

RÉSISTANCE LOCALE DE L'INTERFACE ENTRE UN ENDUIT ISOLANT PROJÉTÉ ET SON SUPPORT BÉTON

Mathieu EYMARD¹, Pascal PERROTIN¹, Jean-Patrick PLASSIARD¹, Stéphane LE FAY²

¹ Laboratoire LOCIE, Campus scientifique, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget du Lac, France.
mathieu.eymard@univ-savoie.fr

² Société PAREXLANKO, 38 rue du Montmurier, 38070 Saint Quentin Fallavier, France.

1. INTRODUCTION

Pour répondre à des besoins de réhabilitation du bâtiment, d'un point de vue thermique (comme structurel), l'ajout d'une couche directement sur la structure porteuse peut être une solution intéressante. Cette configuration pose le problème de l'étude de l'interface entre ces deux matériaux. En effet c'est par celle-ci que transite une partie des efforts appliqués à la structure porteuse. Lors de sollicitations, cette interface peut donc être soumise à de multiples couples de contraintes normales et tangentielles. Afin de pouvoir déterminer le critère de rupture de l'interface, il est nécessaire de connaître, expérimentalement, un nombre suffisant de points représentatifs, donc d'états de contraintes à l'interface lors de sa rupture. Dans la littérature, de nombreux essais à l'échelle locale permettent de soumettre une interface à différents états de contraintes, que ce soit en traction pure ou par une combinaison de traction ou de compression avec du cisaillement (voir Figure 1). D'après [MOM 05], chacun de ces essais donne une information partielle sur le comportement de l'interface. Etant donné les différences au niveau de la géométrie des éprouvettes et/ou du mode d'application de la charge, il peut être difficile de comparer directement ces essais les uns avec les autres, les résistances obtenues étant fonctions du type d'essai réalisé. Pour cette étude nous nous sommes limités volontairement à deux types d'essais couramment maîtrisés. L'essai de traction uniaxiale (voir Figure 1, (a)) qui n'est pas présenté ici et l'essai slant-shear (voir Figure

1, (e)). Il soumet l'interface à une combinaison de contraintes de compression et de cisaillement et permet, en faisant varier l'angle d'interface, de soumettre celle-ci à différents états de contraintes. En poursuivant chaque essai jusqu'à rupture, ceux-ci doivent permettre de caractériser la résistance de cette interface et le type de critère la régissant.

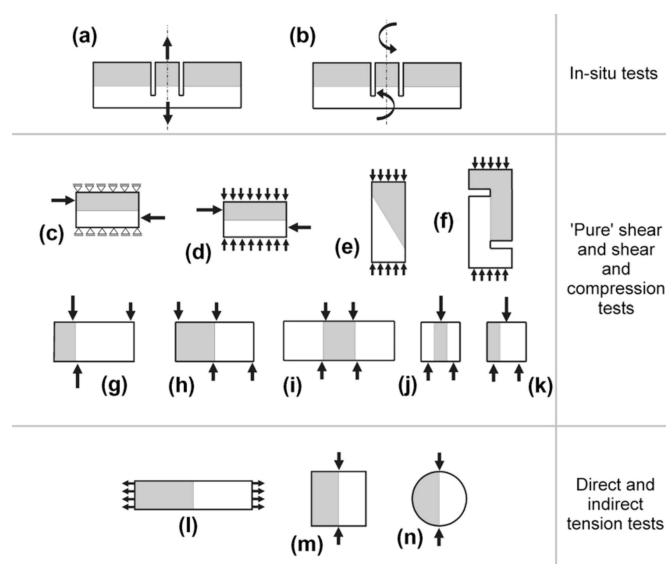


Figure 1. Représentation schématique des différents essais pour la mesure de la résistance d'une interface, d'après [ESP 11].

2. CONTEXTE ÉCONOMIQUE ET INDUSTRIEL

La réhabilitation est un défi majeur pour assurer la pérennité du parc immobilier français, dont le taux de renouvellement est inférieur à 1% par an, en sachant que, pour les logements, près de 70% ont été construits avant 1974. On estime que plus de la moitié des bâtiments qui existeront en France en 2050 existent déjà et que cette part du parc représentera au moins les trois quarts des consommations d'énergie de l'ensemble des bâtiments en 2050. Par conséquent, d'un point de vue thermique, des efforts importants sont nécessaires pour satisfaire à l'évolution des normes qui vont dans le sens d'une économie toujours plus importante en énergie, notamment avec la RT2012 qui impose une consommation moyenne de $50 \text{ kWh}_{\text{EP}}/(\text{m}^2.\text{an})$. Cette solution de réhabilitation thermique est développée par l'entreprise PAREXLANKO dans le but de répondre efficacement à ces problématiques, en fournissant un complément d'isolation pour les bâtiments anciens, de manière à satisfaire les nouvelles normes en vigueur. Le laboratoire LOCIE fait parti de ce projet et a pour objectifs de déterminer les performances thermiques, non discutées ici, ainsi que le comportement mécanique de cette solution de réhabilitation thermique par l'extérieur, appliquée par projection.

3. L'ESSAI SLANT-SHEAR DANS LA LITTÉRATURE

3.1. Origine

Cet essai a été initialement créé pour mesurer l'adhérence entre deux matériaux résineux [AST 83]. Cependant, il est aussi largement référencé dans la littérature [AUS 99 ; JUL 04 ; JUL 06 ; MOM 05 ; SAN 07 et SAN 11] et dans plusieurs normes internationales [AST 83 et BSI 84] pour

déterminer la résistance de liaison entre deux matériaux à base cimentaire. Il est utilisé en particulier avec un substrat en béton ou mortier et une couche d'ajout du même type qui possède généralement de meilleures caractéristiques mécaniques. Cet essai sert donc aussi pour mesurer la résistance d'un renfort structural. Il est généralement utilisé en compression avec un angle d'interface α de 30° (voir Figure 2). [AUS 99] a produit une étude sur cet essai en traction, et en faisant varier l'angle de l'interface, tel que $0, 15, 30, 45$ et 60° .

3.2. Influence des paramètres expérimentaux

De nombreux paramètres expérimentaux pouvant influencer sur la résistance, ainsi que sur le mode de rupture de l'éprouvette, ont été identifiés [JUL 04 ; JUL 06 ; MOM 05 ; SAN 07 et SAN 11]. Il ressort de ces travaux que la résistance de l'interface dépend principalement de :

- la propreté du substrat. Les poussières et autres impuretés peuvent dégrader la liaison de manière significative,
- l'angle de l'interface a une influence sur le mode de rupture. Il existe une orientation d'interface à partir de laquelle la rupture passe d'un mode adhésif (correspondant à une rupture de l'interface, voir Figure 3) à un mode cohésif (par rupture en compression du matériau le plus faible mécaniquement). En effet, lorsque α augmente, le rapport σ_n/τ augmente lui aussi, augmentant alors les chances d'obtenir une rupture au niveau du matériau ayant la plus faible résistance à la compression, les sollicitations en cisaillement étant trop faibles pour amener la rupture à l'interface,
- la rugosité de l'interface. De nombreux auteurs se sont penchés sur l'influence de ce paramètre en termes de résistance et de mode de rupture. En effet, une augmentation de la rugosité a tendance à améliorer la liaison, mais une macro-rugosité trop importante (créée mécaniquement sur la surface) peut fragiliser le support et donc

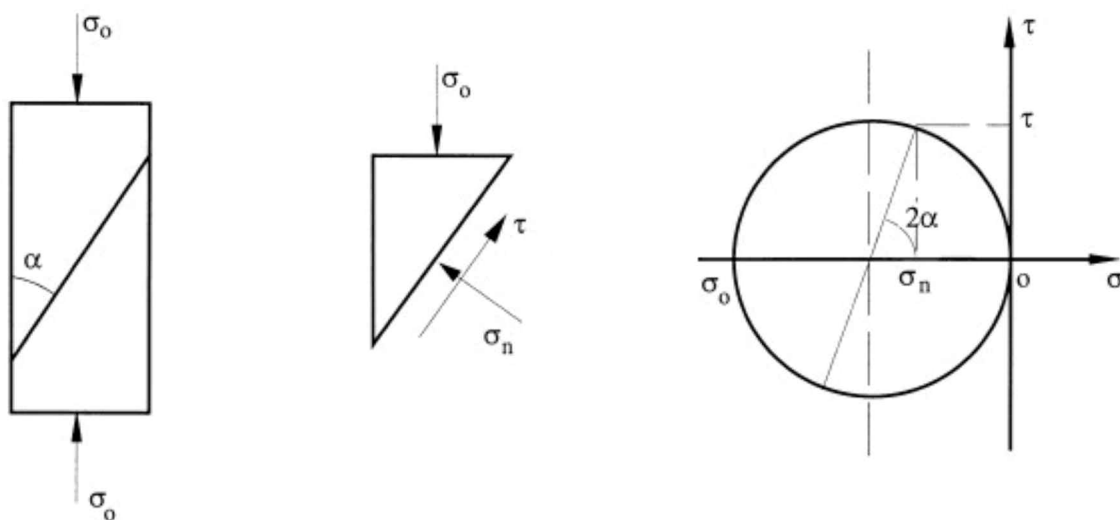


Figure 2. Principe de l'essai slant-shear et état de contrainte à l'interface déduit du repère de Mohr, d'après [AUS 99].

dégrader la pérennité de l'interface. Il est donc souvent préférable de créer une micro-rugosité, par l'intermédiaire d'un sablage par exemple. Il existe également une rugosité à partir de laquelle la rupture passe d'un mode adhésif à un mode cohésif, tout comme l'orientation de l'interface,

- les caractéristiques mécaniques du support et du matériau d'ajout, en particulier la différence de module d'Young entre les deux matériaux. Selon [AUS 99] cette différence équivaut à un excentrement de la charge appliquée lors de l'essai, et peut donc être à l'origine de concentrations de contraintes à l'interface.

4. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

4.1. Propriétés des matériaux

Le béton jouera ici le rôle de support structurel. Deux matériaux d'ajout sont testés, l'enduit de finition Monorex GF, considéré ici comme référence, et l'enduit isolant (à base d'aérogel, et dont la nature n'est pas discutée ici). Ces deux matériaux ont été ajoutés à leur support par projection. Le béton possède des propriétés mécaniques bien supérieures à l'enduit isolant, que l'on peut considérer comme très faible mécaniquement. Des essais de flexion trois points sur des éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm³ ont permis de déterminer les résistances en traction simple σ_t . Les essais de compression simple sur les demi éprouvettes restantes ont permis de déterminer la résistance à la compression σ_c , ainsi que le module d'Young E des matériaux (voir Tableau 1).

Matériau	E (MPa)	σ_c (kPa)	σ_t (kPa)
Béton (estimation)	30 000	Δ	Δ
Isolant	5,0	110	60
Monorex GF	200	2 900	1 300

Tableau 1. Propriétés mécaniques des matériaux

4.2. Expérimentations

Dans la configuration d'essai choisie, le support béton est situé en partie inférieure, et le matériau d'ajout en partie supérieure. La hauteur de l'éprouvette a été déterminée de manière à permettre une variation suffisante de l'angle d'interface (20, 25 et 30° par rapport à la verticale). L'éprouvette est un cylindre de 20 cm de diamètre et de 55 cm de hauteur. La répétabilité est testée avec 4 séries d'éprouvettes pour l'enduit isolant et 2 pour le Monorex GF. Le support béton a été moulé à l'aide d'une réservation en polystyrène usiné. De cette manière, la précision de l'angle d'interface est garantie. Afin de créer une micro-rugosité à la surface du support, celle-ci a été brossée à l'aide

d'une brosse métallique une fois le support démoulé. Un délai de 28 jours avant la projection du matériau d'ajout permet à la majeure partie du retrait du béton d'être effectuée. L'interface a été nettoyée à l'air comprimé avant la projection du matériau d'ajout. L'essai a eu lieu après 28 jours de séchage du matériau d'ajout. L'effort de compression est appliqué par un vérin électrique piloté en déplacement et possédant un appui rotulé (voir Figure 3). Les essais de traction uniaxiale (voir Figure 1, (a)) n'ont pas pu être exploités en raison d'une rupture des éprouvettes en traction, au sein de l'enduit isolant, et non à l'interface. Il est possible que le forage nécessaire avant cet essai ait fragilisé le matériau.

La corrélation d'images, avec le logiciel 7D développé par le laboratoire SYMME à Annecy-le-Vieux, a été utilisée afin d'obtenir les valeurs de déformations et de déplacements à la surface de l'éprouvette tout au long de l'essai.

4.3. Résultats expérimentaux

En premier lieu, les essais réalisés ont systématiquement donné lieu à une rupture adhésive (voir Figure 3), excepté pour un seul essai, référencé 2.30.C.a et concernant l'enduit Monorex GF. Le choix des orientations d'interfaces à 20, 25 et 30° permet donc ici l'utilisation des résultats en vue de déterminer le comportement mécanique de la liaison enduit-béton. Les contraintes normales et tangentielles moyennes à l'interface, $\sigma_{n,moy}$ et τ_{moy} ont été calculées d'après le principe de l'essai slant-shear (voir Figure 2), telles que :

$$\sigma_{n,moy} = \frac{F_{Rupt.}}{S_{int.} \cdot \sin(\alpha)} \quad [1]$$

$$\tau_{moy} = \frac{F_{Rupt.}}{S_{int.} \cdot \cos(\alpha)} \quad [2]$$

Avec $F_{Rupt.}$ l'effort maximal appliqué lors de l'essai, et $S_{int.}$ la surface totale de l'interface de l'éprouvette slant-shear. Le Tableau 2 présente les contraintes normales et tangentielles moyennées sur l'interface pour l'ensemble des essais. Comme attendu, les résultats sont plus faibles pour l'enduit isolant que pour le Monorex GF. La Figure 4 permet de comparer les critères expérimentaux obtenus. On y remarque que la cohésion est de 8 kPa pour l'enduit isolant et de 272 kPa pour le Monorex GF. Cependant, l'angle de frottement \varnothing obtenu pour les 2 matériaux est proche de 51°. Ce résultat semble indiquer que l'angle de frottement de l'interface dépend de la rugosité du support et non des caractéristiques mécaniques de l'enduit. Néanmoins, cette valeur est très élevée et une étude plus approfondie est nécessaire.

La Figure 5 montre un exemple de répartition des déplacements à la surface de l'éprouvette lors de l'essai juste avant la rupture. On remarque que les déplacements affectent particulièrement la zone supérieure de l'interface, laissant supposer la présence de concentrations de contraintes. Ce résultat indique que les paramètres du critère, obtenus par moyenne sur l'interface ne sont pas acceptables et qu'une étude plus poussée est nécessaire.

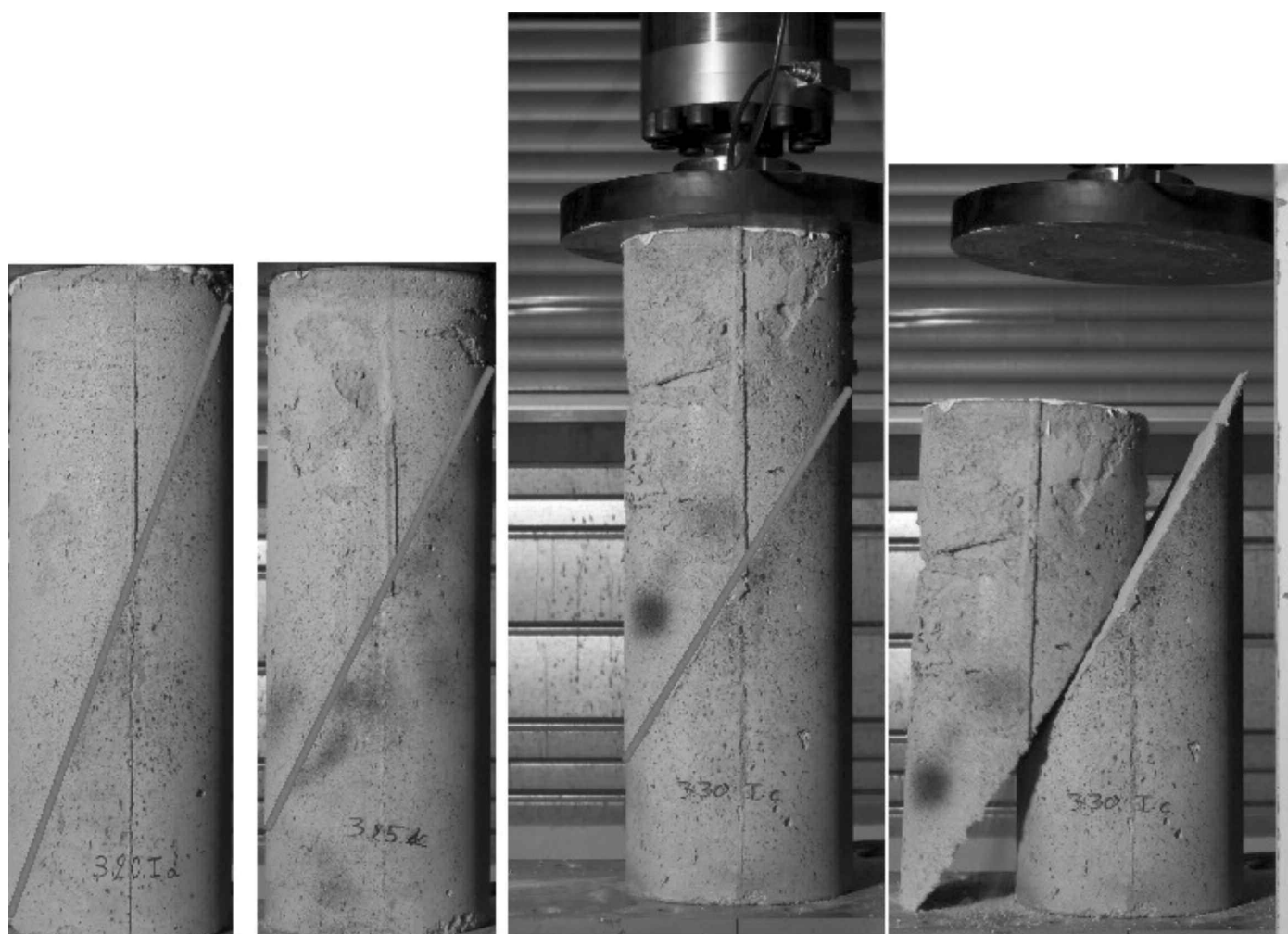


Figure 3. De gauche à droite, une éprouvette à 20°, 25° et 30° lors de l'essai et après rupture adhésive entre l'enduit isolant et son support.

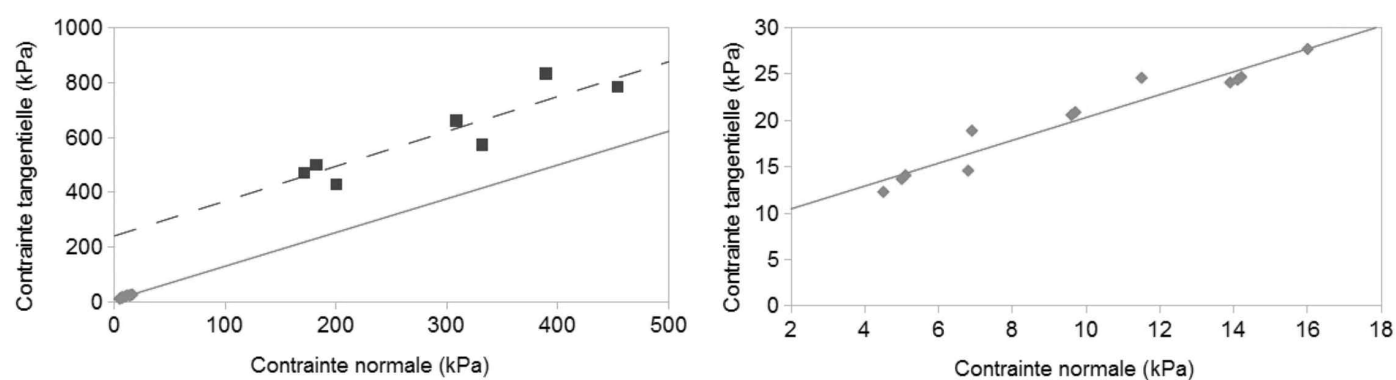


Figure 4. Critères expérimentaux obtenus par essais slant shear, en trait plein l'enduit isolant, en pointillés l'enduit Monorex GF.

5. MODÉLISATION AUX ÉLÉMENTS FINIS DU COMPORTEMENT DE L'ENDUIT ISOLANT

Pour quantifier ces concentrations de contraintes, et connaître les paramètres régissant la rupture à l'échelle locale, une étude numérique aux éléments finis a été réalisée. Les conditions expérimentales ont été reproduites avec le logiciel CAST3M.

Dans ce modèle 3D, le maillage (voir Figure 7) possède environ 140000 éléments. Le béton est considéré comme élastique étant donné la gamme d'efforts considérés. L'enduit isolant est modélisé par un comportement élasto-plastique de Drucker-Prager Parfait. L'interface est modélisée par des éléments JOINT de type élasto-plastique suivant la loi de Coulomb. La corrélation d'images (Figure 5) indique que le déplacement de la surface verticale de l'éprouvette est essentiellement vertical et relativement uniforme. En conséquence, des conditions similaires sont appliquées à la surface supérieure du modèle.

Référence	Matériau testé	FRupt. (kN)	$\sigma_{n,moy}$ (kPa)	τ_{moy} (kPa)
2.20.C.a	Monorex GF	42,38	171,2	470,4
2.20.C.b	Monorex GF	45,14	182,4	501,1
2.25.C.a	Monorex GF	63,07	389,1	834,4
2.25.C.b	Monorex GF	50,00	308,4	661,5
2.30.C.a	Monorex GF	–	Rupture	cohésive
2.30.C.b	Monorex GF	52,56	453,8	786,1
3.20.I.a	Enduit isolant	1,27	5,10	14,10
3.20.I.b	Enduit isolant	1,23	5,00	13,70
3.20.I.c	Enduit isolant	1,70	6,90	18,90
3.20.I.d	Enduit isolant	1,11	4,50	12,30
3.25.I.a	Enduit isolant	1,58	9,70	20,90
3.25.I.b	Enduit isolant	1,56	9,60	20,60
3.25.I.c	Enduit isolant	1,10	6,80	14,60
3.25.I.d	Enduit isolant	1,86	11,50	24,60
3.30.I.a	Enduit isolant	1,63	14,10	24,40
3.30.I.b	Enduit isolant	1,65	14,20	24,70
3.30.I.c	Enduit isolant	1,85	16,00	27,70
3.30.I.d	Enduit isolant	1,61	13,90	24,10

Tableau 2. Résultats expérimentaux pour l'essai slant-shear.

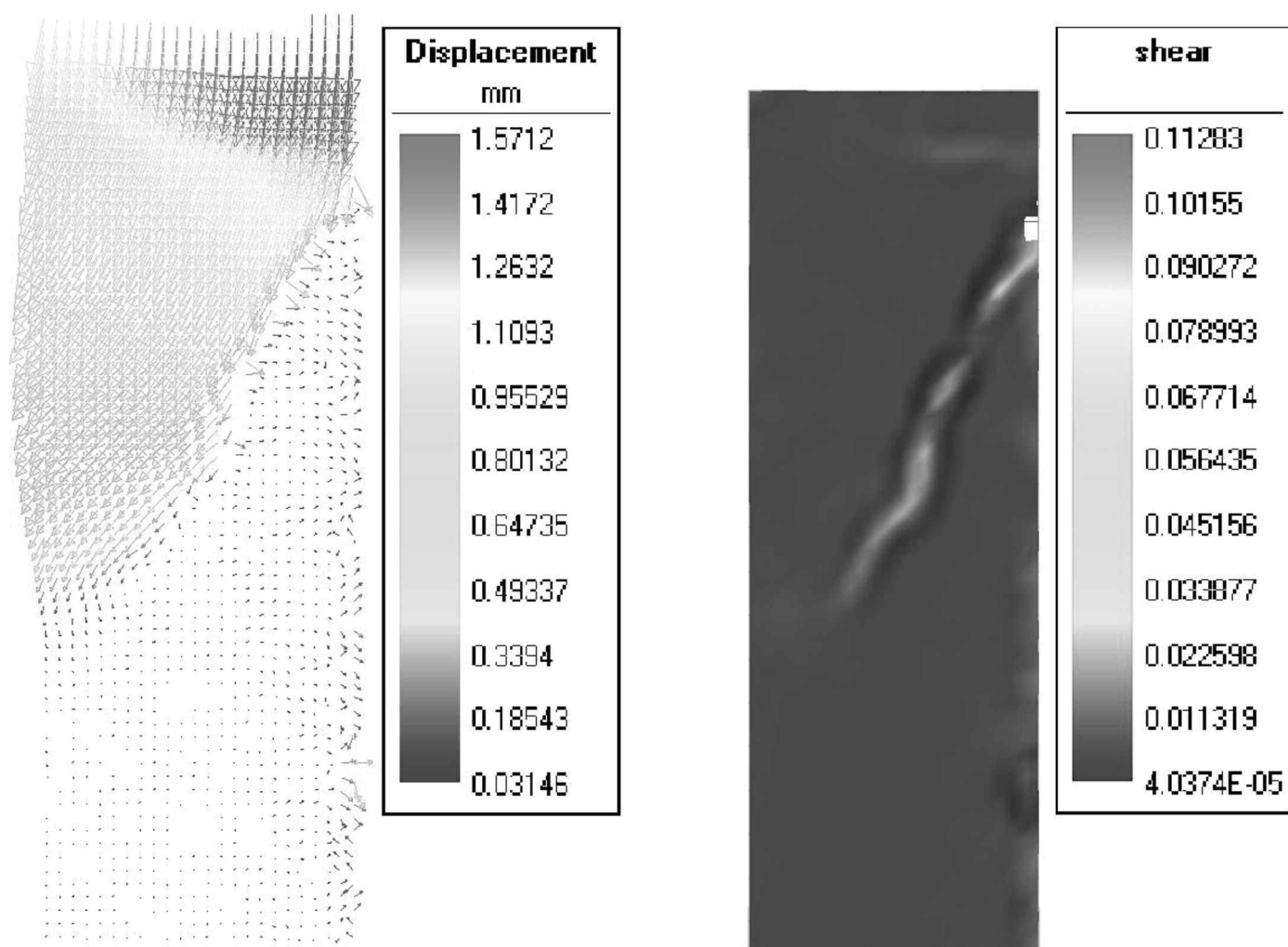


Figure 5. Résultats de la corrélation d'images avant rupture sur l'éprouvette 3.25.I.c avec, à gauche les vecteurs déplacements et à droite les déformations en cisaillement.

Matériau	E (MPa)	σ_c (kPa)	σ_t (kPa)	K_n (GN/m ³)	K_s (GN/m ³)	c (kPa)	Δ (°)
Béton	30 000	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
Enduit isolant	5,0	110	60	Δ	Δ	Δ	Δ
Interface	5,0	Δ	Δ	10	4,17	9	28

Tableau 3. Paramètres utilisés pour la modélisation aux éléments finis avec le logiciel Cast3m.

Les paramètres du Tableau 3 ont été déterminés afin de reproduire le comportement intrinsèque des matériaux évoqué dans le Tableau 1. Le module d'Young de l'interface est pris égal à celui de l'isolant. De plus, étant donné la faible rugosité du substrat béton après brossage, une épaisseur $e=0,5$ mm a été considérée pour l'interface. Les essais mécaniques ne permettant pas de déterminer le coefficient de Poisson, cette valeur est fixée à $\nu=0,2$ pour tous les matériaux. La calibration du modèle a ensuite permis de déterminer les paramètres liés à l'interface. Les coefficients K_n et K_s représentant respectivement la raideur normale et la raideur en cisaillement de l'interface, sont calculés tels que :

$$K_n = \frac{E}{e} \quad [3]$$

$$K_s = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu) \cdot e} \quad [4]$$

Une cohésion $c=9$ kPa et un angle de frottement $\phi=28^\circ$, donc un angle largement inférieur à celui obtenu expérimentalement, permettent de reproduire convenablement la courbe effort-déplacement pour les essais orientés à 25° et 30° (voir Figure 6). Cependant les résultats pour une orientation d'interface de 20° ne sont pas conformes à l'expérimentation. Il est possible que la faible quantité de matière entre la surface d'application de l'effort et l'interface soit une des causes des différences constatées pour cette inclinaison.

Le rapport r , défini par la Formule 5, permet de quantifier la part de résistance au cisaillement mobilisée. Il varie entre 0 (contrainte tangentielle nulle) à 1 (seuil plastique

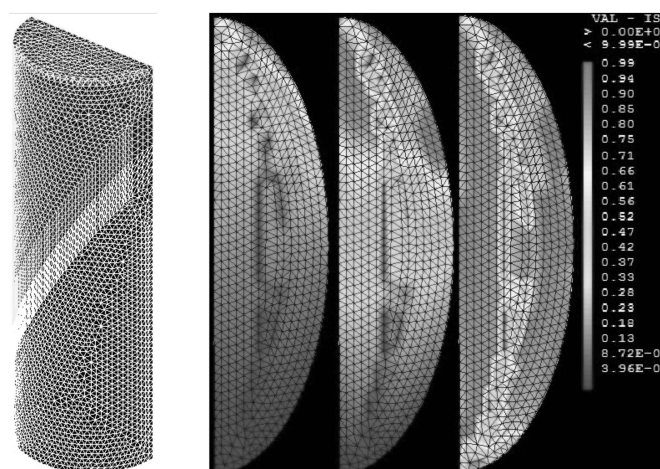


Figure 7. A gauche : maillage d'une demi-épreuve sous CAST3M ; à droite : l'évolution, à l'interface, du rapport entre la contrainte appliquée et le critère de rupture, pour un déplacement de la surface supérieure de 0,4mm, 1mm et 4,7mm (rupture).

atteint). La figure 7 présente l'évolution de ce rapport r sur l'interface lors de l'essai. On remarque que la partie supérieure de l'interface atteint le seuil de plasticité dès le début du chargement et que le reste de l'interface atteint ce seuil progressivement tout au long de l'essai. Ces résultats confirment donc la répartition hétérogène des contraintes dans ce cas de figure. En conséquence, il y a rupture progressive de l'interface et non rupture fragile généralisée, comme supposée pour le calcul des contraintes moyennes expérimentales avec les formules 1 et 2. En utilisant la formule 6 qui régit le critère à l'interface, le fait d'obtenir une rupture locale progressive implique des concentrations de contraintes à l'interface. Celles-ci permettent de mobiliser

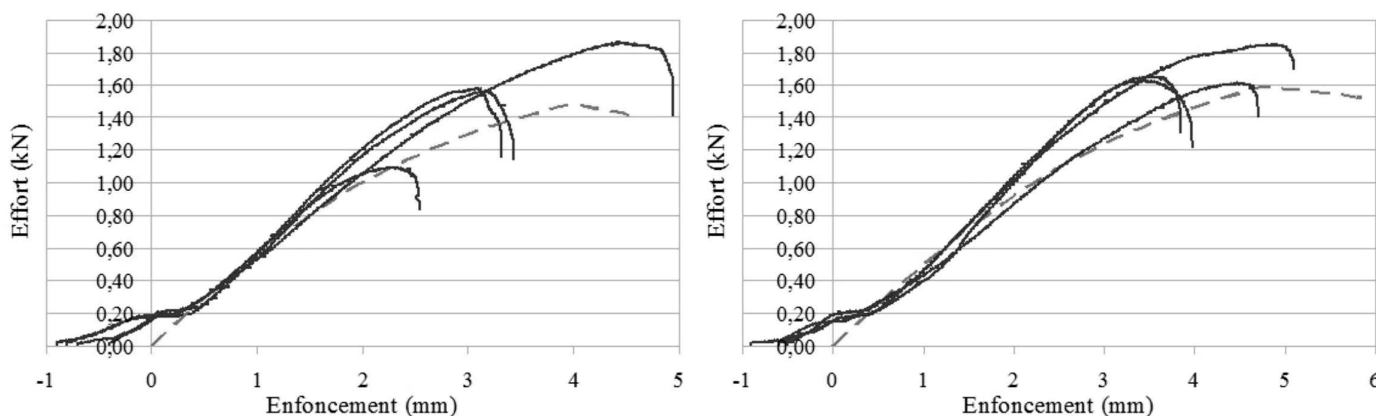


Figure 6. Comparaison des courbes Effort-Déplacement expérimentales (en traits pleins) et numériques (en pointillés). À gauche pour un angle de 25° , à droite, pour un angle de 30° .

plus de résistance au cisaillement localement. Par conséquent, pour une même valeur de rupture globale, l'analyse numérique nécessite un angle de frottement ϕ plus faible que celui obtenu expérimentalement. De plus, la cohésion c étant un terme isolé dans la formule, celui-ci n'est pas affecté par cette distribution hétérogène des contraintes. D'où la proximité entre la cohésion c expérimentale et numérique.

$$r = \frac{\tau}{\sigma_n \cdot \tan \phi + c} \quad [5]$$

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \phi + c \quad [6]$$

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le mode de rupture adhésif pour les 3 angles considérés lors de l'essai slant-shear a permis la construction d'un critère expérimental de rupture de l'interface. Une modélisation aux éléments finis a mis en évidence l'impact de la différence de rigidité entre les 2 matériaux : une distribution hétérogène des contraintes ayant pour conséquence la surestimation de l'angle de frottement F du critère expérimental.

Plusieurs points restent en perspective. En effet, à défaut de pouvoir modéliser correctement le comportement avec un angle α de 20° , l'accès à des résultats de traction uniaxiale sur l'interface permettrait de compléter le critère de rupture. De plus, la modélisation du comportement de l'enduit Monorex GF permettra de mesurer l'impact de la différence de rigidité sur le paramètre F du critère expérimental, et ainsi de valider ou non les conclusions de cette étude. Enfin, une analyse à l'échelle d'un mur est en cours pour mesurer la possible influence des effets d'échelles et pour observer le mode de rupture dans une configuration plus proche d'une sollicitation réelle.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [AST 83] *Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy Resin Systems Used with Concrete (ASTM C 882-78)*, American Society for Testing and materials, Philadelphia, PA, 1983.
- [AUS 99] AUSTIN S., ROBINS P., PAN Y., « Shear bond testing of concrete repairs », *Cement and Concrete Research*, vol. 29, 1999, p. 1067-1076.
- [BSI 84] *BS 6319: Part 4. Slant Shear Test Method for Evaluating the Bond Strength of Epoxy Systems*, BSI, London, 1984.
- [ESP 11] ESPECHE A.D., LEON J., « Estimation of bond envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test », *Construction and Building Materials*, vol. 25, 2011, p. 1222-1235.
- [JUL 05] JULIO E.N.B.S., BRANCO F.A.B., SILVA V.D., « Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface », *Construction and Building Materials*, vol. 18, 2004, p. 675-681.
- [JUL 06] JULIO E.N.B.S., BRANCO F.A.B., SILVA V.D., « Influence of added concrete compressive strength on adhesion to an existing concrete substrate », *Building and Environment*, vol. 41, 2006, p. 1934-1939.
- [MOM 05] MOMAYEZ A., EHSANI M.R., RAMEZANIAN-POUR A.A., RAJAIE H., « Comparison of methods for evaluating the bond between concrete substrate and repair materials », *Cement and Concrete Research*, vol. 35, 2005, p. 748-757.
- [SAN 07] SANTOS P.M.D., JULIO E.N.B.S., SILVA V.D., « Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface », *Construction and Building Materials*, vol. 21, 2007, p. 1688-1695.
- [SAN 11] SANTOS P.M.D., JULIO E.N.B.S., « Factors affecting the bond between new and old concrete », *ACI Materials Journal*, vol. 108 n°4, 2011, p. 449-456.
- [TRA 07] TRAN B.-H., BERTHAUD Y., RAGUENEAU F., « Essai PIAF : Pour Identifier l'Adherence et le Frottement », *18^e Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, 27-31 Août 2007.