

Modélisation du décollement de l'interface ancien-nouveau béton sous sollicitations monotones et de fatigue

Quoc Thanh Tran

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), 135 avenue de Rangueil 31077 Toulouse Cedex 9

RESUME. Ce travail, couplant l'expérimentation et la modélisation, est dédié à l'étude de la propagation du décollement le long d'une interface entre un support simulant une structure en ancien béton et un Rechargement Mince Adhérent à base Cimentaire (RMAC). Il s'agit d'une contribution pour la maîtrise de la durabilité des réparations. En se basant sur des données expérimentales, un modèle couplant des effets mécaniques (chargements monotones et en fatigue) et des effets différés (retrait, fluage, relaxation des contraintes) a été construit. La modélisation par la méthode d'éléments finis a permis de mieux comprendre l'origine du décollement de l'interface support-réparation et d'identifier des paramètres essentiels qui conditionnent la durabilité des RMACs.

MOTS-CLÉS : interface, décollement, réparation.

ABSTRACT. This work, associating experiment and simulation approaches, is dedicated to the study of debonding propagation between a substrate simulating an old concrete structure and a thin bonded cementitious overlay. It is a contribution for the durability of repairs. Based on the experimental data, a model coupling mechanical effects (monotonic and fatigue loadings) and delayed effects (shrinkage, creep, stress relaxation) has been developed. The modelling by Finite Element Method allowed a better understanding of the origin of overlay-substrate interface debonding and identification of key parameters governing the durability of thin bonded cementitious overlays.

KEYWORDS: interface, debonding, repairs.

1. INTRODUCTION

De nos jours, avec un nombre important d'anciens ouvrages à entretenir, la réparation est une problématique d'actualité. Pour développer une science de réparation, il est essentiel de mieux comprendre et prédire le comportement composite de telles structures réparées en tenant compte de plusieurs facteurs d'impact liés aux matériaux utilisés ainsi qu'aux conditions réelles d'exploitation. Ce travail fait partie d'un vaste programme de recherche mené au laboratoire LMDC (Granju, 2001 ; Turatsinze *et al.*, 2005 ; Tran *et al.*, 2007). Il s'attache à développer un modèle permettant de prédire l'évolution de la fissure dans le rechargement ainsi que la propagation du décollement de l'interface support-réparation.

2. ETUDES EXPERIMENTALES

2.1. MATERIAUX DE RECHARGEMENT

Le matériau de référence est un Mortier Ordinaire (MO) dont la composition est donnée dans le Tableau 1. Le comportement du matériau de référence est comparé à celui d'un rechargement renforcé de fibres métalliques amorphes qui ont la forme de rubans (29 μm d'épaisseur, 1,6 mm de largeur et

30 mm de longueur). Ces fibres sont flexibles, inoxydables et présentent une haute adhérence ainsi qu'une résistance en traction élevée (2 GPa). La composition du Mortier Fibré (MF) est dérivée de celle du matériau de référence : les fibres ont été ajoutées à un dosage de 20 kg/m^3 et le super-plastifiant a été ajusté pour assurer une maniabilité constante.

2.2. EPROUVETTES COMPOSITES

Une éprouvette composite est constituée d'une couche de rechargement sur un support simulant une structure de base. Deux types de support ont été envisagés :

- d'une part des supports métalliques de sections creuses. Leurs surfaces de coulage ont été préalablement préparées pour obtenir une couche fine de mortier adhérent. De cette manière, malgré la nature métallique des supports, on peut considérer le contact support-rechargement comme un contact béton-béton.
- d'autre part des supports cimentaires qui ont été fabriqués en utilisant la composition MO et conservés pendant 6 mois avant de couler le rechargement. Pour obtenir une bonne adhérence support-réparation, la couche de laitance du support de faible qualité a été enlevée par sciage. Ce type de support permet d'étudier le comportement d'une mini réparation plus réaliste.

Composant	Quantité (kg/m^3)
Ciment (CPA CEM I 52.5 R)	500
Sable (0-4 mm)	1600
Super-plastifiant	3,25
Eau	235

Tableau 1 – Composition du matériau de référence.

Notation	Recha- gement	Epaisseur d'un rechargement (mm)	Profondeur d'encoche (mm)
SM150-RF60	MF	60	20
SM150-RO60	MO		
SC90-RF50	MF	50	10

Tableau 2 – Détail des éprouvettes composites.

La réponse structurale d'une réparation a été évaluée par le biais d'essais de flexion trois points. Le rechargement a été encoché à mi-travée pour prédéterminer et localiser une fissure éventuelle due au retrait empêché. Chaque couche de rechargement a une longueur de 500 mm et une largeur de 100 mm. Pour les supports métalliques, deux compositions de rechargement (MO et MF) ont été utilisées tandis qu'une seule composition MF a été testée pour les supports cimentaires.

Les éprouvettes composites ont été démoulées à 24 heures après le coulage, puis enveloppées par des films plastiques et placées dans une salle de 20°C et 60% HR. De cette façon, les effets du retrait sont atténués mais non négligeables. Ces effets seront pris en compte dans la modélisation. Toutes les éprouvettes ont été testées à l'âge de 7 jours.

2.3. ESSAIS DE FLEXION TROIS POINTS MONOTONE ET DE FATIGUE

Le dispositif permettant d'effectuer les essais de flexion trois points monotone et de fatigue est une presse commandée en circuit fermé avec une capacité de 50 kN. Les éprouvettes composites décrites ci-dessus ont été placées sur deux appuis avec une portée de 430 mm. La disposition est telle que la couche de rechargement sous le support est soumise en tension lorsque la charge est appliquée sur le support. Dans le cas des chargements monotones, l'essai a été asservi à l'ouverture de l'encoche avec une vitesse de $5 \mu\text{m/min}$. Quatre grandeurs ont été mesurées : la charge, la flèche, l'ouverture de l'encoche ainsi que la longueur du décollement de l'interface. Cette dernière mesure a été rendue possible par un vidéo-microscope avec l'agrandissement de 175x. Concernant l'essai de fatigue, un

chargement sinusoïdal en force entre deux niveaux maximal et minimal ($P_{\max}$ et $P_{\min}$ respectivement) avec une fréquence de 5 Hz est imposé. Le niveau de la charge $P_{\max}$ a été choisi au voisinage de la charge d'amorce du décollement de l'interface dans l'essai monotone tandis que le niveau de la charge $P_{\min}$ correspond à la précharge. Les caractéristiques des essais sont données dans le Tableau 3. L'ouverture de l'encoche à $P_{\max}$ et la longueur du décollement de l'interface ont été mesurées de la même manière que dans l'essai de flexion monotone. Les résultats expérimentaux seront exposés en comparaison avec les résultats issus d'un modèle numérique présenté par la suite.

3. PRINCIPE DE LA MODELISATION

Pour simuler le comportement mécanique de l'interface support-rechargement sous sollicitations monotones et de fatigue, un modèle basé sur le concept de la fissure cohésive a été développé. Les résistances résiduelles entre deux surfaces de la fissure ou du décollement, les effets différés et l'effet de fatigue mécanique sont les paramètres essentiels à prendre en compte.

3.1. MODELISATION DE LA FISSURATION DU RECHARGEMENT OU DU DECOLLEMENT DE L'INTERFACE

Le calcul est effectué en utilisant la méthode d'éléments finis. Pour contrôler la propagation de la fissure ou du décollement, la contrainte normale au nœud immédiatement suivant le nœud du fond de la fissure ou du décollement est prise en considération comme illustrée sur la Figure 1.

Eprouvettes	$P_{\max}$ (kN)	$P_{\min}$ (kN)
SM150-RF60	11,0	0,1
SM150-RO60	8,2	0,1
SC90-RF50	9,0	0,1

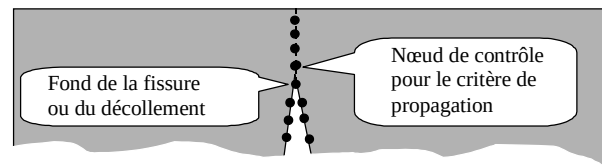


Tableau 3 – Paramètres des essais de flexion de fatigue.

Figure 1 – Contrôle de la propagation de la fissure ou du décollement.

De cette manière, le fond de la fissure ou du décollement se propage si la contrainte normale au nœud considéré dépasse la résistance en traction du matériau de rechargement ou de l'interface (rupture en mode I). Les résistances résiduelles entre deux surfaces de rupture sont ensuite prises en compte par des efforts résiduels calculés à partir des lois σ - w associées. Le modèle a été mis en œuvre en 2D avec l'hypothèse des contraintes planes. Les distances inter-nœuds le long de la fissure ou du décollement ont été optimisées à 1 mm. Il s'agit d'un calcul itératif avec un critère de précision à vérifier avant chaque incrément de déplacement ou de chargement imposé.

3.2. LOIS σ - w ET LEUR EVOLUTIONS SOUS SOLLICITATION DE FATIGUE

Différentes relations σ - w pour les matériaux de rechargement et les interfaces support-réparation, identifiées en détail dans la contribution précédente (Tran *et al.*, 2007), sont résumées par les [Eq. 1] à [Eq. 3]. Les valeurs des paramètres seront explicitées dans le Tableau 4.

Pour le matériau de rechargement MF:

$$\sigma_1 = \begin{cases} (R_t - \sigma_r) \cdot (w_0 - w) / w_0 + \sigma_r & (0 \leq w \leq w_0) \\ \sigma_r & (w_0 < w \leq w_c) \\ \sigma_r \cdot \exp(-3 \cdot (w - w_c) / w_l) & (w_c \leq w \leq w_l) \end{cases} \quad [\text{Eq. 1}]$$

Pour le matériau de rechargement MO:

$$\sigma_1 = R_t \cdot \exp(-6 \cdot w / w_l) \quad [\text{Eq. 2}]$$

Pour l'interface support-réparation:

$$\sigma_1 = R_t \cdot \exp(-5 \cdot w / w_l) \quad [\text{Eq. 3}]$$

expressions dans lesquelles σ_t et R_t sont respectivement la contrainte normale résiduelle et la résistance en traction du matériau de rechargement ou de l'interface support-réparation ; w est l'ouverture de la fissure ou du décollement et w_l est l'ouverture limite au-delà de laquelle les contraintes résiduelles sont considérées comme nulles ; σ_r , w_0 et w_c sont les paramètres qui caractérisent la phase de consolidation pour le matériau MF (Figure 2).

Zhang et al. (1999) ont mis en évidence le phénomène de dégradation des contraintes résiduelles sous l'effet de fatigue mécanique dans l'essai de traction cyclique asservi en déplacement. La méthode utilisée dans ce travail pour simuler la cinétique de la fissuration ou du décollement sous chargements de fatigue consiste à exprimer la contrainte résiduelle comme une fonction de l'ouverture de la fissure ou du décollement, w , et du nombre de cycles, N . En se basant sur les lois proposées par Zhang et al., l'évolution des lois σ - w est traduite par les [Eq. 4] à [Eq. 5].

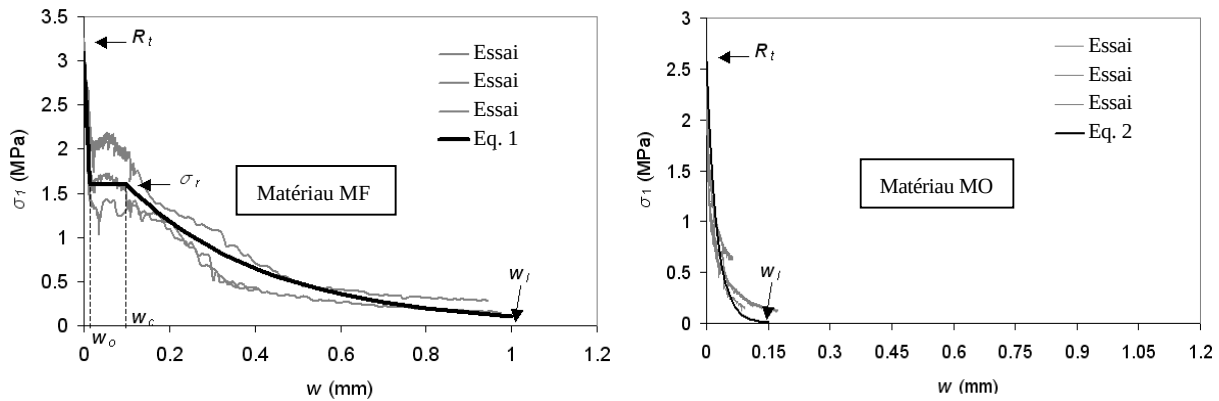


Figure 2 – Courbes σ - w pour les matériaux de rechargement.

L'évolution des lois σ - w pour le rechargement MO et l'interface support-réparation :

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_1} = 1 - \varphi \cdot k \cdot \log(N) \quad [\text{Eq. 4}]$$

L'évolution des lois σ - w pour le rechargement MF :

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_1} = \begin{cases} 1 + \varphi \cdot k_1 \cdot \log(N) & (1 \leq N \leq 10) \\ 1 + \varphi \cdot [(k_1 - k_2) + k_2 \cdot \log(N)] & (10 \leq N \leq 10^5) \end{cases} \quad [\text{Eq. 5}]$$

σ_N et σ_1 sont les contraintes résiduelles au $N^{\text{ième}}$ et au 1^{er} cycle respectivement, σ_1 est calculée grâce aux [Eq. 1] à [Eq. 3]. φ est le facteur tenant compte de l'influence de l'ouverture de la fissure minimum ($w_{\min}$). k , k_1 et k_2 sont fonctions de l'ouverture de fissure maximale, $w_{\max}$. Ils sont donnés par les [Eq. 6] à [Eq. 8]. Le paramètre A est adapté au matériau MO ou selon le type d'interface support-réparation. Identiquement, les constants B_1 , B_2 , w_{01} , C_1 , C_2 et w_{02} pour le matériau MF sont à déterminer selon le type et le dosage des fibres utilisées.

$$k = \varphi \cdot (A + 4w_{\max}) \quad [\text{Eq. 6}]$$

$$k_1 = \begin{cases} B_1 \cdot w_{\max} & (0 \leq w_{\max} \leq w_{01}) \\ (B_1 - B_2) \cdot w_{01} + B_2 \cdot w_{\max} & (w_{01} < w_{\max} \leq 1) \end{cases} \quad [\text{Eq. 7}]$$

$$k_2 = \begin{cases} C_1 \cdot w_{\max} & (0 \leq w_{\max} \leq w_{02}) \\ (C_1 - C_2) \cdot w_{02} + C_2 \cdot w_{\max} & (w_{02} < w_{\max} \leq 1) \end{cases} \quad [\text{Eq. 8}]$$

3.3. MODELISATION DE L'EFFET DE FATIGUE

Après chaque cycle de charge, le fond de la fissure ou du décollement peut être propagé à une nouvelle position. Après un nombre donné de cycles, la surface totale de rupture est constituée de plusieurs zones ayant subi des historiques de fatigue différentes. L'effet de fatigue sur les efforts résiduels est donc évalué selon l'histoire de fatigue de chaque zone. Pour accélérer le calcul, l'incrément de quelques cycles a été appliqué comme ci-dessous :

0 < N ≤ 100 cycles : incrément avec 10 cycles,
 100 < N ≤ 1000 cycles : incrément avec 100 cycles,
 1000 < N ≤ 10000 cycles : incrément avec 1000 cycles,
 10000 < N ≤ 100 000 cycles : incrément avec 2000 cycles.

La procédure de modélisation de l'essai de fatigue est illustrée par la figure 3.

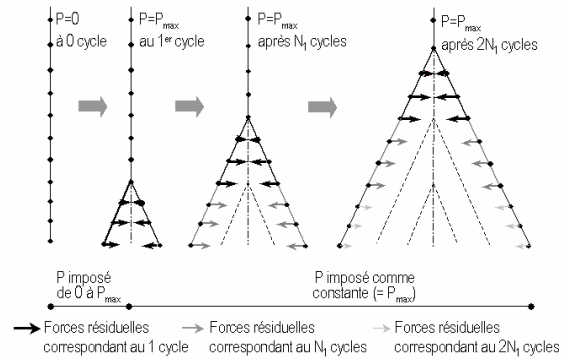


Fig. 3 – Affection des efforts résiduels entre deux surfaces de la fissure ou du décollement selon l'historique de la fatigue.

3.4. MODELISATION DES EFFETS DIFFERES

3.4.1. Modélisation du retrait de séchage et du retrait endogène

Dans cette étude, le séchage du matériau a été modélisé en utilisant les équations suivantes (Rahman *et al.*, 2000) :

Loi de diffusion : $\partial C / \partial t = \text{div}(D(C) \cdot \text{grad}(C))$ [Eq. 9]

Conditions initiales : $C_0 = W - r \cdot \gamma \cdot B_m$ [Eq. 10]

Conditions aux limites : aux surfaces d'évaporation : $D(C)(\partial C / \partial n) = f(C) \cdot (C_e - C_s)$ [Eq. 11]

en particulier à l'interface support métallique-mortier : $\partial C / \partial n = 0$ [Eq. 12]

équations dans lesquelles : C est la teneur en eau libre dans le matériau, D est la diffusivité hydrique, W et B_m sont la teneur en eau et la teneur en liant, respectivement, dans la formulation du matériau, C_0 est la teneur en eau libre initiale, r est le degré d'hydratation, γ représente la proportion massique d'eau réagissant avec le ciment, $\vec{n}$ est le vecteur normale unitaire à la surface de séchage, C_e est la teneur en eau d'équilibre lorsqu'un élément est conservé dans une condition d'humidité donnée, C_s est la teneur en eau aux surfaces de séchage et $f(C)$ est le coefficient convectif de transfert hydrique.

Une relation linéaire [Eq. 13] entre la variation de teneur en eau, ΔC , et le retrait de séchage libre, ε_h , a été utilisée (Féron, 2002), équation dans laquelle k est déterminé à partir de la courbe de perte de masse. L'identification des paramètres nécessaires à la modélisation du retrait de séchage est détaillée dans la contribution précédente (Tran *et al.*, 2007). En ce qui concerne le retrait endogène, il a été mesuré sur des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm et traité comme une perte de teneur en eau uniforme dans tout le volume du matériau qui vient s'ajouter à ΔC dans [Eq. 13] (Tran *et al.*, 2007).

$$\varepsilon_h = k \cdot \Delta C \quad [\text{Eq. 13}]$$

3.4.2. Couplage retrait-fluage-relaxation des contraintes

Les contraintes induites dans le système composite par le retrait empêché sont soumises à une redistribution au cours du temps. Pour traiter ce problème, un module effectif ajusté du matériau de rechargement, $E_{ca}(t)$, défini par [Eq. 14], a été utilisé pour calculer les contraintes induites (Bazant, 1972).

$$E_{ca}(t, t_0) = \frac{E(t)}{1 + \chi(t, t_0) \cdot \phi(t, t_0)} \quad [\text{Eq. 14}]$$

$\phi(t, t_0)$ et $\chi(t, t_0)$ sont les coefficients de fluage et de vieillissement, $E(t)$ est le module d'élasticité instantané à l'instant t et t_0 est l'âge (en jours) au moment où les sollicitations de retrait sont considérées effectives. $\phi(t, t_0)$ et $\chi(t, t_0)$ ont été calculés en s'appuyant sur la norme ACI (ACI 209R, 1992) et en utilisant les formules proposées par Bazant (Bazant, 1972) comme détaillé par Tran *et al.*, 2007.

3.5. MISE EN ŒUVRE

		Rechargement MO	Rechargement MF	Interface acier- mortier	Interface mortier- mortier
	E (MPa)	31 000	31 000	—	—
Lois σ-w	R_t (MPa)	2,6	3,1	1,5	1,1
	w_l (mm)	0,15	1,0	0,01	0,04
	σ_r (MPa)	—	1,6	—	—
	w₀ (mm)	—	0,015	—	—
	w_c (mm)	—	0,1	—	—
Evolution des lois σ-w	A	0.07	—	0.09	0.09
	B₁ (mm⁻¹)	—	-1.43	—	—
	B₂ (mm⁻¹)	—	0.339	—	—
	C₁ (mm⁻¹)	—	-1.30	—	—
	C₂ (mm⁻¹)	—	0.098	—	—
	w₀₁ (mm)	—	0.166	—	—
	w₀₂ (mm)	—	0.07	—	—
	ϕ	1	1	1	1

Tableau 4 – Paramètres mécaniques d'entrée du modèle.

Le calcul a été scindé en deux étapes. Dans la première étape, on a évalué le champ des contraintes induites dans le système composite dû aux effets différés (retrait, fluage, relaxation). Ce champ des contraintes est calculé par la loi de Hook en utilisant le module effectif ajusté, E_{ca} et a été ensuite transformé en forces nodales qui viennent se superposer aux chargements mécaniques. Dans la seconde étape, la modélisation du comportement mécanique du système composite a été effectuée en utilisant le modèle de la fissure cohésive. Les paramètres gouvernant l'évolution des lois σ -w dans un chargement cyclique (cf. [Eq. 4] à [Eq. 8]) ont été obtenus par analyse inverse et sont détaillés dans le Tableau 4.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats expérimentaux et numériques présentés sur les figures 4-7 ont permis de valider le modèle dans différents cas (chargements monotones ou chargements de fatigue, éprouvettes composites acier-mortier ou mortier-mortier). On trouve une bonne concordance entre la modélisation et l'expérimentation. Cet outil numérique a été ensuite exploité pour analyser des facteurs influençant la durabilité des rechargements minces adhérents.

Les figures 8-11 présentent quelques résultats de cette étude paramétrique de la cinétique du décollement. Pour analyser l'impact d'un paramètre, nous avons fait varier sa valeur en supposant que les autres paramètres du modèle restent inchangés. Les figures 8-9 montrent que plus la résistance en traction du matériau de rechargement ou de l'interface est élevée, plus la propagation du décollement est retardée. La figure 10 présente le rôle positif d'un renforcement du matériau de réparation par des fibres. L'effet du retrait de séchage du matériau d'apport sur la cinétique de dégradation de l'interface a été éclairé dans la figure 11 avec la considération de différents taux d'humidité du milieu ambiant.

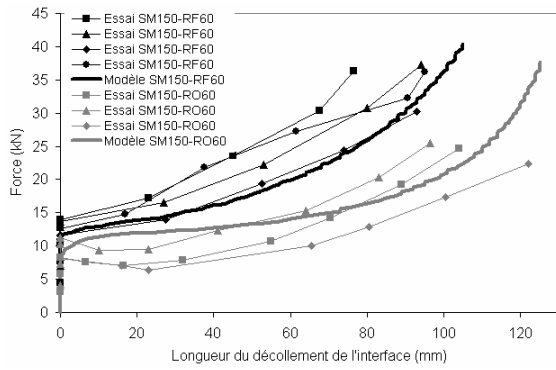


Figure 4—Force-longueur du décollement (chargements monotones).

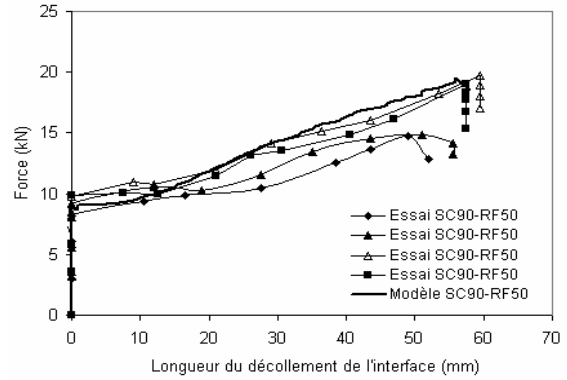


Figure 5 – Force-longueur du décollement (chargements monotones).

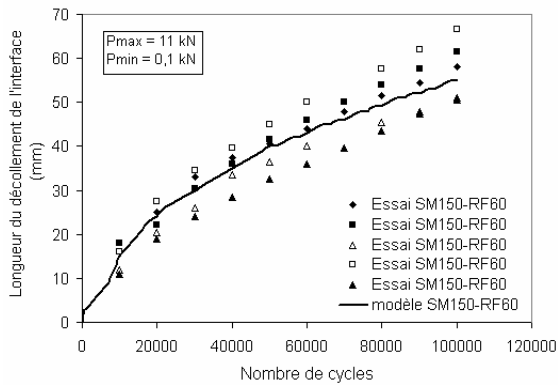


Figure 6 – Longueur du décollement en fonction du nombre de cycles (chargement de fatigue).

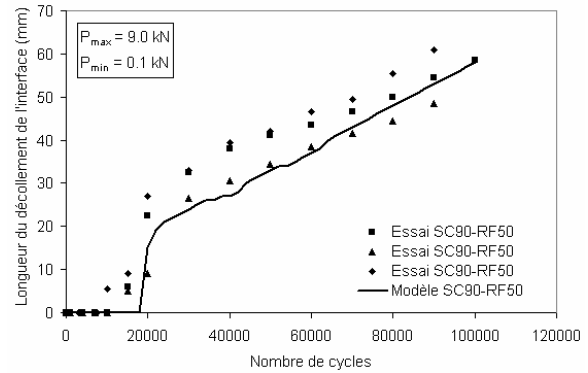


Figure 7 – Longueur du décollement en fonction du nombre de cycles (chargement de fatigue).

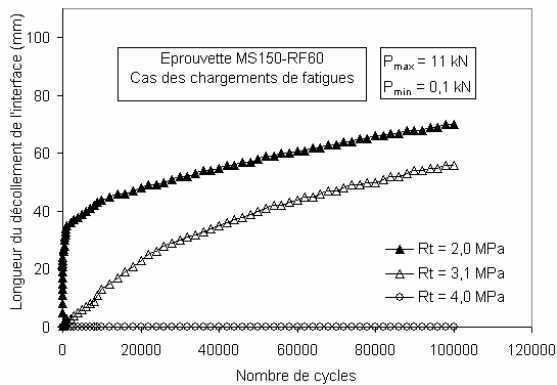


Figure 8 – Influence de la résistance en traction du matériau de rechargement.

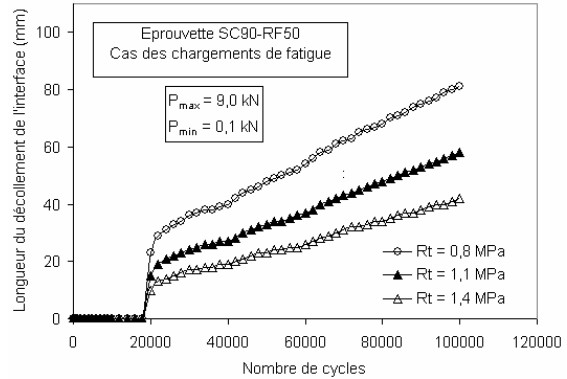


Figure 9 – Influence de la résistance en traction de l'interface.

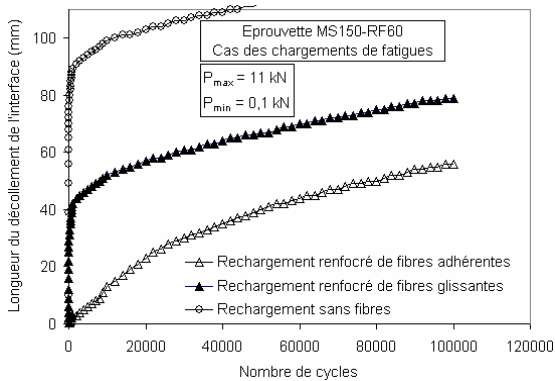


Figure 10 – Influence du type des fibres renforçant le matériau de rechargement.

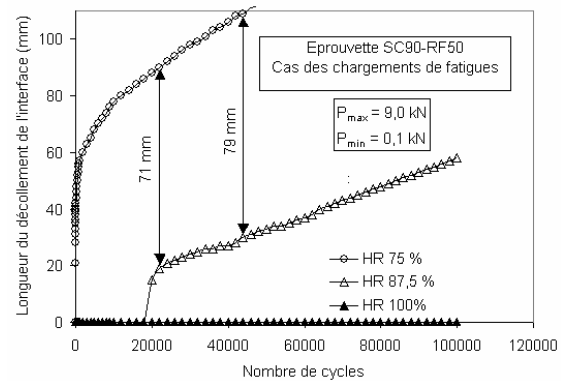


Figure 11 – Influence de l'humidité relative du milieu ambiant.

5. CONCLUSIONS

En se basant sur le concept de la fissure cohésive, un modèle permettant une simulation du décollement d'un rechargement mince adhérent à base cimentaire de son support a été développé. Ce modèle a ensuite servi à identifier des paramètres importants influençant la durabilité de l'interface support-rechargement. A l'issue de ce travail, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. La cinétique du décollement de l'interface est conditionnée par la dégradation de la résistance résiduelle dans la zone fissurée du rechargement ainsi que dans la zone décollée de l'interface.
2. Un matériau de réparation avec une résistance en traction élevée contribue à la durabilité des rechargements. Par conséquent, une méthode appropriée de préparation de la surface de coulage du support peut améliorer la résistance en traction de l'interface et ainsi retarder la propagation du décollement.
3. Un renfort par des fibres apparaît comme une solution adéquate pour améliorer la durabilité de l'interface support-rechargement. Dans cet objectif, des fibres adhérentes apparaissent les plus efficaces.
4. Le retrait du rechargement, empêché par le support, est un facteur particulièrement aggravant vis à vis la durabilité de l'interface et une cure appropriée doit être mise en œuvre pour le limiter.

Dans la perspective, le modèle peut être enrichi pour tenir compte d'autres phénomènes (variations thermiques, cycles de gel-dégel...). Par ailleurs une méthode de calcul analytique moins sophistiquée reste nécessaire pour établir des règles de dimensionnement des rechargements minces adhérents à base cimentaire.

6. BIBLIOGRAPHIE

ACI 209R-92 (1992), (reapproved 1997), «*Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*», reported by ACI committee 209.

Bazant Z-P. (1972) «Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method», *ACI Journal*, p. 212-217.

Feron C. (2002), «Etude des mécanismes de génération de contraintes et de fissuration par retrait gêné dans les structures à base de matériaux cimentaires», PhD thesis of INSA Lyon, 17 June 2002.

Granju J.L. (2001), «Debonding of thin cement-based overlays», *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 13, n° 2, p. 114-120.

Rahman M.K., Baluch M.H., Gadhbi A.H. (2000), «Simulation of shrinkage distress and creep relief in concrete repair», *Composites Part B: Engineering*, vol. 31, n° 6-7, p. 541-553.

Tran Q. T., Toumi A., Turatsinze A. (2007), «Modelling of debonding between old concrete and overlay: fatigue loading and delayed effects», *Materials and Structures*, accepté et publié en ligne, <https://www.springerlink.com/content/f54250770052300h/resource-secured/?target=fulltext.pdf>

Turatsinze A., Granju J.-L., Sabathier V. and Farhat H. (2005), «Durability of bonded cement-based overlays: effect of metal fibre reinforcement», *Materials and Structures*, vol. 38, p. 321-327.

Zhang J., Stang H., Li V-C. (1999), «Fatigue life prediction of fibre reinforced concrete under flexural load», *International Journal of Fatigue*, vol. 21, p. 1033-1049.