

Essais d'adhérence des époxydes au béton hydraulique (Tests on bonding between epoxies and hydraulic concrete)

J. L. B. AGUIAR

Département de Génie civil, Université du Minho, Azurém, 4800 Guimarães, Portugal

La réparation et les collages de structures en béton sont des travaux dont l'utilité se fait de plus en plus sentir. La nécessité de réparer ces structures provient de leur ancienneté ou de défauts de construction. Les polymères sont toujours davantage utilisés dans les travaux de réparation et de collage en raison de leur capacité d'adhérence qui rend possible la liaison béton durci-béton durci, béton durci-béton frais et béton durci-matériaux métalliques par collage. Nous présentons deux essais, l'un de traction directe et l'autre basé sur les principes de la mécanique de la rupture. Ce dernier nous a permis d'évaluer l'adhérence de façon plus rigoureuse que les essais de traction directe. Nous avons déterminé la résistance à la traction et les taux de restitution d'énergie pour l'adhérence entre béton durci et époxyde.

1. INTRODUCTION

Dans les techniques de réparation, les polymères sont utilisés purs ou chargés avec des fillers divers. Habituellement, on injecte une résine pure dans les fissures fines et l'on procède au collage structural béton durci-béton durci à l'aide d'une résine chargée.

Avec les essais de traction, nous avons étudié, d'une part, l'influence d'une charge donnée sur l'adhérence du système béton durci-polymère-béton durci et, d'autre part, l'adhérence en fonction des caractéristiques et du dosage de la charge.

Nous avons procédé à un essai basé sur les principes de la mécanique de la rupture parce que les essais de traction directe ne permettent pas de caractériser valablement l'adhérence. Tout d'abord, quand la rupture est du type I (rupture dans le béton), nous savons que le collage résiste plus que le béton, mais nous ne savons pas quelle est sa résistance. En outre, la dimension des éprouvettes influe sur les résultats qu'on obtient avec ce type d'essais.

La mécanique de la rupture nous permet, à partir d'une analyse mécanique, de déterminer les paramètres de la fissure dont les valeurs critiques sont caractéristiques des matériaux. Cette détermination permettra de caractériser de façon plus précise l'adhérence entre les époxydes et le béton. La mécanique de la rupture nous permet aussi de connaître l'influence des défauts toujours présents dans le collage.

2. ESSAIS DE TRACTION DIRECTE

2.1 Conduite des essais

Nous avons effectué tous les essais de traction directe conformément à la norme française NFP 18-871, relative aux produits pour collage structural entre deux éléments

en béton avec surface d'application horizontale. Nous avons utilisé, pour le collage structural, un béton durci de 90 jours dont la résistance à la compression à 28 jours sur des cylindres de 16 cm × 32 cm était de l'ordre de 48 MPa.

Afin de minimiser, ou d'annuler, l'effet d'une hétérogénéité ponctuelle dans la couche de polymère mise en oeuvre en vue du collage, nous avons travaillé sur des demi-prismes de 14 cm × 9 cm × 30 cm (Fig. 1). L'application des polymères a été effectuée sur des surfaces de 420 cm² brossées et humides. On a reconstitué des prismes de 14 cm × 18 cm × 30 cm par collage de l'autre demi-prisme de béton durci correspondant.

Compte tenu des conclusions des travaux antérieurs [1-3], nous ne nous intéressons pas au support sec parce que, dans ce cas-là, la rupture a toujours lieu dans le béton.

Les éprouvettes destinées à la détermination de l'adhérence ont été obtenues à 28 jours de l'assemblage par carottage de cylindres de 8 cm × 18 cm dans le prisme reconstitué (Fig. 2).

Nous avons utilisé deux systèmes époxydes, système A (résine époxyde A + durcisseur A₁ à base de polyamine aliphatique) et le système X (résine époxyde X + durcisseur Y à base d'un mélange d'amines cycliques et d'alcool benzilique).

Les modes de rupture des éprouvettes reconstituées ont été classés en quatre types (Fig. 3). Dans le type I (Fig. 3a), le cylindre reconstitué ne se sépare pas suivant le plan de collage horizontal. Le béton casse sous l'effet des contraintes de traction exercées sur l'éprouvette, dans le cas du collage de béton frais sur béton durci, soit du côté du béton durci servant de support, soit du côté du béton rapporté frais. Dans le type II (Fig. 3b), la cassure intéresse à la fois le béton et le plan de collage. Dans le type III (Fig. 3c), le produit reste adhérent sur chaque demi-éprouvette de béton et la rupture a lieu dans

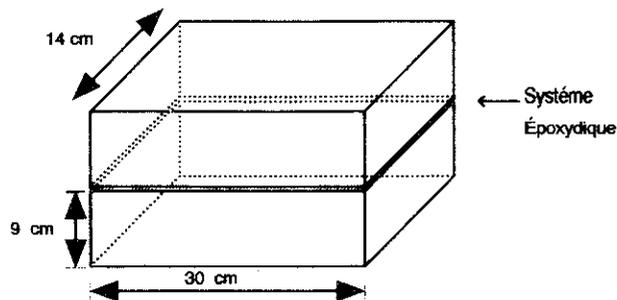


Fig. 1 Epreuve prismatic reconstituée par collage, à l'aide d'un époxyde, de deux demi-prismes 14 cm x 9 cm x 30 cm de béton durci.

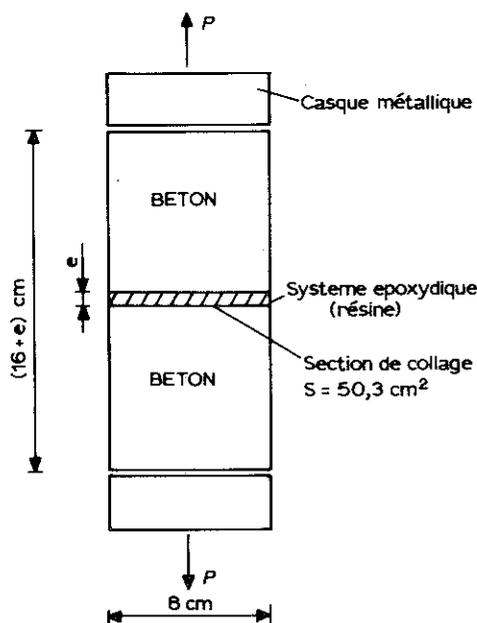


Fig. 2 Epreuve cylindrique béton-résine-béton.

l'épaisseur du produit de collage suivant un plan parallèle au plan d'assemblage. Dans le type IV (Fig. 3d), la rupture se produit à l'une des interfaces du produit de collage-béton par défaut d'adhérence du produit soumis aux essais.

Nous avons étudié l'adhérence en fonction de la nature minéralogique du filler, de sa granularité et du pourcentage présent dans le système époxyde. Nous

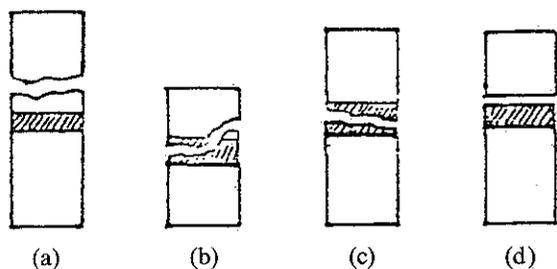


Fig. 3 Différents types de rupture. (a) Type I: rupture dans le béton, (b) type II: rupture mixte béton - plan de collage, (c) type III: rupture cohésive, (d) type IV: rupture adhésive (décollement).

Tableau 1 Fractions granulométriques

Nature de la charge	Filler ultrafin	Filler fin	Filler moyen
Calcaire	80% < 4 μm	68% < 4 μm	35% < 4 μm
	92% < 20 μm	85% < 20 μm	75% < 30 μm
Siliceux	72% < 4 μm	61% < 4 μm	39% < 4 μm
	95% < 20 μm	95% < 20 μm	100% < 30 μm

avons expérimenté, avec les deux systèmes époxydes A et X définis précédemment, trois fractions granulométriques différentes d'une charge calcaire et d'une charge 100% siliceuse (Tableau 1).

2.2 Détermination de la quantité de charge incorporable aux polymères

Comme on le voit dans la Fig. 4, la quantité de filler qu'il est possible d'ajouter aux systèmes époxydes A et X décroît avec la finesse du filler. Cette quantité est plus faible dans le cas du filler siliceux. Ainsi, pour les fillers moyens ($SS < 20\,000\text{ cm}^2\text{ g}^{-1}$), on peut atteindre 80% pour le système X et 70% pour le A avec du filler calcaire et environ 70% maximum pour le filler siliceux quelle que soit l'époxyde utilisée. Pour cette dernière charge, on constate qu'à partir d'une surface spécifique de $38\,000\text{ cm}^2\text{ g}^{-1}$ la teneur maximale de charge est toujours de l'ordre de 52% pour le polymère X. Dans le cas du polymère A, le palier se situe aux environs de 42% pour les fillers à $SS > 60\,000\text{ cm}^2\text{ g}^{-1}$.

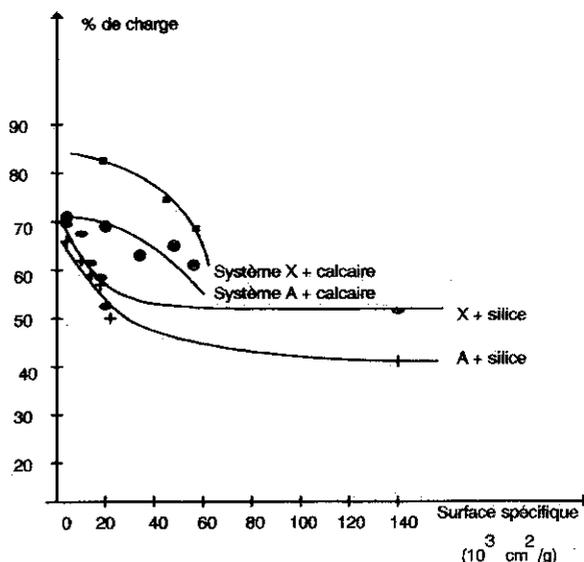


Fig. 4 Quantité maximale de filler incorporable aux deux types de résines époxydes en fonction de la surface spécifique du filler.

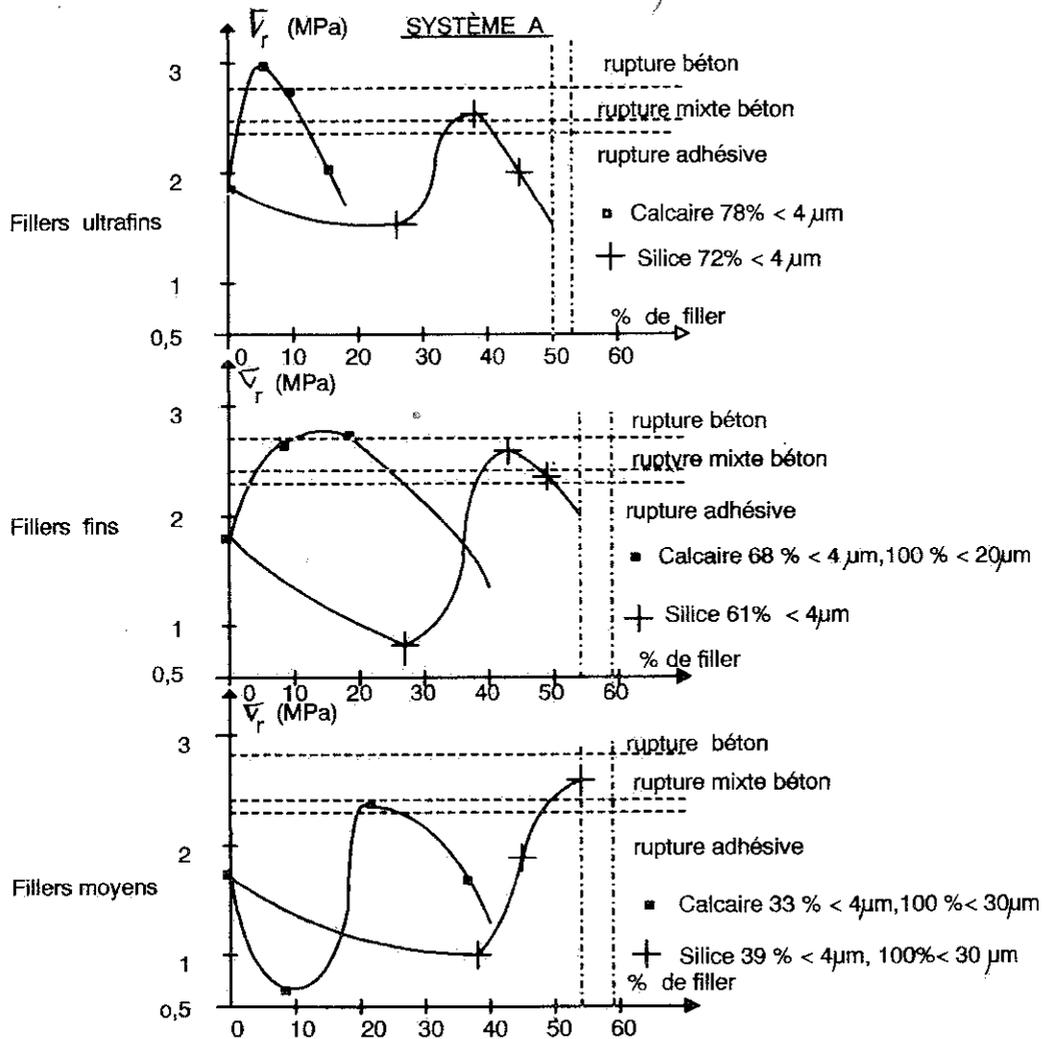


Fig. 5 Adhérence en fonction du dosage en filler (surface humide-épaisseur $\approx 0,6$ mm).

2.3 Influence du pourcentage, de la nature et de la granularité de la charge sur l'adhérence du polymère

On a constaté (Figs 5 et 6) qu'il existe un dosage optimum de filler conduisant à un maximum de résistance et d'adhérence. Cet optimum varie suivant la nature du filler, sa granularité et le système époxyde expérimenté.

Pour la résine A on obtient les meilleurs résultats (rupture dans le béton) avec le filler calcaire fin et ultrafin et des dosages compris entre 5 et 16%. Les fillers calcaire et siliceux semblent conférer le même comportement au système X quelle que soit leur granularité, mais les pourcentages optimaux, du point de vue de l'adhérence, sont compris entre 12 et 18% et entre 20 et 30% pour le filler siliceux.

Ces résultats sont synthétisés dans la Fig. 7 où il apparaît que les contraintes maximales entraînant une rupture dans le béton, enregistrées avec le système X ont eu lieu indifféremment avec les fillers calcaires ou siliceux, avec une tendance à de meilleures performances dans le cas d'éléments moyens. Il en va tout autrement avec le système époxyde A, dont les performances décroissent au fur et à mesure que la dimension des fines calcaires

augmente. Les fines siliceuses conduisent, quelle que soit leur granularité, à des ruptures mixtes, pour des résistances de l'ordre de 2,5 MPa.

Ces résultats confirment donc l'existence d'un couple optimal polymère-charge. L'adhérence d'un système époxyde à un béton humide semble bien être, entre autres, fonction de la nature et de la granularité de ladite charge.

3. ETUDE PAR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

3.1 Choix de l'essai

Nous avons choisi l'essai type DCB (double cantilever beam) parce que c'est celui qui nous permet de mieux suivre la propagation de la fissure. Dans cet essai, la propagation s'effectue sur une longueur plus grande que dans les autres essais basés sur les principes de la mécanique de la rupture (flexion trois ou quatre points par exemple). Les éprouvettes utilisées dans la flexion présentent des longueurs de propagation de l'ordre de 10 cm, ce qui est très peu, surtout si on compare avec la longueur de la zone microfissurée du béton (6-8 cm).

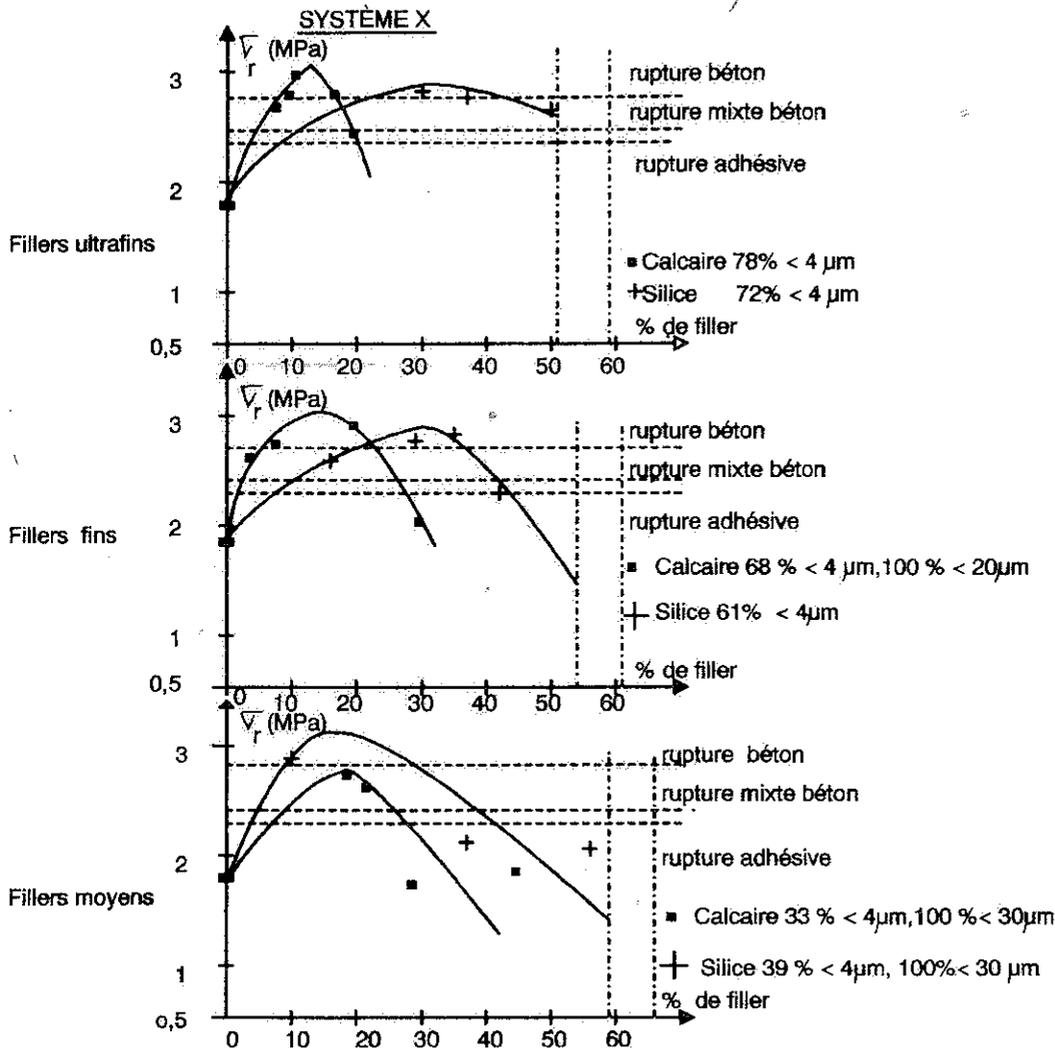


Fig. 6 Adhérence en fonction du dosage en filler (surface humide-épaisseur $\approx 0,6$ mm).

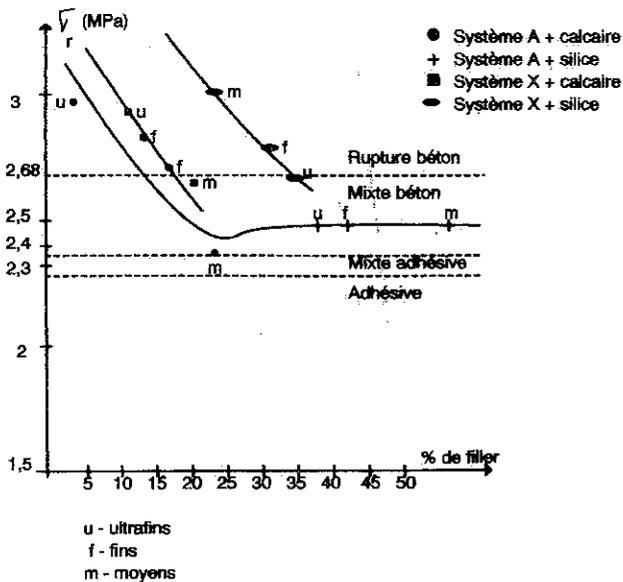


Fig. 7 Contraintes maximales à la rupture en fonction du dosage en filler.

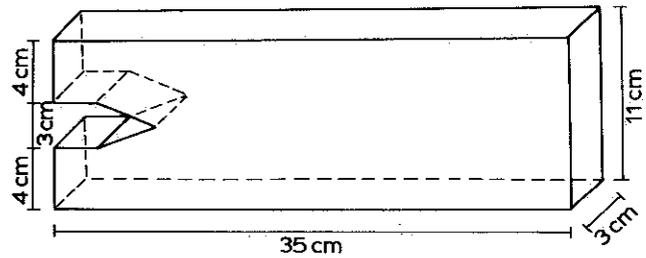


Fig. 8 Dimensions de l'éprouvette type DCB.

Nous avons utilisé un mortier normal conforme à la norme française NFP15-403 de juillet 1963. Le ciment utilisé est un ciment CPA-HTS. L'époxyde a été choisi en fonction des résultats d'une étude antérieure. Nous avons utilisé le système A (résine époxyde A + durcisseur A₁ à base de polyamine aliphatique) avec une charge calcaire (20%).

Les éprouvettes sont du type DCB (Fig. 8). L'état de surface est celui du mortier scié. On obtient les surfaces sciées à 28 jours. Au moment du collage, les surfaces présentées sont sèches. Afin d'obtenir une bonne

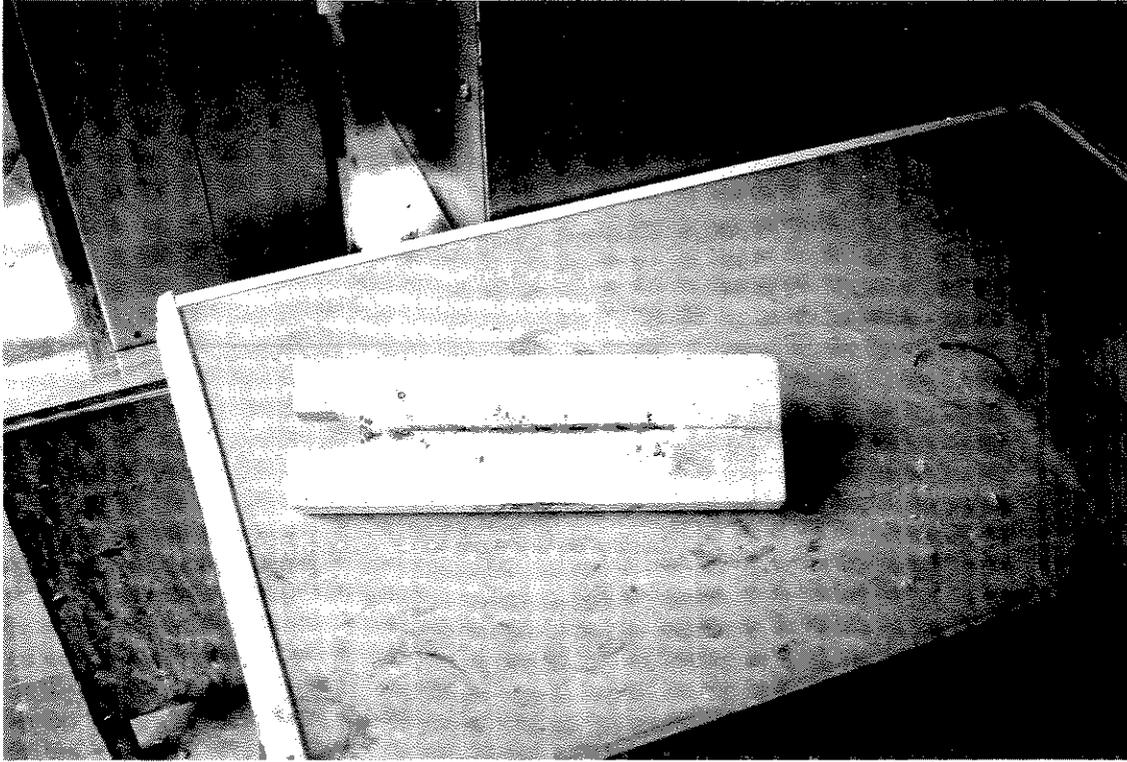


Fig. 9 Eprouvette reconstituée.

reproductibilité de l'état de surface, les éprouvettes sont sorties de l'eau 7 jours avant leur collage. Avant le collage, les surfaces sont ponçées avec du papier de verre et soufflées pour éliminer toutes les parties friables ou souillées.

3.2 Préparation de l'essai

Les surfaces sciées de chaque demi-éprouvette ont été soigneusement recouvertes à l'aide d'une spatule d'une couche de liant époxyde. Passé le délai d'attente requis (dépendant de la cinétique de polymérisation du liant époxyde), nous avons procédé à l'assemblage des deux demi-éprouvettes. Des calles d'1 mm d'épaisseur ont permis de toujours maintenir un joint de cette épaisseur (Fig. 9). Les assemblages ont été conservés à plat et maintenus à l'aide de serre-joints pendant 24 h pour un meilleur mouillage du support mortier. Les éprouvettes reconstituées, restées ensuite en cure à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 72 h, ont été conservées dans l'eau à $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Sept jours après l'assemblage, nous avons procédé à une réduction de la section par sciage (Fig. 10). Le chemin de fissure obtenu était de $7,5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ de chaque côté de l'éprouvette.

Après avoir créé un chemin de fissures, nous avons procédé au renforcement des éprouvettes avec quatre plaques en acier de 3 mm d'épaisseur (Figs 10, 11) afin d'obliger la fissure à suivre toute la longueur de l'éprouvette. Ensuite, deux pièces métalliques collées sur les éprouvettes ont assuré l'amarrage à la machine de traction.

3.3 L'essai

Nous avons tout d'abord effectué des cycles de fatigue pour avoir un fond de fissure bien marqué et éliminer tous les problèmes de jeu au montage, qui peuvent rendre la courbe effort-déplacement non linéaire. Nous avons effectué 10 cycles à 20 daN (charge maximale) à une vitesse de $240 \mu\text{m min}^{-1}$. Ensuite, nous avons commencé l'essai proprement dit à une vitesse de $10 \mu\text{m min}^{-1}$.

Quand nous avons vu la charge diminuer, nous avons arrêté la machine de traction et laissé la fissure se propager suivant un déplacement imposé pendant 15 min. Nous avons ensuite déchargé et mis en charge immédiatement jusqu'à une nouvelle baisse de la charge; nous avons alors arrêté 15 min comme précédemment. Nous avons effectué trois cycles de charge-déchargement.

Après le dernier cycle, nous avons fait une nouvelle montée en charge, mais quand nous sommes arrivés à environ 50% de la charge maximale du cycle précédent, nous avons augmenté notre vitesse d'essai pour une valeur se situant entre 10 et 30 mm min^{-1} . Nous avons ensuite sorti le capteur de déplacement et poursuivi notre essai jusqu'à rupture totale de l'éprouvette. Nous avons enregistré la charge correspondant à cette rupture.

3.4 Evaluation de la longueur de la fissure

Le but principal des premiers essais était de déterminer la meilleure méthode d'évaluation de la longueur de la fissure. Cette connaissance est primordiale pour le calcul du taux de restitution d'énergie. On a utilisé trois méthodes: émission acoustique [4], capteur de déplace-

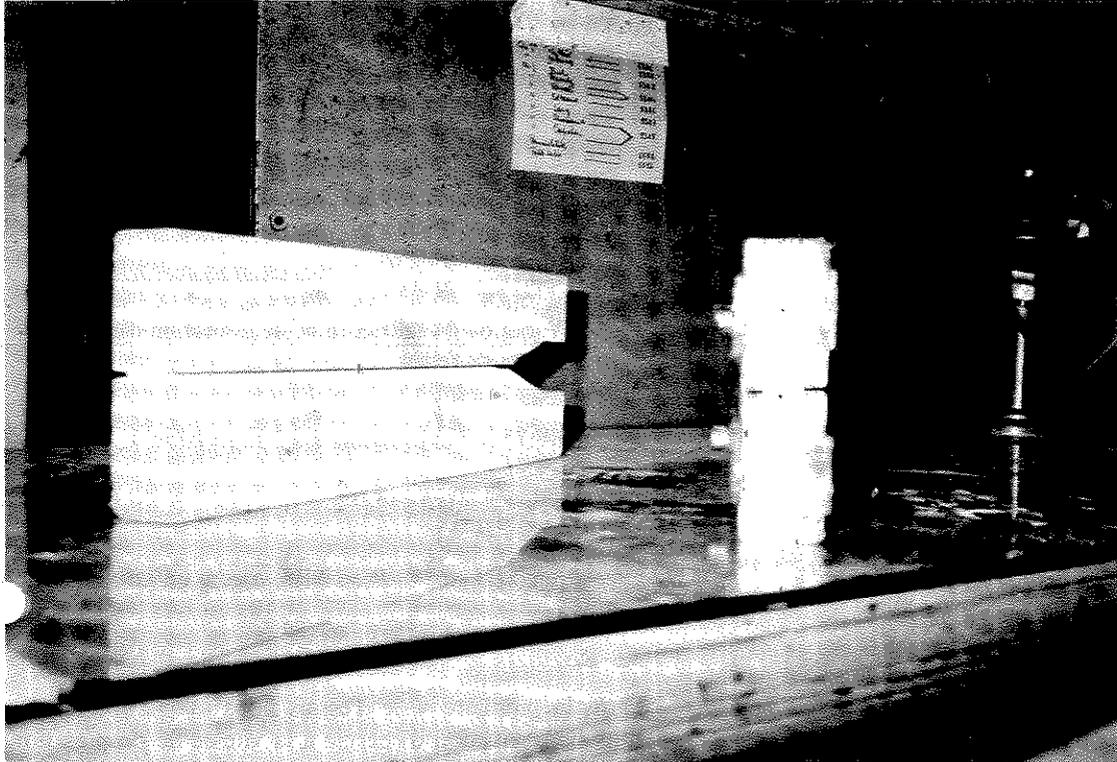


Fig. 10 Chemin de fissure et renforcement des éprouvettes.

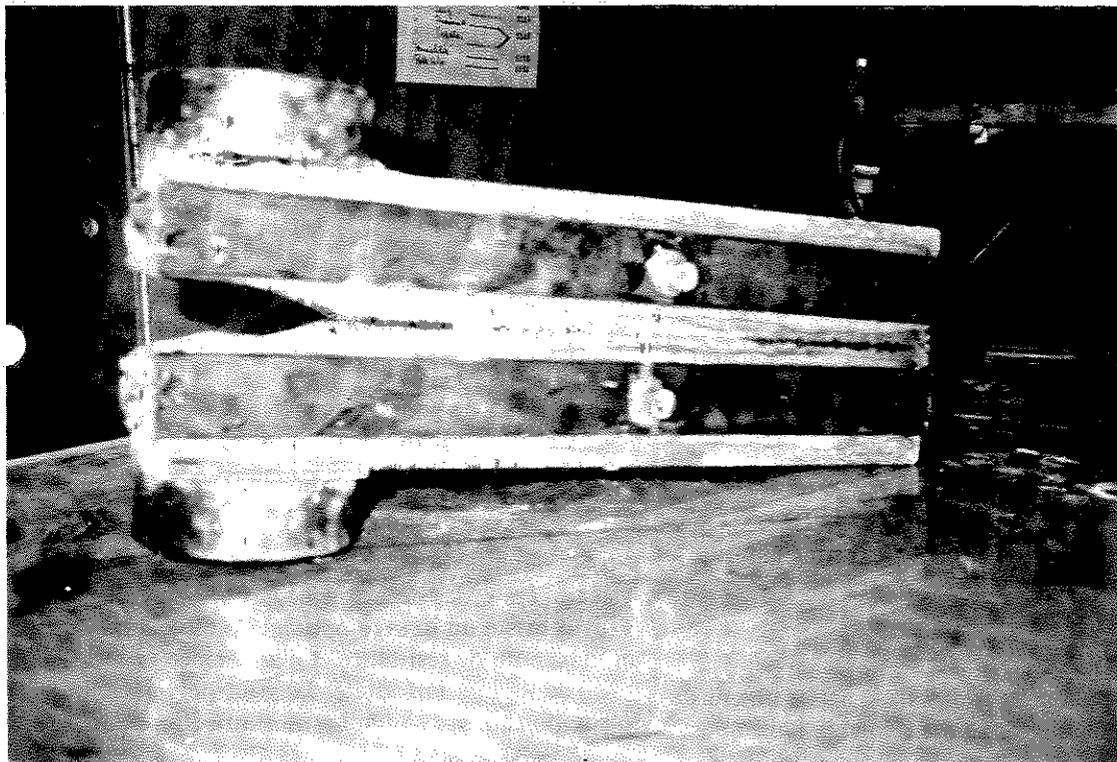


Fig. 11 Epreuve de mortier + colle renforcée.

ment au milieu du chemin de fissure, et compliance des éprouvettes.

On a vérifié que la dispersion est moindre quand on utilise la longueur de la fissure obtenue par la méthode qui consiste à déterminer au moyen d'un programme

d'éléments finis la compliance de l'éprouvette correspondant à une longueur de fissure imposée. La Fig. 12 montre la variation de la compliance avec la longueur a de la fissure.

Avec les points obtenus on peut arriver à une équation

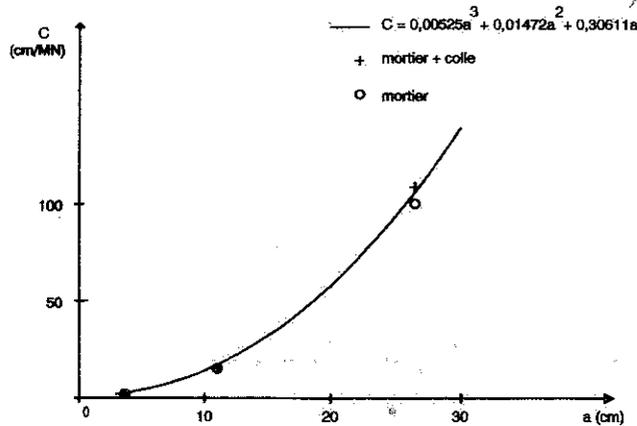


Fig. 12 Variation de la compliance des éprouvettes avec la longueur de la fissure.

d'une courbe du 3^{ème} degré en a . Nous savons que les expressions pour le calcul de G , taux de restitution d'énergie, peuvent être de deux types:

$$G = \frac{P^2}{2B} \left(\frac{dC}{da} \right) \tag{1}$$

C'est la formule de la méthode de compliance. Nous avons une autre expression présentée par Srawley et Gross [5]:

$$G = \frac{12P^2}{B^2h^3E} (a^2 + 1,32ha + 0,532h^2) \tag{2}$$

Si on égalise les expressions 1 et 2, on obtient:

$$\frac{dC}{da} = \frac{24}{Bh^2E} (a^2 + 1,32ha + 0,532h^2) \tag{3}$$

Comme B , h et E sont constants, nous avons

$$\frac{dC}{da} = f(a^2) \tag{4}$$

et, pourtant

$$C = f(a^3) \tag{5}$$

Comme pour $a = 0$, $C = 0$, l'expression 5 est de la forme suivante:

$$C = \alpha_1 a^3 + \alpha_2 a^2 + \alpha_3 a \tag{6}$$

Si on fait passer cette courbe par les trois points obtenus dans les calculs par la méthode des éléments finis, nous avons

$$C = 0,00525a^3 + 0,01472a^2 + 0,30611a \tag{7}$$

avec C en cm MN^{-1} et a en cm . Si on dérive l'expression 7 depuis a , on obtient

$$\frac{dC}{da} = 0,01575a^2 + 0,02944a + 0,30611 \tag{8}$$

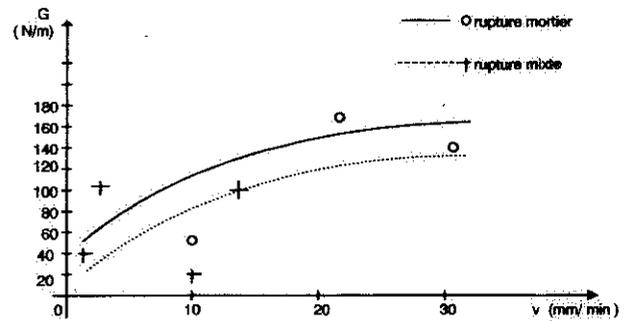


Fig. 13 Variation du taux critique de restitution d'énergie avec la vitesse de l'essai.

Si on substitue l'expression 8 à l'expression 1, on a:

$$G = \frac{P^2}{2B} (0,01575a^2 + 0,02944a + 0,30611) \tag{9}$$

avec G en MN cm^{-1} , P en MN , a et B en cm .

3.5 Résultats

Dans la première série d'essais nous avons obtenu des taux de restitution d'énergie à la vitesse de propagation nulle de $61,93 \text{ N m}^{-1}$ pour la rupture du mortier, et $48,76 \text{ N m}^{-1}$ pour des ruptures mixtes.

Dans une deuxième série nous avons déterminé le taux de restitution d'énergie à la vitesse de propagation nulle G_0 , et le taux critique de restitution d'énergie, G_c . Nous avons trouvé $G_0 = 77,75 \text{ N m}^{-1}$ pour la rupture du mortier et $G_0 = 36,85 \text{ N m}^{-1}$ pour des ruptures mixtes. Ces valeurs sont proches de celles trouvées dans la série n°1.

Pour G_c , les valeurs obtenues sont présentées dans la Fig. 13. On note une tendance à la stabilisation pour des vitesses entre 20 et 30 mm min^{-1} . On propose que la détermination de G_c se fasse à une vitesse de 30 mm min^{-1} . Les valeurs estimées pour G_c sont de $179,00 \text{ N m}^{-1}$.

4. CONCLUSIONS

Des essais de traction directe on peut tirer les conclusions suivantes:

- (i) la quantité de filler qu'il est possible d'ajouter aux systèmes époxydes décroît avec la finesse du filler;
- (ii) il existe un dosage optimal de filler conduisant à un maximum de résistance et d'adhérence;
- (iii) la charge introduite dans un polymère joue un rôle important sur son adhérence au béton humide.

L'évaluation de la résistance des liaisons béton-époxyde avec des essais de mécanique de la rupture a permis de conclure ce qui suit:

- (i) Il est possible d'appliquer la mécanique de la rupture à l'étude des liaisons béton-époxyde. Pour ce faire, on doit utiliser des éprouvettes du type DCB parce qu'elles offrent une plus grande longueur pour la propagation de la fissure. Des trois méthodes utilisées

pour déterminer la longueur des fissures, c'est la méthode de la compliance qui donne les meilleurs résultats;

(ii) Pour les cas étudiés, il a été possible de déterminer le taux de restitution d'énergie à vitesse de propagation nulle, G_0 , et le taux critique de restitution d'énergie, G_c . Les valeurs moyennes de G_0 sont $69,84 \text{ N m}^{-1}$ pour la rupture du mortier et $42,81 \text{ N m}^{-1}$ pour des ruptures mixtes. Celles de G_c s'élèvent à $179,00 \text{ N m}^{-1}$ pour la rupture du mortier et $158,00 \text{ N m}^{-1}$ pour les ruptures mixtes.

(iii) Il s'est vérifié que l'essai de traction directe a déterminé des ruptures dans le béton avec le même époxyde utilisé alors que l'application de la mécanique de la rupture a conduit à un plus grand pourcentage de ruptures mixtes même avec une surface sèche du substrat de béton.

MERCIEMENTS

Je remercie le Laboratoire Central des Ponts et

Chaussées, Paris, France qui a permis la réalisation de ce travail dans ses installations.

REFERENCES

1. Lamouri, R., 'Analyse de la liaison adhésive entre un liant époxydique et le béton hydraulique', Thèse présentée à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris (1984).
2. Paillère, A. M. *et al.*, 'Influence de la nature et de la granularité de la charge sur l'adhérence des résines époxydes au béton durci sec et humide, in Proceedings of Conference on Adhesion between Polymers and Concrete, Aix-en-Provence, France, September 1986.
3. Troncy, M., 'Etude de la liaison adhésive, entre un liant époxydique et le béton,' Mémoire présenté à l'Université de Clermont II, Aubière, France (1985).
4. Aguiar, J. L. *et al.*, 'Mechanical behaviour of adhesive joints such as a concrete epoxy', in Proceedings of Conference on Mechanical Behaviour of Adhesive Joints, Saint-Etienne, France, August 1987.
5. Srawley, J. E. et Gross, B., 'Stress intensity factors for crackline-loaded edge-crack specimens', *Mater. Res. Stds* 7(4) (1967) 155-162.

SUMMARY

Tests on bonding between epoxies and hydraulic concrete

The importance of techniques of repair and glued assembly of concrete structures is becoming increasingly obvious. The need to repair these structures arises from their age or construction defects. Polymers are now being used in glued assembly and repairs because of their adhesion quality

which ensures bonding of hardened concrete-hardened concrete, hardened concrete-fresh concrete and hardened concrete-metallic materials.

This article presents two tests, one under direct tension and the other based on the principles of fracture mechanics. The latter offers the possibility of a more rigorous evaluation of the bond than direct tension tests. The author has determined the tensile strength and the energy recovery rate for the bond between hardened concrete and epoxy.