



## Partie 2 – Corrosion des aciers du béton armé

# CRÉATION DE DÉFAUTS ARTIFICIELS SUR DES ÂMES EN TÔLES D'ÉLÉMENTS EN BÉTON

**CREATION OF ARTIFICIAL DEFECTS ON THE SURFACE OF STEEL SHEET IN CONCRETE**

**X. X. GAO<sup>(a)</sup>, F. DEBY<sup>(a)</sup>, G. ARLIGUIE<sup>(a)</sup>, A. LANG<sup>(b)</sup>, Y. GOURBEYRE<sup>(c)</sup>**

a. Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions),  
135, Avenue de Rangueil, F-31 077 Toulouse Cedex 04, France

b. SEDIF (Syndicat des Eaux d'Ile-de-France), 120 Boulevard Saint-Germain, 75006 Paris c. VERI,  
Chemin de la digue, BP 76, 78603 Maisons-Laffitte Cedex, France

\* auteur correspondant : xxgao@insa-toulouse.fr

## RÉSUMÉ

*En vue des tester des méthodes de contrôle non destructif sur des canalisations en béton armé à âme tôle, un protocole de création de défauts artificiels est en cours d'élaboration. Cet article décrit la première partie de cette étude, dont le but est de créer une zone corrodée de taille maîtrisée par attaque des chlorures sur une zone ciblée. Une méthodologie expérimentale, basée sur le principe de la migration des chlorures sous l'influence du champ électrique, est établie par l'étude de la cinétique de la migration des chlorures dans le béton grâce à des mesures chimiques (consommation des chlorures : Cl%) et des mesures électrochimiques (potentiel de corrosion  $E_{corr}$  et résistance de la polarisation  $R_p$ ). Cette méthode est validée par l'autopsie des corps d'épreuve et l'analyse de l'âme tôle après l'attaque. La taille des défauts créés dépend du temps d'application du courant et de la dimension du manchon d'alimentation en chlorures. La taille des défauts correspond environ au double de celle du manchon au moment où la cinétique de la migration atteint son palier (courbe  $\Delta E$  et  $R_p$ ).*

**Mots-clés :** Corrosion, chlorures, migration, potentiel de corrosion, résistance de la polarisation

\*\*\*

## 1. INTRODUCTION

Les canalisations en béton armé à âme en tôle, servant notamment à l'adduction d'eau potable, peuvent aussi faire l'objet de dégradations en raison du développement de la corrosion suite à la présence de chlorures. Ces dégradations engendrent des dysfonctionnements des réseaux que les propriétaires et gestionnaires (comme le SEDIF et Véolia) souhaitent éviter en les détectant avant leur apparition. Dans l'objectif de tester des techniques de contrôle non destructif (CND) et de vérifier leur aptitude à détecter ces défauts dans ce type de canalisation, un protocole de création de défauts artificiels est en cours d'élaboration. Le travail se concentre sur la création de défauts artificiels représentatifs par l'attaque des chlorures. Il s'agit de proposer une méthodologie électrochimique de création de défauts de taille contrôlé à un endroit ciblé. Une méthode, basée sur le principe de l'essai de migration des ions chlorures dans le béton [Deby 2008], est utilisée. Sous l'influence d'un champ électrique, les chlorures se déplacent par migration de la cathode à l'anode. La présence des chlorures au voisinage de l'âme tôle (anode) provoque la corrosion. Pour mettre en œuvre cette méthode, un protocole de coulage du béton a été réalisé au laboratoire en simulant les canalisations à âme tôle dans un premier temps. Dans un second temps, des mesures chimiques et électrochimiques ont été effectuées afin d'étudier le com-



portement de la migration des ions chlorures et la corrosion de la tôle. Ensuite, les corps d'épreuve ont été autopsiés afin d'évaluer la méthode de suivi.

## 2. PROTOCOLE MIS EN PLACE POUR L'ÉTUDE

### 2.1. Coulage du béton

Une structure en « sandwiches », avec une tôle piégée dans le béton, est conçue. Cette conception garantit l'adhérence entre le béton et la tôle et évite le problème de désolidarisation entre ces deux parties, et permet également d'isoler électriquement la face inférieure du corps d'épreuve. En outre, pour faciliter la mise en œuvre des essais, une conception de dalle à géométrie plane est proposée. Enfin, afin d'éliminer dans un premier temps les éventuels problèmes d'interactions électrochimiques, le corps d'épreuve est réalisé sans armatures dans le béton d'enrobage.

Le ciment utilisé lors de cette étude est un CEM I 52.5 R, un ciment Portland classique, choisi pour la régularité de sa composition chimique. Un dosage en ciment de 400 kg/m<sup>3</sup> est utilisé. Un rapport E/C de 0.55 a été retenu afin de viser une porosité autour de 16%. Le granulat, qui contient 45% (pourcentage en masse) de sable (0~4 mm) et 55% de gravier (4~10mm), est du granulat siliceux alluvionnaire, normalisé EN12620. Une tôle commerciale d'acier doux avec une épaisseur de 1,5 mm est utilisée pour le coulage. Sa surface est traitée par éthanol pour dégraissier, et également abrasée enlevant les petites tâches de corrosion afin de ne pas perturber l'observation des essais.

Le processus de coulage est décrit ci-dessous. Une première couche de béton (3 cm) est déposée sur un moule. L'ensemble est ensuite mis en œuvre sur une table vibrante pendant environ 10s afin de remplir correctement le moule et éliminer l'air entraîné lors du malaxage du béton. Ensuite, la tôle est déposée avant de mettre la deuxième couche (4 cm) et recommencer l'opération de vibration. L'ensemble est alors couvert avec un plastique pour éviter l'évaporation de l'eau nécessaire à l'hydratation correcte du ciment, et est conservé ainsi pendant 24h avant le démouillage. Une fois que la dalle est démoulée, elle est conservée dans une salle à 100% d'humidité pendant plus d'un mois. Les dalles sont de dimensions 25\*22\*7 cm. La couche supérieure de béton au-dessus de la tôle que l'on utilise ensuite pour les essais de migration fait donc toujours 4 cm.

### 2.2. Crédit des défauts

La figure 1 représente l'ensemble du dispositif de création des défauts. Un manchon en PVC, collé sur la dalle avec un joint silicone pour en assurer l'étanchéité, est utilisé pour placer la solution NaCl au contact de la dalle. Une contre électrode en acier inox, de même diamètre que le manchon, est placée à l'intérieur, de façon à ce que les ions chlorures migrent vers l'âme tôle lorsqu'un courant

continu est imposé par un générateur entre cette contre électrode (négative) et l'âme tôle (positive). Les mesures électrochimiques sont réalisées par un potentiostat-galvanostat Gamry.

## 3. MÉTHODOLOGIE

En s'inspirant des essais de migration des chlorures dans le béton nous appliquons un champ électrique entre la contre électrode, qui est mise en place dans la solution chlorure, et l'âme tôle où les chlorures doivent se déplacer par migration. Cependant, des adaptations particulières sont à définir pour répondre aux différents objectifs. Cette méthode devra nous permettre de :

- garantir l'arrivée des chlorures à l'âme tôle,
- établir la relation entre les paramètres étudiés et la taille de corrosion.

Son efficacité sera ensuite vérifiée par observation de la présence de corrosion sur la tôle (essai destructif).

### 3.1. Etude de la cinétique de la migration

Pour commencer les essais, nous avons choisi d'appliquer une différence de potentiel de 20V entre les 4 cm d'épaisseur du béton, ce qui correspond à la recommandation de 5V/cm selon Deby [2008]. Une concentration de 20g/l de NaCl est utilisée afin de simuler un taux de contamination d'environ 0,6% du béton. Enfin la taille du manchon est de 6.2 cm. La durée d'application doit être déterminée de façon à pouvoir garantir que les chlorures ont le temps de migrer jusqu'à l'âme tôle et provoquer la corrosion. L'étude de la cinétique est donc nécessaire afin d'estimer l'avancement de la migration des chlorures. Elle s'appuie sur trois paramètres : le dosage des chlorures dans les solutions à la cathode qui permet d'évaluer la consommation des chlorures, le potentiel, et la résistance de polarisation pour évaluer l'état de corrosion de l'âme tôle.

#### 3.1.1. Suivi de la concentration de Cl- dans le manchon

La concentration en chlorures à la cathode est mesurée à intervalles de temps réguliers par dosage de la solution avec une méthode titrimétrique au nitrate d'argent. L'essai

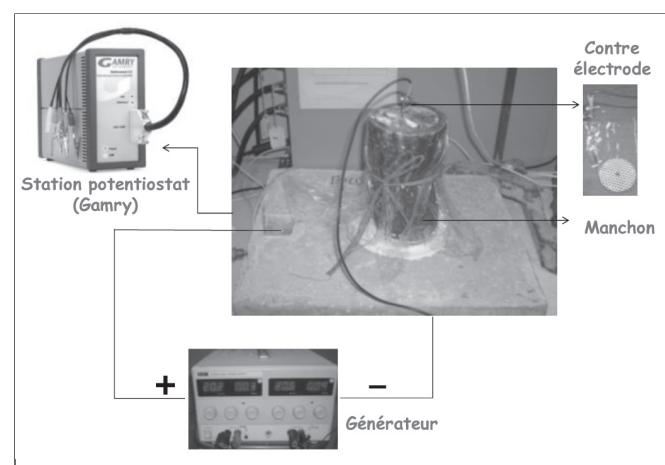
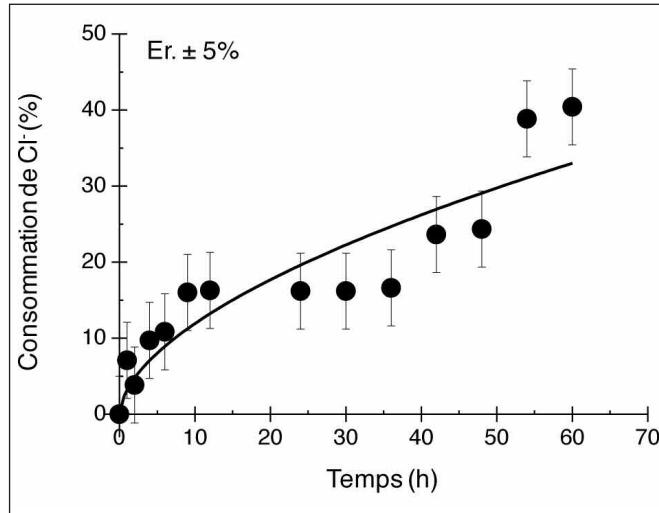


Figure 1 : Dispositif de création de défauts



**Figure 2 : Consommation de chlorures en fonction du temps d'application du courant (Barre Erreur :  $\pm 5\%$ )**

consiste à faire un prélèvement de 0.75 ml de la solution et à ajouter la même quantité de solution de NaCl frais afin de diminuer l'effet du prélèvement sur la concentration. L'évolution de la consommation de chlorures en fonction du temps d'application du potentiel est représentée sur la figure 2. La consommation des chlorures, calculée par rapport à la concentration en chlorure initiale ( $t=0h$ ), représente les pourcentages de chlorures qui migrent dans le béton.

On observe que la consommation en chlorures augmente au fur et à mesure du temps d'application du courant. Cette tendance continue pendant toute la durée des mesures, aucun palier n'est remarqué. Cela signifie que les chlorures migrent continuellement du manchon vers le béton.

### 3.1.2. Mesures du potentiel

La valeur du potentiel pris par un métal permet d'évaluer l'état du métal : passif ou corrodé. L'évolution du potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ) est enregistrée à intervalles de temps réguliers. L'électrode de référence est une électrode au calomel saturé. L'âme tôle représente l'électrode de travail. Avant chaque mesure, le courant est coupé pendant environ 16h afin de dépolarisier l'âme tôle. La figure 3 montre l'évolution de la variation du potentiel en fonction du temps d'injection du courant. La variation du potentiel ( $\Delta E$ ) représente la différence par rapport au potentiel initial ( $E_{corr} = -188 \text{ mV}$ ). On observe les tendances suivantes :

- avant 20h, une faible diminution du potentiel est observée. Cette période correspond à une période d'incubation pendant laquelle les chlorures migrent dans le béton ;
- entre 20h et 60h, une forte chute du potentiel jusqu'à -400 mV est remarquée. Cette chute semble correspondre à une activité de corrosion sur la tôle. La diminution au cours du temps de ce potentiel traduirait une augmentation de l'état de corrosion de la tôle ;
- à 60h, un palier est alors atteint.

### 3.1.3. Mesures de la résistance de polarisation apparente

La résistance de polarisation ( $R_p$ ) permet de faire une estimation de la vitesse de la corrosion au moment de la mesure. Rappelons le principe : si on trace une courbe de

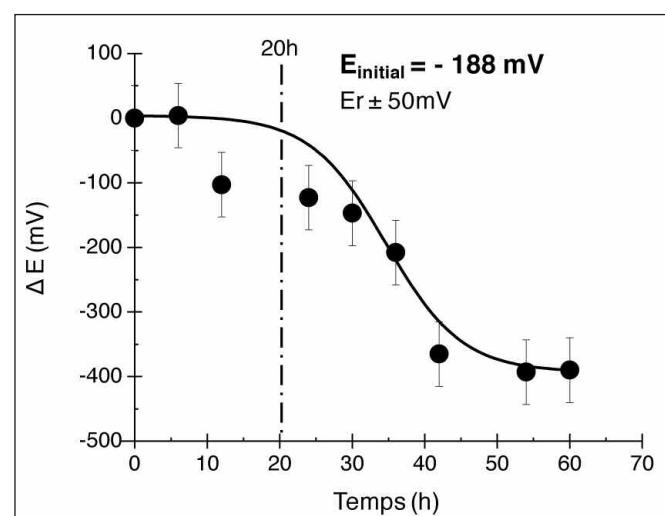
polarisation pour un acier actif, on peut obtenir une relation linéaire lorsque le potentiel appliqué est proche du potentiel de corrosion. On définit la pente de cette courbe comme l'inverse de la résistance de polarisation. Plus  $R_p$  est petite, plus l'acier est actif et la vitesse de corrosion est rapide. La  $R_p$  mesurée dans nos conditions expérimentales n'est pas celle définie suivant cette stricte définition (densité de courant), mais une  $R_p$  apparente ( $R_{p,app}$ ) qui fait intervenir directement le courant total mesuré. La définition de la  $R_p$  n'est en effet de toute façon valable qu'en corrosion uniforme alors que la tôle est dans un état de corrosion localisée.

Les mesures sont faites par un système à trois électrodes : l'électrode de référence est une électrode au calomel saturé, la contre-électrode est constituée par une grille en acier inox, et l'âme tôle représente l'électrode de travail. Les données sont collectées et analysées par la station Gamry. Pour notre mesure, nous avons choisi un balayage entre -20 et +20 mV autour du potentiel de corrosion  $E_{corr}$ , valeurs recommandées pour la mesure de  $R_p$  sur les ouvrages de génie civil [RILEM TC 154-EMC]. Avant chaque mesure, une coupure du courant pendant environ 16h est appliquée pour laisser le temps à l'âme tôle de se dépolarisier.

La figure 4 montre l'évolution de la  $R_{p,app}$  en fonction du temps d'application du courant. Étant donnée l'allure de la courbe de polarisation pour un acier passif, la valeur de  $R_{p,app}$  est très forte et n'est pas significative dans l'exploitation des résultats. Dans notre cas (géométrie de la cellule électrochimique), nous avons retenu une limite de la  $R_{p,app}$  de 2000  $\Omega$  comme seuil de passivité de l'âme tôle. La figure 4 correspond à un zoom sur les valeurs inférieures à 2000 Ohm. On note les tendances suivantes : la  $R_{p,app}$  chute fortement à partir de 20h jusqu'à 60h. Cela signifie qu'à partir de 20h, la corrosion devient de plus en plus active selon le temps, et atteint un maximum autour de 60h.

### 3.1.4. Corrélation entre les paramètres étudiés et la taille de corrosion

Rappelons que les mesures électrochimiques montrent que la corrosion commence à partir de 20h et atteint un palier à 60h. Pour construire la corrélation avec la taille de corro-



**Figure 3 : Variation du potentiel en fonction du temps d'application du courant (Barre Erreur :  $\pm 50\text{mV}$ )**

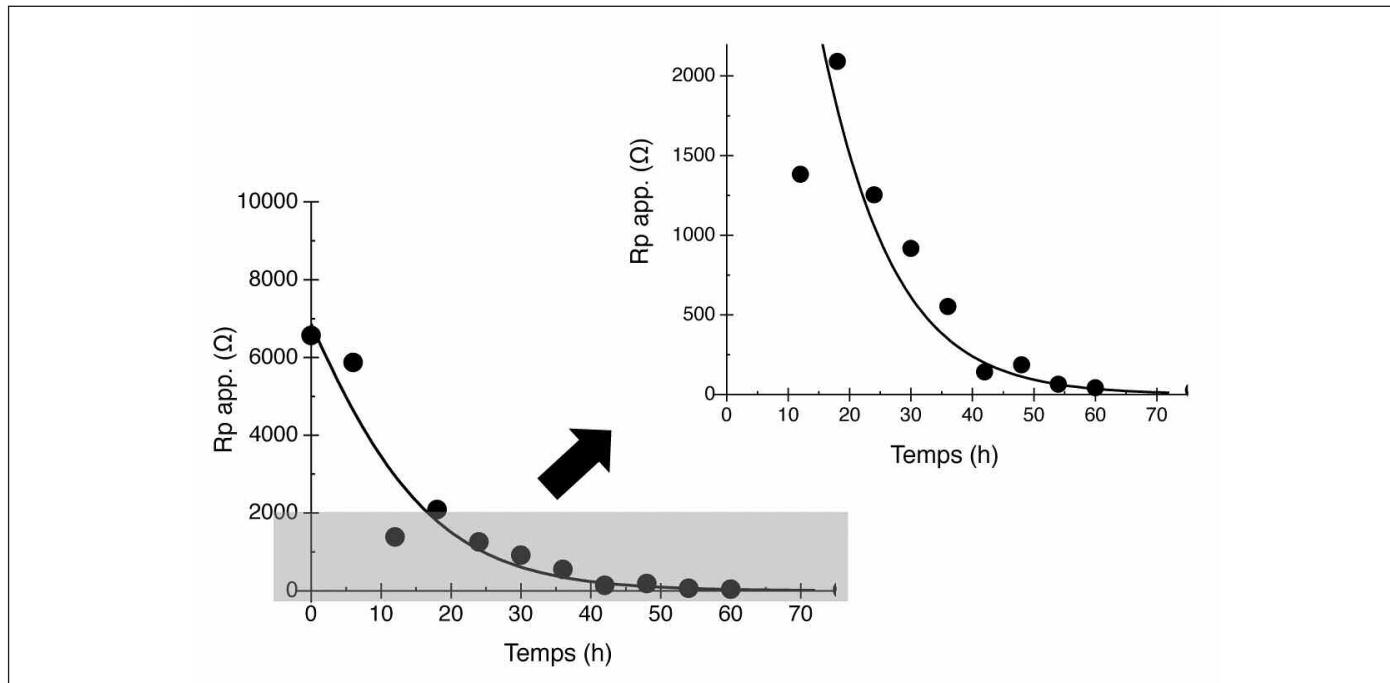


Figure 4 : Résistance de la polarisation apparente en fonction du temps d'application du courant

sion, nous avons fait trois autopsies des corps d'épreuve avant et après les paliers, soit à 37h, 60h et 72h respectivement (figure 5). Tout d'abord, nous observons qu'une forte corrosion est bien centrée à l'endroit où le manchon a été positionné. Par ailleurs, à partir de 37h, la taille de la zone corrodée est plus grande que celle du manchon ( $\Phi = 6,2$  cm). Au palier, à 60h, un rapport d'environ 2 est constaté. À 72h, la taille de corrosion continue à augmenter et atteint jusqu'à 18 cm. En conclusion, la dimension de la zone de tôle touchée par la corrosion dépend du temps d'application du courant. Au-delà d'un certain temps (période d'incubation), plus la durée d'application du courant est grande, plus la taille de la zone corrodée est grande. Ceci est en accord avec les résultats relatifs à la consommation des chlorures. Les résultats précédents (figures 3 et 4) montrent que les mesures de  $E_{corr}$  et  $R_{p app}$  atteignent un palier à 60h. Compte tenu de la géométrie de notre essai, l'électrode de référence et la contre électrode restant toujours dans le manchon, l'évolution de  $E_{corr}$  et  $R_{p app}$  n'est plus détecté une fois que la taille de la zone corrodé dépasse un diamètre limite.

### 3.2. Vérification des défauts dus aux ions chlorures

#### 3.2.1. Identification des chlorures dans les corps des épreuves

L'autopsie des corps d'épreuves a été effectuée afin de vérifier la présence des chlorures dans le béton. Le processus est présenté sur la figure 6. L'essai consiste à carotter dans la zone où est mis en place le manchon, mais avec diamètre bien plus grand, puis à fendre le prélèvement verticalement. Sur la surface rompue et fraîche, un révélateur, le nitrate d'argent ( $AgNO_3$ ), est pulvérisé afin de vérifier la présence des chlorures. La précipitation blanche de chlorure d'argent ( $AgCl$ ) révèle la présence des chlorures [Deby 2008, NTBuild 192, 1999]. On observe que la taille du précipité blanc sur la face qui était au contact de la solution de NaCl, est bien plus grande que la taille du manchon. Cette zone blanche diminue selon la profondeur du béton. Au niveau de la face du béton qui était au contact avec l'âme tôle, la zone blanche correspond bien à celle des

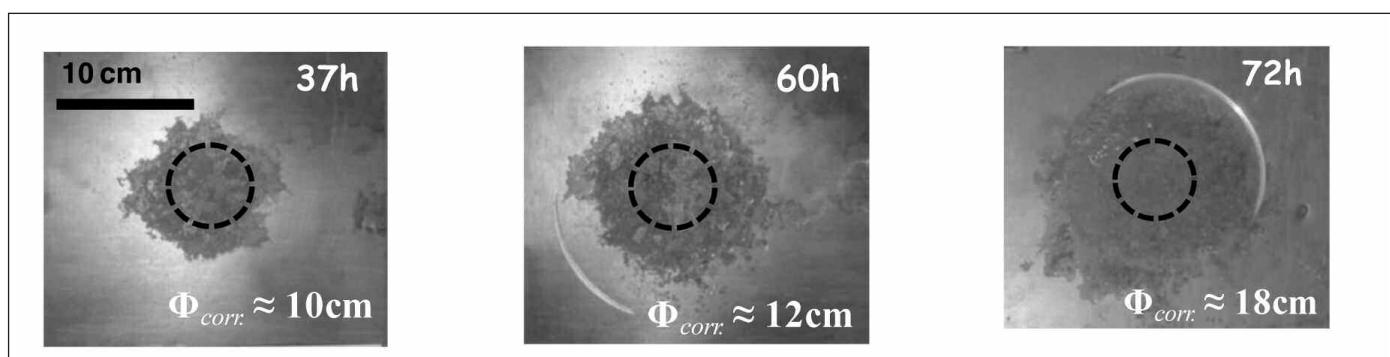
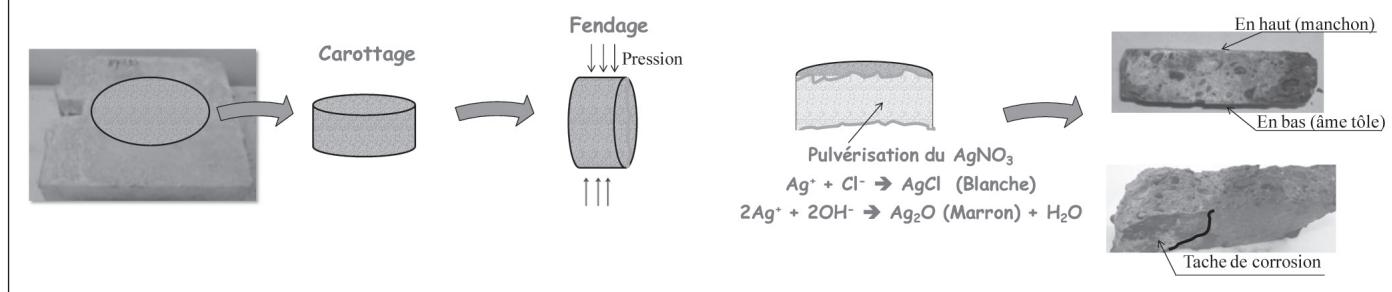


Figure 5 : Défauts sur les âmes tôles après l'attaque des chlorures



**Figure 6 : Autopsie des corps d'épreuve après 60h d'application du courant**

tâches de corrosion observées. Ces observations confirment que la corrosion a bien lieu en présence des chlorures.

### 3.2.2. Observation microscopique sur l'âme tôle

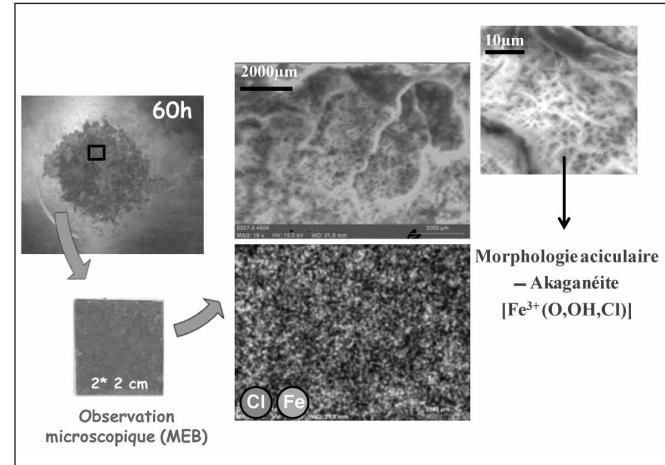
Pour confirmer la corrosion par les ions chlorures d'une manière plus approfondie, des analyses au microscope électronique à balayage couplé à un analyseur chimique sont effectuées, les photos sont présentées sur la figure 7. Un carré de 2x2 cm est prélevé dans la zone corrodée sur le côté extérieur de l'âme tôle (côté essai de migration). Une morphologie aciculaire a été constatée, pouvant correspondre à un produit de corrosion  $[Fe^{3+}(O, OH, Cl)]$  déjà obtenu lors d'attaques de chlorures [Koleva et al. 2006]. La présence des chlorures est également mise en évidence par l'analyse chimique EDS. Les résultats confirment l'existence de chlorures sur la tôle au contact de la zone où est installé le manchon. On peut donc conclure que la pénétration des chlorures à travers le béton extérieur est bien arrivée à l'âme tôle, et que la corrosion sur l'âme tôle est due aux chlorures.

## 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Pour conclure, les travaux présentés dans ce rapport peuvent être résumés de la façon suivante :

- La méthode électrochimique mise en œuvre pour la création des défauts permet de créer une zone de corrosion au bout d'une période courte (2 ou 3 jours de courant appliquée au total). Ces défauts peuvent bien être contrôlés à l'endroit ciblé.
- La taille des défauts dépend du temps d'application du courant. Pour choisir le temps, nous avons étudié la cinétique de la migration par trois paramètres. Les courbes du potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ) et de la  $R_p$  montrent une forte chute à partir de 20h, puis on atteint un palier à 60h. Nous avons trouvé que la taille des défauts créés est environ le double de celle du manchon d'alimentation en chlorures.

Cependant, ce ratio de 2 est une valeur empirique, obtenue ici pour un enrobage donné (~ 4 cm) et une formulation de béton particulière ( $E/C=0,55$ ). Etant donné que le comportement de la migration des chlorures est complexe et dépend notamment de la formulation du béton (porosité), nous allons poursuivre ces travaux et étudier les aspects



**Figure 7 : Photos de MEB sur l'âme tôle corrodée après 60h d'application du courant**

cinétiques ainsi que la taille du défaut sur des bétons avec une autre gamme de porosité : autour de 10%.

## RÉFÉRENCES

- [Deby 2008] F. Deby, Approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin, thèse, Université de Toulouse, 2008.
- [NTBuild 492, 1999] NTBuild 492(1999), Concrete, Mortar and cement based repair materials: chloride migration coefficient from non steady state migration experiments.
- [RILEM TC 154-EMC] C. Andrade, C. Alonso, Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, RILEM TC-EMC “Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion” Recommendations, Materials and Structures 37 (2004) 623-643.
- [Koleva et al. 2006] D. A. Koleva, J. Hu, A. L. A. Fraaij, P. Stroeven, N. Boshkov, J. H. W. de Wit, Quantitative characterization of steel/cement paste interface microstructure and corrosion phenomena in mortars suffering from chloride attack, Corrosion Science 48 (2006) 4001-4019.
- [Truc 2000] O. Truc, Prediction of chloride penetration into saturated concrete-Multi-species approach, thèse, Université de Toulouse, 2000.