Prédiction du comportement à rupture de structures en béton armé corrodées

Essais et Calculs

Quang Thanh Nguyen * — Frédéric Ragueneau * — Yves Berthaud * — Nanthilde Reviron *

* LMT-Cachan, Ecole Normale supérieure de Cachan, 91, avenue du Pr. Wilson, 94 235 Cachan Cedex. France.

ragueneau@lmt.ens-cachan.fr

RÉSUMÉ. L'objectif de ce travail est de qualifier de manière expérimentale et numérique l'influence de la corrosion sur la tenue mécanique résiduelle de structures en béton armé. Un modèle de comportement de l'acier corrodé a été développé permettant de prendre en compte la fragilisation de l'acier par effet d'entaille. Dans le but réaliser des calculs de structures de génie civil nécessitant des approches simplifiées et pragmatiques du calcul, cette loi de comportement a été implanté au sein d'un élément fini de type poutre multifibres. Parallèlement des essais sur structures en flexion quatre points ont été réalisés à différents niveaux de corrosion contrôlée, permettant de valider la modélisation ainsi que l'implantation numérique de la loi de comportement.

ABSTRACT. This paper deals with the influence of rust on the mechanical behavior of reinforced concrete structures combining experimental investigations and numerical computations. Constitutive equations for corroded steel bars have been developed and implemented within a multifiber finite element. It allows accounting for the ductility decrease due to pitting corrosion. Experiments on reinforced concrete four points bend tests have been carried out, subject to accelerated different levels of corrosion

MOTS-CLÉS : corrosion, endommagement, plasticité, béton armé, poutre multifibre

KEYWORDS: rust, damage, plasticity, reinforced concrete, multifibre beam element

1. Introduction

Soumis à des environnements agressifs, le béton armé présente des pathologies sévères liées à l'oxydation des aciers (Huang & Yang 1997, Uomoto et al. 1988). En plus de leur caractère inesthétique, les capacités portantes de ces structures se trouvent bien souvent diminuées. Afin de prédire le comportement résiduel de tels éléments ayant subi des agressions couplées de type chimique-mécanique, une loi de comportement des aciers a été développée (Ouglova 2004). Cette dernière prend en compte non seulement la perte de section due à la création de produits de corrosion mais aussi la fragilisation des aciers due à la présence de piqure de corrosion entraînant des concentrations de contraintes importantes. Ce modèle développé et identifié en 3D a été également implanté dans un élément fini de type poutre multifibres. Cette approche permet de conserver à l'échelle de la structure tout le pragmatisme nécessaire au traitement de structures de génie de grande taille tout en introduisant à l'échelle locale du matériau les mécanismes physiques de dégradation nécessaires à une telle problématique. Afin de valider cette approche du calcul, des essais de flexion sur poutres ont été réalisés. Ces poutres soumises électriquement à une corrosion accélérée ont été testées mécaniquement à rupture sous des cas de chargement de flexion quatre points. Par une procédure adéquate, les effets du taux de corrosion et de la perte d'adhérence par corrosion ont été discriminés. Dimensionnées de manière optimale, ces effets ont permis de mettre en évidence clairement les effets de la réduction de section, de la fragilisation des aciers et de la perte d'adhérence sur le comportement ultime tant du point de vue de la charge maximale que sur les faciès de rupture. Des comparaisons avec les calculs éléments finis permettent de valider le type d'approche du point de vue du calcul de structure et l'identification du modèle d'un point de vue matériaux.

2. Modélisation des structures en béton armé corrodées

Le modèle présenté ci-après repose sur une description de type poutre. Son utilisation en calcul de structure n'est représentative de la réalité que pour des structures suffisamment élancées, pouvant être décrites par des cinématiques de type Euler-Berrnoulli ou Timoshenko, et supportant principalement des sollicitations de type flexion et/ou effort normal. Dans un premier temps, l'approche du calcul par éléments multifibres est présentée, puis les lois de comportements relatives aux deux matériaux en présence. Pour une utilisation plus générale des lois de comportement endommageables du béton et d'endommagement plastique ductile de l'acier, des calculs 3D complets peuvent être réalisés prenant en compte toutes les composantes des tenseurs des contraintes et de déformations (Ouglova, 2004).

2

Prédiction du comportement à rupture de structures en béton armé corrodées 3

2.1. Elément de Poutre multifibres

Le modèle à fibres permet de calculer la loi de comportement de l'élément de poutre de Timoshenko (c'est à dire la relation entre déformation axiale, courbure et rotation et les contraintes généralisées associées (N, M et T)) à partir d'une description géométrique de la section basée sur des éléments bidimensionnels maillant la section droite et de lois de comportement uniaxiales pour chaque matériau (béton, acier, ...). Les hypothèses cinématiques supposent l'absence de gauchissement en cisaillement. En torsion, la répartition de contrainte de cisaillement n'est exacte que pour des sections circulaires. Le principe général consiste à passer des déformations généralisées (rotation et déplacement) aux nœuds des poutres au profil de déformation le long d'une section droite par l'intermédiaire des hypothèses de Timoshenko : les sections planes restent planes mais non perpendiculaires à la fibre neutre. Ainsi, pour un problème de flexion plane, en tout point à la côte y d'une section droite, les déformations peuvent être calculées en fonction du déplacement axial u(x), du déplacement transversal v(x) et de la rotation $\theta(x)$:

$$\mathcal{E}_{xx} = u'(x) - y \cdot \theta'(x)$$
 et $2\mathcal{E}_{xy} = v'(x) - \theta(x)$

Les lois de comportement locales, au niveau de chaque fibre, permettent de passer des déformations aux contraintes de Cauchy. Du fait de la cinématique de déformation d'une section droite propre aux poutres, l'adhérence entre l'acier et le béton est considérée ici comme parfaite.

2.2. Comportement du béton

Afin de rendre compte dans un calcul de structure du comportement complexe du béton, la loi de comportement doit prendre en compte un certain nombre de mécanismes tels que les chutes de raideur liées à la fissuration, les déformations anélastiques et le comportement unilatéral. Le modèle utilisé est basé sur la mécanique de l'endommagement continu (Laborderie, 1991). La dissymétrie du comportement en traction et compression est obtenue par l'introduction de 2 variables scalaires d'endommagement D1 et D2.

Ce modèle a été identifié afin de correspondre aux données des matériaux des poutres testées dans le paragraphe suivant.

2.3. Comportement de l'acier

Afin de rendre compte des effets de la corrosion sur l'acier de renforcement, un modèle couplant plasticité et endommagement ductile a été retenu (Lemaitre, 1992). Par l'intermédiaire de deux seuils, ce modèle permet de prendre en compte la plasticité du matériau et de décrire sa rupture par l'introduction d'une déformation

plastique à rupture. La corrosion des aciers, entraînant l'apparition de piqûres, a pour principal effet de générer des concentrations de contraintes très importantes au droit de ces piqûres. Ces fortes concentrations de contraintes induisent des fragilisations très importantes des aciers sous des sollicitations de type traction. Cet effet est pris en compte dans le modèle par une corrélation directe entre le taux de corrosion et la déformation plastique à rupture.

L'énergie libre de Helmhotz introduisant un couplage entre plasticité et endommagement ductile s'exprime par :

$$\Psi = \frac{1}{\rho} \left[\frac{1}{2} (1 - D) \left(\varepsilon - \varepsilon^p \right) E \left(\varepsilon - \varepsilon^p \right) + R(r) \right]$$

 ρ la masse volumique; ψ le potentiel d'état; E le module d'Young; D la variable d'endommagement; ε la déformation totale; ε_p la déformation plastique; R(r) la fonction d'écrouissage isotrope; R la variable associée à r. La contrainte s'obtient par dérivation par rapport à la déformation totale :

$$\sigma = \rho \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon} = E(1-D)(\varepsilon - \varepsilon^p)$$

Le seuil de plasticité est basé sur un critère de von Misès, introduisant la contrainte effective :

$$f = \frac{\sigma_{eq}}{1 - D} - R - \sigma_y = 0$$

 σ_y est la limite initiale d'élasticité, σ_{eq} la contrainte équivalente au sens de Misès.

Les lois d'évolution sont classiquement obtenues par des règles de normalité, introduisant un multiplicateur plastique λ . Pour la déformation plastique par exemple, les lois d'évolution sont de la forme :

$$\varepsilon^{p} = \frac{3}{2} \frac{\lambda}{1-D} \frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_{eq}}$$
, $\tilde{\sigma}$ est la contrainte effective

Le seuil d'endommagement fait intervenir la déformation plastique cumulée p, qui est égale à la déformation plastique lors d'un chargement uniaxial monotone.

$$f_{end} = p - p_L$$

où p_D est la déformation qui correspond au début d'endommagement.

Une simplification des lois d'endommagement (Lemaitre, 1992), introduisant une déformation plastique à rupture permet d'obtenir de manière explicite l'endommagement en fonction de la déformation plastique. En supposant que la triaxialité des contraintes agit de la même manière sur le seuil d'endommagement p_D

et sur la déformation à rupture, le rapport p_D/p_R est constant pour chaque matériau et égal à sa valeur en unidimensionnel $\varepsilon_D/\varepsilon_R$. Par analyse de différents essais de traction, $\varepsilon_D = 0.8\varepsilon_R$ (ε_D au pic).

$$D = \frac{Dc}{p_R - p_D} (p - p_D)$$

Avec Dc, l'endommagement critique.

La corrosion est prise en compte dans le comportement de l'acier par une réduction de section efficace ainsi que par une diminution de la déformation plastique à rupture induisant une fragilisation de l'acier. La diminution de section sera introduite au niveau de la description géométrique des éléments de l'acier. Par contre, la fragilisation est directement introduite en liant la déformation plastique à rupture au taux de corrosion Tc. Pour des barres rondes, le taux de corrosion est défini de la manière suivante :

$$T_{c} = \left(\frac{d_{non \ corrod\acute{e}} - d_{corrod\acute{e}}}{d_{non \ corrod\acute{e}}}\right)$$

Avec $d_{corrod\acute{e}}$ et $d_{non\ corrod\acute{e}}$ le diamètre des barres d'acier corrodées et non corrodées. La déformation plastique à rupture dépend du taux de corrosion. Cette évolution est présentée sur la figure 1. On déduit de données expérimentales (Almusallam *et al.*, 1995) concernant des essais de traction la variation de la déformation plastique à rupture en fonction du taux de corrosion.



Figure 1 : Déformation plastique à rupture en fonction du taux de corrosion

Une description empirique des essais expérimentaux, confirmée par des analyses éléments finis, permet d'obtenir la loi bilinéaire suivante (de même que Castel et al. 2000) : si T_c le taux de corrosion ≤ 15 %, la déformation plastique à rupture s'exprime comme suit :

$\varepsilon_R = -0.0111Tc + 0.2345 \text{ sinon } \varepsilon_R = -0.0006Tc + 0.051$

Les paramètres d'écrouissage isotrope non-linéaire de la loi de comportement ont été identifiés utilisant les résultats expérimentaux disponibles pour ces aciers. La figure 2 présente la réponse du modèle identifié pour 3 taux de corrosion différents.



Figure 2: Identification des paramètres de la loi de comportement pour acier corrodées. Comparaisons essais calculs sur barres de 6 mm. De diamètre (Almusallam *et al.* 95)

3. Essais mécanique sur poutres corrodées en béton armé

3.1. Description des essais

Afin de tester l'influence de la corrosion sur la résistance résiduelle de structures en béton armé, différents essais de flexion 4 points sur poutres en béton armé ont été réalisés. Les corps d'épreuve sont des poutres de 0.9 m de longueur pour une section transversale de 0.1 m x 0.2 m. Les renforcements d'acier sont constitués de 2 barres supérieurs HA12 et 2 barres inférieures HA8. Un tel dimensionnement favorise la rupture des aciers inférieurs en traction permettant de mieux apprécier l'influence de la corrosion sur la tenue de telles structures (Reviron 2005).

Les aciers inférieurs ont été pré-corrodés avant le coulage à différents niveaux suivants la loi de Faraday, puis décapés afin d'éliminer la rouille susceptible de perturber l'adhérence acier-béton. Les aciers ainsi pré-corrodés ont été utilisés pour réaliser les poutres à divers degrés de corrosion, conservant une bonne adhérence permettant ainsi de mettre en évidence les effets de la corrosion seule. Une dernière structure a été testée avec corrosion in situ permettant de mettre en évidence les effets de la corrosion sur la perte d'adhérence entre l'acier et le béton. Le béton utilisé présentait un module d'Young de 30 GPa et une résistance moyenne à la compression de 43 MPa. Les essais étaient du type flexion 4 points présentant une distance de 0.3 m entre centre d'appuis des efforts, définissant ainsi une zone de moment constant (figure 3).



Figure 3: Dispositif expérimental de poutres en flexion 4 points

3.2. Comparaisons essais-calculs

Cette section présente les résultats expérimentaux obtenus pour 3 types de poutres : les types A étant les poutres de références (pas de corrosion), les types B obtenues en pré-cossorion pour 2 niveaux différents de corrosion et les types C en pré et post-corrosion. La figure suivante présente une comparaison entre l'analyse éléments finis décrite ci-dessus utilisant un modèle de corrosion d'acier dans un cadre multifibres et les essais dans un diagramme force-flèche au centre.



Figure 4: Essais de flexion 4 points : comparaisons essais-calculs

4. Conclusion

Le calcul simplifié des structures de génie civil en béton armé de type multifibres permet d'aborder de manière pragmatique le comportement de structures tout en prenant en compte de manière fine le comportement local des matériaux. Ainsi le comportement des aciers corrodés, par le biais de lois thermodynamiques couplant endommagement et plasticité, a pu être pris en compte au niveau du calcul de structures. La réduction de section résistante du fait direct de la corrosion ainsi que leur fragilisation par effet géométrique des piqûres sur le comportement en traction de l'acier permettent de rendre compte de manière simple et efficace de l'action de la corrosion sur une structure en béton armé supportant des actions mécaniques importantes dans un environnement agressif. Des essais mécaniques sur poutre en béton armé ayant subies diverses actions corrosives ont permis de mettre en évidence les rôles de la réduction de section, de la fragilisation des aciers et de l'influence de la corrosion sur la perte d'adhérence entre l'acier et le béton. Des comparaisons entre ces résultats expérimentaux et les calculs numériques menés avec les outils préalablement présentés permettent de juger de la pertinence de l'approche quant à la prévision de la résistance résiduelle de structures en béton armé sujettes à des dégradations chemo-mécaniques.

7. Bibliographie

- Almusallam A. A., Al-Gahtani A. S., Aziz A. R., and Rasheeduzzafart, « Effect of reinforcement corrosion on bond strength », Const. and Build. Mat., 10, 123-129. 1995.
- Castel A., François R. and Arligui G., 2000, Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams. Part 2: Bond and notch effects, Mat. & Struct., 33, 345-351.
- Huang R., Yang C.C., Condition assessment of reinforced concrete beams relative to reinforcement corrosion, Cement and Concrete Composites, 1997
- La Borderie Ch., «Phénomènes unilatéraux dans un matériau endommageable : modélisation et application à l'analyse de structures en béton», Ph. D. thesis: Univ. Paris VI. 1991.
- Lemaître J., « A Course on Damage Mechanics », Springer-Verlag. 1992.
- Ouglova A., « Etude du Comportement Mécanique des Structures en Béton Armé Atteintes par la Corrosion». Thèse de Doctorat. ENS-Cachan. 2004.
- Reviron N. «Etude du comportement en flexion 4 points de poutres en béton armé attaquées par la corrosion», Mémoire M2 MIS: 2005
- Uomoto T., et al., Deterioration mechanism of concrete structures caused by corrosion of reinforcing bars, translation of the Japan concrete institute, 1984

8