

Influence de la fissuration sur l'initiation et la propagation de la corrosion

F. Paradis¹, V. Lapointe¹, S.Fellah¹, M. Jolin¹ et J. Marchand¹⁻²

(1) CRIB-Department of Civil Engineering
Laval University, Québec, Canada, G1K 7P4

(2) SIMCO Technologies Inc.
1400, boul. du Parc Technologique, Québec, Canada, G1P 4R7

ABSTRACT

La corrosion des armatures dans le béton est un problème des plus importants dans l'évaluation de la durabilité des structures. L'objectif de la présente recherche est de générer de l'information quantitative au niveau de l'influence des fissures sur l'initiation et la propagation de la corrosion. Le type et la distribution des produits de corrosion sont également analysés. Cette information permettra de construire et valider un modèle de prédiction de la durée de vie des ouvrages en béton armé. L'information pertinente est obtenue par trois essais en cours à l'Université Laval; une analyse préliminaire des résultats est présentée dans le présent article. Les échantillons de béton armé sont soumis à des conditions environnementales contrôlées (brouillard salin en cycle de mouillage-séchage). L'évolution de la corrosion est suivie par des méthodes électrochimiques non-destructives.

1. Introduction et mise en contexte

La dégradation prématurée des infrastructures en béton constitue un grave problème en Amérique du Nord. Du point de vue économique, la dégradation des ouvrages en béton armé engendre des problèmes importants en terme d'entretien et de réhabilitation. Le gouvernement du Québec et ses municipalités font face à un défi important au niveau de la gestion de leurs infrastructures.

Parmi les ouvrages les plus affectés, on retrouve les ponts et les viaducs, qui sont exposés à l'action combinée des intempéries et des sels fondants, et les structures océaniques qui sont soumises à un environnement salin. Bien que les facteurs mécaniques aient une influence significative sur le comportement des infrastructures, la détérioration des éléments de béton armé est d'abord et avant tout attribuable à la corrosion des armatures induite par la pénétration des ions chlore. Par exemple, Vézina (1998) estimait que 25% des ouvrages en béton armé du ministère des Transports du Québec étaient affectés, à divers degrés, par ce type de dégradation.

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses recherches se sont effectuées sur la corrosion des armatures dans le béton dans l'objectif de prédire son influence. Les effets et conséquences de la corrosion sont divers et peuvent être représentés par la Figure 1. La réaction de corrosion est un processus électrochimique qui se manifeste par la transformation graduelle du fer en oxydes de fer. Dans un premier temps, cette réaction engendre une perte de section d'acier. Cette perte de section se manifeste selon deux phénomènes, soit la corrosion par piqûre (locale), soit généralisée sur toute la longueur de la barre. Ces pertes de section mènent à une diminution de la ductilité et de la résistance. Dans un second temps, la corrosion provoque une dégradation de l'interface acier-béton. Cette dégradation fait diminuer l'adhérence entre l'acier et le béton. Dans un dernier temps, l'expansion volumique des produits de corrosion provoque d'une part, la disparition des nervures et d'autre part, la fissuration du béton de recouvrement.

La formation de la rouille induit d'importantes pressions internes qui conduisent à la fissuration du béton de recouvrement. Cette fissuration engendre des problèmes d'ordre esthétique, mais principalement des problèmes de sécurité. Lorsque la corrosion atteint un certain niveau, le béton de recouvrement éclate et des pièces de béton peuvent chuter de la structure et mettre en danger la sécurité des usagers. Ce phénomène arrive à des degrés de corrosion très faible d'environ 1 à 2% de perte d'acier (Stanish et coll. 1999, Auyeung et coll. 2000), donc bien avant que des problèmes structuraux surviennent. Il est donc primordial de prendre en considération ce phénomène et essayer de prédire l'endommagement du béton de recouvrement.

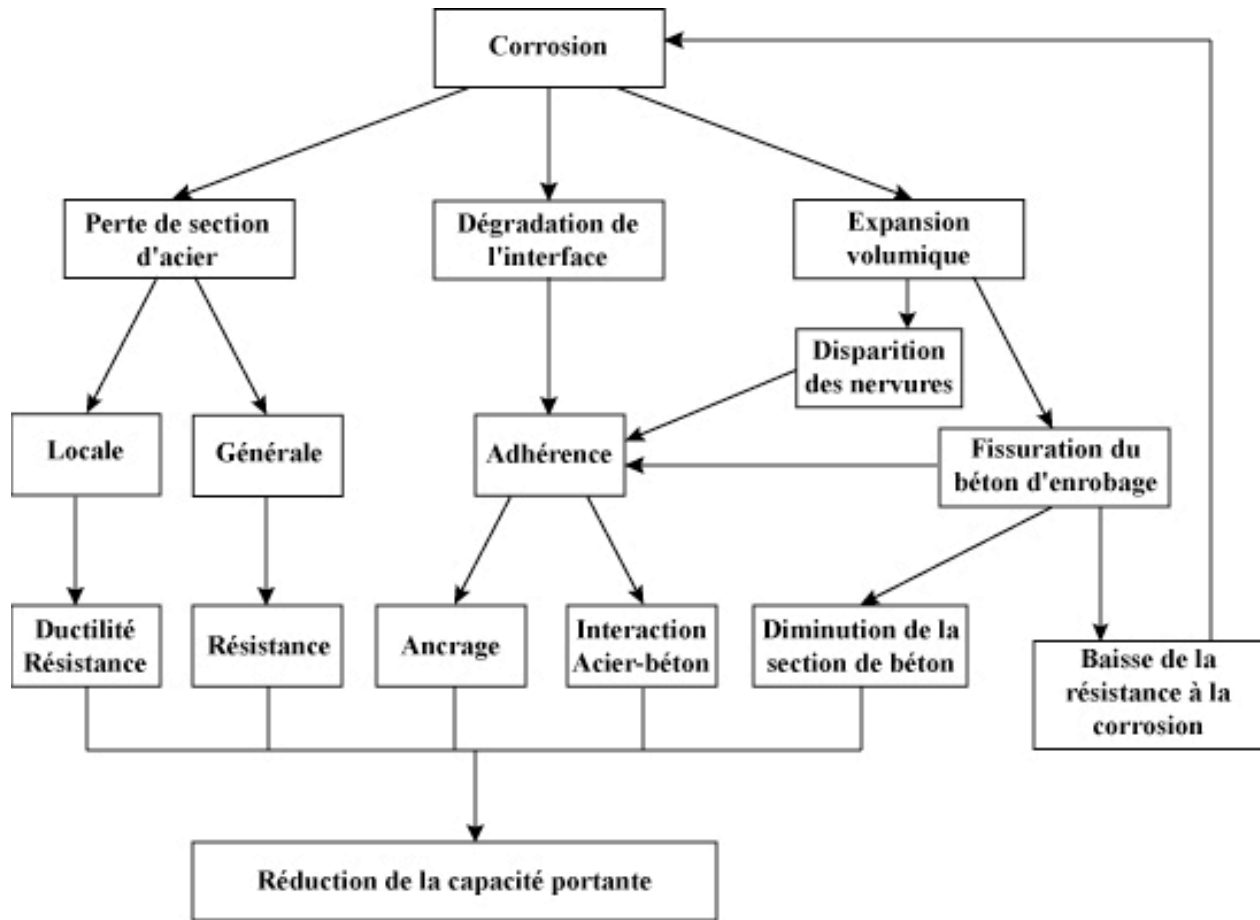


Figure 1. Effets de la corrosion sur le comportement mécanique de structures corrodées (FIB 2000)

2. Corrosion

2.1. Considérations générales

Lorsque les aciers sont noyés dans le béton frais, la solution alcaline des pores du béton produit une oxydation rapide en surface de l'acier pour former une couche d'oxyde, appelé film passif (Rosenberg et coll. 1989, Bentur et coll. 1999, Broomfielf 1997). Ce phénomène, appelé passivation, n'arrête pas la réaction de corrosion, mais la limite à quelques microns par année (Rosenberg et coll. 1989). Cependant, les structures sont soumises à des conditions environnementales qui implique la pénétration d'agents agressifs tel que les ions chlorure et de sulfate (Rosenberg et coll. 1989, Bentur et coll. 1999, Broomfielf 1997, Dehwah et coll. 2002). La présence de ces ions, particulièrement les ions chlore, au pourtour de l'armature compromet la stabilité du film passif et accélère la réaction de corrosion.

Dans le cas de la corrosion induite par les chlorures, la réaction débute lorsque la concentration en chlorure près des armatures atteint un seuil critique. Cette concentration critique nécessaire pour initier la réaction de corrosion a été investigué dans les dernières décennies. Dans la littérature, la concentration critique de chlorures est habituellement exprimée en pourcentage de masse du liant ou en pourcentage de la masse totale de béton (ACI 222R). Dans les deux cas, la

masse de chlorures considérés dans les calculs correspond à la masse totale de chlorures (i.e. chlorures liés et libres) trouvé dans le matériau. D'autres auteurs préfèrent exprimer la concentration limite comme un ratio entre la concentration en chlorure libre (trouvé dans la solution) et les ions hydroxydes (OH^-) (Hausmann 1967). Cette dernière méthode semble plus précise, considérant que la réaction de corrosion est sensible au pH de la solution des pores autour des armatures (Bentur et coll. 1999).

Les récents développements suggèrent que la concentration critique est influencé par la qualité de l'acier (acier standard, acier avec époxy, acier inoxydable) (FHA 1998). De plus, pour un type d'acier, la concentration critique varie significativement selon les auteurs (Bentur et coll. 1999, FHA 1998, Alonso et coll. 2000). Pour l'instant, dans une revue du sujet, Alonso et coll. 2000 trouvent que la valeur de chlorures par masse de liant pour un acier standard (acier noir) varie entre 0.25% et 6.0%.

Comme présentée sur la Figure 2, la principale réaction de corrosion consiste en la formation d'une anode où le fer est dissous $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$. Les électrons ainsi relâchés sont consommés par la cathode par la réduction de l'oxygène $\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$ (noter l'importance de l'apport de l'eau et de l'oxygène). Les ions ferreux réagissent ensuite avec les ions OH^- pour former des hydroxydes : $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$. En présence d'oxygène, la réaction continue pour former $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Fe_2O_3 et Fe_3O_4 . Ce sont les oxydes typiques qu'il est possible de retrouver dans les structures de béton. Cependant, comme la section suivante le démontre, cette représentation du processus de corrosion est une simplification du phénomène de corrosion réelle.

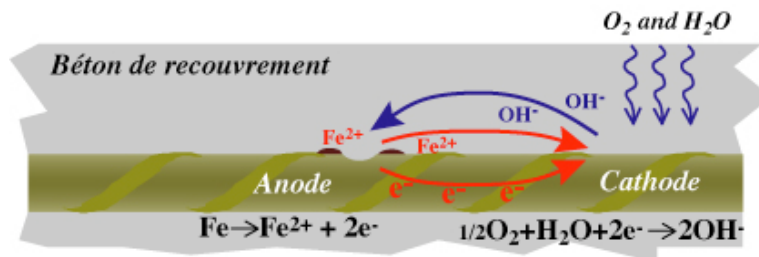


Figure 2. Processus de corrosion

2.2. Corrosion de l'acier dans le béton

La réaction de corrosion qui prend place dans le béton peut être considéré un cas spécifique du phénomène discuté dans la section précédente. La corrosion peut être contrôlé par l'anode, la cathode, ou par une combinaison des deux. Le contrôle est relié à la disponibilité d'un produit ou par la cinétique de réaction d'un produit. Dans le béton, la réaction de corrosion est souvent contrôlée par la réduction de l'oxygène et de l'eau (réaction cathodique), parce que la disponibilité des réactifs est reliée à la diffusion dans le béton. Duffo et coll. (2004) mentionnent que le processus de corrosion des armatures dans le béton est différent de celui en condition atmosphérique et est possiblement plus similaire à la dégradation de l'acier immergé dans une solution alcaline carbonatée.

La rouille est composée de plusieurs oxydes et hydroxydes qui possèdent différentes propriétés. La réaction de corrosion qui implique la précipitation des produits de corrosion autour des armatures est complexe. Une représentation schématique de la formation et de la transformation des oxydes est présentée à la Figure 3. Selon les conditions environnementales autour des

armatures, la réaction de corrosion peut favoriser la formation de certains produits de corrosion et limiter la précipitation des autres.

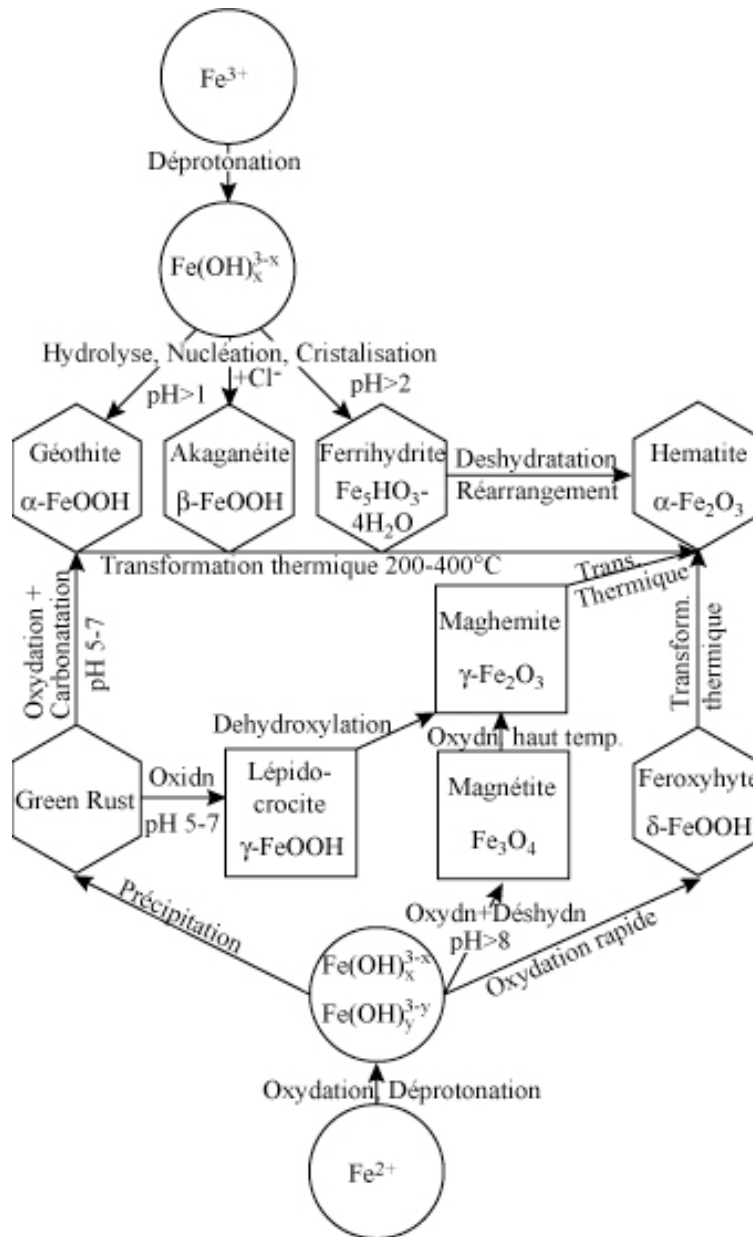


Figure 3. Représentation schématique des formations et transformations des oxydes communs (Cornel et Schwertmann 2003)

La magnetite (Fe_3O_4), maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$), goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), akaganéite ($\beta\text{-FeOOH}$) et hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) sont les produits de corrosion typique que l'on retrouve dans le béton (Duffo et coll. 2004, Aligizaki et coll. 2000, Cornell et Schertmann 2003, Marcotte 2001, Chitty et coll. 2005). Duffo et coll. (2004) ont analysé de la rouille provenant d'une structure âgée de 65 ans en condition urbaine. Leurs observations démontrent qu'il a deux couches de produits de corrosion, une première couche intérieure noire, dense et adhérente, puis

une couche extérieure rouge-brun, faible, poreuse et non adhérente. La présence de ces deux couches est également confirmée par les auteurs Marcotte et Hanson (2003 et 2004) et Aligizaki et coll. (2000). Les analyses de Duffo et coll. (2004) ont montré une prédominance de magnétite (Fe_3O_4) avec des pics de goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) et quelques pics de lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$) dans la couche de rouille interne et dense. Dans la couche externe, seulement la lepidocrocite et la goethite ont été trouvées.

Les investigations effectuées sur les structures de béton en service démontrent aussi que les oxydes sont habituellement distribués inégalement autour des armatures. Les produits de corrosion semblent diffuser de l'armature pour précipiter dans la matrice cimentaire. Par exemple, Chitty et coll. (2005) et Marcotte et Hansson (2003) rapportent la présence des produits de corrosion jusqu'à 5 mm de l'interface acier béton. De plus, la fissuration influence la distribution des produits de corrosion en permettant aux ions chlore de migrer dans la fissure.

2.3. Facteur affectant la corrosion dans le béton

Tel que mentionné précédemment, la réaction de corrosion est sensible à plusieurs paramètres. Par exemple, Marcotte et Hanson (2003) ont effectué des essais de corrosion sur des échantillons de béton ordinaire et de béton haute performance avec fumée de silices. Les analyses par diffraction rayon X ont montré que la présence de chlore modifie la composition de la rouille en augmentant la présence de l'akaganéite ($\beta\text{-FeOOH}$). Ces observations sont en accord avec les résultats de Cornél et Schwertmann (2003) et Duffo et coll. (2004) qui indiquent que la présence de chlore est nécessaire pour former de l'akaganéite ($\beta\text{-FeOOH}$).

Les caractéristiques des mélanges de béton ont aussi une influence sur le processus de corrosion. Par exemple, la présence d'ajout cimentaire, tel que la fumée de silices modifie la distribution des pores et la perméabilité, ce qui affecte le type et la distribution des produits de corrosion formés. Une structure poreuse plus dense limite l'accès aux chlorures et à l'oxygène à la surface de l'acier. En comparant avec un béton ordinaire, ces mélanges nécessitent habituellement une concentration en chlorure plus importante. En plus, la réaction de corrosion mène principalement à la formation de magnétite (Fe_3O_4). Dans un béton haute performance sans fumée de silices, la goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) et l'akaganéite ($\beta\text{-FeOOH}$) sont formés.

Les conditions environnementales ont une grande influence sur la formation des produits de corrosion et peuvent également favoriser la transformation des produits de corrosion. Par exemple, la magnétite (Fe_3O_4) s'oxyde en hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et en goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) en condition atmosphérique (Marcotte et Hansson 2003). Cornell et Schwertmann (2003) mentionnent que la goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) se forme seulement en présence de CO_2 . Dans cette optique, la présence de fissures dans le béton aura une influence importante sur les produits de corrosion en augmentant la concentration en oxygène et en CO_2 près des armatures. Encore une fois, la Figure 3 est très utile pour saisir l'importance des conditions d'exposition sur la formation et la transformation des produits de corrosion. Il y a aussi des évidences que le pH et la température ont une influence directe sur la nature des oxydes formés dans le béton. Cornell et Schwertmann (2003) expliquent en détail les effets de ces deux facteurs. Le Tableau 1 présente les conditions qui favorisent la formation d'un produit.

Tableau 1. Conditions qui favorisent la formation d'un oxyde selon des pairs d'oxydes formées via l'oxydation des sels de Fe^{2+} à un pH 4-9

Géothite	Lépidocrocite
Présence de CO_2	Absence CO_2
Sulfate	Chlore
Oxydation lente	Oxydation rapide
pH faible	pH élevé
Al, Mn, Co	-
Lépidocrocite	Ferrihydrite
Oxydation lente	Oxydation rapide
pH > 5	pH < 5
	Si
Lépidocrocite	Magnetite
Oxydation rapide	Oxydation lente
Température faible	Température élevé
pH faible	pH élevé
Chlore	-
Concentration faible en Fe^{2+}	Concentration élevé en Fe^{2+}

2.4. Influence des fissures

Les fissures jouent un rôle très important dans la cinétique de corrosion puisqu'elles facilitent la pénétration d'agents agressifs. La fissuration transversale (fissures de flexion, de retrait ou de variation thermique) est le principal moteur pour l'initiation de la corrosion des armatures en formant un chemin privilégié favorisant le transport des ions chlore. La rouille formée exerce alors une pression sur le béton qui engendre une fissuration longitudinale. Cette fissuration donne aux agents agressifs un accès important aux armatures favorisant ainsi la propagation de la corrosion. Par ailleurs, François (2000), Lorentz et French (1995), Castel (2000) et Mohamed et coll. (2003) soutiennent que des bouchons de rouille peuvent se former en fond de fissure. Ces bouchons limitent la pénétration des agents agressifs et l'oxygène diminuant ainsi la vitesse de corrosion. Toutefois, les chargements dynamiques semblent limiter la formation de ces bouchons (Küter et coll. 2005, Mendoza 2003). Enfin, plusieurs hypothèses sont évoquées concernant l'influence des fissures sur la cinétique de corrosion, mais très peu de données quantitatives sont disponibles.

3. Objectifs de la recherche

Au cours des dernières années, plusieurs travaux ont porté sur l'étude et la modélisation des mécanismes de transport des ions dans les matériaux cimentaires afin d'améliorer la compréhension des phénomènes de dégradation chimique du béton. Le modèle, appelé STADIUM, a récemment été utilisé pour la conception d'ouvrages neufs et l'estimation de la durée de vie résiduelle de structures en service. Bien que très versatile, cet outil ne tient toutefois pas encore compte de l'influence de la présence de fissures sur les phénomènes de dégradation et particulièrement sur l'initiation et la propagation de la corrosion des armatures.

Un programme de recherche a été mis sur pied afin d'améliorer les connaissances et d'apporter des données quantitatives reliées à la corrosion. Ces recherches ont pour objectifs de prédire la

durée de vie des infrastructures en béton armé. Voici certains objectifs du programme de recherche :

- Évaluation de la concentration critique en chlorure pour initier la corrosion
- Évaluer le type et la distribution des produits de corrosion le long et autour d'une barre d'armature
- Quantifier l'influence des fissures sur l'initiation et la propagation de la corrosion
- Déterminer l'influence des charges dynamiques sur la formation de bouchons de corrosion en fond de fissures

4. Programme expérimental

Afin de répondre à ces objectifs, différents essais en laboratoire ont été effectués. Trois types d'essais sont en cours à l'heure actuelle. Le premier essai permet de déterminer la concentration critique en ions chlore. Ce même essai permet d'évaluer le type et la distribution des produits de corrosion autour d'une armature. Le second essai permet de quantifier l'influence d'une fissure sur l'initiation et la propagation de la corrosion. De plus, il permet d'évaluer le type et la distribution de la corrosion autour et le long d'une armature. Le troisième essai permet de vérifier l'hypothèse de la formation de bouchon de corrosion en présence de cycle de chargement.

Les essais sont réalisés dans des conditions d'exposition contrôlée puisqu'elles jouent un rôle primordial dans le processus de corrosion. Afin de reproduire le plus fidèlement possible les conditions d'exposition des structures existantes, les échantillons sont soumis à un environnement agressif contrôlé. Pour ce faire, une chambre de conditionnement unique en son genre a été construite à l'Université Laval. Cette chambre permet de soumettre les échantillons à des cycles de brouillard salin. Le brouillard salin est constitué d'une solution aqueuse de 3% NaCl et ce brouillard est appliqué pendant 4 jours, suivi par une période de séchage de 3 jours. Entre le cycle de mouillage et de séchage, un brouillard d'eau est appliqué pendant deux heures dans la chambre afin d'enlever le surplus de sel sur les échantillons. Ce cycle est répété toutes les semaines pour la durée des essais.

4.1. Essai d'évaluation de la concentration critique

Le premier essai a pour objectif d'évaluer la concentration critique en ions chlore pour initier la corrosion et d'évaluer la propagation de la corrosion. Cet essai a également pour objectif d'évaluer la distribution des produits de corrosion autour des armatures. Ces essais ont été réalisés avec quatre types de mélange, soit deux e/c (0.485 et 0.65) et deux type de ciment (type I et type V). Deux préparations de barres ont également été testées (brossé et au jet de sable).

Le type d'éprouvettes utilisées pour cet essai est montré à la Figure 4. Les échantillons ont été soumis à des cycles mouillage (4 jours d'une solution 3% NaCl) et de séchage (3 jours). Plusieurs éprouvettes sont testées simultanément. À différentes échéances, le profil en concentration d'ions chlore totaux est mesuré ainsi qu'une étude des produits de corrosion est réalisée. Un suivi méticuleux est aussi entrepris sur les échantillons afin de déterminer avec précision le seuil de corrosion à l'aide de mesures de corrosion.

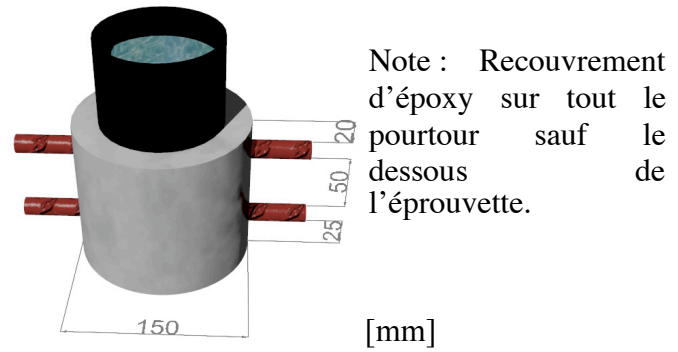


Figure 4. Montage pour déterminer le seuil de corrosion (barres 15M)

La réponse à la corrosion des échantillons est évaluée selon trois mesures ; le courant de corrosion, le potentiel de corrosion ainsi que la résistance de polarisation.

4.1.1 Résultats préliminaires

Les premiers résultats de la concentration critique en ions chlore pour initier la corrosion sont présentés. Pour un mélange constitué d'un ciment de type V et d'un rapport eau sur ciment de 0,65 cette concentration varie entre 0,3% et 0,4% en masse de béton.

La résistance de polarisation est une mesure de corrosion très conservatrice permettant de déterminer le seuil de corrosion. Selon la norme, le seuil de corrosion pour cette mesure se situe à 5 kohms/cm² et c'est en delà de cette valeur qu'il y a de l'activité de corrosion. La Figure 5 montre la réponse de divers mélange. Sur cette figure, l'initiation de la corrosion est identifiée par une baisse brusque de la valeur de résistance de polarisation menant jusqu'à la valeur limite de 5 kohms/cm².

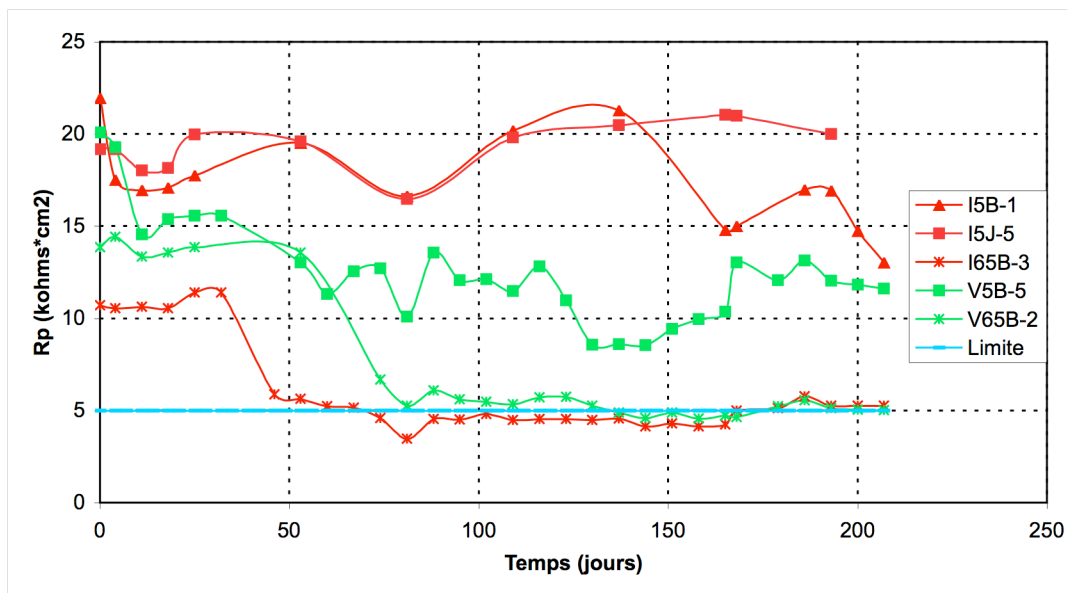


Figure 5. Résistance de polarisation

L'étude du type et de la distribution des produits de corrosion formés autour d'une barre permet de mieux comprendre les mécanismes qui mènent à la fissuration du béton. Pour ce faire, des petites pastilles de 30 mm de diamètre sont extraites des éprouvettes ayant subies des essais de pénétration des ions chlore par cycles de mouillage et séchage. Les pastilles sont découpées de manière à avoir en leur centre une section d'une barre d'armature ayant corrodé. La distribution et la nature des produits de corrosion autour de la barre sont déterminées par deux techniques, soit la spectroscopie Raman et des analyses par microsonde.

La Figure 6 présente une image prise à la microsonde de l'interface entre l'acier et le béton. La partie blanche présente l'acier. Ensuite, il y a une couche de produit de corrosion d'environ 650µm. On remarque qu'une fissure s'est créée et les produits de corrosion migrent dans celle-ci. Les essais effectués à l'heure actuelle présentent des épaisseurs de corrosion variant entre 20 et 1000µm.

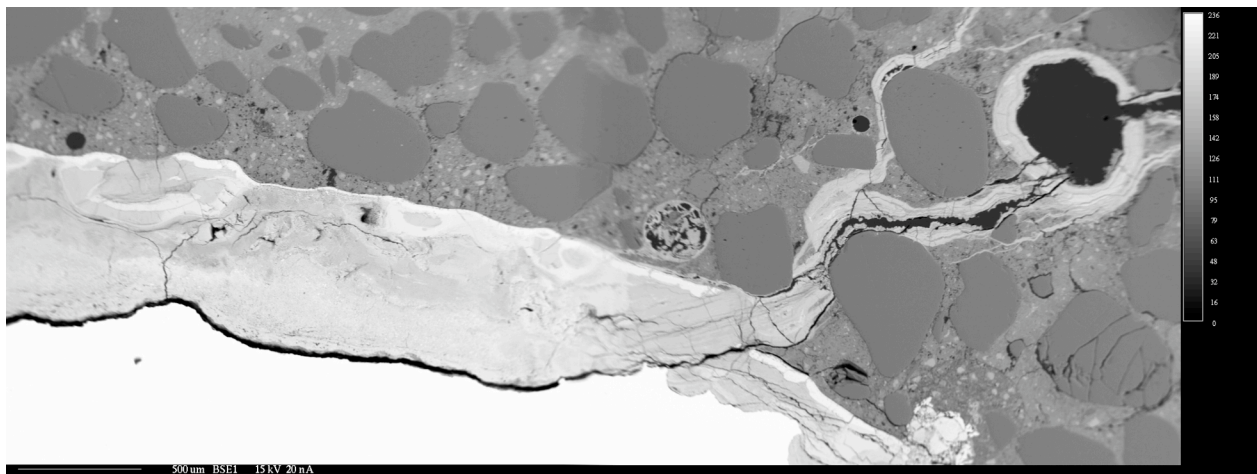


Figure 6. Image typique de l'interface acier béton

La Figure 7 présente un profil à la microsonde des éléments (Cl, Si, Ca, Fe) constituant la couche de produit de corrosion. Les profils permettent donc d'établir les quantités relatives des éléments en place. La dimension de la couche de corrosion et la diffusion des produits de corrosion peuvent également être déterminés.

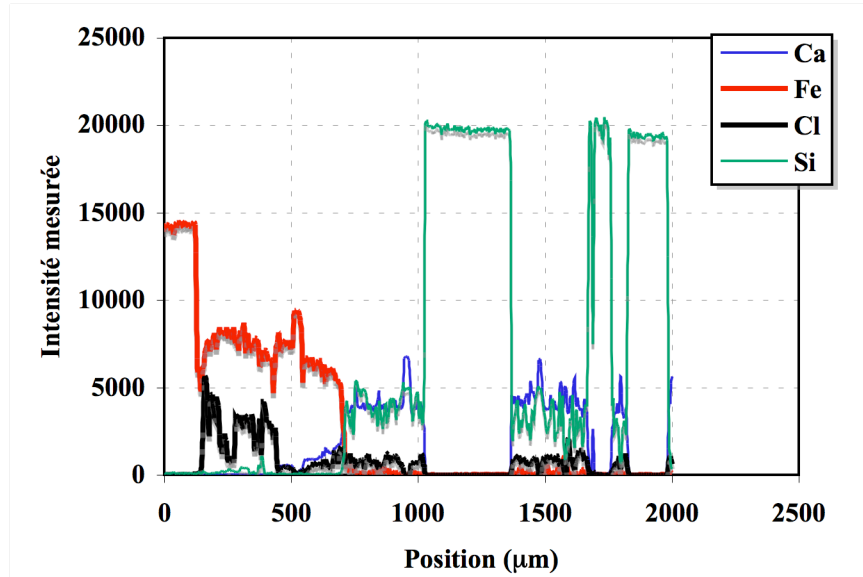


Figure 7. Profil à la microsonde des éléments (Ca, Fe, Cl, Si) sur l'échantillon I5B-1

Les analyses effectuées par la spectroscopie Raman permettent de déterminer les produits de corrosion en place. Les principaux produits observés sont la magnétite (Fe_3O_4), la maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), la goéthite ($\alpha\text{-FeOOH}$), l'akaganéite ($\beta\text{-FeOOH}$) et l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). La couche de produits de corrosion est souvent composée de plusieurs produits. Toutefois, en présence de ciment type V, un seul produit de corrosion a été observé, soit la magnétite. La Figure 8 présente un spectre typique de magnétite (Fe_3O_4) et d'akaganéite ($\beta\text{-FeOOH}$).

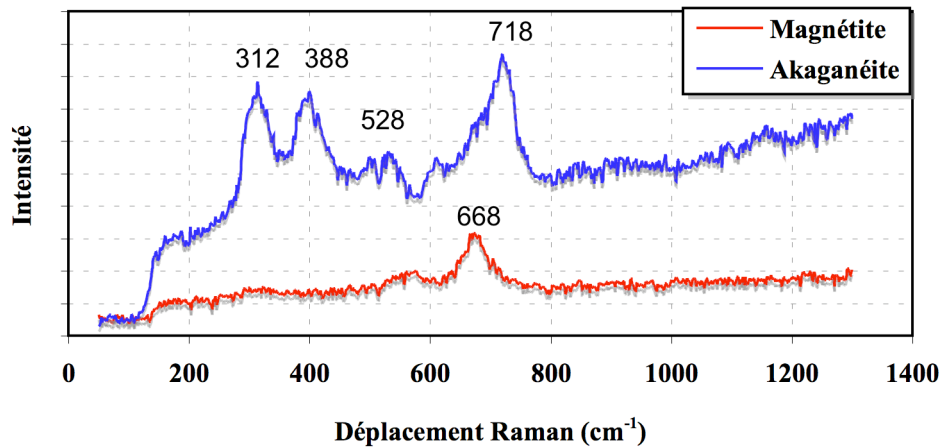


Figure 8. Spectre Raman de la magnétite et de l'akaganéite

4.2. Échantillons pré-fissurés

Le second type d'échantillon permet de quantifier l'influence d'une seule fissure sur le type et la distribution des produits de corrosion près de cette fissure. Les mesures de corrosion par des

méthodes non-destructives donnent une indication de l'activité de corrosion sur l'ensemble de l'armature, mais ne permettent pas d'évaluer la distribution de la corrosion avec précision.

Afin d'arriver à quantifier la distribution de la corrosion le long d'une armature en fonction d'une fissure, dix échantillons identiques ont été produits et seront évalués à dix échéances différentes. Pour ce faire, les échantillons seront détruits et l'évaluation de la corrosion se fera par perte de masse. Des analyses à la microsonde et de spectroscopie Raman sont effectuées afin de connaître la répartition et le type de produit de corrosion.

L'échantillon est composé d'une armature 15M dans un bloc de béton. Le recouvrement est de 20 mm. Une pré-fissure de 0.3 mm de largeur est effectuée au centre de l'échantillon à l'aide d'une cale d'acier. Les dimensions de l'échantillon sont présentées sur la Figure 9. Deux séries de 10 échantillons ont été fabriquées, le premier est un mélange de mortier (e/c 0,485 type 10) et le second est le même mortier avec de la fumée de silice.

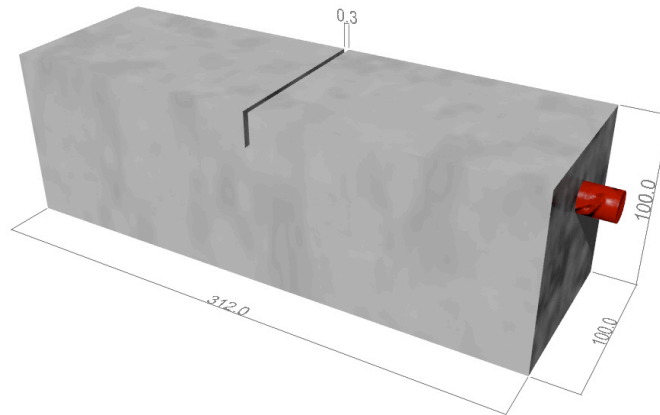


Figure 9. Échantillon avec 1 fissure

4.2.1 Résultats préliminaires

Les essais effectués sur ces échantillons présentent des résultats clairs sur l'influence de la fissuration sur l'initiation de la corrosion. L'analyse des mesures de corrosion permet de constater que la présence d'une fissure jusqu'aux armatures engendre l'initiation de la corrosion dans les premières heures et journées d'exposition à un brouillard salin. La Figure 10 montre une chute du potentiel de corrosion d'environ 250 mV dans les premières heures, ce qui indique clairement le début de la corrosion des échantillons. À -250 mV, la probabilité de corrosion est considérée élevée. Dans les jours qui suivent, le potentiel de corrosion continue à chuter pour atteindre des valeurs autour de -500 mV, ce qui indique une probabilité de corrosion très élevée (Gu et coll. 2001, Andrade et Alonso 1996). Un suivi de la corrosion est effectué régulièrement sur les échantillons pour suivre la propagation de la corrosion. Les analyses de la distribution de la corrosion s'effectueront dans les prochains mois.

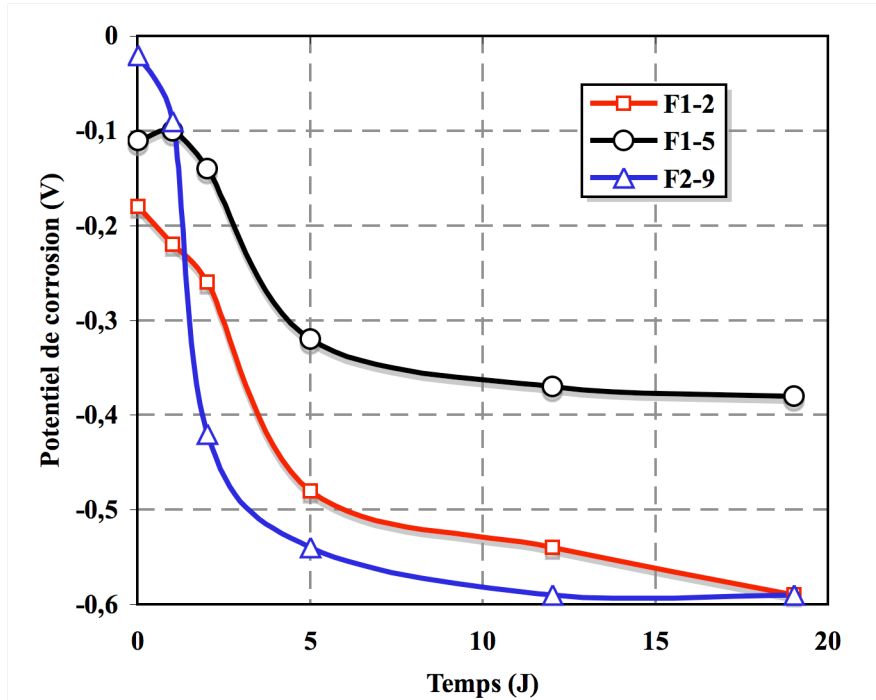


Figure 10. Potentiel de corrosion sur 3 échantillons fissurés

4.3. Essais en U

Le troisième type d'échantillon a pour objectif de quantifier l'effet des chargements sur l'initiation et la propagation de la corrosion. Cet essai permet de valider l'hypothèse de la formation de bouchons de corrosion en fond de fissure en condition statique et dynamique. La Figure 11 présente les dimensions de l'échantillon. Quatre armatures de 15M sont placées dans les coins avec un recouvrement de béton de 20 mm. Dans cet essai, trois séries de poutres en U sont réalisées. La première série d'éprouvettes est constituée d'échantillons sans fissure. Ces éprouvettes servent d'échantillons témoins permettant de déterminer le temps d'initiation de la corrosion. La seconde série comporte des fissures (formées mécaniquement ou avec des cales). La dernière série comporte des fissures comme la seconde série, mais cette série est soumise à des cycles de chargement. Pour chacune des séries de poutres, différents paramètres sont testés : deux espacements de fissures, deux types de béton (avec fumée de silice et sans fumée de silice) et deux types de fissures.

Deux types de fissures sont induites, soit des fissures créées par des efforts mécaniques, soit par des cales en acier (fissure modèle). Les échantillons sont chargés dans le haut induisant un moment dans la partie centrale engendrant la formation de fissures mécaniques. Le deuxième type de fissures est créé à l'aide de cales d'acier de 0.3mm d'épaisseur. Les cycles de chargement sont effectués une fois par cycle de mouillage séchage, soit après la fin du mouillage. Les cycles de chargement consistent à mettre en charge les échantillons pour ouvrir et refermer les fissures d'environ 0.2 mm.

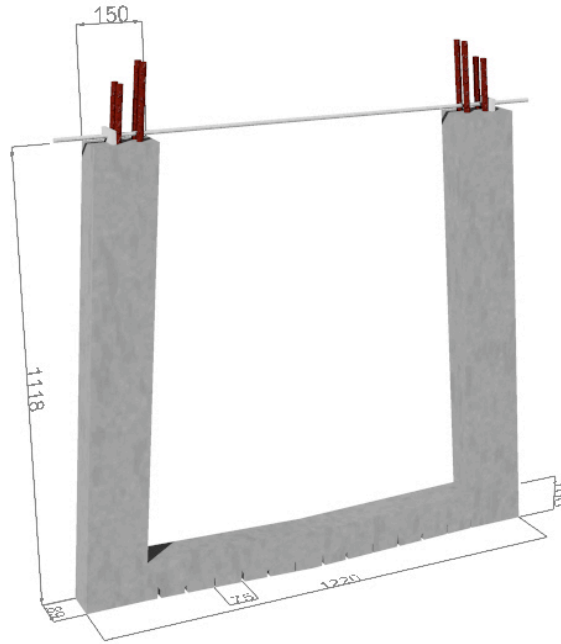


Figure 11. Schéma de l'échantillon en U

4.3.1 Résultats préliminaires

Cet essai démontre que la fissuration joue un rôle important sur le temps d'initiation de la corrosion comme l'essai précédent. La fissuration joue également un rôle dans le processus de propagation de la corrosion puisqu'il assure la pénétration et la présence des agents agressifs en quantité suffisante assurant la corrosion. Toutefois, différents phénomènes d'autocolmatation peuvent limiter la pénétration des agents agressifs en bouchant les fissures. Il faut noter que les échantillons en U ont plus de 120 jours de cure avant le début des essais, il est donc peu probable que l'autocolmatation soit de l'autocicatrisation, mais bien des bouchons de corrosion.

La Figure 12 permet de constater le phénomène d'autocolmatation sur les échantillons qui sont cyclé toutes les semaines. Toutefois, la semaine autour de la 90^e journée, aucun cycle de chargement n'a été effectué. Le potentiel de corrosion a remonté probablement à cause de la formation d'un bouchon de corrosion. Les semaines suivantes, les cycles de chargement ont été recommencés. On constate qu'un seul cycle de chargement ne suffit pas pour détruire le bouchon de corrosion. Suite à quelques cycles de chargement, les bouchons se sont détruits en partie pour augmenter la vitesse de corrosion. Il faut remarquer que la courbe remonte à la fin. Ce phénomène laisse croire que les bouchons de corrosion se reforment rapidement. La suite des essais permettra de confirmer ces hypothèses et d'apporter plus d'information sur ce sujet.

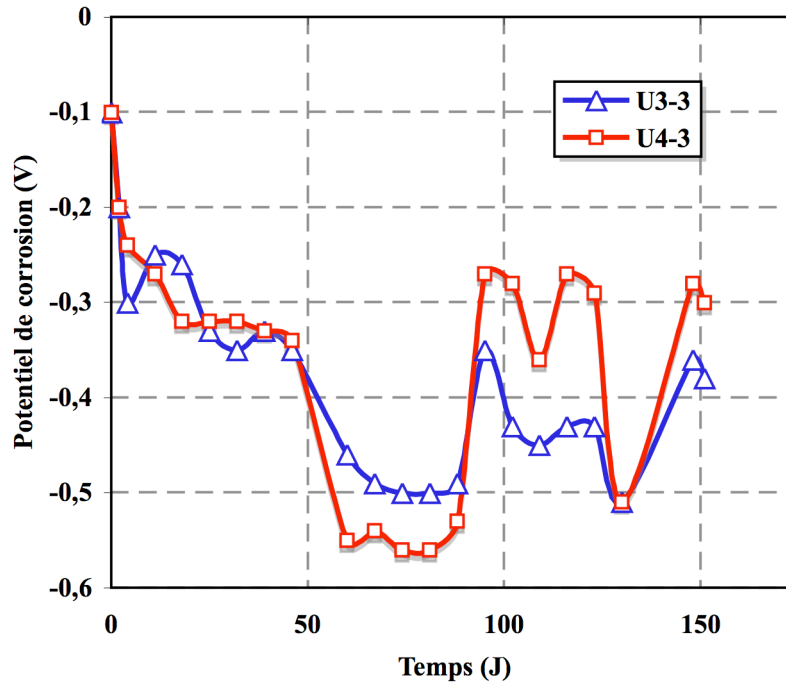


Figure 12. Potentiel de corrosion sur les échantillons en U

5. Conclusion

Le programme de recherche mis sur pied permettra d'améliorer les connaissances et d'apporter des données quantitatives au niveau de la corrosion. Ces recherches amélioreront les modèles de prédiction de la durée de vie des infrastructures en béton armé et permettra une meilleure gestion des infrastructures. Les essais présentés permettront d'évaluer la concentration critique en chlorure pour initier la corrosion, d'évaluer le type et la distribution des produits de corrosion, de quantifier l'influence des fissures sur l'initiation et la propagation de la corrosion, puis de vérifier l'influence des chargement statique ou dynamique sur la propagation de la corrosion.

6. Références

ACI 222R (1996) *Corrosion of metals in concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.

Aligizaki K. K., Rooij M. R., Macdonald D. D., *Analysis of iron oxides accumulating at the interface between aggregates and cement paste*, Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp. 1941-1945

Alonso, C. et al. *Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*, Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp. 1047-1055.

Andrade C., Alonso C., *Corrosion rate monitoring on the laboratory and on-site*, Construction and Buildings Materials, Vol. 10, No. 5, 1996, pp. 315-328.

Auyeung, Balaguru, Chung, *Bond behaviour of corroded reinforcement bars*, ACI Materials Journal, Vol. 97, No. 2, 2000, p. 214-220

Bentur A., Diamond S., Berke N. *Steel corrosion in concrete - Fundamentals and civil engineering practice*, E & FN Spon, 1999, 201 p.

Broomfield J.P. *Corrosion of Steel in Concrete*, E&FN Spon, 1997, 272 p.

Castel A., *Couplage mécanique et corrosion dans les éléments de béton armé*, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, 2000, 233 p.

Chitty W.-J., Dillmann P., L'Hostis V., Lombard C., *Long-term corrosion resistance of metallic reinforcements in concrete - A study of corrosion mechanisms based on archaeological artifacts*, Corrosion Science, Vol. 47, 2005, pp. 1555-1581.

Cornell R.M. and Schertmann U., *The Iron Oxides*, WILEY-VCH, Germany, 2003, 664 p.

Dehwah H.A.F., Maslehuddin M., Austin S.A. *Long-term effect of sulfate ions and associated cations on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concrete*, Cement & Concrete Composites, Vol. 24, No. 1, 2002, pp. 17-25.

Duffo G.S., Morris W., Raspini I., Saragovi C., *A study of steel rebars embedded in concrete during 65 years*, Corrosion Science, Vol. 46, No. 9, 2004, pp. 2143-2157

Federal Highway Administration *Corrosion evaluation of epoxy-coated, metallic-clad and solid metallic reinforcing bars in concrete*, Report No. FHWA-RD-98-153, 1998.

FIB, *FIB Bulletin 10: bond of reinforcement in concrete: Bond of corroded reinforcement*, 2000

François R., *Rôle de la fissuration du béton armé sur la corrosion des armatures: mythe ou réalité*, Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, Toulouse, July, 2000.

Gu G.P. Beaudoin J.J., Ramachandran V.S., *Techniques for Corrosion Investigation in Reinforced concrete*, Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology, edited by V.S. Ramachandran and J.J. Beaudoin, Building Materials series, William Andrew publishing, New York, Usa, 2001, 964 p.

Hausmann D.A., *Steel corrosion in concrete*, Materials protection, Vol. 4, No. 11, 1967, pp. 19-22.

Küter A, Geiker M. R., Olesen J.F., Stang H., *Chloride Ingress in concrete cracks under cyclic loading*, CONMAT 05, 2005

Stanish K., Hooton R.D., Pantazopoulou S.J., *Corrosion effect on bond strength in reinforced concrete*, ACI Structural Journal, Vol. 96, No. 6, 1999, p. 915-921

Lorentz T., French C., *Corrosion of reinforcing steel in concrete : Effects of materials, mix composition, and cracking*, ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 2, 1995, p. 181-190.

Mendoza A.R., *Corrosion of Reinforcing Steel in Loaded Cracked Concrete exposed to de-icing Salts*, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2003, p. 126

Marcotte T.D., *Characterization of chloride-Induced Corrosion Products that form in Steel-Reinforced cementitious Materials*, Thesis, University of Waterloo, 2001, 330 p.

Marcotte T., Hansson C.M., *The influence of silica fume on the corrosion resistance of steel in high performance concrete exposed to simulated sea water*, Journal of Materials science, Vol. 38, 2003, pp. 4765-4776.

Marcotte T.D., Hansson C.M., *Corrosion products that form on steel within cement paste*, RILEM international Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, 2004

Mohammed T.U., Otsuki N., Hamada H., *Corrosion of steel bars in cracked concrete under marine environment*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15, No. 5, 2003, p. 460-469.

Rosenberg A., Hansson C.M., Andrade C. *Mechanism of corrosion of steel in concrete*, Materials Science of Concrete, Vol. 1, American Ceramic Society, 1989, pp. 285-314.