

PHASES D'INITIATION ET DE PROPAGATION DE LA CORROSION ET DURÉE DE VIE DU BETON ARMÉ EN MILIEU SALIN

Arnaud CASTEL, Raoul FRANÇOIS, Ruijin ZHANG

INSA de Toulouse

Vute SIRIVIVATNANON

C.S.I.R.O.

1. INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années, l'une des principales préoccupations de la recherche au niveau international en génie civil a été de promouvoir des moyens et procédures pour l'entretien et la gestion du patrimoine des ouvrages en béton. Prédire la durée de vie des ouvrages et le moment optimal pour engager des réparations est un apport nécessaire aux maîtres d'ouvrage pour mieux gérer le vieillissement du patrimoine bâti ou des constructions futurs.

La principale cause de dégradation des structures en béton est la corrosion des aciers dont les conséquences peuvent être très préjudiciables pour la sécurité des usagers et dont les coûts de réparation sont extrêmement élevés. Les principaux facteurs environnementaux mis en cause sont les chlorures provenant de l'eau de mer ou de l'air marin et l'utilisation de sels fondants pour le déverglaçage des routes. Ce problème concerne donc tous les pays comportant des frontières maritimes ou des structures en régions froides ou montagneuses. La majeure partie des études consacrées à la durée de vie considère que le critère de fin de service correspond au démarrage de la phase de propagation de la corrosion. Pourtant, cet instant ne signifie pas que la performance de la structure est mise en cause. Dans cet article, l'analyse du vieillissement de deux poutres en béton armé (16 mm et 48 mm d'enrobage de béton pour les aciers longitudinaux) conservées en milieu salin sous charge de service pendant 17 ans, permet d'étudier le processus à la fois dans sa phase d'initiation (pénétration des agents agressifs) et de propagation de la corrosion des armatures. L'influence de paramètres tels que l'épaisseur d'enrobage et le chargement mécanique seront discutés. L'impact de la corrosion sur les performances de la structure sous chargement de service sera prise en compte pour analyser la limite de service de l'ouvrage et sa durée de vie opérationnelle en phase de propagation.

2. CONTEXTE EXPÉRIMENTAL

Depuis 1984, un important programme de recherche est en cours au LMDC. L'objectif de ce programme de recherche est d'étudier, à long terme, les couplages entre le chargement mécanique des structures et le développement de la corrosion des armatures en milieu salin. Initialement, 36 poutres en béton armé (3000 x 280 x 150 mm) ont été fabriquées et conservées sous charge de service dans un brouillard salin. Le brouillard salin était dosé à 35 g/l de NaCl, ce qui correspond à une concentration saline en milieu marin. En parallèle, 36 poutres témoins ont aussi été fabriquées et conservées en ambiance non agressive au laboratoire. A différentes échéances, des poutres corrodées ont été prélevées afin de réaliser des tests pour suivre leur vieillissement (taux de chlorures, taux de corrosion des aciers, influence de la fissuration mécanique...). Une synthèse complète sur les 13 premières années de ce programme expérimental est déjà publiée [1]. L'un des intérêts principaux de ce travail est que la corrosion résulte d'un processus naturel sous différents niveaux de chargement et donc en présence de fissures fonctionnelles sans utiliser de champ électrique pour accélérer le vieillissement des corps d'épreuve. Dans ce cas, le processus de corrosion et les produits de corrosion formés sont représentatifs des conditions réelles de vieillissement des structures.

Deux types de poutres (notées type A et type B) ont été fabriqués. Ces poutres ont été armées à l'aide d'aciers classiques de limite élastique $f_e = 500$ MPa. Les poutres de type A et B ont un enrobage respectif de 4 cm et 1 cm (16 mm et 48 mm d'enrobage de béton pour les aciers longitudinaux), en accord avec les règles du BAEL 1983 en vigueur lors de leur fabrication. Les caractéristiques géométriques ainsi que les plans de ferrailage des poutres sont donnés dans la figure 1. Deux intensités de chargement ont pu être appliquées aux poutres pendant 17 ans en flexion trois points : $M_{ser1} = 14$ kN.m ou $M_{ser2} = 21$ kN.m. Les moments de rupture pour les poutres A et B sont de 42 kN.m et de 38 kN.m. Le tableau 1 donne la composition du béton. La résistance mécanique moyenne du béton mesurée à 28 jours est de 45 MPa, son module élastique étant de 32 GPa.

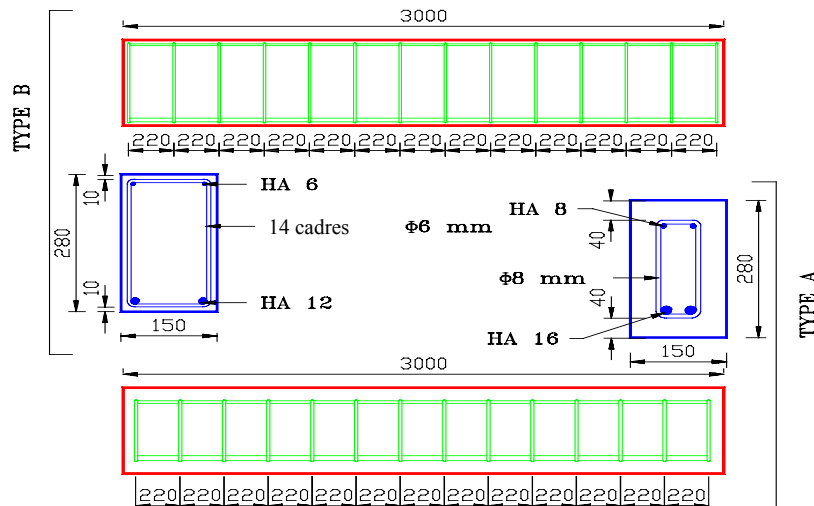


Figure 1 : Caractéristiques géométriques et plans de ferrailage des poutres A et B

Granulats roulés silico-calcaires (5/15 mm)	1220
Sable (0/5 mm)	820
Ciment CPA 55R (1984)	400
Eau	200

Table 1. Composition du béton (kg/m³)

3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Deux poutres sont particulièrement étudiées pour cet article : une poutre de type A conservée pendant 17 ans sous un chargement mécanique d'intensité $M_{ser1} = 14$ kN.m (notée A1CL1) et une poutre de type B conservée pendant 17 ans sous un chargement mécanique d'intensité $M_{ser2} = 21$ kN.m (notée B2CL2).

Pour A1CL1 (4 cm d'enrobage), ce moment de flexion correspond à un dimensionnement aux ELS fissuration très préjudiciable. Pour B2CL2 (1 cm d'enrobage), ce moment de flexion correspond au double de celui autorisé aux ELS fissuration très préjudiciable. L'objectif est d'analyser le processus de corrosion à la fois dans sa phase d'initiation (pénétration des agents agressifs) et de propagation en fonction de paramètres tels que l'épaisseur d'enrobage, chargement mécanique et le taux de chlorure à la profondeur des aciers dans le béton. L'impact de la corrosion sur la performance de la structure sous charge de service sera pris en compte pour analyser la limite de service de l'ouvrage.

3.1. Mesure des taux de chlorure totaux au niveau des aciers

Durant les premières années du programme de recherche, la quantification des taux de chlorure n'a pu être réalisée de façon précise. Ensuite à l'échéance de 5 ans, des taux de chlorure ont pu être mesurés, mais les poudres de béton ont été prélevées à l'aide d'une perceuse équipée d'un foret de 10 mm de diamètre donc inférieur à 3 fois la taille des plus gros granulats. En conséquence, la précision de la mesure restait limitée. Enfin, au delà de 5 ans, les prélèvements ont été effectués par la technique de "grinding" [2]. Elle utilise un broyeur Germann Instruments qui se présente sous la forme d'un tube diamanté rotatif qui permet de réduire le matériau en poudre sur une surface circulaire d'environ 30 mm. Cette méthode très précise et très fiable

permet de récupérer une poudre très fine ($<80 \mu\text{m}$) et autorise des pas de prélèvement de 0.5 mm de profondeur. La détermination des concentrations en chlore des solutions alors obtenues est ensuite réalisée par titrage potentiométrique, par ajout de nitrate d'argent (AgNO_3) en milieu acide.

3.2. Evaluation de la corrosion des aciers

L'évolution de la fissuration du béton due à la corrosion a été suivie durant 17 ans. Des cartes de fissuration ont été réalisées incluant la localisation et l'ouverture des fissures de corrosion. L'ouverture des fissures a été mesurée à l'aide d'un binoculaire d'une précision de 0,02 mm. Une synthèse des résultats obtenus durant les 13 premières années de vieillissement a déjà été publiée [1]. A partir de ces cartes de fissuration, obtenues après 6, 7, 12, 14 et 17 ans suivant les poutres, l'état de corrosion des armatures a pu être déduit. La méthode est basée sur un modèle empirique permettant de relier l'ouverture des fissures longitudinales, au taux de corrosion local qui a engendré ces mêmes fissures par expansion de la rouille [3]. Cette méthode a été appliquée aux poutres A1CL1 et B2CL2 afin d'évaluer l'état global de corrosion des aciers tendus et des aciers situés en zone comprimée en terme de pourcentage global de perte de masse.

3.3. Comportement mécanique sous charge de service

Le comportement mécanique global des poutres en flexion trois points est évalué en terme de déplacement à mi-portée. Le moment maximal appliqué est de 14 kN.m. Le comportement des poutres corrodées est comparé à celui de poutres témoins notées A1T et B2T. Ces poutres ont été fabriquées à la même période que les poutres corrodées avec les mêmes matériaux, mais ont été conservées pendant 17 ans en ambiance non agressive. Les mesures obtenues avant 14 ans ont été réalisées avec un matériel de permettant pas une mesure assez précise sous chargement de service. Après 14 ans, les déplacements ont été mesurés à l'aide de capteurs numériques d'une précision de 0,01 mm. Par conséquent, seuls les résultats aux échéances de 14 et 17 ans seront présentés. Les résultats expérimentaux seront comparés aux prédictions obtenues à l'aide d'un modèle développé au LMDC qui permet de prendre en compte l'effet couplé de la perte de section d'acier tendu et de l'adhérence acier-béton sur la rigidité de flexion des poutres en béton armé après fissuration [4].

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

4.1. Chlorure totaux au niveau des aciers

La figure 2 présente l'évolution au cours du temps du taux de chlorure totaux mesuré au niveau des aciers dans la poutre A1CL1 (48 mm de profondeur) et dans la poutre B2CL2 (16 mm de profondeur). Après 5 ans, le taux de chlorure de B2CL2 a dépassé ceux considérés nécessaire pour le démarrage de la corrosion selon les recommandations RILEM ou ACI [5-6]. La durée de la période d'initiation du processus de corrosion est donc évaluée à environ 4 ans pour B2CL2. Selon les mêmes critères RILEM/ACI, la fin de la période d'initiation du processus de corrosion est donc évaluée à environ 8 ans pour A1CL1.

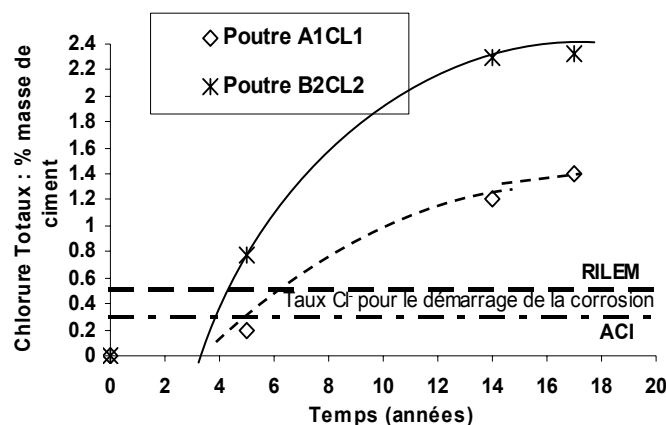


Figure 2 : Taux de chlorure totaux au niveau des armatures (16 mm de profondeur pour B2CL2 et 48 mm de profondeur pour A1CL1)

4.2. Etat de corrosion des aciers

Les cartes de fissurations utilisées pour déduire l'état de corrosion des armatures des deux poutres corrodées ne sont pas présentées dans ce papier mais sont disponibles dans d'autres publications [4, 7]. Pour A1CL1, les premières fissures longitudinales de corrosion sont apparues en partie tendue après 12 ans d'exposition au brouillard salin. Après 17 ans, cette même fissuration s'est développée pour atteindre environ 1,8 mm d'ouverture maximale. Aucune fissure de corrosion n'est apparue en partie comprimée de la poutre A1CL1 après 17 ans d'exposition. Au contraire pour B2CL2, les premières fissures longitudinales de corrosion sont apparues en partie comprimée après 6 ans d'exposition au brouillard salin. Après 17 ans d'exposition, la fissuration de corrosion s'est développée à la fois en partie comprimée puis tendue avec des ouvertures maximales pouvant atteindre 2,4 mm.

La figure 3 présente les taux de corrosion globaux (taux global de perte de masse) déduits des cartes de fissuration sur les deux poutres corrodées. Les résultats sont présentés séparément pour les aciers tendus et pour les armatures situées en partie comprimée. Pour B2CL2, en raison du faible diamètre initial des armatures en zone comprimée ($\phi 6$ mm), les pourcentages de perte de masse sont toujours supérieurs à ceux obtenus pour les aciers tendus ($\phi 12$ mm). Pour la même raison, les pourcentages de perte de masse des aciers tendus de A1CL1 ($\phi 16$ mm) sont toujours inférieurs à ceux obtenus pour B2CL2. Mais en terme de réduction de section d'acier maximale, les valeurs obtenues sont similaires pour toutes les armatures et pour les deux poutres mise à part les aciers en partie comprimée de A1CL1 qui ne présentaient pas de signe de corrosion visible. En accord avec les résultats obtenus sur les mesures des taux de chlorure, la durée de la phase d'initiation de la corrosion des aciers de A1CL1 est supérieure à celle de B2CL2 en raison d'une épaisseur d'enrobage plus importante. En phase de propagation, la durée nécessaire pour l'apparition des premières fissures de corrosion est double pour A1CL1 par rapport à celle de B2CL2. L'épaisseur plus importante de l'enrobage de A1CL1 permet aussi d'expliquer ce résultat puisque plus de produits de corrosion seront nécessaires pour la propagation de la fissuration à travers le béton d'enrobage. Enfin, quelle que soit la poutre ou la localisation des armatures, l'apparition des fissures de corrosion conduit à une augmentation de la vitesse de corrosion.

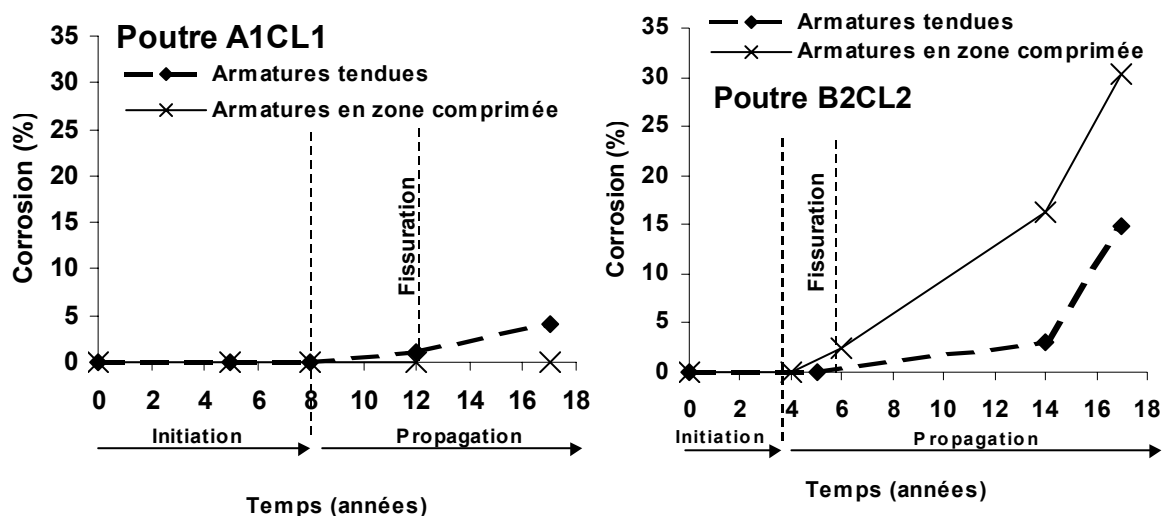


Figure 3 : Pertes de masse globale des armatures situées en partie tendue ou comprimée des poutres A1CL1 et B2CL2

4.3. Comportement mécanique sous charge de service

La figure 4 montre l'évolution de la rigidité en flexion des poutres corrodées et témoins mesurée expérimentalement aux échéances de 14 et 17 années d'exposition. Les rigidités de flexion obtenues à partir du modèle théorique sont aussi présentées cette fois pour toutes les échéances. Le modèle prédit une légère augmentation de la rigidité des poutres non corrodées entre 0 et 6 ans due à l'augmentation du module élastique du béton. Aucune donnée expérimentale précise n'est disponible sur cette période. Après 14 ans d'exposition, la rigidité des deux poutres corrodées (expérimentale ou théorique) redevient égale à la rigidité initiale des poutres après 28 jours. A cette échéance, les effets de la corrosion n'ont pour conséquence que de compenser l'accroissement de la rigidité due à l'augmentation du module élastique du béton. Le comportement des poutres corrodées s'est légèrement dégradé par rapport à celui des poutres témoins surtout pour les

poutres de type B. D'après la figure 3, après 14 ans, les aciers tendus des deux poutres restent faiblement atteints par la corrosion. En revanche, les aciers en zone comprimée de la poutre B2CL2 sont déjà fortement corrodés mais cette corrosion semble n'avoir que peu d'influence sur le comportement mécanique sous charge de service.

La diminution des performances mécaniques en service des deux poutres n'intervient qu'après 17 ans d'exposition. Cette perte de rigidité importante par rapport aux poutres témoins est clairement corrélée à la propagation de la corrosion le long des aciers tendus des deux corps d'épreuve.

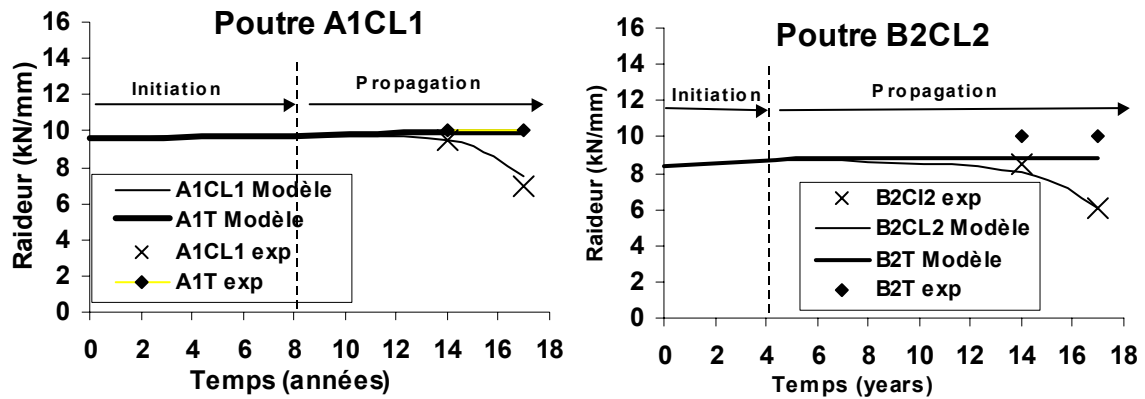


Figure 4 : Raideur en flexion des poutres A1CL1 et B2CL2
Résultats expérimentaux et prédictions du modèle

5. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Influence des fissures transversales de flexion : en milieux agressifs de type salin, la corrosion démarre très rapidement (en quelques mois) sur les aciers tendus situés en fond de fissure. Or, étant donné la présence même de cette fissuration transversale, les produits de corrosion ont la possibilité de se développer « librement » le long de la fissure et par conséquent n'exercent pas une pression suffisante sur le béton pour créer une fissuration supplémentaire. La rouille va rapidement, et pour de faibles taux de corrosion, colmater les zones de décohésion entre les armatures et le béton ainsi que le fond de fissure. Ce colmatage limite les accès en oxygène et en chlorures, ce qui freine considérablement, voire bloque, le développement de la corrosion. Cette fissuration n'est donc pas préjudiciable à la durée de vie de la structure [1, 8].

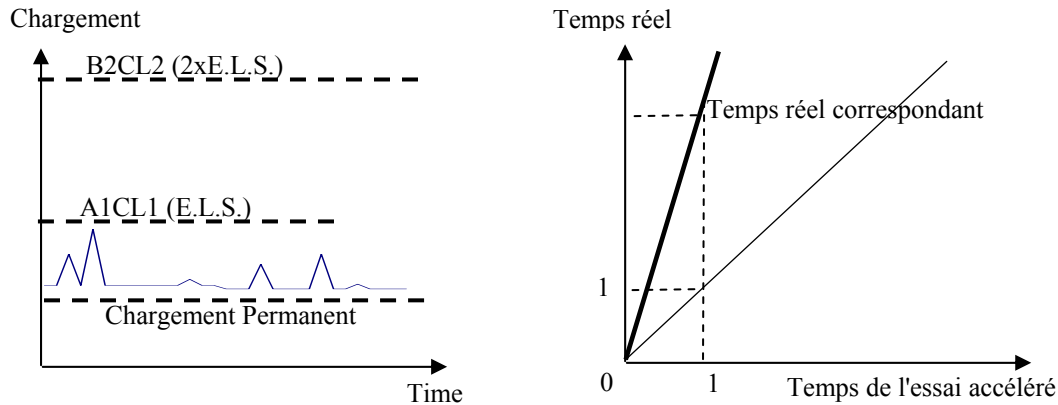
Influence de l'épaisseur du béton d'enrobage : La période d'initiation de la poutre A1CL1 est double de celle de la poutre B2CL2. Or, l'épaisseur du béton d'enrobage (par rapport aux aciers longitudinaux) de A1CL1 est environ trois fois celui de la poutre B2CL2. Dans ces conditions, les modèles usuels de pénétration des chlorures par diffusion prédiraient une phase d'initiation au moins 9 fois plus longue dans le cas de A1CL1 par rapport à celle de B2CL2. Ces résultats montrent donc que l'épaisseur de béton d'enrobage ne peut être considéré (à qualité de béton constante) comme le seul paramètre pouvant influencer la durée de la phase d'initiation.

Influence du chargement mécanique sur la durée de vie : le chargement mécanique peut causer un endommagement du composite béton armé situé entre les fissures de flexion. Ce sont ces dégradations qui sont préjudiciables pour la durée de vie et non pas les fissures de flexion. Le premier type d'endommagement concerne le béton d'enrobage pouvant induire une augmentation de l'ordre de 40% du coefficient de diffusion des chlorures [9]. Le second type d'endommagement concerne le béton à l'interface avec les aciers tendus. En effet, l'armature de type HA, lors de son allongement, peut dégrader le béton à l'interface du fait du blocage par les crénelures. Les vides entre l'acier et le béton causés par cette dégradation sont une condition très favorable pour le démarrage et la propagation de la corrosion [7]. Ce sont ces deux facteurs qui peuvent expliquer la durée relativement courte de la phase d'initiation observée sur la poutre A1CL1 par rapport à celle de B2CL2.

Influence des conditions environnementales de l'étude : la poutre A1CL1 est dimensionnée conformément au BAEL 83 en milieu très agressif et pourtant la corrosion est intervenue relativement rapidement (environ 8 ans). Cette courte durée de la phase de propagation peut être expliquée d'une part par le fort niveau de chargement permanent de la poutre par rapport aux niveau fréquent de chargement des structures réelle (figure 5a). D'autre part, les cycles réguliers d'humidification puis séchage représentent des conditions très sévères d'exposition en comparaison avec un environnement réel. Par conséquent, comme présenté figure 5b,

il n'y pas de correspondance directe entre l'échelle de temps qui correspond à un essai accéléré en laboratoire et la durée de vie réelle de la structure.

Phase de propagation et durée de vie des ouvrages : Les essais mécaniques en service ont montré que les premiers signes significatifs de perte de performance des éléments de structure sont intervenus après 17 ans d'exposition. Si la limite de service est fixée à 17 ans, basée sur une réduction trop importante de la rigidité en flexion, la part de la phase de propagation de la corrosion sur la durée de vie représenterait 50% pour A1CL1 et 75% pour B2CL2.



a) Evolution du chargement réel en service

b) Relation entre temps réel et temps de l'essai accéléré

Figure 5. Comparaison entre les conditions de service réelles d'une structure et celles des poutres A1CL1 et B2CL2

6. CONCLUSIONS

La fissuration de flexion n'est pas préjudiciable à la durée de vie de la structure.

L'épaisseur du béton d'enrobage n'a qu'une influence partielle sur la durée de la phase d'initiation de la corrosion. Les endommagements du béton et de l'interface acier-béton entre les fissures de flexion résultant du chargement mécanique ont une influence tout aussi déterminante.

La phase de propagation de la corrosion semble représenter une part importante de la durée de vie des ouvrages en béton armé. Ne considérer que la phase d'initiation comme durée de vie de la structure semble représenter une démarche très conservatrice.

7. RÉFÉRENCES

- [1] François R., Arliguie G. (1998) Influence of service cracking on reinforcement steel corrosion, Journal of materials in civil engineering, ASCE, Vol.10, No.1, 14-20.
- [2] Poulsen E. (1993), Chloride Profiles – Analysis and interpretation of observations, AEC Consulting Engineers Ltd, Vedbaek Denmark.
- [3] Vidal T., Castel A., François R. (2004) Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete, Cement and Concrete Research, 34, 165-174
- [4] François, R., Castel, A., Vidal, T. (2006) A finite element for corroded Reinforced Concrete, RILEM Materials and Structures, vol. 39, n°5, pp. 569-582.
- [5] RILEM technical committee 124-SRC (1994) Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion, Materials and Structures, vol.27, 415-436.
- [6] ACI committee 222 (1985) Corrosion of metal in concrete, Journal Proceedings, 82 (1), pp.3-32.
- [7] Castel, A., Vidal, T., François, R., Arliguie, G. (2003) Influence of steel-concrete interface quality on reinforcement corrosion induced by chlorides, Magazine of Concrete Research, Vol. 55, n°2.
- [8] Schiessl P., Raupach M. (1997) Laboratory studies and calculations on the influence of crack width on chloride-induced corrosion in concrete, ACI Materials, 94, n°1.
- [9] Castel A., Francy O., François R., Arliguie G. (2001) Chloride Diffusion in reinforced concrete beam under sustained loading, CANMET/ACI Fifth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, ACI SP 200, Singapore, July 29-August 1, 2001, pp. 647-662.