

# Analyse de la fissuration du béton armé en corrosion accélérée

Quang Thanh Nguyen<sup>a</sup>, Sabine Caré<sup>b</sup>, Alain Millard<sup>c</sup>, Yves Berthaud<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> LMT, ENSC/CNRS/UPMC, 61v avenue Président Wilson, 94235 Cachan, France

<sup>b</sup> LMSGC, Institut Navier, LCPC/ENPC/CNRS, 2, allée Kepler, 77420 Champs-sur-Marne, France

<sup>c</sup> CEA/DEN/DM2S/SEMT/LM2S, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

Reçu le 6 novembre 2006, accepté après révision le 23 janvier 2007

Présenté par Jean-Baptiste Leblond

## Résumé

Nous présentons dans cette Note une expérimentation en laboratoire d'un effet mécanique (fissuration du béton) de la corrosion accélérée sur des plaques de béton avec armature métallique. Ces plaques permettent de suivre l'évolution de la déformation du béton au cours de l'essai de corrosion grâce à l'enregistrement d'images numériques à différents instants, images traitées par corrélation numérique. La corrosion est accélérée par imposition de densité de courant électrique. L'avantage de ces essais, rapides, est de permettre de suivre la cinétique de la fissuration, l'inconvénient est que la représentativité de ce type d'essai est toujours discutée. Deux positions d'armatures ont été imaginées. La cinématique de la fissuration a été obtenue et comparée à une modélisation dans laquelle la croissance de la couche d'oxyde est simulée par un chargement thermique, le béton étant élastique endommageable. **Pour citer cet article :** *Q.T. Nguyen et al., C. R. Mecanique 335 (2007).*

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

## Abstract

**Analysis of cracking in reinforced concrete using accelerated tests.** We present in this Note an experimental study—in a laboratory setup—of the mechanical effect (cracking of concrete) of corrosion on plates made of reinforced concrete. Due to the geometry it is possible to use digital image correlation to follow the evolution of strains induced by the corrosion of reinforcement. The corrosion is accelerated by the imposition of current density. Even if the representativity of this test is still discussed, it allows one to record the entire strain history. The kinetics of cracking has been obtained and compared to a very simple model in which the increase of the corroded layer is modelled by a fictitious thermal load, the reinforcement remaining elastic and the concrete being damageable. **To cite this article :** *Q.T. Nguyen et al., C. R. Mecanique 335 (2007).*

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

**Mots-clés :** Endommagement ; Corrosion ; Béton armé ; Expérimentation ; Essais accélérés

**Keywords :** Damage; Corrosion; Reinforced concrete; Experiment; Accelerated tests

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [berthaud@lmt.ens-cachan.fr](mailto:berthaud@lmt.ens-cachan.fr) (Y. Berthaud).

## Abridged English version

### Introduction

Most reinforced concrete structures are damaged due to the presence of the reinforcements in the concrete. In the usual conditions the pH near the reinforcements is around 12–13, which means the steel is in a passive state [1]. Due to the uptake of salts or of CO<sub>2</sub>, corrosion is initiated. As a consequence (hydro) oxides are produced that induce: (i) a pressure on the surrounding concrete; (ii) a loss of cross-section accompanied by a fragilization of the steel bar; (iii) a modification of the steel concrete interface properties; and (iv) a modification of transfer properties due to the damage of the concrete. We have decided to study the cracking of reinforced concrete due the corrosion of the reinforcing using accelerated tests.

### Experimental set-up

The specimen are depicted in Fig. 1. A steel bar (10 mm in diameter, FeE500 steel) is located either in the middle (P2 case) or near the corner (P1 case) in order to reproduce common examples. The zone inside the dashed line is observed by a CCD camera. The composition of the microconcrete is: CEM I 52.5 N cement,  $e/c = 0.47$ , and a weight ratio cement to sand equal to 0.46. Chlorides have been added (3.5% of the cement mass) in order to accelerate the inception of corrosion. We know that the mechanisms of oxide formation are different from those in natural corrosion, but cracking patterns are similar [2]. The experimental set-up is shown in Fig. 2. Except for the upper surface, the specimen is in a saline solution. A generator is connected to the reinforcement. The imposed current density is: 100  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , the surface being the lateral surface of the bar in contact with concrete. The other electrode is the carbon tissue located under the specimen. The upper surface of the specimen is tagged with white paint on a black surface. Images are recorded every hour and stored, to be analyzed with digital image correlation [3].

### Experimental results

The typical cracking patterns for each configuration P1 and P2 are shown in Fig. 5. They have been deduced from the optical measurements and displacement computations. Fig. 3 gives the iso-values of the displacement field in the directions 1 and 2 for P2 test. This field corresponds to that recorded at time 46 h and at the beginning of the test. The iso-values indicate a discontinuity (direction 1) corresponding to a crack present in the concrete. More accurate results are given in Fig. 4 with the eigen strains deduced from the displacement fields for three different steps corresponding to a particular cracking evolution. At 30 h the initiation takes place around the bar. Then (33 h), due to bending, a localization of strain occurs at the free surface and the crack rapidly propagates to reach the bar. Finally a new crack initiates and propagates in the low part (in the figure) of the specimen.

### Numerical simulations

We have tried to reproduce this simple test with the following procedure: the increase of the oxide layer has been obtained by a fictitious thermal load applied to a thin layer, the initial width of which has been fixed to 30  $\mu\text{m}$  (a value deduced from optical measurements under a microscope). A 0.49  $\mu\text{m}/\text{h}$  increase of this layer has been recorded. The thermal load has been fixed in order to recover this experimental data. The elastic properties of the layer were  $E = 0.15$  GPa (as previously obtained by [4]) and a Poisson ratio  $\nu = 0.3$ . The relative volume expansion of the oxide is between 2 and 7. A 3.7 value has been adopted due to physical considerations (presence of Goethite). The behaviour of concrete is described by a nonlocal scalar damage model [5]. Fig. 6 shows (case P2) the evolution of the cracking pattern. The initiation of cracking, that fits the data, is obtained for a time similar to the experimental one. The other case (P1) is more difficult to simulate probably because: (i) the bar is near free surfaces; and (ii) the heterogeneity of concrete (described by the nonlocal length) is of the order of magnitude of the concrete cover.

### Conclusion

We have shown in this Note that it was possible to perform accelerate tests of corrosion on reinforced concrete specimens and to measure the displacement fields along the test. These tests give the kinematics of cracking and data

about the increase of the oxide layer. Numerical simulations with a fictitious thermal load applied to the rust layer and a damageable concrete allows us to recover both the cracking evolution and the time to the inception of cracking. Some problems remain dealing with one of the tested configurations, due to interaction between the free surfaces, the reinforcement and the characteristic length.

## 1. Introduction

Les structures en béton armé sont fissurées en raison de la corrosion des armatures proches de la surface. En fonctionnement normal le pH autour des armatures est de l'ordre de 12–13 ce qui place l'acier en situation de passivité [1]. En revanche, en raison soit de la diffusion du CO<sub>2</sub> atmosphérique soit de chlorures provenant des sels de déverglaçage (ou marin), les conditions thermodynamiques sont modifiées amenant l'acier en situation de corrosion active. La conséquence en est la production d'oxydes ou d'hydroxydes à l'interface acier-béton avec comme effets mécaniques : (i) une pression exercée sur le béton d'enrobage qui conduit à sa fissuration ; (ii) une réduction de section d'acier, réduction non homogène (formation éventuelle de piqûres) avec une fragilisation de l'acier ; (iii) une modification des propriétés de l'interface (augmentation puis diminution de l'adhérence) ; (iv) des rétro-actions ; le béton étant alors fissuré, il laisse l'oxygène et les chlorures migrer plus facilement ce qui accélère les phénomènes [1]. Le sujet est largement étudié dans le monde car l'enjeu économique est très important [6,7]. Pour étudier l'ensemble de ces effets, nous avons choisi une méthode d'accélération de la corrosion, par densité de courant électrique imposée. Les limites de cette méthode d'accélération par rapport à la corrosion naturelle sont discutées dans cette Note. Nous nous concentrerons dans cette Note à la fissuration du béton induite par la croissance de la couche d'oxydes, phénomène déjà étudié [8,9].

## 2. Montage expérimental

Le plan des éprouvettes de type plaque d'épaisseur 2 cm est donné sur la Fig. 1. L'armature (diamètre 10 mm, acier d'armature FeE500) est positionnée soit au coin (cas P1) soit au milieu (cas P2) de façon à décrire deux cas courants pour lesquels on constate sur les bâtiments une fissuration du béton. Sur cette figure la zone tiretée correspond à la partie observée par une caméra numérique. Le micro béton a pour composition : ciment CEM I 52.5 N avec un rapport massique eau/ciment égal à 0,47 et un rapport massique ciment/sable (silico-calcaire, 0/4 mm) égal à 0,46. De façon à favoriser la corrosion nous avons ajouté des chlorures (NaCl en quantité égale à 3,5% de la masse de ciment). Les chlorures catalysent en effet la réaction d'oxydation et favorisent une corrosion généralisée. Les résistances mécaniques sont déterminées sur le matériau gâché avec chlorures pour tenir compte des modifications de la microstructure de la matrice cimentaire dues à l'ajout de NaCl. Les effets éventuels sur les processus de transfert et sur les réactions électrochimiques n'ont pas été abordés dans cette Note. Seul l'aspect final du faciès de corrosion a été examiné.

Le montage expérimental est visible sur la Fig. 2 : l'éprouvette baigne dans la solution saline à l'exception de la face supérieure laissée à l'air libre pour permettre les observations optiques. La partie inférieure de l'armature (voir zoom sur la même figure) est reliée à un générateur de courant électrique avec lequel nous imposons une densité de

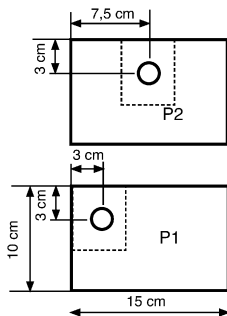


Fig. 1. Plan des éprouvettes.

Fig. 1. Specimen.

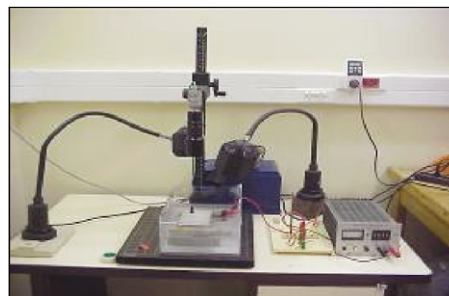


Fig. 2. Montage de corrosion accélérée.

Fig. 2. Experimental set-up with accelerated corrosion.

courant électrique de  $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , la surface considérée étant la surface de contact acier béton siège des réactions électro-chimiques. L'autre électrode est constituée d'un tissu de fibres de carbone, chimiquement inerte, placé sous l'éprouvette. Cette densité de courant est souvent choisie dans ce type d'essai de corrosion accélérée car elle donne des durées d'essais raisonnables (quelques heures à quelques semaines). Un avantage est que, comparée aux valeurs mesurées en corrosion naturelle (quelques  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), elle élimine de fait tous les phénomènes physiques à grande constante de temps (fluage du béton) qui interviennent dans la réponse en corrosion naturelle. L'essai accéléré génère une couche de rouille relativement homogène autour de l'armature, ce qui n'est pas toujours observé en corrosion naturelle, mais qui est a priori favorable pour valider le modèle numérique proposé. Cet essai permet de déterminer la vitesse de croissance de la couche de rouille, donnée difficile à obtenir en corrosion naturelle en dehors de modèles physico-chimiques. Une analyse de type élasticité endommageable sera alors considérée comme pertinente pour ces essais. Nous insistons sur le fait que les résultats obtenus en corrosion accélérée ne sont aisément pas transposables à la corrosion naturelle car le champ électrique facilite la migration des espèces. Il n'en reste pas moins que le processus qui conduit à la fissuration est le même : production d'oxydes expansifs qui, confinés entre l'armature et le béton, soumettent ce dernier à une pression qui conduit à sa fissuration [10]. Il faut ajouter que les faciès de fissuration dus à la corrosion sont semblables [2] et que, localement, le faciès de corrosion (morphologie, nature des oxydes) est similaire à celui obtenu dans des conditions de corrosion naturelle [11].

L'éprouvette avant d'être placée dans le montage est recouverte d'un mouchetis de peinture blanche sur un fond noir. Une caméra numérique est placée au dessus de l'éprouvette. Une image est enregistrée (toutes les heures) avec un éclairage ad hoc synchronisé et ceci pendant une semaine environ. Les images sont traitées par intercorrélation [3]. On en déduit les cartes de déplacement entre deux instants choisis a priori (pour nous ce sera l'instant initial et l'instant  $t$ ) et les cartes de déformations. La résolution du système (quelques centièmes de pixels) permet de mesurer des déformations de l'ordre de  $10^{-4}$ .

### 3. Résultats expérimentaux

Nous avons résumé le schéma de fissuration typique obtenu pour les deux configurations P1 et P2 avec pour chaque cas deux résultats. Afin de comprendre comment ces résultats ont été obtenus nous montrons sur la Fig. 3 une carte de déplacement correspondant à l'essai P2-1 à l'instant 46 h (1 pixel =  $46 \mu\text{m}$ ). Les iso valeurs montrent clairement suivant la direction 1 une discontinuité de cette composante qui traduit la présence d'une fissure alors que la composante suivant 2 est elle continue. La Fig. 4 donne les cartes de déformation principales déduites des images numériques pour l'essai P2-1, ceci pour les instants 30, 33 et 46 h. Ces instants ont été choisis a posteriori car ils correspondent à des instants clés d'apparition de fissures particulières. Sur cette figure on observe un premier phénomène, à 30 h, de concentration des déformations autour de l'armature. Associée à une discontinuité dans la carte des déplacements on en déduit qu'il y a amorçage de fissurations notées FO dans la Fig. 5. C'est ainsi que, par une analyse du film de l'essai, nous aboutissons à la Fig. 5 qui résume l'enchaînement de la fissuration des éprouvettes.

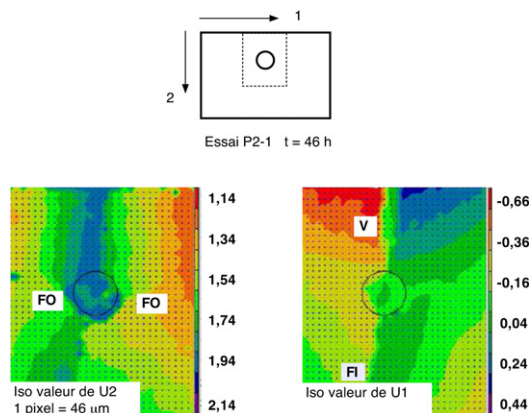


Fig. 3. Iso valeurs de déplacement (P2-1).

Fig. 3. Iso-values of displacement (P2-1).

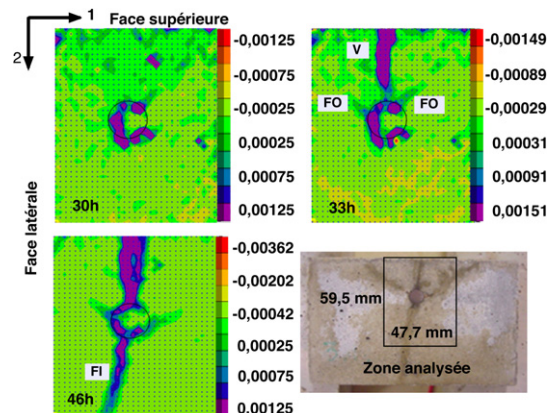


Fig. 4. Cartes des déformations principales (P2-1).

Fig. 4. Eigen strains (P2-1).

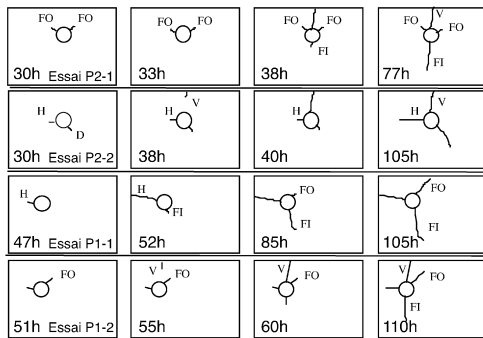


Fig. 5. Faciès de fissuration (un essai par ligne).

Fig. 5. Cracking pattern (one test every line).

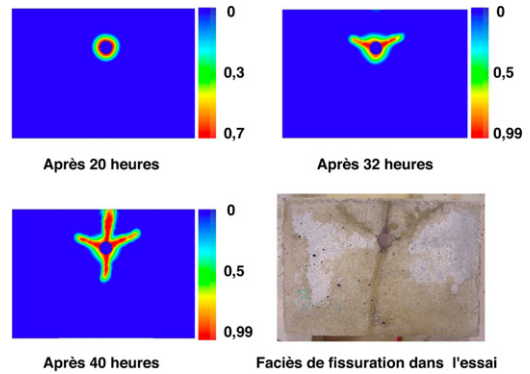


Fig. 6. Carte d'endommagement (P2).

Fig. 6. Damage pattern at different stages (P2).

### 3.1. Configuration P2 (armature au milieu)

La Fig. 5 résume pour deux essais l’histoire de fissuration. Elle débute donc autour de l’armature dans les deux cas (fissures FO pour l’essai P2-1 et H pour l’essai P2-2). Ensuite on observe sur les champs de déformation une extension importante en des points proches de la surface au droit de l’armature. Cela s’explique simplement par une mise en flexion de cette partie supérieure sous l’effet des produits de corrosion. Cette fissure notée V se propage de la surface vers l’armature. Ensuite on assiste à la création et à la propagation d’une dernière fissure qui s’initie autour de l’armature et se propage au sein de l’éprouvette. Dans l’essai P2-2 cette dernière fissure est notée FI. Il faudrait multiplier les essais pour se convaincre que l’essai P2-1 est représentatif. En fait nous en avons réalisé une dizaine mais sur des mini poutres [2] ou sur des poutres [12] avec des géométries semblables et le faciès final correspond le plus souvent à l’essai P2-1.

### 3.2. Configuration P1 (armature au coin)

La Fig. 5 donne également le faciès de fissuration dans ce cas. On constate qu’il y a aussi amorçage autour de l’armature et ensuite propagation de fissures depuis l’une des faces. Une dernière fissuration a lieu vers l’intérieur de l’éprouvette depuis l’armature.

## 4. Simulation numérique

Afin de reproduire ce type d’essai nous avons décidé de procéder à des calculs par éléments finis avec un acier supposé élastique ( $E = 210$  GPa,  $\nu = 0,3$ ), le béton étant décrit par un modèle élastique endommageable non local [5]. Les paramètres du modèle ont été identifiés à partir de données mécaniques classiques (résistances en traction 3,3 MPa et en compression  $-39$  MPa) et la longueur caractéristique prise égale à 10 mm sachant que la taille maximale des hétérogénéités du micro-béton est de 4 mm. Nous supposons que ce type de calcul non local est valide bien que la taille de la longueur caractéristique soit aussi celle de l’armature (et que le béton soit connexe. La croissance de la couche d’oxyde est simulée par un chargement thermique appliqué à des éléments joints. Se pose le problème des propriétés mécaniques (thermo-élastiques) à affecter à ces éléments. Ce sont des mesures d’épaisseurs de rouille avec microscope optique longue distance sur des essais interrompus qui ont permis de mesurer l’évolution de la croissance de la couche au cours du temps ( $0,49 \mu\text{m/h}$ ). Cet essai a été simulé et les paramètres thermo élastiques de la couche d’oxyde déterminés de façon à retrouver ces résultats expérimentaux. On en a déduit  $E_r = 0,15$  GPa avec  $\nu_r = 0,3$  imposé ; le coefficient d’expansion (rapport du volume des produits de corrosion et du volume de l’acier) a été évalué à 3,7 à partir des mesures optiques sachant qu’il est compris entre 2 et 7 selon la composition de la couche.

La simulation de l’essai de corrosion a été réalisée par un calcul bidimensionnel (code Castem) en contraintes planes [12]. Des conditions aux limites classiques sont appliquées (point inférieur gauche bloqué dans les directions 1 et 2, supérieur gauche bloqué en 2 et inférieur droit bloqué en 1. Elles ne reproduisent pas celles appliqués puisque la plaque repose sur toute sa surface inférieure sur un support, l’ensemble étant plongé dans la solution saline (qui

atténuée probablement les frottements). On a alors, avec un jeu de données matériau fixé, les cartes d'endommagement de la Fig. 6. Nous retrouvons un enchaînement des zones endommagées qui correspond bien à ce qui a été observé sur la majeure partie des essais pour cette configuration (acier au milieu). Il est intéressant de remarquer que les instants auxquels on obtient ces cartes correspondent également aux données expérimentales. Par contre nous ne sommes pas encore capables de reproduire les essais avec armature au coin. Il est possible que la présence des surfaces libres et que la taille de l'armature (10 mm) comparable à celle de la longueur caractéristique soient une explication de la grande sensibilité des calculs numériques dans ce cas.

## 5. Conclusion

Nous avons dans cette Note montré qu'il est possible de procéder à des essais de corrosion accélérée avec mesure optique des champs de déplacement en cours d'essai et ceci pour différentes configurations de position des armatures. Ces essais donnent une idée précise de la cinématique de la fissuration dans chaque cas. Dans les simulations numériques la couche de rouille est supposée élastique et sa croissance (mesurée) simulée par un chargement thermique. Nous avons pu reproduire certains des essais de corrosion accélérée par densité de courant électrique imposé (armature au centre) mais pas tous (armature au coin) en raison probablement de la présence de surfaces libres et d'interactions fortes entre celles-ci et l'armature au travers de la longueur caractéristique qui est de l'ordre de grandeur à la fois du diamètre de l'armature et de l'épaisseur d'enrobage du béton. On peut imaginer que l'analyse de l'efficacité de l'enrobage—et éventuellement son optimisation—puisse être menée à bien avec ce type de démarche.

## Références

- [1] K. Tuutti, Corrosion of steel in concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
- [2] Quang Thanh Nguyen, Étude expérimentale et théorique de l'effet de la corrosion sur la fissuration et le comportement global des structures en béton armé, Thèse de Doctorat, UPMC, 2006.
- [3] F. Hild, J.N. Périé, M. Coret, Mesure de champs de déplacements 2D par corrélation d'images numérique 2D, Rapport interne (1999), LMT-ENS Cachan.
- [4] A. Ouglova, S. François, F. Foct, Y. Berthaud, Properties of rust deduced from various experiments, Corrosion Science (2006), in press.
- [5] J. Mazars, G. Pijaudier-Cabot, Continuum damage theory: application to concrete, ASCE Journal of Engineering Mechanics 115 (1989) 345–365.
- [6] T. Vidal, A. Castel, R. François, Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete, Cement and Concrete Research 34 (2004) 165–174.
- [7] I. Petre Lazar, Evaluation du comportement en service des ouvrages en béton armé soumis à la corrosion des aciers, PhD thesis, université de Laval, Québec, 2000.
- [8] C. Andrade, C. Alonso, F.J. Molina, Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part I—Experimental test, Materials and Structures 26 (1993) 453–464.
- [9] F.J. Molina, C. Alonso, C. Andrade, Cover cracking as a function of corrosion: Part 2—Numerical model, Materials and Structures 26 (1993) 523–548.
- [10] S. Caré, A. Raharinaivo, Influence of impressed current on the initiation of damage in reinforced mortar due to the corrosion of embedded steel, Cement and Concrete Research, submitted for publication.
- [11] W.J. Chitty, P. Dillmann, V. L'Hostis, C. Lombard, Long term corrosion resistance of metallic reinforcement in concretes. A study of corrosion mechanisms based on archaeological artefacts, Corrosion Science 47 (2005) 1555–1581.
- [12] A. Millard, V. L'Hostis, K. Beddiar, Y. Berthaud, S. Caré, Modelling the cracking of a reinforced concrete structure subjected to corrosion of steels; a first validation of a damage model based on experimental tests, in: Proceedings of the OECD/NEA/CSNI-RILEM Workshop on Use and Performance of Concrete in NPP Fuel Cycle Facilities, Madrid, Spain, 15–16 mars 2004.