# Fissuration du béton soumis à la corrosion

# Quang Thanh Nguyen, Sabine Caré\*\*, Yves Berthaud, A. Millard\*

LMT-Cachan, ENS Cachan/CNRS/Univ.Paris 6, 61, Av. du Pt Wilson, 94235 Cachan \*\* LMSGC, CNRS/LCPC/ENPC, 2 allée Kepler, 77420 Champs sur Marne \*CEA SEMT/LM2S Saclay berthaud@lmt.ens-cachan.fr

RÉSUMÉ. Le béton armé est atteint de corrosion de ses armatures pour différentes raisons connues (carbonatation, pénétration des ions chlores). Nous avons souhaité étudier le processus de fissuration du béton en conditions contrôlées, c'est à dire sur un matériau modèle (micro béton type) et une corrosion par imposition de courant. Dans le même état d'esprit les éprouvettes sont soit des mini poutres (décimétriques) soit des plaques minces, ce qui a l'avantage de permettre la réalisation d'essais avec mesures optiques de champs de déplacement. Les mesures ont permis, sur plusieurs configurations d'armatures et sur plusieurs éprouvettes, de mettre en évidence une cinématique type de fissuration du béton et la détermination de paramètres tels que le temps de fissuration, le temps de remplissage de la zone poreuse au voisinage de l'acier et la vitesse de croissance de la couche d'oxydes. En parallèle, des essais simples de caractérisation et une modélisation par EF avec chargement thermique reproduisant la croissance de la couche de rouille nous permettent des comparaisons entre les résultats de calcul (cinétique et faciès de fissuration) et les essais.

ABSTRACT. One of the most current degradations in reinforced concrete structures is related to the corrosion of the reinforcements. The objective of this work is to study the cracking of concrete due to the corrosion of the reinforcements. The phenomenon of corrosion/cracking is studied in experiments through tests of corrosion accelerated by imposing a current density of  $100\mu A/cm^2$ . Follow-ups of the deformation of the concrete, cracking as well as the fracture topography of the beam are presented. A finite element computation using a damage model for concrete under the effect of corrosion has been carried out and compared with the experimental results.

MOTS-CLÉS : Béton armé, corrosion, essais, calculs

KEYWORDS: Reinforced concrete, corrosion, experiment, computations

L'objet. Volume  $8 - n^{\circ} 2/2005$ , pages 1 à 15

#### 2 L'objet. Volume $8 - n^{\circ} 2/2005$

## 1. Introduction

La durée de vie des structures en béton armé est conditionnée par la réponse aux agressions physiques et chimiques de l'environnement, ainsi que par la capacité des matériaux constitutifs à se protéger contre ces attaques. La corrosion des armatures est une des causes majeures de dégradation des structures en béton armé. Cette corrosion induit une modification de l'adhérence acier-béton, une réduction de la section des barres d'acier, une réduction de la ductilité de l'acier ainsi qu'un endommagement périphérique du béton dû à la pression des produits de corrosion. Tous ces aspects peuvent conduire à la diminution de la capacité portante de la structure en béton armé. L'objectif de ce travail est d'étudier la fissuration du béton due à la corrosion des armatures. Le présent article est divisé en deux parties. La première partie présente une étude expérimentale de la fissuration du béton sur une plaque soumise à la corrosion accélérée par imposition d'une densité de courant de  $100\mu A/cm^2$ . Des suivis de la déformation du béton, de la fissuration ainsi que du faciès de rupture de la plaque sont présentés. La deuxième partie représente un calcul par élément finis utilisant un modèle d'endommagement du béton armé soumis à la corrosion des armatures. Ce modèle utilise un type d'élément de contact pour modéliser la couche de rouille. Les paramètres dans le modèle sont calés en se basant sur la date d'apparition de la première fissure débouchante. Le calcul se fait sur le code CAST3M. La comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux nous donne la première validation de ce modèle.

# 2. Etude expérimentale

Lorsque les conditions de dépassivation de l'acier sont réunies (pH, chlorures), des produits (rouille) peuvent se former à l'interface de acier/béton. Selon Y. Lui, il existe une zone poreuse à l'interface acier/béton. Le volume de cette zone est lié à la surface des armatures, au rapport massique eau/ciment (E/C), au degré d'hydratation. Quand la quantité totale des produits de corrosion est inférieure à la quantité nécessaire pour remplir toute la zone poreuse à l'interface acier/béton, les produits de corrosion n'exercent aucune pression sur le béton d'enrobage. En revanche, quand la quantité totale des produits de corrosion atteint une quantité critique pour remplir toute la zone poreuse, un effet mécanique apparaît sur le béton d'enrobage et des fissures apparaissent à la surface du béton. L'objectif de cette étude est de déterminer expérimentalement l'évolution spatio-temporelle des fissures ainsi que la déformation dans le béton armé induite par le processus de corrosion des armatures.

#### 2.1. Protocole expérimental

Les essais sont réalisés sur des plaques de béton armé de dimensions  $(150x100x20mm^3)$ . Le mortier est composé de  $808kg/m^3$  de sable (0 - 4mm), de  $380kg/m^3$  de ciment type CEM 1, le rapport de E/C étant de 0, 47. Pour accélé-

rer les phénomènes de corrosion, on ajoute dans l'eau de gâchage une quantité de sel (NaCl = 74g/l). Les barres d'armature utilisées sont des barres d'acier de nuance E24, rondes et lisses et de diamètre 10mm. Les armatures sont partiellement recouvertes d'Araldite (en partie inférieure qui est immergée). La barre d'acier est mise au coin de la plaque ou au milieu comme cela est indiqué dans la figure 2 pour représenter deux configurations classiques. Les éprouvettes subissent une cure dans l'eau pendant au moins de 28 jours avant de lancer les essais.



Figure 1 – Enrobage de l'armature et position de l'armature

Les éprouvettes sont immergées partiellement dans une solution interstitielle basique (pH = 13) qui contient en particulier du sel NaCl (30g/l). Un générateur de courant est utilisé pour imposer une densité de courrant de  $100\mu A/cm^2$  entre l'armature (anode (+)) et un tissu en fibre de carbone (cathode (-)) placé sous l'éprouvette. Cette valeur de densité du courant correspond à la valeur maximale enregistrée dans le cas de corrosion naturelle induite par les ions chlorures. Ce courant nous permet d'accélérer la corrosion et a été une des valeurs utilisées tout au long des études sur la corrosion accélérée au LMT.



Figure 2 - vue de profil de l'éprouvette avant essai

#### 4 L'objet. Volume $8 - n^{\circ} 2/2005$



Figure 3 - Montage de prise de vue et alimentation électrique

#### 2.2. Résultats expérimentaux

Nous présentons ici les résultats typiques d'un essai de corrosion accéléré sur une éprouvette avec en particulier l'évolution des déformations issues de l'analyse optique.

Pour les éprouvettes avec armature au milieu deux types de fissuration ont été observés La figure 4 montre l'évolution du champ de déformation  $\epsilon_{11}$  pour l'instant 30h (cas a),  $\epsilon_{22}$  pour 33h (cas b) et 46h (cas c) et  $\epsilon_{11}$  pour 93h (cas d). Nous pouvons observer deux zones d'intenses déformations qui correspondent à des fissures (notées Sc) qui se sont amorcées autour de la barre. Ensuite une fissure apparaît à partir de la surface libre au droit de l'armature (notée V), fissure qui va ensuite se propager vers l'armature. Lorsque cette fissure a atteint l'acier, on voit apparaître une dernière fissure (notée L) qui s'initie à l'interface et se propage dans le béton. Ce type de fissuration a été reproduit sur plusieurs éprouvettes de type plaque. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus sur les poutres (non présentés dans ce papier).

Cette figure montre les iso-déplacements (soit en composante  $U_1$  soit  $U_2$  après 30, 33 et 92 heures. Lorsque le béton est encore sain on ne perçoit pas de discontinuité de déplacements alors qu'elles sont visibles et atteignent par exemple  $17\mu m$  pour la fissure L en fin d'essai. Ce type de figure nous permet de tracer le faciès de fissuration et son évolution.

#### 3. Modélisation de fissuration du béton dans l'essai de corrosion accélérée

### 3.1. Modèle COROBA avec élément de contact

La modélisation est effectuée à partir du modèle d'endommagement du béton armé soumis à la corrosion des armatures mis au point par M. Lancel et A. Millard. Pour modéliser le comportement du béton, nous avons utilisé le modèle endommagement isotrope de Mazars. L'acier est représenté à l'aide d'un modèle de comportement pure-



Fissuration du béton soumis à la corrosion 5

Figure 4 – Champ de déformation et de déplacement



Figure 5 – Faciès de fissuration

ment élastique. En effet, compte tenu du chargement imposé (application d'une pression due à l'expansion de la rouille au niveau de l'interface acier/béton) et la résistance relative du matériau utilisé, le comportement de l'acier reste élastique. Dans l'essai, on a constaté que la diminution de la section de l'armature était faible (taux de corrosion de 2, 5%), donc on peut supposer que la section de l'armature ne change pas. Pour modéliser la couche de produit de corrosion, on utilise des éléments de contact. Cet élément a une épaisseur nulle et ne traduit pas la diminution de section de l'acier. Il est considéré comme un matériau possédant une raideur normale (kn) et tangentielle (ks) constante dans le temps. La raideur normale (kn) et la raideur tangentielle (ks) de l'élément de contact sont déterminées à partir des équations :

$$k_n = \frac{E}{ep} \; ; \; k_s = \frac{E}{2(1+\nu)ep}$$

#### 6 L'objet. Volume $8 - n^{\circ} 2/2005$

Avec E: module d'Young de la rouille  $(N/m^2)$ , ep: épaisseur estimée du joint physique (m) ce qui correspond à la couche de rouille,  $\nu$ : coefficient de poisson de l'élément.

On caractérise cet élément par un coefficient de dilatation ( $\alpha$ ) qui traduit la vitesse d'expansion de la rouille. Un chargement thermique linéaire est appliqué à l'élément de contact.

### 3.2. Application du modèle et analyse les résultats

Les paramètres utilisés dans le modèle sont les suivants :

Pour le mortier : Modèle élastique endommageable isotrope :  $E_b = 36GPa$ ;  $\nu = 0, 2$ ;  $\sigma_t = 3,55MPa$ . L'acier est supposé élastique isotrope :  $E_a = 200GPa$ ,  $\nu = 0,3$ .

Pour la couche de rouille, nous avons considéré les valeurs issues des travaux récents (A. Ouglova) qui donnent un ordre de grandeur de quelques GPa (de 0, 8 à 5GPa). Dans cette modélisation on a choisi une valeur de  $E_{rouille} = 1GPa$  et de  $\nu$  égal ) 0.2 (valeur postulée). La valeur de ep est fixée à  $18\mu m$  d'après les mesures optiques.

La vitesse d'expansion de la rouille est dépendante de la vitesse de corrosion et des oxydes formés. En effet, il est courant avoir d'un mélange de plusieurs oxydes dans les produits de corrosion. De plus, ces oxydes ont un volume de 2 à 7 fois plus imporatant que celui de l'acier initial. Pour calculer la vitesse d'expansion de la rouille, on se base sur la date de la première fissure débouchante. La démarche adoptée consiste dans un premier temps, à retrouver une date de fissuration comprise entre 4 - 6 jours en changeant le paramètre de la vitesse d'expansion de la rouille. Pour obtenir une fissuration débouchant au  $4^e$  jour (le module d'Young de la couche de rouille étant égal à 1 Gpa) la vitesse d'expansion de rouille obtenue est de  $3\mu m/jour$  ce qui est parfaitement cohérent avec les données expérimentales.

Lorsque la vitesse d'expansion de la rouille est connue, on compare les résultats numériques et les résultats expérimentaux. Les calculs par éléments finis sont réalisés en déformation plane sur le code CAST3M en mode non local.

La figure 6 représente le champ d'endommagement issu du calcul pour les instants 31 et 33h ainsi que la déformée de la plaque. On constate que les déformations principales (non montrées) positives responsables de la dégradation (pour le modèle) sont intenses dans un premier temps au voisinage de l'armature. Dans une seconde phase, par effet de flexion local au droit de l'armature, une fissuration s'amorce en surface et se propagera vers l'intérieur, ce qui correspond bien à l'essai. Cet effet est conditionné par l'épaisseur d'enrobage essentiellement.

#### Fissuration du béton soumis à la corrosion 7



Figure 6 - Champ de déformation et de déplacement calculés pour 31 et 33 heures

## 4. Conclusion

La validation du modèle CORDOBA du béton armé soumis à la corrosion accélérée a été réalisée en comparant les résultats de l'essai de corrosion accéléré sur les plaques dont les armatures sont au coin avec les résultats numériques. Les résultats de la déformation numérique sont assez cohérents avec les résultats des déformations expérimentales avant et après la fissuration. De plus, les faciès d'endommagement de structure sont cohérents avec les faciès de rupture expérimentaux. Pourtant les calculs montrent que le modèle est sensible à la position des armatures. La vitesse d'expansion de la rouille dans le calcul n'est pas la vitesse réelle ; elle est calée en se basant sur la date d'apparition de la première fissure débouchante. Des études sur la quantité de rouille produite au cours de l'essai sont envisagées pour connaître précisément la vitesse d'expansion de celle-ci. Au cours de notre étude, nous avons considéré une corrosion uniforme autour des aciers. Or après la fissuration, des zones de corrosion préférentielles se développent au droit de la fissure et modifient certainement les processus de corrosion. Une étude sur influence de la fissuration sur les processus de corrosion est nécessaire.

# 5. Bibliographie

Andrade, C., Alonso, C. and Molina, F. J., Cover cracking as o function of rebar corrosion : Part I Experimental test, Materials and Structures 26 (1993), 453-464.

Mazars. J, "Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure", thèse de doctorat d'état, université Paris VI, 1984.

Petit, C., Modélisation de milieux composites multicouches fissurés par le mécanique de la rupture, Thèse de doctorat en Génie Civil Université Blaise Pascal, 1990.

Youping Liu, Richard E. Weyers, Modeling the time-to-corosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structure, ACI Materials Journal, technical paper 95-M65, 95, 6, November 1, 1998.

# 8 L'objet. Volume $8 - n^{\circ}2/2005$

Lancel, M., Modélisation de la fissuration du béton due à la corrosion des armatures, Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur option génie civil, CUST, Clermont Ferrand, Septembre 2003.

Ouglova, A., Etude de l'effet de la corrosion sur le comportement des structures, Thèse ENS Cachan, 2004.

# ANNEXE POUR LE SERVICE FABRICATION

A FOURNIR PAR LES AUTEURS AVEC UN EXEMPLAIRE PAPIER DE LEUR ARTICLE ET LE COPYRIGHT SIGNE PAR COURRIER LE FICHIER PDF CORRESPONDANT SERA ENVOYE PAR E-MAIL

- 1. ARTICLE POUR LA REVUE : *L'objet. Volume 8 – n°2/2005*
- 2. AUTEURS : Quang Thanh Nguyen, Sabine Caré\*\*, Yves Berthaud, A. Millard\*
- 3. TITRE DE L'ARTICLE : *Fissuration du béton soumis à la corrosion*
- 4. TITRE <u>ABRÉGÉ</u> POUR LE HAUT DE PAGE <u>MOINS DE 40 SIGNES</u> : *Fissuration du béton soumis à la corrosion*
- 5. DATE DE CETTE VERSION : 5 avril 2006
- 6. COORDONNÉES DES AUTEURS :
  - adresse postale : LMT-Cachan, ENS Cachan/CNRS/Univ.Paris 6, 61, Av. du Pt Wilson, 94235 Cachan
    \*\* LMSGC, CNRS/LCPC/ENPC, 2 allée Kepler, 77420 Champs sur Marne
    \*CEA SEMT/LM2S Saclay berthaud@lmt.ens-cachan.fr
    téléphone : 00 00 00 00 00
  - télécopie : 00 00 00 00 00
  - e-mail : Roger.Rousseau@unice.fr
- 7. LOGICIEL UTILISÉ POUR LA PRÉPARATION DE CET ARTICLE : LATEX, avec le fichier de style article-hermes.cls, version 1.2 du 03/03/2005.
- 8. Formulaire de copyright :

Retourner le formulaire de copyright signé par les auteurs, téléchargé sur : http://www.revuesonline.com

> SERVICE ÉDITORIAL – HERMES-LAVOISIER 14 rue de Provigny, F-94236 Cachan cedex Tél : 01-47-40-67-67 E-mail : revues@lavoisier.fr Serveur web : http://www.revuesonline.com