

Caractérisation expérimentale en compression/cisaillement de triplets en pierre à joint courbe

Paul Vergonjeanne¹, Thomas Parent², Stéphane Morel², Robert LE ROY¹, Thierry Ciblac¹

¹ ENSA Paris Malaquais, Laboratoire Géométrie Structure Architecture

² Université de Bordeaux, UMR5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie-Bordeaux (I2M), Dept.

RESUME L'article présente une campagne de caractérisation visant à identifier des paramètres mécaniques, sur des assemblages de pierres calcaires jointoyées au mortier de chaux. Il s'agit d'expérimentations de compression/cisaillement sur des triplets de pierre qui présentent des joints courbes. Les essais ont fourni des données mécaniques révélant le comportement non linéaire des joints courbes. Les résultats ont permis de caractériser les comportements mécaniques, d'identifier les phases de fissuration, et de déterminer des paramètres clés, tels que le coefficient de frottement moyen (μ) et la raideur initiale de l'interface (K). Les observations ont également montré l'effet de la position de l'éprouvette lorsqu'elle est placée « à l'endroit » ou « à l'envers » sur les fissures et sur la résistance au cisaillement. En perspective, cette campagne expérimentale permettra de valider des approches de calcul hybride associant des modèles éléments discrets et éléments finis.

Mots-clés joint courbe, maçonnerie, pierre calcaire, compression/cisaillement, expérimentation

I. INTRODUCTION

Ce travail se place dans le contexte de la compréhension du comportement mécanique des édifices anciens en pierre de taille. De nombreuses méthodes numériques sont en développement en vue de pouvoir caractériser le comportement mécanique de ce type d'ouvrage (d'Altri et al, 2020). Dans les méthodes de modélisation dites bloc à bloc, la caractérisation expérimentale des interfaces pierre-mortier est nécessaire pour alimenter les lois de contacts régissant l'interaction entre les blocs. L'objet de l'article est de présenter une campagne de caractérisation de ces interfaces sur des assemblages de pierres (triplet) mis en œuvre avec des joints courbes et sollicités en compression/cisaillement. Les tests ont été réalisés au laboratoire I2M, département GCE, à Bordeaux, sur la plateforme labellisée Xyloplate. Ces essais s'inscrivent dans le cadre d'une thèse en architecture menée à l'école de Paris Malaquais, visant à mieux comprendre le rôle mécanique des arcs présentant des joints à emboîtement.

On entend par joints à emboîtement le fait que les surfaces de contact entre les pierres ne sont pas planes et qu'elles s'interpénètrent. Ce type de joint, ne fait que rarement l'objet d'études mécaniques. S'ils sont rares en France, ils sont pourtant courants dans le patrimoine en taille de pierre, notamment dans l'architecture musulmane du XIII^e s. (Naby, 2014).

Les tests sur des assemblages de pierres à joints plans sont couramment effectués en mode I (traction), ou en mode II (cisaillement). A titre d'exemple, des essais mécaniques sur triplets soumis à des efforts de compression/cisaillement (Venzal et al., 2020) ou sur duos soumis à des efforts de traction cyclique (Peng et al., 2022) ont récemment permis de caractériser les interfaces pierre mortier de joints plans. Ils ont conduit à l'identification de paramètres mécaniques en mode I (traction) et mode II (cisaillement) tels que la raideur de l'interface ($K [Pa/m]$), la contrainte cohésive ($\sigma [Pa]$), l'énergie de fissuration ($G [J/m^2]$) ou le coefficient de frottement (μ). Il ressort de ces études expérimentales que les interfaces présentent des comportements fortement non linéaires mettant en jeu divers mécanismes dissipatifs. Sur les essais de compression/cisaillement, Venzal et al. (ibid.) observe une transition progressive entre une phase purement cohésive liée à l'endommagement vers une phase purement frictionnelle à mesure que le déplacement de cisaillement imposé à la pierre centrale augmente (la clé). Parallèlement, Peng et al. (ibid.) expose des résultats concernant des essais cyclés de traction directe mettant en évidence des mécanismes non linéaires tels que l'endommagement caractérisé par une perte de raideur de l'interface et des phénomènes de plasticité révélés par des déplacements résiduels constatés après chaque décharge. Ces recherches récentes démontrent la richesse et la complexité du comportement mécanique des interfaces pierre-mortier à joints plans. A partir de ce constat, le présent article vise à obtenir les réponses mécaniques de triplet à joints courbes soumis à des efforts de compression/ cisaillement pour comprendre et analyser leur fonctionnement mécanique.

Par ailleurs, la courbure des joints de mortier devrait entraîner une réponse hybride de l'interface combinant à la fois de la traction et du cisaillement avec frottement de l'interface pierre/mortier et de la compression/cisaillement dans les joints de mortier. La complexité et la diversité des mécanismes de rupture non linéaires de ce type d'essai permettrait donc de disposer d'un cas d'étude pertinent pour la validation de modèles micro détaillés tel que le modèle hybride développé dans le cadre du projet ANR DEMMEFI. Ce type de modèle implémenté dans le logiciel éléments discrets LMGC90 cherche en effet à simuler à la fois les non linéarités observées dans les interfaces à travers une loi de contact cohésive frictionnelle FCZM (Venzal, 2020) et dans les blocs calcaires à travers un modèle d'endommagement développé dans un cadre éléments finis (Boukham et al., 2024).

L'article se divise en deux parties, la présentation du protocole expérimental, et les résultats et leurs discussions.

II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Les triplets sont composés de pierres calcaires de St Maximin, franche fine mesurant $15 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, l'aspect de taille des joints est brettelé. La taille des éprouvettes a été réalisée manuellement au ciseau à main et pneumatique fig. 1(a). Un gabarit est placé sur la face de la pierre (panneau de tête), il permet de tracer le profil recherché. Une fois que la moulure composée de deux filets et d'un talon est taillée par épannelage (discrétisation de plan), le bloc est coupé à l'aide d'un zag (scie à pierre) fig. 1(b) puis retravaillé avec un chemin de fer (rabot à pierre).



(a)

(b)

(c)

FIGURE 1. (a) Taille des sommiers au ciseau droit (b) Coupe au zag et (c) Éprouvettes assemblées dans des gabarits.

Avant d'assembler les triplets, les pierres sont immergées dans l'eau pendant une nuit. Le mortier est dosé en volume à trois doses de sable pour une dose de chaux, avec de la NHL 2. L'épaisseur de joint est de 7 mm. Les éprouvettes sont assemblées dans des gabarits fig. 1(c), les joints sont fichés (remplis au fer à joint). Les gabarits permettent d'obtenir des triplets parallélépipédiques avec au moins deux faces de référence perpendiculaires. Ensuite, les triplets reposent verticalement et sont pulvérisés avec de l'eau pendant 8 jours pour optimiser la cure de mortier. Afin d'avoir une résistance de mortier suffisante, on attend 3 mois de séchage en salle de conditionnement avant les tests.

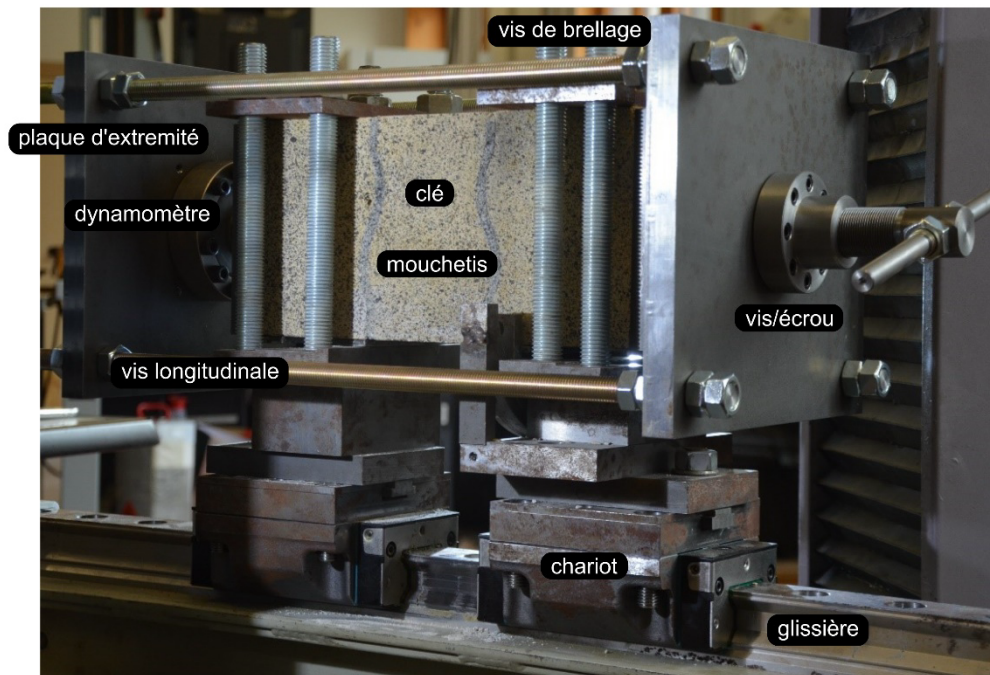


FIGURE 2. Montage pour l'essai de compression/cisaillement.

Le montage expérimental (fig.2) permet la réalisation d'essais sur triplets sollicités en compression/cisaillement. L'effort normal aux joints est préalablement appliqué à l'intérieur d'un châssis constitué de deux plaques d'extrémité retenues par quatre visse longitudinales. Ce dispositif est équipé d'un dynamomètre et d'un système de vis-écrou permettant de mesurer et d'asservir manuellement l'effort normal en temps réel.

Ensuite, le triplet est positionné sur les deux appuis d'extrémité montés sur des chariots permettant d'assurer une liaison glissière entre les pierres et le bâti. Un brellage des pierres d'extrémité est réalisé pour limiter la flexion parasite due à l'effort vertical. L'essai est asservi en déplacement vertical de la traverse qui appuie sur la clé sollicitant les joints du triplet en cisaillement. Cet asservissement permet de ne pas subir d'instabilité liée à la libération de l'énergie élastique au pic de force. On obtient ainsi la partie adoucissante de la loi de comportement.

Pendant l'essai, la contrainte normale est régulée avec le système de vis-écrou en tenant compte de la diminution de la surface effective projetée (ou équivalente) des joints liée à la descente de la clé. On appelle ici la surface équivalente projetée dans le plan transversal présentant donc des dimensions initiales largeur * hauteur de l'éprouvette.

Le suivi des déplacements des 3 blocs est assuré par des caméras positionnées de part et d'autre de l'éprouvette. D'un côté, un mouchetis est réalisé pour analyser par corrélation d'images les champs de déplacement de la surface latérale du triplet. De l'autre, huit jauges virtuelles (fig. 3) sont placées sur l'éprouvette afin de suivre en temps réel les déplacements des huit points positionnés.

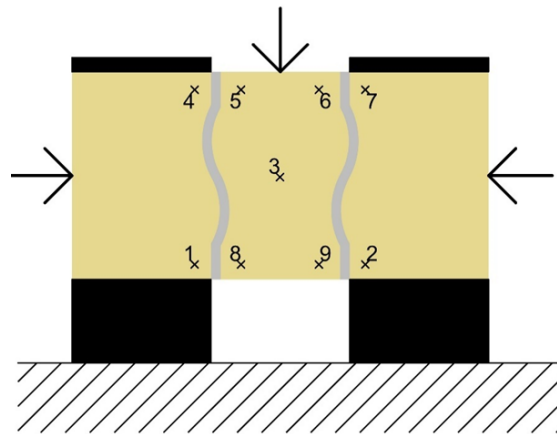


FIGURE 3. Triplet de pierre avec joint courbe à double lit brisé, emplacement des jauges et direction des efforts.

Au total, 12 éprouvettes ont été testées de la manière suivante :

- 9 éprouvettes avec 3 niveaux de contrainte normale constante allant de 0,2 MPa, 0,3 et à 0,4 MPa. (3 éprouvettes par niveau de contrainte).
- 1 éprouvette « à l'endroit », sans asservissement de contrainte normale.
- 1 éprouvette « à l'envers », à 0,3 MPa de contrainte normale.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans un premier temps, cette partie expose les résultats des essais asservis en contraintes normales, puis compare entre un essai positionné « à l'endroit » et un autre « à l'envers ».

a) Résultats des tests avec une contrainte normale effective asservie et maintenue constante.

La figure 4 présente la réponse mécanique contrainte-déplacement d'une éprouvette soumise à une contrainte normale de 0,3 MPa. La contrainte de cisaillement équivalente représente le rapport de l'effort vertical appliqué par la traverse à la clé sur la somme des 2 surfaces cisailées équivalentes (une pour chaque joint de mortier). Le déplacement de la pierre centrale correspond au suivi de la jauge 3 positionnée au centre de l'éprouvette.

On constate un comportement linéaire, une perte de linéarité avant le pic de contrainte et un écrouissage négatif tendant vers un régime asymptotique correspondant au plateau purement frictionnel. Cette forme est caractéristique d'une interface quasi-fragile sollicitée en compression/cisaillement (Venzal et al., *op. cit.*).

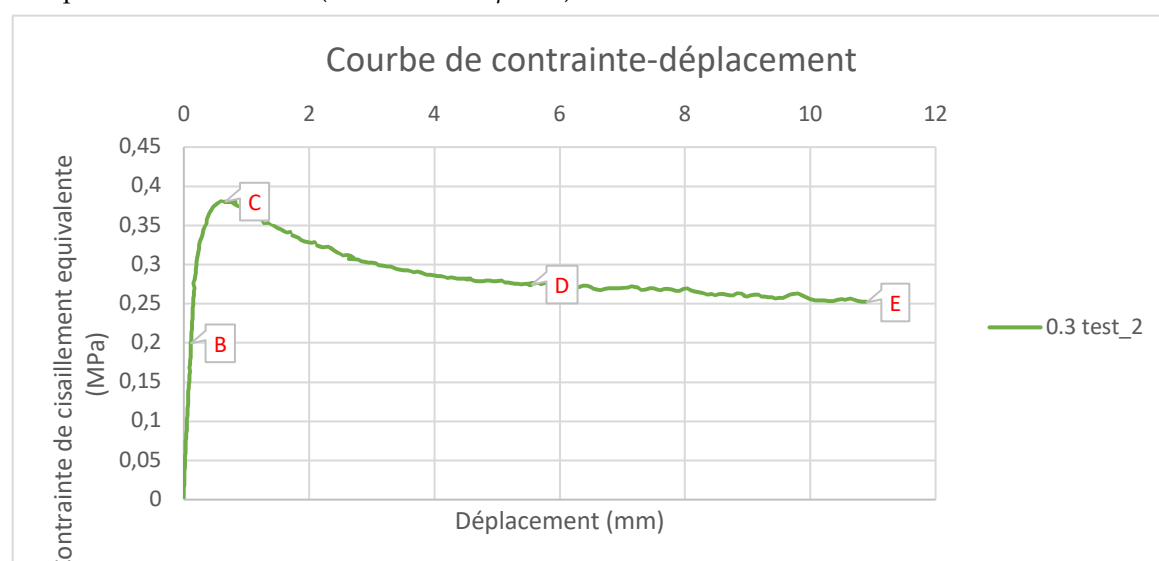


FIGURE 4. Courbe de contrainte/déplacement analyse des domaines de fissuration.

- La première partie (AB) est le domaine élastique (domaine linéaire de la courbe), correspondant au comportement réversible et cohésif de l'assemblage, il n'y a pas d'endommagement du joint.
- Un écrouissage positif se dessine ensuite le long de la branche (BC), la raideur K diminue, car des microfissures se forment entraînant la décohésion de l'interface, mais la contrainte de cisaillement σ_{cis} augmente jusqu'au pic (C).
- Le pic de contrainte (C) correspond à la contrainte maximale de cisaillement, $\sigma_{cis,max}$ soit la résistance en cisaillement de l'interface.
- La transition entre le domaine élastique et le frottement se dessine entre B et D. Elle marque le couplage entre décohésion du joint et frottement sur la surface fissurée, il s'agit d'un comportement à la fois cohésif et frictionnel.

- Enfin, la partie post-pic se termine par un plateau frictionnel à partir du point D, le palier de frottement (DE) est caractérisé par une contrainte résiduelle équivalente $\sigma_{res,eq}$. Elle représente la contrainte de frottement d'un joint plan équivalent une fois l'interface complètement endommagée.

La corrélation d'image permet de connaître les déplacements et les déformations à chaque stade de la courbe (fig. 4). On cherche ainsi à interpréter en chaque point les champs de déformation et les mécanismes de rupture. Pour les images d'analyse présentées, l'échelle de couleur représentant les déplacements et déformations est variable. On nomme « U » les déplacements horizontaux, « V » les déplacements verticaux, « ε_{xx} » les déformations horizontales, « ε_{xy} » les déformations de cisaillement dans le plan xy et « ε_{yy} » les déformations verticales.

Jusqu'au point B, on se situe dans la phase cohésive linéaire, les déformations sont de l'ordre de 10^{-2} mm. On peut faire les constatations suivantes :

- L'ensemble de la structure descend c'est le phénomène de mise en charge, la clé est descendue plus que le reste, soit 0,01 mm (fig. 5 (a)).
- La partie supérieure des sommiers et de la clé est descendue davantage que leur partie inférieure, ce qui atteste d'une légère déformation en compression verticale du bloc central.
- Un léger déplacement horizontal des sommiers vers l'extérieur, de l'ordre de 10-2 mm est observé.
- Légère déformation « ε_{xy} » en partie haute (fig. 5(b)) atteste un début de cisaillement de la partie verticale supérieure des joints de mortier.

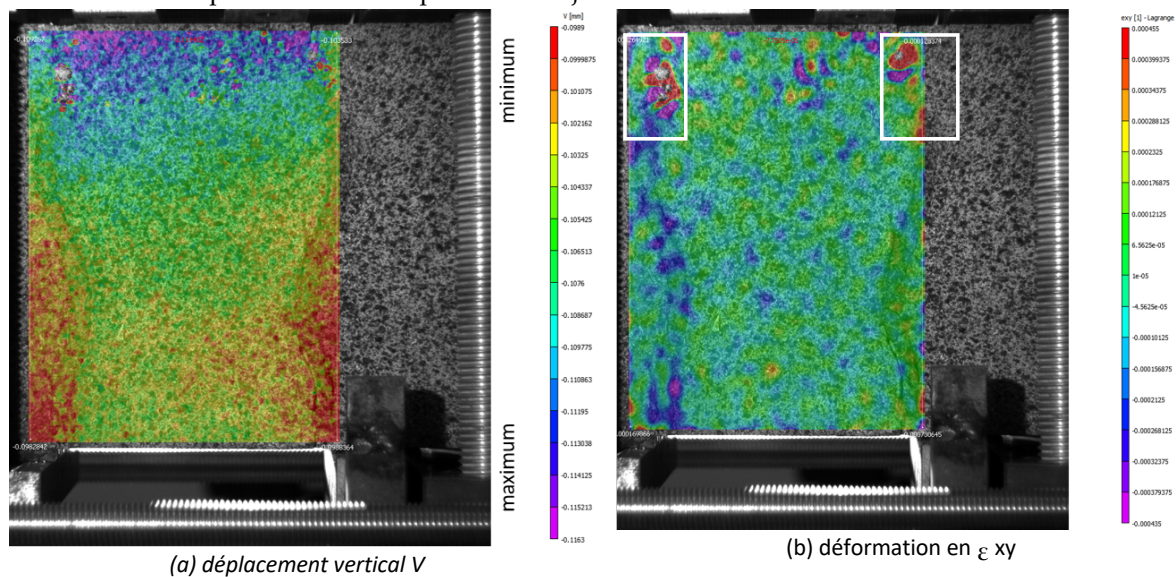


FIGURE 5. Champs de déplacement et de déformation au point B

Au pic de contrainte (fig. 6), on observe :

- Un déplacement vertical relatif des blocs (fig. 6(b)) et le cisaillement des interfaces constaté (fig. 6(e)) atteste le rôle de fusible du joint de mortier lorsqu'il est sollicité en

compression cisaillement. La fig. 6(e) indique les emplacements où a lieu la décohésion entre la pierre et le mortier. Sur le joint clé/sommier droit, on observe une déformation côté clé en partie supérieure. La partie inférieure montre une déformation à l'interface mortier/sommier.

- On observe par ailleurs la formation de rotules (fig. 6(a) et (c)) occasionnée par la rotation du sommier gauche. La partie inférieure du sommier connaît un déplacement horizontal plus important que la partie supérieure. La déformation horizontale « ε_{xx} » des joints (fig. 6(c)) confirme le phénomène. Les parties supérieures du joint se referment tandis que les parties inférieures s'ouvrent.
- On observe une déformation « ε_{yy} » (fig. 6 (d)) importante qui se situe au joint au niveau du point d'inflexion. Le mortier est comprimé verticalement au niveau du point d'inflexion (violet) tandis qu'il est tendu verticalement à la jonction des parties courbe et plane.

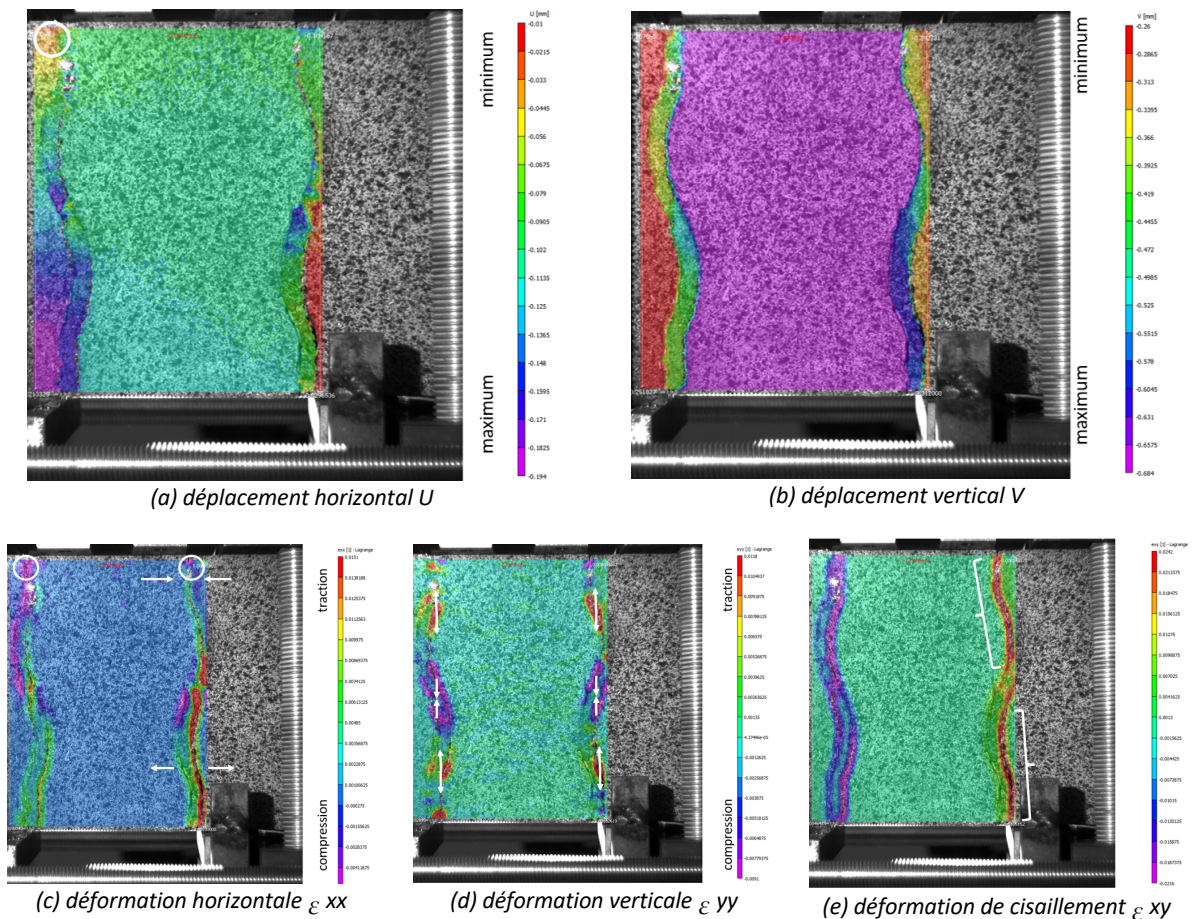


FIGURE 6. Champs de déplacement et de déformation au pic de contrainte (point C)

Les réponses contraintes *vs* déplacement pour chaque niveau de contrainte normale sont tracées en fig. 7. Quel que soit le niveau de contrainte normale, on constate des allures de courbes similaires à

celle présentée précédemment en fig. 4. Globalement, le mécanismes de rupture pour ces neuf essais sont analogues à ceux présentés précédemment en fig. 6 et 7.

Ces courbes de comportement permettent d’identifier les paramètres frictionnels et cohésifs. Une synthèse de ces paramètres par niveau de contrainte normale est présentée dans le tableau 1. La raideur initiale de l’interface K (Pa/m) est déterminée manuellement par régression linéaire de la partie élastique. La contrainte équivalente au pic $\sigma_{cis,max}$ correspond au maximum de la courbe et la contrainte frictionnelle équivalente correspond à la valeur asymptotique de la contrainte en fin d’essai.

On remarque une dépendance des courbes à la contrainte normale. Ainsi la raideur K , la contrainte équivalente de cisaillement au pic $\sigma_{cis,max}$, et la contrainte résiduelle équivalente $\sigma_{res,eq}$ augmentent avec la contrainte normale σ_N appliquée tab. 1. Cette observation s’explique par le fait que l’on mobilise d’autant plus de frottement que la contrainte normale est élevée.

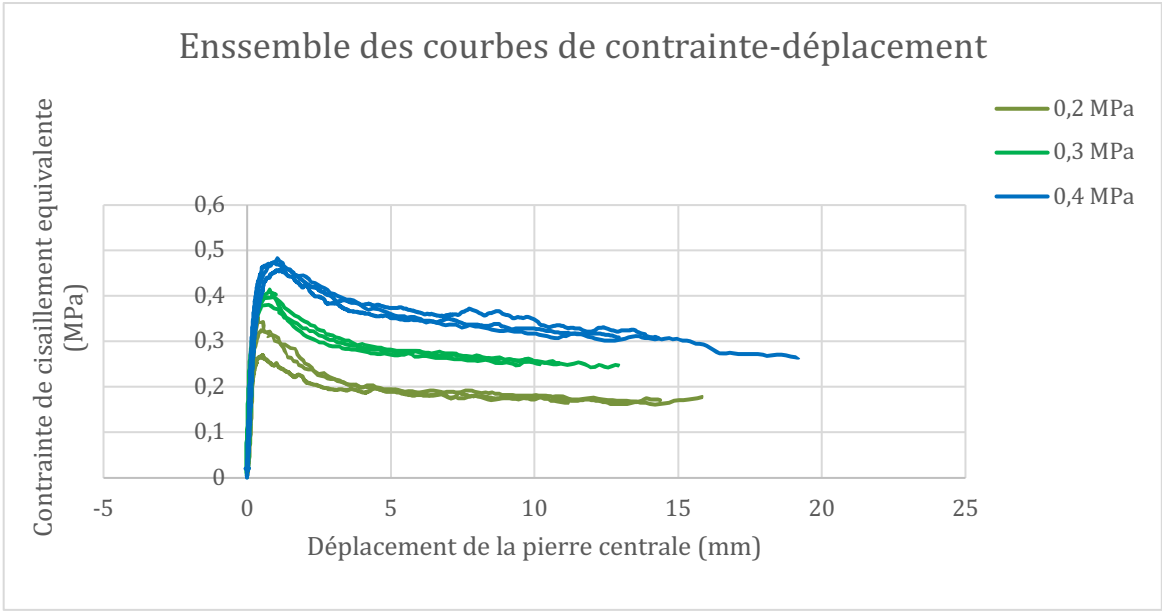


FIGURE 7. Ensemble des courbes de la contrainte de cisaillement équivalente en fonction du déplacement de la pierre centrale.

TABLEAU 1. Paramètre mécanique des tests avec une contrainte normale asservie.

Contrainte normale appliquée	Raideur K (MPa/mm) (CV en %)	Contrainte équivalente au pic $\sigma_{cis,max}$ (MPa) (CV en %)	Contrainte frictionnelle $\sigma_{res,eq}$ (MPa)
0,2 moy	1,34 (8%)	0,32 (13%)	0,17 (3%)
0,3 moy	1,45 (14 %)	0,40 (4%)	0,25 (1%)
0,4 moy	1,55 (18%)	0,47 (3%)	0,29 (9%)

Avec en moyenne une variation de 13 % pour la raideur K et 7 % pour la contrainte au pic $\sigma_{cis,max}$, la dispersion reste relativement faible du fait de la maîtrise des conditions aux limites de l'essai expérimental. Cette faible variabilité peut s'expliquer par :

- L'hétérogénéité du joint, présence de vide et de bulles d'air, due au fichage (remplissage) du triplet.
- L'hétérogénéité naturelle des pierres (porosité).
- Le temps de séchage hors de la salle de conditionnement, variabilité de 3 jours.
- La géométrie des pierres et des éprouvettes (planéité, taille des surfaces de joints).
- La difficulté de maintenir une épaisseur constante du joint.

Enfin, le coefficient de frottement équivalent μ de l'interface pierre-mortier peut être déterminé par régression linéaire de la courbe de contrainte résiduelle équivalente $\sigma_{res,eq}$ en fonction de la contrainte normale σ_N appliquée. On obtient un coefficient de frottement moyen $\mu = 0,61$. Cette valeur est plus faible que celle observée sur un joint de mortier plan de même épaisseur et constitué des mêmes matériaux $\mu = 0,7$ ce qui révèle un comportement frictionnel postrupture moins performant pour le joint courbe que pour le joint plan. L'étude des mécanismes de rupture présentés dans la suite permettra d'expliquer ce résultat.

Les résultats des essais publiés par (Boukham et al, *op. cit.*) montrent que dans le cas des joints plans pour une contrainte normale appliquée à 0,4 MPa, la contrainte équivalente au pic $\sigma_{cis,max}$ est de 0,56 MPa en moyenne avec un écart type de 3%. Pour les joints courbes, on a $\sigma_{cis,max}$ de 0,47 MPa, les joints plans sont donc 19 % plus résistants que les joints courbes.

b) Comparaison des comportements mécaniques entre les éprouvettes testées « à l'endroit » et l'éprouvette placée « à l'envers » asservie à 0.3 Mpa.

Une éprouvette a été placée dans la presse « à l'envers », c'est-à-dire que l'ensemble du triplet a été retourné de 180°. La partie concave de la clé se retrouve ici en partie supérieure (fig. 9). Le triplet est asservi avec une contrainte normale de 0,3 MPa. La courbe de réponse contrainte/déplacement de cet essai (fig. 8) est tracée en comparaison des résultats moyens obtenus précédemment pour les éprouvettes positionnées « à l'endroit » pour les 3 niveaux de contrainte (0,2, 0,3 et 0,4 MPa)

On constate que :

- Pour l'éprouvette « à l'envers », la résistance en cisaillement au pic ($\sigma_{cis,max} = 0,37$ MPa) est légèrement inférieure aux résistances des éprouvettes « à l'endroit » asservies à la même contrainte normale (0,3 MPa).
- La raideur de ($K = 1,62$ MPa/mm) se trouve dans le même ordre de grandeur que les essais à l'endroit asservis à 0,3 MPa.
- Le plateau frictionnel est plus bas, ce qui indique un comportement au frottement moins performant pour une éprouvette « à l'envers ».

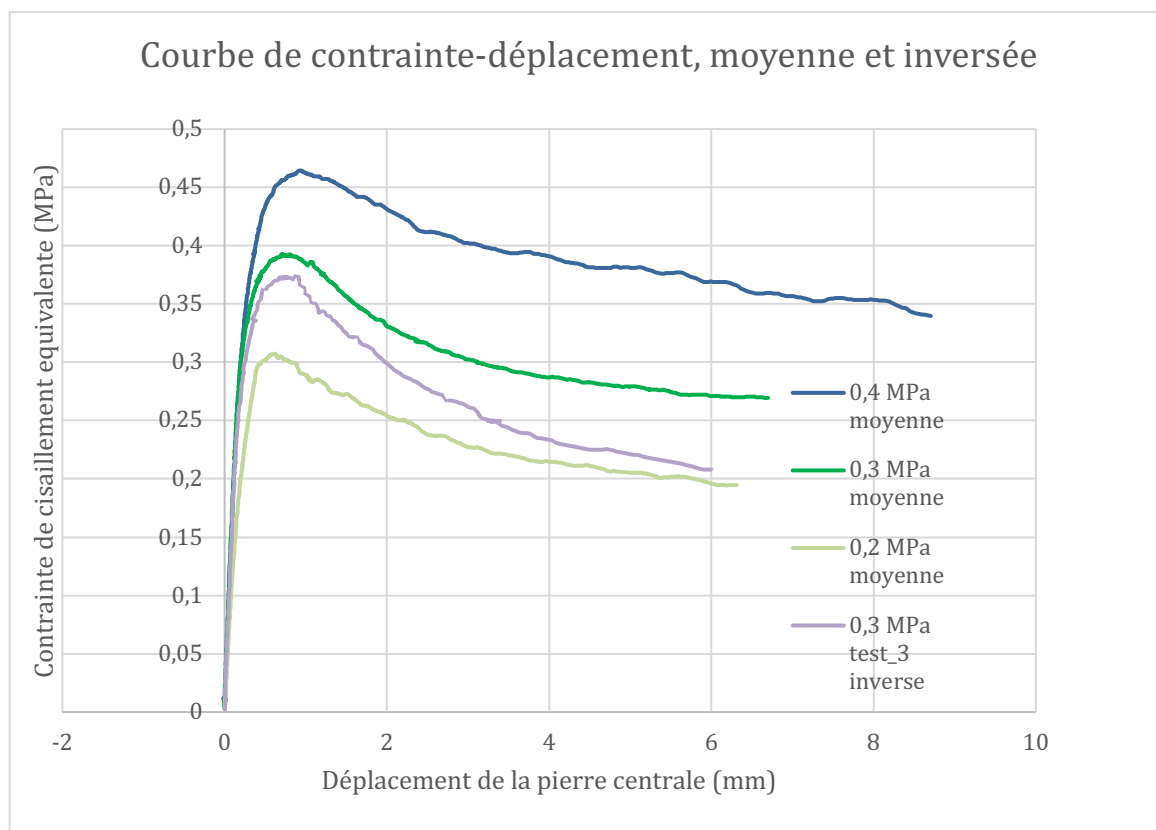


FIGURE 8 Comparaison des courbes contrainte/déplacement moyenne avec une éprouvette placée « à l'envers » asservie à 0,3 MPa.

Pour les éprouvettes placées « à l'endroit » ou « à l'envers », le trajet de la fissure est rectiligne et forme quasiment une droite (fig. 9) minimisant le travail à fournir pour propager la fissure. La comparaison des trajets de la fissure entre l'éprouvette « à l'endroit » et celle « à l'envers », montre que la fissure se propage le long de l'interfaces et traverse trois fois le mortier dans le cas de l'éprouvette placée « à l'envers » et une fois pour l'éprouvette « à l'endroit ».

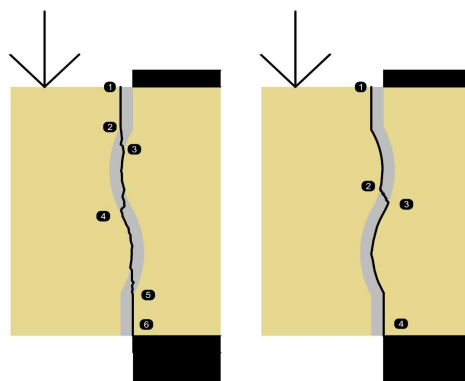


FIGURE 9. Annotation des points de passage de la fissure, à gauche éprouvette placée « à l'envers », à droite éprouvette placée « à l'endroit ».

Dans les deux cas, le mécanisme de rupture est assez complexe, il y a plusieurs types de fissures. Les fissures liées à la traction et celles liées au cisaillement. Une fissure qui s'amorce en mode I (en ouverture normale au joint) travaille en traction/cisaillement, dans ce cas, c'est l'interface qui cède. Tandis qu'au niveau des zones comprimées, il s'agit de compression/ cisaillement, c'est le joint qui fissure. La corrélation d'images (fig. 10) et les photographies des joints après rupture (fig. 11) permettent d'observer que :

- Pour l'éprouvette « à l'envers », deux zones sont comprimées et une zone est tendue.
- Pour l'éprouvette « à l'endroit », deux zones sont tendues et une zone est comprimée.
- Les profils de fissuration sont communs pour toutes les éprouvettes placées à l'endroit. Nous ne pouvons pas faire de généralité pour l'éprouvette « à l'envers », car il n'y a qu'un exemple.

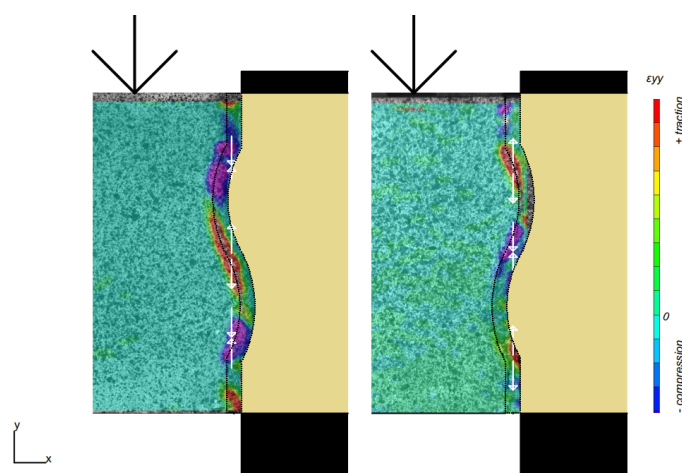


FIGURE 10. Déformations verticale ε_{yy} , observée lors du test de cisaillement. A gauche éprouvette placée « à l'envers », à droite éprouvette placée « à l'endroit ».



FIGURE 11. Fissuration interfaciale observée lors du test de cisaillement. A gauche éprouvette placée « à l'envers », à droite éprouvette placée « à l'endroit ».

V. CONCLUSION

L'article a permis de passer en revue le comportement mécanique des éprouvettes sous différentes contraintes normales constantes. La comparaison des éprouvettes placées « à l'endroit et » à

l'envers » a permis mettre en évidence le comportement mécanique de ce type de joints dans les deux sens. Les principales conclusions de l'étude sont les suivantes :

- Pour les tests avec une contrainte asservie, on observe une certaine répétition des essais, permettant de valider la démarche expérimentale.
- En compression/cisaillement, il y a une dépendance de plusieurs paramètres mécaniques (contrainte maximale, contrainte résiduelle, raideur) vis à vis de la contrainte normale appliquée.
- Pour une contrainte normale de 0,4 MPa, les joints plans ont une résistance équivalente maximum au pic, plus importante que les joints courbes.
- Les joints plans ont un coefficient de frottement plus important que les joints courbes.
- Le sens de l'éprouvette influe sur la résistance mécanique, contrainte de cisaillement maximum, comportement au frottement et profil de fissuration de l'interface. Cette comparaison montre des profils de fissurations divers, dépendant des zones comprimées et tendues.
- Ce type d'essais mobilise le comportement des interfaces en traction/cisaillement et compression/cisaillement.

En perspective, la confrontation des réponses expérimentale et simulée numériquement pourra contribuer à nourrir la connaissance du comportement des joints courbes et plus largement des joints à emboîtement. Ce type d'essais pourra être un cas de validation d'un modèle hybride développé actuellement qui permet de tenir compte de la non linéarité de comportement à la fois dans les interfaces et dans les matériaux continus (blocs et joint mortier).

Remerciements

Merci à toutes les personnes qui ont aidé à élaborer ces expériences. S. Morel, T. Parent, B. Solbes, A. Boukham du laboratoire I2M. La société Rocamat avec Carla Pani pour le don de pierre.

RÉFÉRENCES

D'Altri, A.M., Sarhosis, V., Milani, G., Rots, J., Cattari, S., Lagomarsino, S., Sacco, E., Tralli, A., Castellazzi, G., de Miranda, S., 2019. Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification. Arch Computat Methods Eng. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09351-x>

Boukham, A., Venzal, V., Parent, T., Morel, S., Dubois, F., Solbes, B., 2023. 3D hybrid modelling approach combining the finite and discrete element methods: Validation based on masonry shear wall tests. International Journal of Solids and Structures 112638. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112638>

Peng, Shuang, Thomas Parent, Zoubir Mehdi Sbartaï, et Stéphane Morel. (2022). Experimental characterisation of masonry unit–mortar interface under uniaxial cyclic

tension. Engineering Fracture Mechanics 274 (octobre).
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108790>.

Venzal, V., S. Morel, T. Parent, et F. Dubois. (2020). Frictional Cohesive Zone Model for Quasi-Brittle Fracture: Mixed-Mode and Coupling between Cohesive and Frictional Behaviors. International Journal of Solids and Structures 198 (août): 17-30.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.04.023>.

Naby, Heba. 2014. « The Treatment of the Architectural Unit above Openings of the Mamluk and Ottoman Facades in Cairo ». Journal of Islamic Architecture 3 (septembre): 82.
<https://doi.org/10.18860/jia.v3i2.2541>.