

DURABILITÉ DES RÉPARATIONS DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ AVEC DES MORTIERS MODIFIÉS PAR DES POLYMÈRES

Inès Léana TCHETGNIA NGASSAM, Sandrine MARCEAU, Thierry CHAUSSADENT

Université Paris-Est, IFSTTAR, Département Matériaux et Structures, Cité Descartes,
F-77447, Marne La Vallée, France

ines-leana.tchetgnia-ngassam@ifsttar.fr

sandrine.marceau@ifsttar.fr

thierry.chaussadent@ifsttar.fr

INTRODUCTION

La durabilité des réparations effectuées sur des ouvrages en béton armé pose un vrai problème dans le génie civil en Europe. En effet, près de la moitié des ces rénovations se concluent par un échec prématuré marqué principalement par la réapparition de la corrosion sur les armatures ou le décollement du mortier de réparation. Ces travaux de rénovation représentent près de la moitié du budget européen dans le génie civil. Ils entraînent de nouvelles interventions à court terme et des coûts supplémentaires de restauration et d'interruption de service.

Pour qu'une réparation soit efficace, elle doit améliorer les performances de la structure, renforcer sa résistance,

apporter une étanchéité à l'eau, empêcher la pénétration d'espèces agressives à l'interface béton/acier et augmenter sa durée de vie. La réussite d'une intervention de réparation dépend de plusieurs paramètres [EMM 96, VAY 00] :

- La pathologie de la surface à réparer doit d'abord être clairement identifiée et traitée, et la préparation de surface doit être irréprochable,
- Le matériau de réparation appliqué doit être choisi en fonction de l'exposition et de l'environnement de l'ouvrage. Ce matériau doit être intrinsèquement durable et ses propriétés doivent être compatibles avec celles du support : compatibilité mécanique, thermique, chimique et de perméabilité [HAS 01].

– La qualité de l'application du produit sur le support et le respect des conditions de cure.

Pour cela, des produits de réparation ont été formulés spécialement pour répondre aux attentes des maîtres d'ouvrage. Ils doivent être conformes à la norme européenne NF EN 1504 « Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité », applicable depuis le 1^{er} janvier 2009. Cette norme définit des principes et méthodes de réparation des structures en béton.

Deux types de produits de réparation sont majoritairement utilisés : des liants hydrauliques simples ou des liants hydrauliques modifiés par des polymères. Ces mortiers modifiés par des polymères occupent une place de plus en plus importante dans le panel des produits de réparation. Diverses recherches ont montré leurs performances intrinsèques élevées aussi bien en termes de tenue mécanique (résistance mécanique, force d'adhérence) [OHA 98] que de durabilité (porosité, perméabilité, faible diffusion d'agents agressifs...) [RAM 12]. En revanche, le comportement de ces produits après application ou encore leur impact sur la structure réparée, plus précisément sur les armatures en acier du béton armé, a été très peu abordé, que ce soit à court ou à long terme.

La présente étude vise à analyser l'influence des polymères présents dans les mortiers sur la qualité des réparations de surfaces en béton, notamment sur les propriétés d'adhérence. Pour cela, deux types de mortiers modifiés ont été fabriqués en utilisant deux poudres de polymère, du styrène acrylate (SA) et de l'éthylène vinyle acétate (EVA). Les mortiers ont été formulés en se basant sur la composition d'un panel de mortiers modifiés commerciaux. Leurs propriétés mécaniques et leur microstructure ont été évaluées en fonction des conditions de cure appliquées [TCH 12]. Pour évaluer la qualité de l'adhérence sur une surface de béton à réparer, un test d'adhérence basé sur le test de flexion 3 points a été mis en place. Les influences de l'environnement, de l'état de la surface du support et de la quantité et du type de polymère ont été étudiées.

1. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

1.1. Matériaux

Deux mortiers de réparation commerciaux modifiés par des polymères ont été sélectionnés, l'un avec des propriétés mécaniques élevées (M2) et l'autre avec de faibles pro-

priétés mécaniques (M4). Le tableau 1 résume les propriétés mécaniques de ces deux produits, en comparaison avec celles d'un mortier classique (M0) sans polymère. Le rapport eau / poudre utilisé correspond à la valeur recommandée par le fabricant. Les échantillons sont démoulés après 24 h et conservés pendant le durcissement dans trois conditions de cure différentes de durcissement :

- Cure en immersion dans l'eau : les échantillons sont immergés dans de l'eau à 20°C, correspondant à la cure recommandée pour les mortiers hydrauliques purs dans la norme sur les produits de réparation des ouvrages d'art (EN 1504-3),
- Cure sèche : 21°C et 60 ± 10% d'humidité relative, correspondant à la cure recommandée pour les mortiers modifiés par des polymères (EN 1504-3),
- Cure chaude : 40°C, ce qui peut correspondre à un environnement de chantier en été.

Les mortiers fabriqués en laboratoire se composent de ciment CEM I 52,5 N CE CP2 NF, de sable normalisé CEN 196-1, de poudre de polymère et d'eau. Les polymères utilisés sont des poudres commerciales de styrène acrylate (SA) et de poly (éthylène acétate de vinyle) (EVA). Leurs caractéristiques sont données dans le tableau 2.

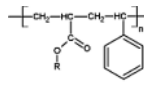
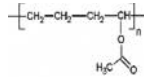
	Formule	Tg (°C)	pH
SA		-6	7.5 - 9,5
EVA		-7	6 - 9

Tableau 2. Propriétés des polymères commerciaux utilisés pour la formulation des mortiers préparés en laboratoire

Les éprouvettes de mortier de laboratoire ont été préparées avec des rapports massiques polymère / ciment (P/C) de 0, 5, 10 et 20%. Le rapport sable / ciment est fixé à 3, correspondant à la composition typique des mortiers de réparation commerciaux. La quantité de polymère correspond à environ 1 à 5% du mélange sec (ciment + sable + poudre de polymère). Les essais d'affaissement au mini-cône ont permis d'obtenir la quantité d'eau nécessaire par rapport à celle du ciment (E/C), ceci en se basant sur la valeur moyenne de l'affaissement des produits commerciaux [TCH 12]. Aucun additif, ni plastifiant n'a été utilisé.

Les propriétés mécaniques et la porosité de ces mortiers faits en laboratoire sont rapportées dans le tableau 3 en fonction du type de cure appliquée.

	Résistance en compression (MPa)			Résistance en flexion (MPa)			Ratio eau/poudre
	T=21°C RH= 60%	40°C	Dans l'eau	T=21°C RH= 60%	40°C	Dans l'eau	
M0	46,7	48,3	56,1	7,1	9,1	8,7	0,12
M2	57,0	65,2	55,3	10,5	12,9	9,0	0,1
M4	26,0	25,1	28,8	7,1	6,0	6,3	0,16

Tableau 1. Principales propriétés des mortiers commerciaux M2 et M4 par rapport à un mortier classique M0

% polymère (P/C)		Résistance en compression (MPa)			Résistance en flexion (MPa)			Porosité (%)			Ratio eau/ciment
		T=21°C HR= 60%	40°C	Dans l'eau	T=21°C HR= 60%	40°C	Dans l'eau	T=21°C HR= 60%	40°C	Dans l'eau	
M0	0	46,7	48,3	56,1	7,1	9,7	8,7	13,0	13,0	12,8	0,49
EVA	5	35,9	37,1	36,6	8,3	9,9	6,2	13,3	10,9	12,3	0,44
	10	42,6	46,1	36,9	10,2	12,0	7,3	8,3	7,6	9,9	0,41
	20	41,1	54,1	43,6	12,3	13,3	8,8	8,1	4,1	7,1	0,36
SA	5	36,2	50,8	43,2	10,3	12,4	7,3	10,6	7,4	10,2	0,41
	10	41,2	57,7	44,1	12,4	14,7	8,2	7,9	4,8	8,2	0,37
	20	45,5	63,3	47,1	15,7	17,5	9,9	4,6	3,2	5,5	0,32

Tableau 3. Propriétés des mécaniques et porosité des mortiers faits en laboratoire et ayant subi différentes cures

1.2. Techniques expérimentales

Un test d'adhérence a été développé, basé sur les essais de flexion 3 points (Figure 1.a). Les échantillons sont des éprouvettes bi-composantes 40 x 40 x 160 mm³ (Figure 1.b). Une moitié de l'échantillon représente le support à réparer. Cette partie se compose d'un mortier classique durci au moins 28 jours et stocké dans un environnement de laboratoire (20±2°C et 60% d'humidité relative).

L'autre moitié de l'échantillon bi-composant est le mortier de réparation coulé dans le moule contenant la partie support (Figure 1.b). Les échantillons sont démoulés après 24 heures et stockés pendant un mois et trois mois avant le test dans les trois conditions de cure citées précédemment (immersion dans l'eau ; à 40°C et à 21°C / 60% HR).

Ces essais ont été réalisés avec deux types de rugosité de surface du mortier à réparer :

- des surfaces planes obtenues par sciage d'échantillons 40 x 40 x 160 mm³.
- des surfaces rugueuses obtenues par rupture des échantillons 40 x 40 x 160 mm³ par un essai de flexion 3 points.

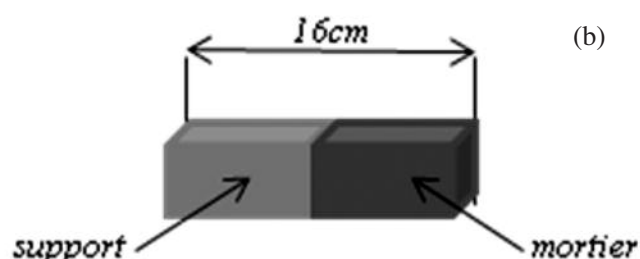
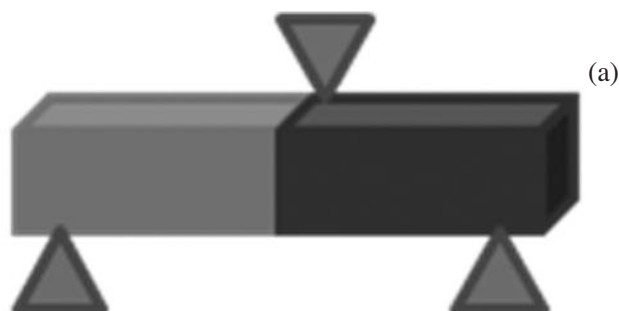


Figure 1. Test d'adhérence. (a) Test d'adhérence par flexion. (b) Echantillon bi-composant.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Conditions d'une bonne adhérence

Selon le mode de rupture observé après le test d'adhérence, trois situations sont possibles [OHA 86, COU 98] :

- Rupture adhésive (A) : la fracture se produit à l'interface du mortier de réparation et du support.
- Rupture cohésive dans le support (S) : la fracture se produit dans la partie support.
- Rupture cohésive dans le mortier de réparation (M) : la rupture se produit dans le mortier de réparation.

Deux paramètres, la contrainte d'adhérence et le mode de rupture, sont donc mis en avant pour définir la qualité de l'adhérence entre la surface du mortier et le matériau de réparation. Idéalement, une bonne adhérence est définie par une contrainte d'adhérence élevée, au moins égale à la résistance en flexion du support.

De plus, une rupture cohésive signifie que la partie la plus fragile du système n'est pas l'interface entre le mortier et le support. Ainsi, une rupture cohésive peut être également considérée comme un signe de très bonne adhérence.

2.2. Adhérence après une cure sèche

La valeur des contraintes d'adhérence des mortiers de réparation sur une surface plane est reportée sur la figure 2 pour 28 et 84 jours de cure sèche

Sauf dans le cas du mortier classique, l'adhérence augmente avec le temps de cure. Cela peut être dû à la cinétique de formation des films de polymère. En effet, la matrice polymère devient plus dense avec le temps et la cohésion granulats/pâte de ciment est renforcée, tout comme l'interaction entre le mortier de réparation et la surface à réparer [OHA 98, VAN 05 et AGG 07].

De plus, on peut observer que l'adhérence du mortier non modifié sur le support est faible. Pour ce système, la contrainte d'adhérence est deux fois plus petite que la résistance en flexion du mortier classique. C'est la valeur d'adhérence la plus faible obtenue parmi tous les systèmes étudiés.

Après 28 jours, les contraintes d'adhérence les plus élevées sont celles obtenues avec les mortiers M2, SA10, EVA10 et EVA20. Elles sont supérieures à la résistance en flexion du mortier classique utilisé comme support. De plus, pour ces mortiers, la rupture a principalement lieu dans le support. Ces deux points montrent une bonne adhérence de ces produits à 28 jours. Par contre, pour les mortiers M4, EVA5 et SA20, la contrainte d'adhérence est du même ordre de grandeur que celle du mortier classique et la rupture se fait principalement à l'interface. Cela marque une faible adhérence de ces produits. Ainsi à cette échéance, l'adhérence la plus élevée pour les mortiers contenant du

SA est obtenue avec 10% de polymère, puis elle diminue lorsque le mortier contient 20% alors qu'elle croît et se stabilise à 10% pour les mortiers modifiés avec de l'EVA.

Après trois mois de cure, la contrainte d'adhérence augmente pour les mortiers modifiés. A l'exception des mortiers avec les rapports P/C de 5% et du mortier M4, elle est supérieure à la résistance en flexion du mortier classique. De plus, la rupture a lieu exclusivement dans le support, preuve d'une bonne adhérence. Il est à noter aussi qu'à cette échéance de trois mois, les mortiers contenant 10% et 20% de SA ont pratiquement la même contrainte d'adhérence.

Pour les produits commerciaux, le mortier ayant la résistance mécanique la plus élevée est celui qui possède la plus contrainte adhérence la plus grande.

Par contre, les mortiers contenant de l'EVA ont une contrainte d'adhérence plus élevée que celle des mortiers ayant du SA, alors que leurs propriétés mécaniques sont plus faibles (tableau 3). L'hypothèse suivante pourrait expliquer ce résultat.

L'extrémum observé pour les mortiers SA après 28 jours peut être dû à l'évolution de la fluidité entre les mortiers contenant une petite quantité de polymère et ceux en comportant une quantité plus importante, à consistance constante. En effet, la quantité d'eau influe sur cette fluidité : en travaillant à une consistance fixée, l'augmentation de la quantité de polymère conduit à la diminution de la quantité d'eau ajoutée. L'impact de la formulation est observé avec l'essai d'affaissement (Figure 3). En effet, les mortiers frais avec un rapport P/C de 20% de SA ont une

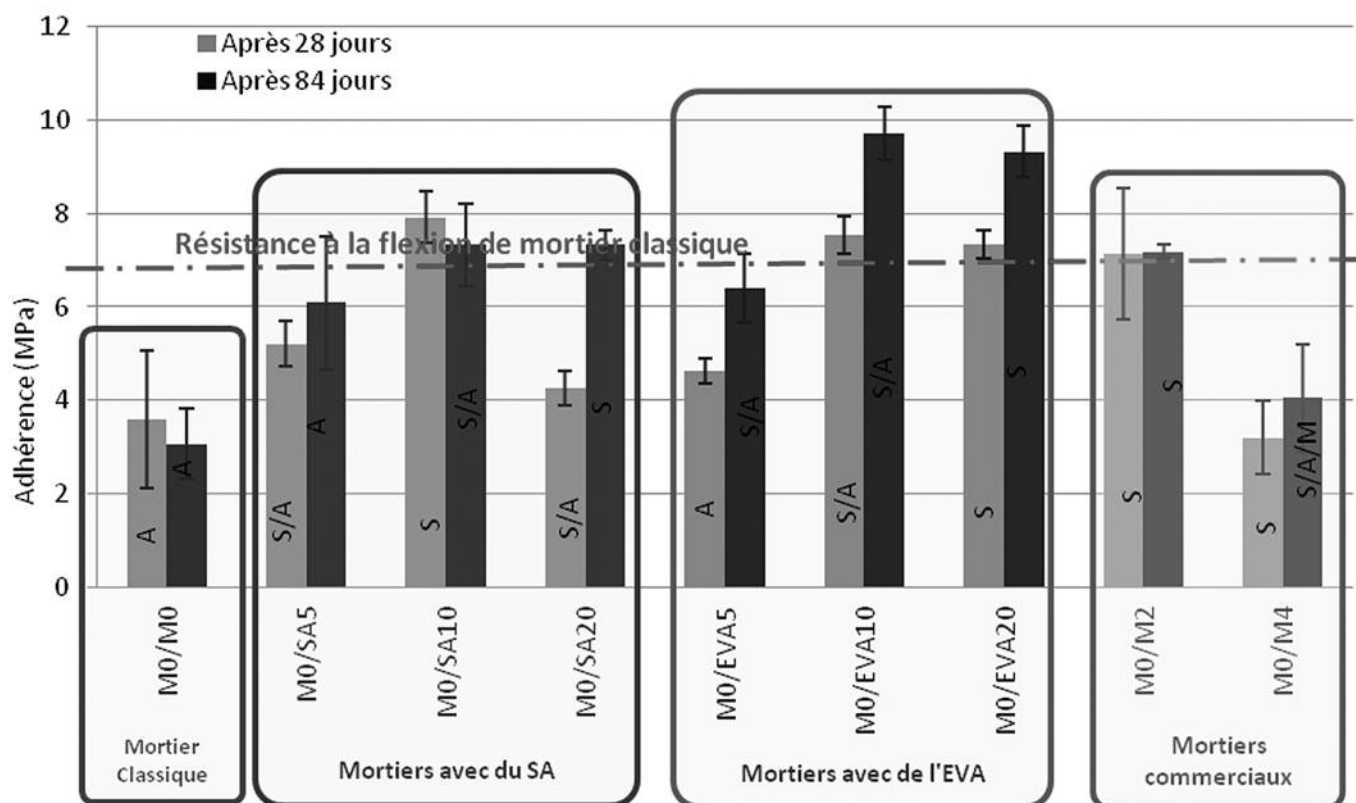


Figure 2. Adhérence et type de rupture en milieu ambiant des mortiers de réparation. Type de rupture : A pour l'adhésif, S pour cohésive dans le support, M pour cohésive dans le mortier de réparation

texture visqueuse et s'affaissent sous l'effet de leur poids (Figure 3.a). Les mortiers ayant seulement de 5% SA ont une texture plus liquide et s'étalent sous l'effet de l'eau qui facilite leur écoulement (figure 3.b). Ainsi, avec des petites quantités de polymère, la quantité d'eau élevée permet aux mortiers de s'étaler facilement et d'hydrater la face du support. Pour des quantités élevées de polymère, le mortier ne peut s'étaler facilement, en raison de la faible quantité d'eau. Le contact avec la surface du support est donc moins important et l'adhérence plus faible. Ainsi, les mortiers modifiés par l'EVA atteignent plus rapidement une contrainte d'adhérence maximale que les mortiers modifiés par le SA car l'action fluidifiante du SA et de l'eau est moins forte que celle de l'EVA et de l'eau.

2.3. Influence des conditions de conservation

Dans cette partie, afin d'étudier l'influence des conditions de conservation des éprouvettes sur l'adhérence des mor-

tiers, les échantillons ont été soumis à des environnements différents avant les mesures d'adhérence.

Pour cela, les échantillons ont été exposés :

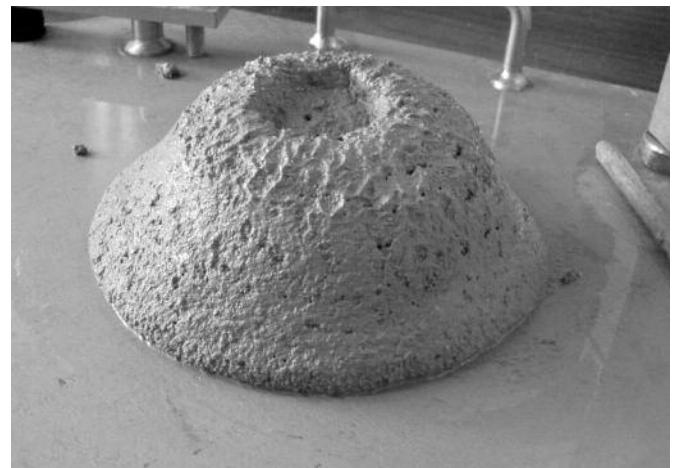
- 28 jours dans des conditions de cure sèche
- 28 jours soit à 40°C dans une étuve, soit en immersion dans l'eau
- 28 jours en cure sèche.

Après chaque période de 28 jours, les contraintes d'adhérence ont été mesurées. Les résultats des mesures sont reportés sur la figure 4.a pour les échantillons placés à 40°C et 4.b pour les éprouvettes immergées dans l'eau.

L'exposition à une température élevée a un impact négatif sur l'adhérence du mortier classique. En outre, la rupture est purement adhésive. Ce résultat était prévisible, car une partie l'eau s'évapore dans ces conditions, ce qui limite l'hydratation du ciment. Pour les mortiers modifiés par des polymères, l'exposition à 40°C améliore l'adhérence. Cependant, après une nouvelle période de 28 jours dans les conditions de cure sèche, la contrainte d'adhérence mais le mode de rupture des échantillons et la contrainte d'adhérence ne changent pas de façon significative entre 28 jours et 84 jours.

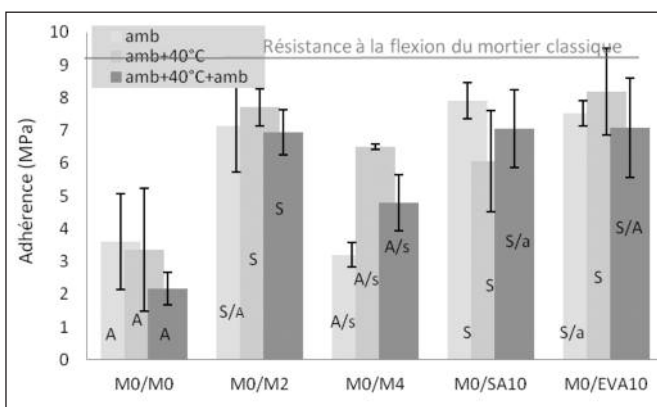


(a)

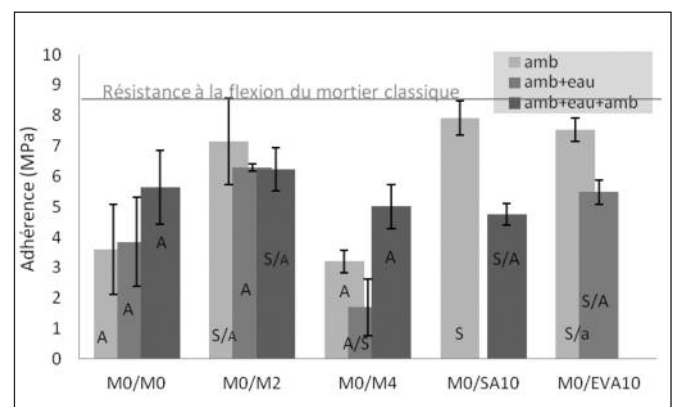


(b)

Figure 3. Mortiers modifiés par du SA. (a) SA20%, (b) SA5%



(a)



(b)

Figure 4. Evolution de la contrainte d'adhérence pendant 3 mois de conservation dans des environnements différents : (a) dans une étuve à 40°C (b) en immersion dans l'eau

L'immersion dans l'eau provoque une augmentation de l'adhérence du mortier non modifié. Ce résultat est également prévisible, parce que l'eau est disponible pour toute l'hydratation du ciment. Cependant, la rupture demeure adhésive et la résistance en flexion du mortier classique n'est toujours pas atteinte. Pour les mortiers modifiés, l'immersion dans l'eau tend à diminuer l'adhérence. Cela est dû au ralentissement de la formation du film polymère causé par un excès d'eau et une température trop basse [TCH 12].

Ainsi, comme pour les propriétés mécaniques intrinsèques, une température élevée augmente l'adhérence tandis que l'immersion dans l'eau la réduit. Ce résultat est confirmé par le fait que la majorité des ruptures sont cohésives dans le support à 40°C alors qu'elles sont adhésives lorsque les échantillons sont immergés dans de l'eau.

2.4. Influence de la rugosité

L'influence de la rugosité de surface du support a également été étudiée par coulage de mortiers modifiés avec 20% de SA sur une surface plane et une surface rugueuse. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes ayant subi une cure en milieu ambiant de 28 jours.

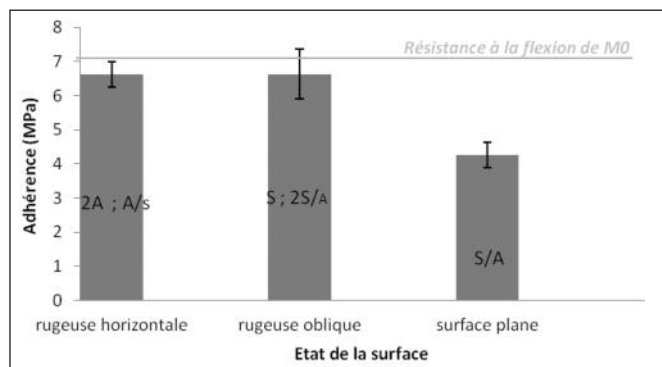


Figure 5. Influence de la rugosité de la surface de contact sur l'adhèrence d'un mortier contenant 20% de SA

On peut observer sur la figure 5 que l'adhèrence est plus élevée lorsque le mortier est coulé sur une surface rugueuse. Cela est dû au fait que, pour la même section mise en jeu, la surface de contact entre les deux matériaux est plus importante sur un échantillon rugueux que celui non rugueux [COU 98].

CONCLUSION

Cette étude montre que les propriétés adhésives des mortiers modifiés par des polymères sont influencées par plusieurs facteurs:

La nature du polymère utilisé et sa quantité : à 90 jours, l'adhèrence augmente avec l'addition de polymère. Elle atteint sa valeur maximale à partir d'un rapport P/C de 10%. Les contraintes d'adhèrence sont supérieures pour les mortiers modifiés par de l'EVA par rapport à ceux contenant du SA.

L'environnement dans lequel le système est exposé : la contrainte d'adhèrence la plus élevée et une rupture cohésive dans le support sont obtenues majoritairement dans un environnement chaud.

La rugosité de la surface de support : l'augmentation de la rugosité conduit à une augmentation de la contrainte d'adhèrence. Cependant, la rupture reste localisée à l'interface.

BIBLIOGRAPHIE

- [AGG 07] AGGARWAL L. K., THAPLIYAL P.C., KARADE S.R., « Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions », *Construction and Building Materials*, vol. 21, 2007, p. 379-383.
- [COU 98] COURARD L., « Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation », thèse de doctorat, Université de Liège, 1998.
- [EMM 96] EMMONS P. H., VAYSBURD A. M., « System concept in design and construction of durable concrete repairs », *Construction and Building Materials*, vol. 10, 1996, p. 69-75.
- [HAS 01] HASSAN K.E., BROOKS J.J., AL-ALAWI L., « Compatibility of repair mortars with concrete in a hot dry environment », *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, 2001, p. 453-458.
- [OHA 86] OHAMA Y., DEMURA K., NAGAO H., OGI T., « Adhesion of polymer modified mortars to ordinary cement mortar by different methods », *Proceedings ISAP 86 Adhesion between polymers and concrete*, H.R. Sasse, Chapman and Hall, 1986, p. 719-729.
- [OHA 98] OHAMA Y., « Polymer-based Admixtures », *Cement and Concrete Composites* vol. 20, 1998, p. 198-212.
- [RAM 12] RAMLI M., TABASSI A., « Effects of polymer modification on the permeability of cement under different curing conditions: a correlation study includes pore distribution and compressive strength », *Construction and Building Materials*, vol. 28, 2012, p. 561-570.
- [TCH 12] TCHETGNIA N. I. L., MARCEAU S., LESPINASSE F., CHAUSSADENT T., « Physico-chemical properties and durability of polymer modified repair materials », *3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, 2012, Cape Town.
- [VAN 05] VAN GEMERT D., CZAMEKI L., MAULZSCH M., SCHON H., BEELDENS A., LUKOWSKI P., KNAPEN E., « Cement concrete and concrete-polymer composites: two merging worlds », *11th ICPIC Congress*, Berlin, 2004, *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, 2005, p. 926-933.
- [VAY 00] VAYSBURD A.M., EMMONS P.H., « How to make today's repairs durable for tomorrow – corrosion protection in concrete repair », *Construction and Building Materials*, vol. 14, 2000, p. 189-197.