

FISSURATION D'UNE POUTRE D'UN PONT EN BÉTON ARMÉ PAR CORROSION

KHEIRA OUZAA¹, MOHAMMED BENALI BENMANSOUR².

¹ Faculté d'Architecture et de Génie Civil, Université des Sciences et de la Technologie D'Oran, Mohamed Boudiaf, Algérie, kh_ouzaa@yahoo.fr

² Faculté d'Architecture et de Génie Civil, Université des Sciences et de la Technologie D'Oran, Mohamed Boudiaf, Algérie, benmansr@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Les matériaux de construction ont, sans exception, une durée de vie limitée. Au fil des temps, tout ouvrage connaît plus ou moins rapidement des altérations. Le béton et le béton armé, dont nous avons une expérience de durabilité de l'ordre d'un siècle, n'échappent pas à cette règle. Le point faible du béton armé, qui met le plus en péril sa pérennité, est son armature. En effet, la corrosion des parties métalliques constitue un danger potentiel pour la conservation et la stabilité des bâtiments. Ce phénomène se traduit par l'apparition, en surface exposée à l'extérieur, de différentes altérations (taches de rouille, fissures, épaufrures...).

Si certaines mesures préventives ne sont pas appliquées, ces phénomènes physico-chimiques peuvent s'amplifier et entraîner une détérioration du béton armé qui n'assurera plus sa fonction porteuse.

Ce travail propose un programme numérique préventif, nommé « CORPRO », capable d'évaluer la durée de processus d'initiation de la corrosion. Il constitue ainsi une aide à la décision permettant d'inclure la problématique de la fissuration par corrosion des aciers d'armatures lors de planification des stratégies de réhabilitation et de maintenance d'ouvrages existant ou lors du dimensionnement d'élément d'ouvrages neufs.

MOTS CLÉS : Corrosion, Armature, Fissuration, Diagnostic, Remède.

1. Introduction

La corrosion des armatures est l'une des principales causes de fissuration des structures en béton armé.

Les dommages occasionnés par la corrosion des aciers dans le béton sont essentiellement causés par des défauts de conception tels qu'insuffisance d'épaisseur d'enrobage, insuffisance de la perméabilité du béton et insuffisance de la résistance des aciers d'armatures.

Lors de la corrosion des aciers d'armature, les premiers dégâts perceptibles sont les fissurations dues à l'expansion des produits de corrosion (la rouille). Trois types de fissures peuvent ainsi apparaître durant ce processus : la fissuration au droit de l'armature, les éclatements et la délamination. Ces fissures sont souvent accompagnées de coulures provenant des produits de corrosion (Fig.1).

Notre apport dans ce travail consiste à présenter une approche numérique du problème de fissuration par corrosion. Cette modélisation est réalisée sous forme d'un programme numérique nommé « CORPRO » qui fait parti du logiciel de modélisation préventive des dégradations des ouvrages

« CRACKPRO » Réf. [1]. Ce module poursuit deux objectifs essentiels :

- Identification des différents paramètres occasionnant une initiation de la corrosion des aciers d'armatures dans le béton en présence de la carbonatation ou des ions de chlorures et évaluation de la durée d'initiation de la corrosion provoquée par ces paramètres.
- Détermination du temps de l'apparition de la première fissure ($T_{fissure}$), de la fissuration en service ($T_{service}$) et en éclat ($T_{éclat}$) avec leurs ouvertures correspondantes.

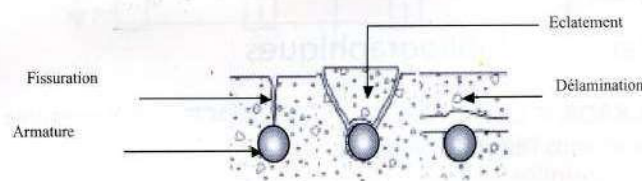


Figure1 : Type de fissures développées lors de la corrosion des aciers d'armature

2. Détermination du temps de l'apparition de la première fissure

Le temps d'initiation de la première fissure est déterminé à partir du modèle de Weyers Réf. [2], cette modélisation est uniquement liée à la formation de fissures provoquée par la pression de la rouille :

$$T_{fissure} = T_i + \Delta t_{fissure} \quad (1)$$

Où (T_i) est l'instant d'initiation de la corrosion par la pénétration des ions chlorures ou par carbonatation du béton et ($\Delta t_{fissure}$) l'intervalle de temps nécessaire pour la formation de la première fissure.

2.1. Temps d'initiation de la corrosion par pénétration des ions de chlorures

En supposant que la pénétration des chlorures dans le béton est modélisée comme un processus Fickien de diffusion et que la résistance des armatures à la corrosion induite par les chlorures est définie par le seuil de concentration des chlorures, alors le temps pour l'initiation de la corrosion (T_i) est donné par l'équation suivante Réf. [2]:

$$T_i = \frac{C_p^2}{4D} \left(\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_{cr} - C_s}{C_0 - C_s} \right) \right)^{-2} \quad (2)$$

Où (C_p) est l'épaisseur du béton d'enrobage, (erf) la fonction d'erreur, (C_{cr}) la concentration critique des chlorures, (C_s) la concentration de chlorures en surface, (C_0) la concentration initiale et (D) le coefficient de diffusion. Sa valeur est donnée par la formule suivante Réf. [3]:

$$D = 0,15 D_{H_2O} \left(\frac{1 + \rho_c \frac{e}{c}}{1 + \rho_c \frac{e}{c} + \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{g}{c}} \right) \left(\frac{\rho_c \frac{e}{c} - 0,85}{1 + \rho_c \frac{e}{c}} \right)^3 \quad (3)$$

Où (c/e) est le rapport massique de ciment sur eau, (g/c) le rapport massique de granulat sur ciment, (ρ_c) la densité du ciment, (ρ_g) la densité du granulat et (D_{H_2O}) la valeur du coefficient de diffusion des chlorures dans une solution infinie de NaCl de $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$.

2.2. Temps d'initiation de la corrosion par carbonatation

La modélisation utilisée pour déterminer le temps d'initiation de la corrosion par carbonatation du béton est celui qui dérive de la loi de diffusion en racine carrée du temps Réf. [4]:

$$T_i = \left(\frac{C_p}{K} \right)^2 \quad (4)$$

La valeur du multiplicateur K est donnée par la relation suivante:

$$K = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2} [CO_2]^\circ}{[C_a(OH)_2]^\circ + 3[C-S-H]^\circ + 3[C_3S]^\circ + 2[C_2S]^\circ}} \quad (5)$$

$[CO_2]^\circ$ est la concentration molaire en CO_2 dans la phase gazeuse au contact du béton, correspondant à la teneur molaire des composés du ciment qui participent aux réactions de carbonatation dans le béton.

Le dénominateur caractérise la teneur molaire totale, exprimée en (CaO), des composés carbonatés et le coefficient effectif de diffusion du CO_2 dans le béton déjà carbonaté. Il est fonction de la porosité du béton au temps et du degré de saturation des pores qui dépend de l'humidité relative et de la distribution en tailles de pore. Dans ce présent travail, seul le composé le plus réactif à la carbonatation est retenu. Il s'agit de la portlandite ($Ca(OH)_2$). Par conséquent, la somme inscrite au dénominateur dans la racine carrée de (K) est réduite à :

$$K = \sqrt{\frac{2 D_{CO_2} [CO_2]^\circ}{[C_a(OH)_2]^\circ}} \quad (6)$$

(D_{CO_2}) est le coefficient de diffusion effectif du dioxyde de carbone, il est calculé à partir de la formule suivante Réf. [5]:

$$D_{CO_2} = 0,00000164 \varepsilon_p^{1,8} (1 - 0,01 HR)^{2,2} \quad (7)$$

(HR) est l'humidité relative en (%) et (ε_p) la porosité de la pâte de ciment durci. Cette porosité est obtenue à partir de la formule suivante :

$$\varepsilon_p = \varepsilon \frac{1 + \frac{e}{c} \frac{\rho_c}{\rho_e} + \frac{g}{c} \frac{\rho_c}{\rho_g}}{1 + \frac{e}{c} \frac{\rho_c}{\rho_e}} \quad (8)$$

Où (ε) est la porosité mesurée sur un échantillon de béton, (ρ_e) la densité de l'eau, (ρ_c) la densité du ciment, (ρ_g) la densité du granulat, (e/c) le rapport massique de l'eau sur ciment et (g/c) le rapport massique de granulat sur ciment.

2.3. Détermination de l'intervalle de temps $\Delta t_{fissure}$

Cet intervalle de temps est déterminé indépendamment de l'évolution de la perte de capacité portante des éléments d'une structure. Il correspond à l'intervalle de temps au terme duquel la masse de produits de rouille dépasse la masse critique Réf. [6]:

$$\Delta t_{fissure} = \frac{W_{crit}^2}{2 k_p} \quad (9)$$

(W_{crit}) est la masse critique de rouille (kg/m). Sa valeur peut être exprimée par :

$$W_{crit} = \frac{\rho_{rouille} \rho_{acier}}{\rho_{acier} - \alpha \rho_{rouille}} \left(\pi \phi \left[\frac{C_p f_t}{E} \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu_c \right) + d_0 \right] \right) \quad (10)$$

où (d_0) est l'épaisseur de la zone poreuse, (d_s) l'épaisseur de la couche des produits de corrosion capables de créer des efforts de traction, ($\rho_{rouille}$) la densité des produits de la corrosion, (ρ_{acier}) la densité de l'acier, (α) rapport entre les poids moléculaires de l'acier et des produits de corrosion, (ν_c) le coefficient de Poisson du béton, à l'état limite de service ce coefficient prend la valeur de 0,2 et (a) et (b) représentent respectivement le rayon interne (zone poreuse) et externe (béton) (Fig. 2). Leurs valeurs sont données par les expressions (11) et (12):

$$b = \frac{(\phi + 2d_0)}{2} + C_p \quad (11)$$

$$a = \frac{(\phi + 2d_0)}{2} \quad (12)$$

(E) et (f_l) représentent respectivement le module de déformation longitudinale différée du béton et la résistance à la traction du béton. Ils sont déterminés par les formules suivantes Réf. [5]:

$$E = 3700.(f_{cj})^{1/3} \quad (13)$$

$$f_{tj} = 0,06 f_{cj} + 0,6 \quad (14)$$

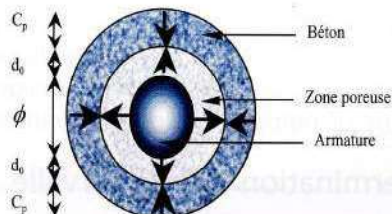


Figure 2 : Illustration de la pression uniformément répartie autour de l'armature

Le symbole (k_p) représente la vitesse de production de rouille ($\text{kg}^2/\text{m}^2\text{s}$). Sa valeur est supposée proportionnelle au courant de corrosion (i_{corr}) en ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) et au diamètre de l'armature en (m) :

$$k_p = 0,000383 \phi i_{\text{corr}} \quad (15)$$

La valeur du courant de corrosion est déterminée à l'aide de la formule ci - après. La valeur de l'enrobage est donnée en (mm):

$$i_{\text{corr}}(t) = \frac{32,13(1 - e/c)^{-1,64}}{C_p} t^{-0,29} \quad (16)$$

3. Propagation des fissures

L'accroissement d'ouverture de la fissure (Δw) dans un intervalle de temps (Δt) est déterminé par la fonction linéaire suivante:

$$\Delta w = \gamma \Delta \phi \quad (17)$$

($\Delta \phi$) représente la réduction du diamètre de la barre due à la corrosion. Si nous supposons que l'augmentation d'ouverture de la fissure est égale à celle du volume de produits de corrosion, le rapport entre (Δw) et ($\Delta \phi$) peut être défini par :

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\phi/2}{\phi/2 + C_p} + 1 \right) C_p \Delta w = (\phi - 1) \pi \phi \frac{\Delta \phi}{2} \quad (18)$$

De l'équation (17), on obtient le paramètre :

$$\gamma = \frac{(\phi - 1) \pi \phi}{\left(\frac{\phi/2}{\phi/2 + C_p} + 1 \right) C_p} \quad (19)$$

Ce paramètre dépend du diamètre de la barre, de l'épaisseur de l'enrobage et du (ϕ) qui représente le rapport entre la densité de l'acier et la densité des produits de corrosion.

Finalement, l'ouverture de la fissure $w(t)$ est donnée par :

$$w(t) = w_0 + \gamma \lambda i_{\text{corr}} \Delta t \quad (20)$$

(w_0) représente l'ouverture initiale de la fissure, (λ) est pris égal à 0,023 (corrosion uniforme) Réf. [6].

4. Application pour le cas d'une poutre d'un pont en béton armé

Pour éclaircir la démarche proposée ci- dessus, un exemple d'une poutre de rive en T appartenant à un pont en béton armé est donné. Ce dernier a une travée de 20 m avec 5 poutres, 5 entretoises et 2 voies de circulation. Les caractéristiques géométriques et le ferrailage longitudinal de la section de la poutre sont résumés dans le tableau (1). La limite élastique de l'acier vaut 400 MPa et l'épaisseur de l'enrobage est égale à 3 cm.

Tableau1 : Dimensions et ferrailage de la section transversale de la poutre.

Largueur de la table (m)	Largueur d'âme (m)	Hauteur totale (m)	Hauteur de la table (m)	Ferrailage total (disposé en deux nappes)
2,50	0,5	1,25	0,15	10 ϕ 32

La valeur des constituants et les propriétés mécaniques du béton étudié sont récapitulées dans le tableau (2).

Tableau 2 : Valeur des constituants et des propriétés mécaniques du béton étudié.

Ciment [$\rho_c = 2,9 \text{ t/m}^3$] (Kg /m ³)	Eau [$\rho_e = 1 \text{ t/m}^3$] (l /m ³)	Graviers et sable [$\rho_g = 2,6 \text{ t/m}^3$] (Kg /m ³)	f_{c28} (MPa)	f_{t28} (MPa)	E (GPa)
358	179	1843	30	2,4	11,50

Les conditions environnementales auxquelles est exposée la poutre et les paramètres nécessaires pour déterminer le temps d'initiation de la corrosion sont résumées dans le tableau (3).

Tableau 3 : Temps d'amorçage de la corrosion

Corrosion par pénétration des ions de chlorures					
C_{ce} (kg/m ³)	C_s (kg/m ³)	C_0 (kg/m ³)	C_p (cm)	D (cm ² /s)	T_i (Année)
1,40	2,24	0	3	$5 \cdot 10^{-8}$	21,26
Corrosion par carbonatation					
$Ca(OH)_2$ (%)	CO_2 (%)	ε (%)	ε_p (%)	HR (%)	T_i (Année)
20	0,05	12	40,08	75	56,32

Le temps d'initiation de la corrosion correspond à la valeur minimale entre les prédictions des instants les plus probables (corrosion par pénétration des ions de chlorures et par carbonatation), donc, (T_i) est égal à 21,26 année.

Après avoir déterminé le temps d'amorçage de la corrosion, nous calculons le temps d'apparition de la première fissure en utilisant les équations énumérées ci-dessus. Les paramètres rentrant dans le calcul de la masse critique et la vitesse de production de rouille sont récapitulés dans le tableau (4). Après le calcul et le développement, nous trouverons que le temps de la première fissuration est égal à 23,02 années.

Tableau 4 : Paramètres de calcul de l'intervalle du temps de la première fissure

ρ_{acier} (t/m ³)	$\rho_{rouille}$ (t/m ³)	φ	d_0 (μ m)	α	ϕ (mm)	E (GPa)	f_{ct} (MPa)	C_p (cm)	e/c	$\Delta T_{fissure}$ (Année)	$t_{fissure}$ (Année)
8	3,6	2,22	12,50	0,57	32	11,50	2,4	3	0,5	1,76	23,02

La cinétique d'évolution de l'ouverture des fissures en fonction de l'intervalle du temps (t) est illustrée par la figure 3.

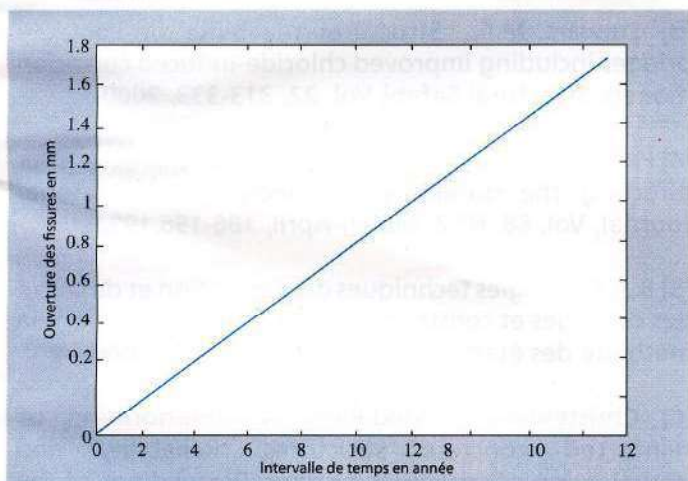


Figure 3 : Champs d'évolution de l'ouverture de fissuration en fonction de l'intervalle de temps.

Dans ce présent travail nous nous intéressons à la détermination du temps de la première fissuration jusqu'à l'éclatement du béton. La figure 4 s'attache à présenter ces instants.

Nous remarquons sur cette figure que pour un intervalle de temps égal à 1,76 années la largeur de la première fissure est égale à 0,16192 mm. Donc le temps de fissuration en service est égal à 24,521 années.

L'ouverture admissible à l'état limite de service est prise égale à 0,3 mm, l'intervalle de temps nécessaire à la création de cette amplitude est égal à 3,2610 années.

Une largeur de fissure de 1mm est considérée comme une valeur représentative d'un état d'éclatement du béton, l'intervalle de temps correspondant à cette largeur est égal à 10,8698 années. Donc le temps de fissuration en éclat est égal à 32,1298 années.

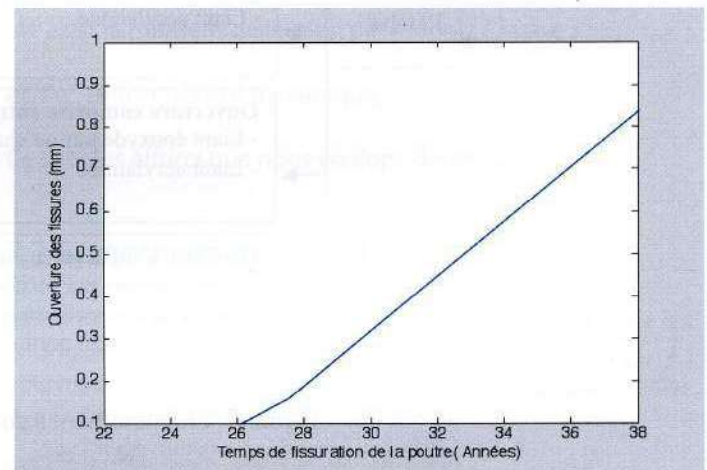


Figure 4 : Illustration des instants de phase de fissuration de la poutre.

Après avoir déterminé les instants de fissuration de la poutre à partir de l'initiation jusqu'à l'éclatement du béton, il nous reste qu'à passer à sa réalisation. En cas d'apparition de désordres, nous proposons la réparation des dégradations constatées en utilisant le programme de traitement des fissures Réf. [1] (Fig. 5).

Les modes de réparation sont très différents suivant qu'il s'agisse d'effectuer des travaux d'urgence ou qu'il suffise d'attendre la stabilisation des fissures.

Dans le cas où la stabilisation s'obtient d'elle-même sans mettre en péril la solidité de la poutre, il serait vain de procéder à des réparations prématurées : il faut attendre que les fissures n'évoluent plus, puis il faut les reboucher pour remédier aux désordres.

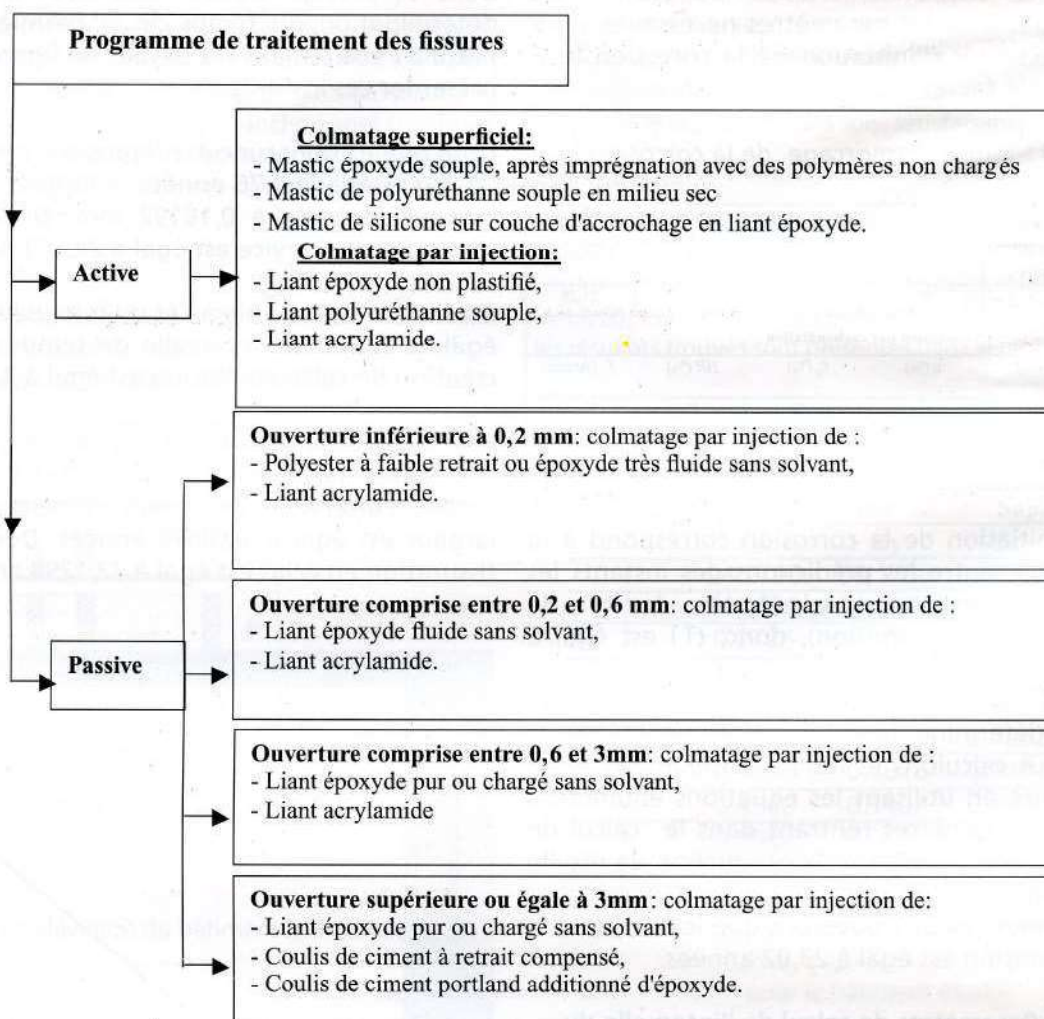


Figure 5 : Cheminement à suivre pour traiter des fissures.

5. Conclusions

Durant le processus de détérioration par fissuration après corrosion des armatures par carbonatation ou par pénétration des ions de chlorures, des fissures apparaissent dans le béton d'enrobage en même temps que la corrosion des armatures progresse et le béton d'enrobage éclate rapidement. L'apparition d'une fissuration induite par la corrosion dans le béton d'enrobage le long de l'armature est considérée comme la limite de détérioration pour la fissuration due à la corrosion des armatures.

Le module « CORPRO » du logiciel « CRACKPRO » établi dans ce travail, permet d'obtenir une évaluation préventive du temps d'initiation de la corrosion et du risque de fissuration. Cette approche numérique peut répondre à des besoins de dimensionnement, en y apportant des précisions supplémentaires pour une durée de service de l'ouvrage prédéfinie : l'épaisseur d'enrobage nécessaire, l'établissement de la perméabilité du béton et le type d'acier nécessaire.

Références bibliographiques

[1] Ouzaa K. , Logiciel numérique de modélisation préventive des dégradations des ouvrages «CRACKPRO»,

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Faculté d'Architecture et de Génie Civil, 2009.

[2] Weyers R.E., Modelling the time-to-cracking in chloride contaminated reinforced concrete structure, ACI Materials Journal, Vol.95, N° 6, November-December, 1998.

[3] Stewart M.G., Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models, Structural Safety, Vol. 22, 313-333, 2000.

[4] Papadakis V.G., Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, ACI Material Journal, Vol. 88, N° 2, March-April, 186-196, 1991.

[5] B.A.E.L, Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états - limites. Edition Eyrolles, 1991.

[6] Christensen P, Modelling of deterioration of reinforced concrete structures, Reliability and optimization of structures systems, Proceedings of the ninth IFIP WG 7.5 working conference on reliability and optimization of structural systems, pp 15-25, 2000.