtenues par CIN-2D sont insuffisantes pour capturer avec précision les conditions aux limites (**Figure 10**). Cette limitation affecte en particulier les déformations mesurées et explique les déformations initiales relevées par les jauges virtuelles, lesquelles ne reflètent pas nécessairement la réponse mécanique attendue. De plus, le modèle numérique ne pourra pas reproduire ce comportement, ce qui pénalisera in fine l'identification des paramètres du modèle. Ce résultat met en évidence la limite d'une instrumentation avec une seule caméra pour l'étude des essais de compression diagonale, en particulier en présence de mouvements hors plan. Il souligne ainsi la pertinence de recourir à une instrumentation multi-caméras, mise en oeuvre lors de ces essais, avec cinq caméras sur la face avant de l'éprouvette, pour déterminer le mouvement 3D et corriger les mesures de déformations (**Collin (2025); Collin et al. (2025c)**).

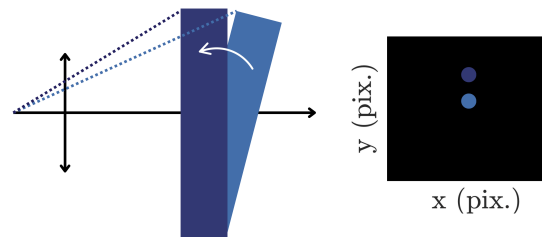


FIGURE 10. Influence des mouvements hors-plan de l'éprouvette sur les mesures par CIN-2D

La (**Figure 9(c)**) montre le déplacement relatif U_y entre les deux supports pour l'essai DIAG_RM_5. Les résultats sont ici cohérents avec la charge appliquée avant rupture, les cycles de chargement étant clairement visibles. Après avoir atteint l'effort maximal à l'indice 50, l'évolution du déplacement devient plus ératique, conséquence de l'endommagement progressif du panneau. Enfin, il est important de noter qu'en associant cette mesure de déplacement relatif à celle de l'effort, il devient possible d'identifier de manière plus précise l'énergie dissipée lors des cycles de charge et de décharge.

V. Conclusion

Cet article présente les résultats d'une campagne d'essais de compression diagonale sur différentes configurations de maçonnerie, renforcées ou non, et instrumentées par CIN. Une première conclusion est que les résultats obtenus par mesure des efforts, des champs de déformation et des jauges virtuelles soulignent l'apport d'un renforcement – par revêtement béton sur les deux faces avec treillis soudé – permettant notamment d'augmenter la résistance à la compression diagonale, d'empêcher une ouverture rapide des fissures et d'améliorer la ductilité des panneaux étudiés.

Dans cette étude, l'apport de la CIN est particulièrement intéressant pour la mesure de champs (déplacements, déformations), permettant un suivi précis de la fissuration dans le matériau en suivant la méthodologie détaillée par **Collin et al. (2025a)**. L'utilisation de jauges virtuelles montre qu'il est possible de reproduire les données mesurées par LVDT et de comparer les différentes configurations de maçonnerie.

Cependant, la CIN présente deux limitations principales dans le cas des essais de compression diagonale. Premièrement, la mesure reste surfacique, tout comme celle réalisée par LVDT, et n'est donc pas nécessairement représentative du comportement global du panneau. Pour pallier cela, il est nécessaire d'instrumenter les deux faces de l'éprouvette, ce qui permet de mieux corriger les mouvements dans le plan de chaque côté de l'éprouvette.

Deuxièmement, contrairement aux LVDT, la CIN est sensible aux mouvements hors-plan de l'éprouvette, qui perturbent la mesure. Ces mouvements sont dus à la taille et à la géométrie de l'éprouvette, qui rendent un alignement parfait selon la diagonale difficile lors de la mise en place. Ils influent notamment sur les mesures des jauges virtuelles ainsi que sur l'observation des conditions aux limites, rendant complexe l'identification des paramètres numériques de modèles.

Dans de tels cas, une simple analyse de corrélation 2D s'avère insuffisante. Pour y répondre, un calcul 3D devient nécessaire. Dans les essais réalisés, en plus des caméras permettant l'étude 3D, des caméras zoomant au niveau du centre de l'éprouvette et des conditions aux limites, en partie haute et basse, permettront, après dépouillement, de corriger les mouvements 3D et de réduire les incertitudes dans les zones d'intérêt (Collin et al. (2025d,c); Collin (2025)).

Ainsi, si l'objectif expérimental est simplement de mener une approche normative pour comparer différentes configurations de maçonnerie, l'utilisation de LVDT s'avère être la démarche la plus pertinente. Cependant, si l'expérimentateur souhaite investiguer plus finement le comportement de la maçonnerie, comme l'évolution de la fissuration, ou mettre en place un dialogue essai-calcul, l'utilisation de la CIN-2D avec une caméra sur chaque face permet d'obtenir des résultats satisfaisants. L'optimal reste enfin un dispositif multi-caméras permettant au moins des mesures CIN-3D (Jing et al. (2023)), et pouvant être optimisé au préalable par des essais virtuels.

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. Sont également vivement remerciés Xavier Pinelli, Olivier Rateau et Laëticia Szturycz, pour leur aide précieuse dans la mise en place du dispositif expérimental.

Références

- ASTM, 2010. Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages. ASTM E519/E519M-10.
- Basili, M., Vestroni, F., Marcari, G., 2019. Brick masonry panels strengthened with textile reinforced mortar : experimentation and numerical analysis. *Construction and Building Materials* 227, 117061. doi :10.1016/j.conbuildmat.2019.117061.
- Bhat, Z.M., Singh, Y., Agarwal, P., 2023. 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. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.133502.
- Carpinteri, A., Grazzini, A., Lacidogna, G., Manuello, A., 2014. Durability evaluation of reinforced masonry by fatigue tests and acoustic emission technique. *Structural Control and Health Monitoring* 21, 950-961. doi :10.1002/stc.1623.
- Casolo, S., Biolzi, L., Carvelli, V., Barbieri, G., 2019. Testing masonry blockwork panels for orthotropic shear strength. *Construction and Building Materials* 214, 74-92. doi :10.1016/j.conbuildmat.2019.04.116.

- Collin, L., 2025. Des essais virtuels à la réalité - essais de compression diagonale sur des panneaux en maçonnerie. *Academic Journal of Civil Engineering* 43, 1061–1073. doi :10.26168/ajce.43.1.90.
- Collin, L., Destruhaut, T., Gatuingt, F., Giry, C., Hild, F., 2025a. Dic analysis of unreinforced masonry panels under diagonal compression using virtual gauges and damage indicators Soumis pour publication.
- Collin, L., Gatuingt, F., Giry, C., Hild, F., 2025b. Exploring the shear behavior of masonry triplets via digital image correlation, damage quantification and mohr-coulomb criterion identification. *Structures* 80, 109696. doi :https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109696.
- Collin, L., Gatuingt, F., Giry, C., Hild, F., 2025c. Optimisation par essais virtuels de l'instrumentation multi-vue et multiéchelle des essais en compression diagonale sur des panneaux en maçonnerie, dans : 26ème Congrès Français de Mécanique, Metz, France.
- Collin, L., Gatuingt, F., Giry, C., Hild, F., 2025d. Virtual Design of Masonry Triplet Shear Tests using Digital Image Correlation. *Materials and structures* 58, 203. doi :10.1617/s11527-025-02707-9.
- Dehghani, A., Fischer, G., Nateghi Alahi, F., 2015. Strengthening masonry infill panels using engineered cementitious composites. *Materials and Structures* 48, 185–204. doi :10.1617/s11527-013-0176-4.
- Ferretti, F., Mazzotti, C., 2021. Frcm/srg strengthened masonry in diagonal compression : experimental results and analytical approach proposal. *Construction and Building Materials* 283, 122766. doi :https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122766.
- Grédiac, M., Hild, F. (Eds.), 2012. Full-field measurements and identification in solid mechanics. John Wiley & Sons.
- Hild, F., Bouterf, A., Roux, S., 2015. Damage Measurements via DIC. *International Journal of Fracture* 191, 77–105. doi :10.1007/s10704-015-0004-7.
- Hild, F., Roux, S., 2012. Digital image correlation, dans : *Optical Methods for Solid Mechanics : A Full-Field Approach*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, pp. 183–228.
- Jing, L., Wang, N., Yin, S., 2023. Shear performance of textile-reinforced concrete (TRC)-strengthened brick masonry walls. *Construction and Building Materials* 397, 132401. doi :10.1016/j.conbuildmat.2023.132401.
- Leclerc, H., Neggers, J., Mathieu, F., Hild, F., Roux, S., 2015. Correli 3.0. IDDN.FR.001.520008.000.S.P.2015.000.31500. Agence pour la Protection des Programmes, Paris, France.
- Petry, S., Beyer, K., 2015. Cyclic test data of six unreinforced masonry walls with different boundary conditions. *Earthquake Spectra* 31, 2459–2484. doi :10.1193/101513EQS269.
- Sciuti, V.F., Vargas, R., Guerrero, N., Marante, M.E., Hild, F., 2025. Digital image correlation analyses of masonry infilled frame : Uncertainty-based mesh refinement and damage quantification. *Mathematics and Mechanics of Solids* 30, 93–115. doi :10.1177/10812865231174840.
- Stazi, F., Serpilli, M., Chiappini, G., Pergolini, M., Fratolocchi, E., Lenci, S., 2020. Experimental study of the mechanical behaviour of a new extruded earth block masonry. *Construction and Building Materials* 244, 118368. doi :10.1016/j.conbuildmat.2020.118368.

Tawfik, A.S., Badr, M.R., ElZanaty, A., 2014. Behavior and ductility of high strength reinforced concrete frames. HBRC Journal 10, 215–221. doi :<https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.11.005>.