



## Identification de la corrosion des armatures dans un beton fissure et carbonate

Rm. Ghanous, Stéphane Poyet, V. L'Hostis, Nc. Tran, Raoul François

### ► To cite this version:

Rm. Ghanous, Stéphane Poyet, V. L'Hostis, Nc. Tran, Raoul François. Identification de la corrosion des armatures dans un beton fissure et carbonate. Rencontres Universitaires de Genie Civil de l'AUGC - Prix Jeunes Chercheurs Rene Houppert, May 2017, Nantes, France. hal-02433872

**HAL Id: hal-02433872**

**<https://hal.science/hal-02433872v1>**

Submitted on 9 Jan 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

---

# Identification de la corrosion des armatures dans un béton fissuré et carbonaté

Rita Maria Ghantous<sup>1, 2, 4</sup>, Stéphane Poyet<sup>2</sup>, Valérie L'Hostis<sup>2</sup>, Nhu-Cuong Tran<sup>3</sup>,  
Raoul François<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI), 13 rue de Toul, F-59000 Lille, France

E-mail: [rita-maria.ghantous@yncrea.fr](mailto:rita-maria.ghantous@yncrea.fr)

<sup>2</sup>Den-SERVICE d'Etude du Comportement des Radionucléides (SECR), CEA, Université Paris-Saclay,  
F-91191, Gif-sur-Yvette, France

E-mail: {stephane.poyet, valerie.lhostis}@cea.fr

<sup>3</sup>EDF, R&D, MMC, F-77818 Moret-sur-Loing cedex, France

E-mail: [nhu-cuong.tran@edf.fr](mailto:nhu-cuong.tran@edf.fr)

<sup>4</sup>Université de Toulouse, INSA, UPS, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions,  
F-31077 Toulouse, France

E-mail: [Raoul.francois@insa-toulouse.fr](mailto:Raoul.francois@insa-toulouse.fr)

---

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

**RÉSUMÉ.** Le béton armé est largement utilisé dans la construction de différentes structures qui sont soumises à des fissures inévitables qui accélèrent la diffusion du dioxyde de carbone atmosphérique à l'interface acier / béton. La carbonatation de l'interface induit une corrosion de l'acier qui pourrait entraîner le développement de nouvelles fissures dans la structure. Le but de cet article est d'étudier l'effet des fissures existantes sur le développement de la corrosion induite par la carbonatation. Les résultats indiquent qu'après la phase d'initiation, la cinétique de corrosion diminue avec le temps et le potentiel de corrosion libre augmente indépendamment de l'ouverture de fissure (jusqu'à 500µm). De plus, la zone corrodée correspond à celle carbonatée. L'interprétation de ces résultats permet aux auteurs de conclure que, lors du processus de corrosion, les produits de corrosion scellent la fissure et agissent comme une barrière à l'oxygène et à la diffusion de l'eau. Par conséquent, l'influence de l'ouverture des fissures sur le développement de la corrosion est masquée et le développement de la corrosion est limité.

**ABSTRACT.** Reinforced concrete is widely used in the construction of different structures which are subject to unavoidable cracks that accelerate the diffusion of atmospheric carbon dioxide to the steel/concrete interface. Carbonation at the interface induces steel corrosion that could cause the development of new cracks in the structure. The aim of this article is to study the effect of existing cracks on the development of carbonation-induced corrosion. The results indicate that, after the initiation phase, the corrosion kinetics decreases with time and the free corrosion potential increases independently of the crack opening (up to 500µm). In addition, the corroded zone matches the carbonated one. The interpretation of these results allows the authors to conclude that, during the corrosion process, corrosion products seal the crack and act as a barrier to oxygen and water diffusion. Consequently, the influence of crack opening on corrosion development is masked and the corrosion development is limited.

**MOTS-CLÉS :** Béton armé, fissures, corrosion par carbonatation, conditions environnementales.

**KEY WORDS:** reinforced concrete; cracks; carbonation-induced corrosion; environmental conditions.

---

## 1. Introduction

La corrosion des armatures est la principale pathologie affectant les structures en béton armé et est un facteur déterminant pour leur durabilité. Ces structures sont sujettes à des fissures inévitables qui facilitent l'accès de l'oxygène, l'eau, le dioxyde de carbone atmosphérique et les chlorures jusqu'à l'interface acier / béton et réduisent ensuite le temps d'initiation de la corrosion. Des études en laboratoire ([ARY 96], [BER 93], [FRA 99], [GAU 83], [MOH 01], [SCH 97]) et *in situ* ([FID 80], [KAT 77], [ONE 80], [REH 64], [SCH 76]) ont noté une accélération dans l'initiation de la corrosion. Il a également été démontré que la corrosion induite par les ions chlorure ainsi que par le dioxyde de carbone s'initie sur quelques millimètres de part et d'autre de la fissure préexistante ([DUR 64], [FRA 88]). Bien qu'il existe un consensus général dans la communauté scientifique sur les effets délétères des fissures et de la qualité de l'interface acier / liant sur l'amorçage de la corrosion, les effets de tels phénomènes sur la propagation de la corrosion induite par la carbonatation sont encore sujets à discussion.

Tuutti [TUU 82] a proposé un modèle de corrosion des armatures enrobées dans un béton carbonaté et fissuré. Ce modèle suppose que les produits de corrosion sont capables de sceller la fissure ce qui favorise une repassivation de l'acier et une éventuelle ré-alcalinisation du mortier carbonaté. Dans la même étude, ce modèle a été validé par des résultats expérimentaux obtenus sur des échantillons fissurés, carbonatés et exposés à différentes humidités relatives. Tremper [TRE 47] a analysé des échantillons fissurés après 10 ans d'exposition à l'environnement extérieur et a visualisé de la corrosion sur la zone de l'armature interceptant une fissure et son environnement immédiat. Il conclut que la corrosion détectée n'a pas de dangereuses conséquences en raison de son degré mineur. Cette observation confirme l'idée qu'une réduction de la cinétique de corrosion se produit après la phase d'initiation, grâce aux produits de corrosion développés en fond de la fissure.

D'autre part, Dang et al. [DAN 15], étudiant la propagation de la corrosion induite par la carbonatation, ont utilisé des échantillons de mortier en forme d'anneau avec des fissures induites mécaniquement par la méthode du cœur expansif [DAN 15]. Après carbonatation accélérée (50% CO<sub>2</sub> - 65% HR), les échantillons ont été soumis à des cycles d'humidification / séchage pour accélérer le développement de la corrosion. Il a été observé que toute l'interface acier / mortier a été carbonatée ce qui a induit l'initiation de la corrosion sur toute la circonférence de l'armature. Par conséquent, une propagation de la corrosion a induit l'apparition de nouvelles fissures dans le béton d'enrobage [DAN 13]. Néanmoins, étant donné que la corrosion a été initiée sur toute la longueur de l'armature, il n'a pas été possible de confirmer les conséquences de la phase de propagation de la corrosion. Il est donc important de compléter la littérature et de comprendre l'effet des fissures et des dommages d'interface acier / liant, tant en termes d'initiation que de propagation de la corrosion dans les échantillons fissurés et carbonatés. Dans ce projet, les échantillons ont été exposés à des cycles de pluie / séchage pour simuler l'environnement extérieur et accélérer naturellement la corrosion. Le but ultime était de trouver des réponses aux questions suivantes:

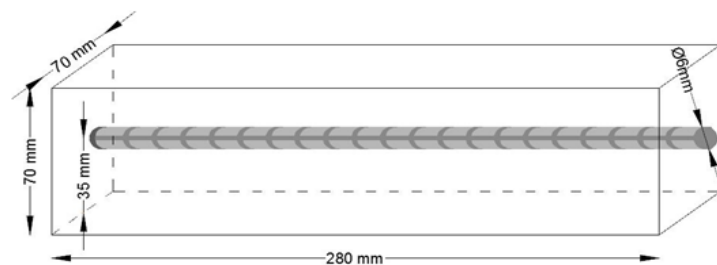
- L'ouverture des fissures influence-t-elle la cinétique de la corrosion induite par la carbonatation?
- Les produits de corrosion développés sur l'armature interceptant un béton carbonaté et fissuré peuvent-ils entraîner des fissures de corrosion menaçant la durabilité de la structure ou contribuent-ils à sceller les fissures et ralentir la propagation de la corrosion ?

Dans les sections suivantes, les protocoles expérimentaux développés pour fournir des réponses aux questions ci-dessus sont détaillés et ensuite les principaux résultats obtenus sont discutés.

## 2. Programme expérimental

### 2.1 Caractéristiques des échantillons

Les échantillons testés étaient des prismes de 70 x 70 x 280 mm renforcés par une armature de haute adhérence (HA) et de diamètre de 6 mm (Figure 1) placée au centre la section. Un total de 66 éprouvettes a été préparé avec un mortier normalisé contenant trois parts (en masse) de sable siliceux normalisé, deux parts de ciment (CEM I 52.5) et une part d'eau (Tableau 1). Le mortier a été coulé en deux couches, chacune étant vibrée pour éliminer les bulles d'air. Après 24 heures, les échantillons ont subi une cure de 28 jours dans de l'eau de chaux.



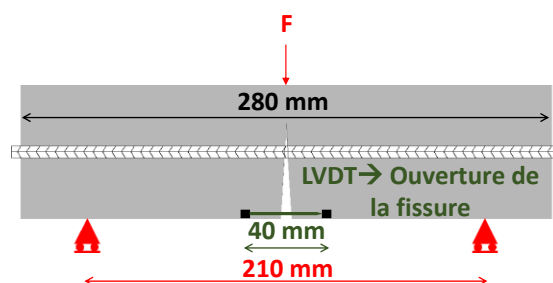
**Figure 1.** Représentation schématique de l'échantillon de mortier armé

**Tableau 1.** Formulation du mortier

| Matériaux                 | Masse (kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------------------------|----------------------------|
| Sable siliceux (EN 196-1) | 1543                       |
| CEM I 52.5 N              | 514                        |
| Eau                       | 257                        |

## 2.2 Fissuration

Après la cure, des fissures de différentes ouvertures ont été générés à mi-portée des éprouvettes par l'intermédiaire de l'essai de flexion trois points. En contrôlant le chargement appliqué lors de l'essai, trois ouvertures de fissures résiduelles après déchargement ont été réalisés : 100, 300 et 500  $\mu\text{m}$  et ont été mesurées par l'intermédiaire d'un capteur de déplacement (LVDT) fixé dans la zone de fissuration (Figure 2).



**Figure 2.** Flexion trois points sur une éprouvette de 70  $\times$  70  $\times$  280 mm

Une attention particulière a été portée à la limitation de l'endommagement de l'interface acier/mortier afin d'éviter l'initiation de la corrosion sur tout le périmètre de l'armature et de pouvoir étudier la phase de la propagation de la corrosion. Dans la littérature [ALA 09], il est déduit que le dioxyde de carbone est capable de carbonater les fronts d'une fissure indépendamment de son ouverture. En se basant sur cette conclusion, il a été supposé que la longueur endommagée pourrait être estimée en mesurant la longueur carbonatée de l'interface acier/liant. Pour cette raison, une étude préliminaire [GHA 17] a été menée et a permis de définir un protocole de carbonatation consistant à exposer les éprouvettes à 3%  $\text{CO}_2$ , 55 % HR et 25°C pendant 30 jours. La carbonatation doit être précédée d'une phase de conditionnement hydrique des échantillons à (20°C  $\pm$  1°C – 60  $\pm$  5 % HR) pendant 1 mois.

Par conséquent, les éprouvettes fissurées ont été carbonatées (de manière accélérée) dans le double but de mesurer la longueur de la zone de d'interface altérée et de dépassiver l'armature en fond de fissure pour permettre l'initiation de la corrosion. Il a été prouvé que l'essai de flexion trois points ne conduit pas à un endommagement total de l'interface acier / mortier pour des fissures d'ouverture inférieure ou égale à 500  $\mu\text{m}$  [GHA 16].

## 2.3 Corrosion

Après carbonatation, et par l'intermédiaire du dispositif ARIEL (Figure 3) développé et mis en place au cours de cette thèse, les éprouvettes ont été soumises à la corrosion au moyen de cycles de pluie/séchage en conditions contrôlées. Les cycles de pluie / séchage sont programmés par une unité de commande automatisée. Dans chacune des chambres de pluie et à chaque niveau, un thermo-hygromètre mesure en continu la température et l'humidité relative. De plus, cette expérience est réalisée dans un laboratoire climatisé dans lequel la température est réglée à 20 °C  $\pm$  1 °C et l'humidité relative est de 60  $\pm$  5%. Un hygromètre mesure en permanence les conditions hygrométriques à l'intérieur du laboratoire. Un logiciel dédié enregistre les données hygrométriques à chaque minute. La durée de la phase de pluie est de 30 minutes à chaque cycle tandis que la phase de séchage dure 72 heures après chaque période de précipitations. Pendant la période de précipitations, la valeur de l'humidité relative augmente à 95%  $\pm$  5%. Après la période de précipitation, la phase de séchage commence et dans cette phase, l'humidité relative prend environ 12 heures pour tomber à 60%  $\pm$  5%.



**Figure 3.** Le dispositif ARIEL (simulating Rainfall for concrete durability) pour corrosion accélérée par cycles de pluie en laboratoire

## 2.4 Analyse de la corrosion

Des éprouvettes ont été prélevées après différentes durées de corrosion, allant de 45 à 360 jours. Pour chacune de ces échéances, 4 éprouvettes ayant la même ouverture de fissure ont été analysées, 1 éprouvette pour l'analyse de surface (microscope optique, Raman) et les trois autres échantillons pour l'analyse physico-chimique. Le potentiel de corrosion libre des armatures a été mesuré en continu pendant l'expérience sur d'autres échantillons exposés aux mêmes conditions de corrosion. Chacune de ces méthodes d'analyse a été appliquée à des échantillons ayant trois différentes ouvertures de fissures résiduelles (100, 300 et 500  $\mu\text{m}$ ). Les méthodes d'analyse de la corrosion sont détaillées ci-dessous. Un récapitulatif du programme expérimental est donné dans le Tableau 2.

**Tableau 2.** Récapitulatif du programme expérimental

| Caractéristiques des échantillons       | Ouverture de fissure ( $\mu\text{m}$ ) | Nombre d'échantillon | Echéance d'analyse de la corrosion | Méthode d'analyse de la corrosion                                                                                                               |
|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 70×70×280 mm<br>Mortier à base de CEM I | 100                                    | 22                   | 0, 1.5, 3, 6, 12                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inspection visuelle</li> <li>- Mesure gravimétrique</li> <li>- Potentiel de corrosion libre</li> </ul> |
|                                         | 300                                    | 22                   |                                    |                                                                                                                                                 |
|                                         | 500                                    | 22                   |                                    |                                                                                                                                                 |

### 2.4.1. Analyse physico-chimique

#### 2.4.1.1. Extraction de l'armature et inspection visuelle

L'échantillon a d'abord été divisé en deux parties par fendage. Avant d'extraire l'armature, la distribution des produits de corrosion est inspectée visuellement. Les longueurs des produits de corrosion développées sur l'armature sont mesurées. Après l'extraction de l'armature, une solution diluée de phénolphtaléine est pulvérisée sur la surface de fracture pour mesurer la longueur carbonatée le long de l'interface acier / mortier et la comparer à la longueur corrodée (Figure 4).

#### 2.4.1.1. Estimation de la cinétique de corrosion

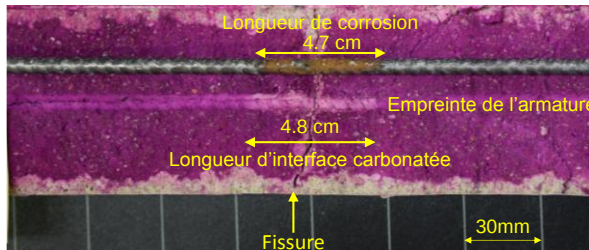
La masse de fer perdu ( $\Delta m_s$ ) est quantifiée à l'aide de mesures gravimétriques (desquamation de l'armature selon la norme NF ISO 8407). Les mesures gravimétriques sont répétées sur trois échantillons. Finalement, la cinétique de corrosion est calculée en se basant sur l'équation [1].

$$\frac{mm}{an} = \frac{\Delta m_s}{\rho_s \times S_{SL}} \times \frac{3.65 \times 10^{-2}}{\Delta t} \quad [1]$$

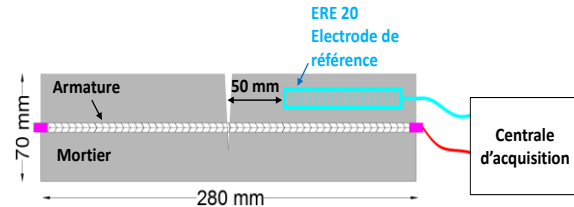
Où,  $\Delta m_s$  est la masse de fer perdue (mg) ;  $\rho_s$  est la masse volumique du fer ( $\text{g/cm}^3$ ) ;  $S_{SL}$  est la surface de l'armature corrodée ( $\text{dm}^2$ ) et  $\Delta t$  est la durée de la corrosion active (jours).

### 2.4.2. Analyse électrochimique

Des mesures en continu du potentiel de corrosion libre sont menées sur quelques éprouvettes afin d'avoir une indication qualitative de l'état de corrosion. Ces mesures sont réalisées au moyen d'une électrode de référence en dioxyde de manganèse (ERE 20) qui est positionnée au-dessus de l'armature avant le coulage du mortier. L'extrémité de mesure dans cette électrode est à 50 mm de la fissure (Figure 5). Dans cette configuration, l'électrode de référence mesure un potentiel de corrosion couplé (entre les parties active et passive de l'armature). Une centrale d'acquisition enregistre en continu le potentiel de corrosion libre mesuré.



**Figure 4.** Inspection visuelle de la longueur de corrosion sur l'armature et de la longueur de l'interface acier/mortier carbonatée



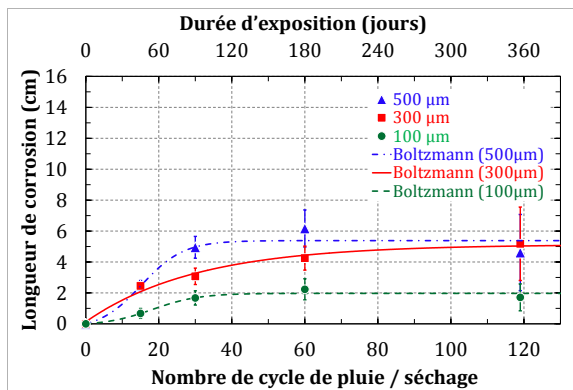
**Figure 5.** Mesure électrochimique pour le suivi du potentiel mixte de corrosion

## 3. Résultats

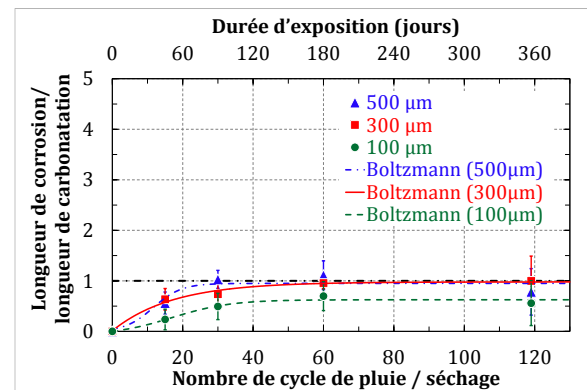
### 3.1. Distribution des produits de corrosion

La Figure 6 montre l'évolution de la longueur moyenne de corrosion mesurée sur trois échantillons par rapport au nombre de cycles de pluie / séchage. On constate que la longueur de corrosion augmente avec l'ouverture de fissure résiduelle et tend à se stabiliser après 30-60 cycles de pluie / séchage. Cette observation est cohérente avec l'étude de Tremper [TRE 47] dans laquelle la taille de la zone corrodée augmente avec l'ouverture de la fissure.

Figure 7 montre l'évolution des rapports de longueur de corrosion de l'armature sur la longueur de carbonatation de l'interface acier / mortier correspondante en fonction des cycles de pluie / séchage appliqués à des échantillons ayant des ouvertures de fissures résiduelles de 100, 300 et 500  $\mu\text{m}$ . On constate que les produits de corrosion remplissent la zone d'interface acier / mortier carbonaté dans les trente premiers cycles de précipitation / séchage et ne se propage pas plus loin.



**Figure 6.** Evolution de la longueur de corrosion en fonction du nombre de cycle de pluie / séchage et des ouvertures de fissure résiduelle



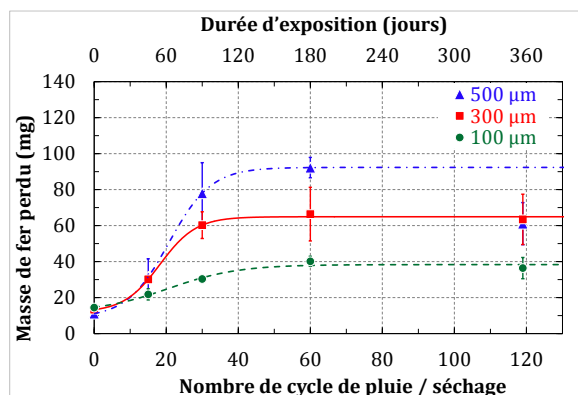
**Figure 7.** Evolution du rapport de la longueur de corrosion sur la longueur de carbonatation en fonction du nombre de cycle de pluie / séchage et des ouvertures de fissure résiduelle



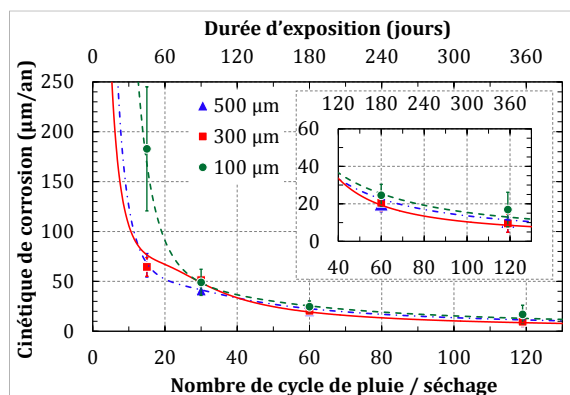
### 3.2. Mesure gravimétrique

La Figure 8 présente les résultats des mesures gravimétriques. Chaque point de cette figure représente la moyenne des valeurs de masse de fer perdu mesurées sur des triplicatas soumis aux mêmes conditions. Une augmentation de la masse de fer perdu avec le nombre des cycles de pluie / séchage et avec l'ouverture des fissures est évidente. De plus, indépendamment de l'ouverture de fissure, la masse de fer perdu tend à se stabiliser après 30-60 cycles de pluie / séchage. Cette stabilisation de l'évolution de la masse de fer perdu est compatible avec l'observation de Tuutti [TUU 82].

Il ressort clairement de la Figure 9 que la cinétique de corrosion diminue avec le nombre de cycles pour les trois ouvertures résiduelles de fissures testées. Cela est dû à la formation d'une couche d'oxyde poreux à la surface de l'acier. Il est également visible qu'à partir de 60 cycles, la vitesse de corrosion semble indépendante de l'ouverture de fissure résiduelle et est d'environ  $10 \mu\text{m} / \text{an}$  après 119 cycles. De plus, la différence entre la cinétique de corrosion mesurée à 6 et 12 mois est négligeable. Par conséquent, une estimation de la cinétique de corrosion à 12 mois par rapport à celle à 6 mois devrait logiquement donner une valeur comparable à la cinétique de corrosion passive ( $0,1-1 \mu\text{m} / \text{an}$  [ROS 89]). La diminution de la cinétique de corrosion avec le temps correspond au modèle proposé par Tuutti [TUU 82]. Selon Tuutti, la diminution dans la cinétique de corrosion est liée à la repassivation de l'acier, il suppose que les produits de corrosion scellent les fissures et empêchent l'accès des agents agressifs à l'armature, favorisant ainsi une repassivation.



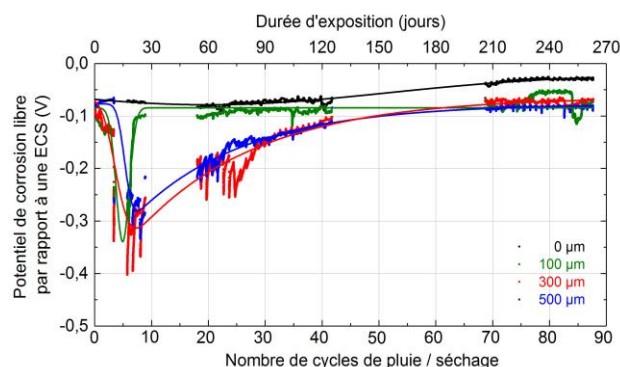
**Figure 8.** Evolution de la masse de fer perdu en fonction du nombre de cycle de pluie / séchage et des ouvertures de fissure résiduelle



**Figure 9.** Evolution de la cinétique de corrosion en fonction du nombre de cycle de pluie / séchage et des ouvertures de fissure résiduelle (selon l'éq. [1])

### 3.3. Potentiel de corrosion libre

Les valeurs du potentiel de corrosion libre diminuent pendant les 10 premiers cycles de pluie/séchage. Ensuite, le potentiel de corrosion augmente et rejoint celui d'une armature passive (Figure 10). Ces mesures de potentiel marquent l'existence de deux mécanismes de corrosion. Le premier mécanisme est la corrosion par macropile qui correspond à l'initiation de la corrosion. Lorsque le potentiel de corrosion augmente et rejoint celui d'une armature passive, le mécanisme de corrosion par micropile devient prépondérant et correspond à la propagation de la corrosion.



**Figure 10.** Evolution du potentiel de corrosion libre par rapport à une électrode au calomel saturé (ECS) dans les échantillons fissurés exposés à des cycles de pluie / séchage pour une durée de 270 jours.

#### 4. Discussion et conclusions

L'objectif de cette étude était de déterminer l'influence des fissures dans un béton d'enrobage carbonaté sur la corrosion des armatures. Pour cela des essais spécifiques ont été développés et les résultats montrent une diminution dans la cinétique de corrosion en fonction du temps, une absence de fissure de corrosion et une augmentation dans le potentiel de corrosion après un certain nombre de cycles de pluie /séchage. De plus, la cinétique de corrosion apparaît peu impactée par l'ouverture de la fissure. Il est aussi déduit que les produits de corrosion ne se propagent pas au-delà de l'interface acier / mortier carbonaté qui est elle-même limitée à quelques centimètres de part et d'autres de la fissure. Ces résultats indiquent que les produits de corrosion remplissent le fond de la fissure et jouent le rôle d'une barrière protectrice pour l'armature en limitant la diffusion des agents agressifs jusqu'à cette dernière. Les observations au microscope optique confirment cette conclusion. Un exemple d'une photo obtenue au microscope optique est donné dans la Figure 11. Par conséquent, la propagation de la corrosion est à son tour limitée.

Il a également été prouvé que même une fissure d'ouverture résiduelle de 500  $\mu\text{m}$  ne provoque pas un état de corrosion plus important. Ce résultat est inattendu puisque la norme européenne EN 1992-1-1 recommande une ouverture maximale de fissures de 300  $\mu\text{m}$  pour la classe XC4 correspondante aux conditions environnementales testées dans cette étude. Par conséquent, il pourrait être déduit que la fissure favorise l'initiation de la corrosion mais pas sa propagation. Pour cette raison, les structures fissurées (ouverture  $\leq 500 \mu\text{m}$ ) peuvent être traitées comme celles non fissurées.

En outre, les mesures de potentiel de corrosion libre suggèrent que deux mécanismes de corrosion peuvent se produire consécutivement. Le premier mécanisme correspondant à une corrosion par macropile se produit au cours de la phase d'initiation. Ensuite, le second mécanisme, qui agit pendant la phase de propagation, correspond principalement à la corrosion par micropile.

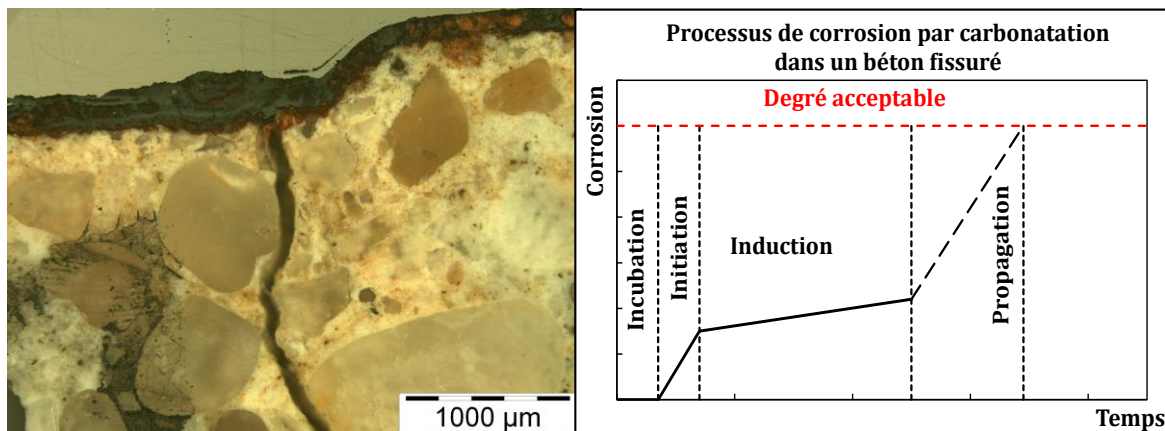
La corrosion à très long terme n'a pas pu être investiguée dans cette étude en raison de la contrainte de temps. Par contre, en se basant sur les résultats obtenus dans cette étude, il pourrait être supposé que la phase de propagation ne va pas être induite par la corrosion en fond des fissures mécaniques mais plutôt par la carbonatation totale du béton d'enrobage. Par conséquent, un modèle proposé dans l'étude [FRA 94] discutant la corrosion induite par les chlorures dans un béton fissuré est applicable pour prédire la propagation de la corrosion à long terme dans un matériau fissuré et carbonaté. Ce modèle schématisé dans la Figure 12 est basé sur quatre phases:

1. L'incubation : le temps nécessaire pour le dioxyde de carbone pour pénétrer dans la fissure et accéder à l'interface acier/liant.
2. L'initiation : cette période correspond à la période pendant laquelle la corrosion s'initie le long de l'armature interceptant un matériau carbonaté
3. L'induction : cette période commence lorsque la cinétique de corrosion diminue et sera contrôlée par les produits de corrosion développés en fond de fissure
4. La propagation : la période pendant laquelle la cinétique de corrosion augmente de nouveau et la corrosion se propage jusqu'à atteindre un degré limite acceptable.

Il est important de noter que ces conclusions ne s'appliquent pas aux structures :

- exposées au gel-dégel ou à des attaques chimiques pouvant être décisives pour la durabilité de la structure plus que la corrosion induite par carbonatation en fond d'une fissure.
- exposées à des chargements dynamiques induisant une variation dans l'ouverture de la fissure et pouvant éventuellement annuler la protection de l'armature par les produits de corrosion.





**Figure 11.** Photo au microscope optique d'une fissure dans un échantillon ayant une fissure résiduelle de 100µm après 60 cycles de pluie / séchage

**Figure 12.** Modèle de corrosion par carbonatation dans un béton fissuré

## 5. Bibliographie

- [ALA 09] ALAHMAD S., TOUMI A., VERDIER J., FRANÇOIS R., «Effect of crack opening on carbon dioxide penetration in cracked mortar sample », *Materials and Structure*, vol. 42, 2009, p. 559–566.
- [ARY 96] ARYA C., OFORI-DARKO F. K., « Influence of crack frequency on reinforcement corrosion in concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 26, 1996, p. 345–353.
- [BER 93] BERKE N. S., DALLAIRE M. P., HICKS M. C., HOOPES R. J., « Corrosion of Steel in Cracked Concrete », *Corrosion Science*, vol. 49, 1993, p. 934–943.
- [DAN 13] DANG V. H., « Initiation and propagation phases of re-bars corrosion in pre-cracked reinforced concrete exposed to carbonation or chloride environment », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2013.
- [DAN 15] DANG V. H., FRANÇOIS R., L'HOSTIS V., MEINEL D., « Propagation of corrosion in pre-cracked carbonated reinforced mortar », *Materials and Structures*, vol. 48, 2015, p. 2575–2595.
- [DUR 64] DURTON R., MOMMENS A., « Corrosion des armatures dans le béton armé », rapport de recherche, 1964, Centre National de recherches scientifiques et techniques pour l'industrie cimentière (CRIC).
- [FID 80] FIDJESTOL P., NILSON N., « Field test of reinforcement corrosion in concrete », *ACI Special Publication*, vol. 65, 1980, p. 205–217.
- [FRA 99] FRANÇOIS R., ARLIGUIE G., « Effect of micro-cracking and cracking on the development of corrosion in reinforced concrete members », *Magazine of Concrete Research*, vol. 51, 1999, p. 143–150.
- [FRA 94] FRANÇOIS R., ARLIGUIE G., « Durability of loaded reinforced concrete in chloride environment », *ACI Special Publication*, vol. 145, 1994, p. 573–596.
- [FRA 88] FRANÇOIS R., MASO J. C., « Effect of damage in reinforced concrete on carbonation or chloride penetration », *Cement and Concrete Research*, vol. 18, 1988, p. 961–970.
- [GAU 83] GAUTEFALL O., VENNESLAND O., « Effects of cracks on the corrosion of embedded steel in silica-concrete compared to ordinary concrete », *Nordic Concrete Research*, vol. 2, 1983, p. 17–28.
- [GHA 16] GHANTOUS R. M., MILLARD A., POYET S., FRANÇOIS R., L'HOSTIS V., TRAN N. C., « Experimental and numerical characterization of load-induced damage in reinforced concrete members », *In 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Berkeley, 2016, pp. 1–7.
- [GHA 17] GHANTOUS R. M., POYET S., L'HOSTIS V., TRAN N. C., FRANÇOIS R., « Effect of accelerated carbonation conditions on the characterization of load-induced damage in reinforced concrete members », *Submitted to Materials and Structures*, 2017.
- [KAT 77] KATAWAKI K., « Corrosion of steel in the concrete exposed to seawater spray zone », *Symposium Proceedings on Cracking of Concrete Structures*, 1977, p. 133–136.

- [MOH 01] MOHAMMED T. U., OTSUKI N., HISADA M., SHIBATA T., « Effect of Crack Width and Bar Types on Corrosion of Steel in Concrete », *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 13, 2001, p. 194–201.
- [ONE 80] O'NEIL E. F., « Study of reinforced concrete beams exposed to marine environment », *ACI Special Publication*, vol. 65, 1980, p. 113–132.
- [REH 64] REHM G., MOLL H., « Versuche zum studium des einflusses der rissbreite auf die rostbildung an der bewehrung von stahlbeton-bauteilen », *In Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, 1964, p. 169.
- [ROS 89] ROSENBERG A., HANSSON C., ANDRADE C., « Mechanisms of corrosion of steel in concrete », *Materials Science of Concrete*, vol. 1, 1989, p. 285–314.
- [SCH 76] SCHIEßL P., « Zur frage der zulässigen rissbreite und der erforderlichen betondeckung im stahlbetonbau unter besonderer berucksichtigung der karbonatisierung des betons », *In Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, 1976, p. 255.
- [SCH 97] SCHIEßL P., RAUPACH M., « Laboratory Studies and Calculations on the Influence of Crack Width on Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete », *ACI Materials Journal*, vol. 94, 1997, p. 56–61.
- [TRE 47] TREMPER B., « The Corrosion of Reinforcing Steel in Cracked Concrete », *Journal Proceedings*, vol. 43, 1947.
- [TUU 82] TUUTTI K., « Corrosion of steel in concrete », rapport de recherche, 1982, Swedish Cement and Concrete Research Institute.