
Modélisation des effets de la corrosion sur l'adhérence béton-armature à haute adhérence

Anh Long Thang* – Slim Kammoun*** – François Buyle-Bodin* – Olivier Maurel**

* *Laboratoire de Mécanique de Lille, Polytech'Lille
CNRS/ University of Lille 1
59 avenue du Langevin, 59650 Villeneuve d'Ascq
Francois.Buyle-Bodin@univ-lille1.fr*

** *LaSAGeC², Université de Pau-Pays de l'Adour,
Allée du Parc Montauray, 64600 Anglet
olivier.maurel@univ-pau.fr*

*** *LGC, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis
slim_kammoun_enit@yahoo.fr*

RÉSUMÉ. Cet article présente un modèle de loi d'adhérence béton-armature utilisable pour les structures en béton armé affectées par la corrosion. La loi d'adhérence du Modèle Code CEB-FIP a été modifiée pour prendre en compte les effets de la corrosion. La contrainte d'adhérence maximale s'exprime suivant la décomposition de (Cairns, 1979). Le glissement correspondant au début de la phase de frottement constant est calculé en fonction de taux de corrosion par extrapolation de résultats expérimentaux. Les contraintes d'adhérence maximales sont fonction de la progression de la fissure de corrosion (mode de rupture), du pourcentage de corrosion, du confinement et du mode de rupture d'adhérence. La loi proposée est applicable aux barres à haute adhérence.

ABSTRACT. This paper presents an analytical method to calculate bond stress-slip relationship of ribbed corroded bars embedded in reinforced concrete structures. The CEB-FIP Model Code relationship is modified to take into account corrosion effects on bond. Maximal bond stress given by (Cairns, 1979) is modified by corrosion. Percentage of corrosion, confinement stress, modes of failure and crack widths are integrated in the calculation of maximal bond strength. The characteristic slip (corresponding to constant bond stress) is proportional to corrosion percentage according to experimental results. The law can be used for ribbed bars.

MOTS-CLÉS : corrosion, adhérence, contrainte, modèle, confinement, béton armé.

KEYWORDS: corrosion, bond, bond stress, model, confinement, reinforced concrete.

1. Introduction

L'adhérence est considérée comme un frottement à la surface de contact béton-armature. Elle est gouvernée par trois mécanismes principaux : adhérence chimique, frottement et interaction nervures/béton. Ce mécanisme d'adhérence qui assure le fonctionnement du matériau composite béton armé est très sensible à la corrosion.

La corrosion avec l'expansion de ses produits cause la fissuration de l'enrobage du béton. Ces fissures, qui se forment aux surfaces des armatures corrodées et se propagent à travers l'enrobage, peuvent altérer les états de service de l'ouvrage.

L'adhérence entre béton et acier est un phénomène complexe, souvent introduit dans le mécanisme du béton armé sous forme simplifiée par le biais d'une relation « contrainte d'adhérence–glissement ».

2. Relation contrainte d'adhérence-glissement

Une relation consensuelle entre contrainte d'adhérence et glissement n'est pas encore disponible en dépit du grand nombre d'investigations effectuées.

Le Modèle Code CEB-FIP [CEB-FIB (1992)] propose une relation entre contrainte d'adhérence et glissement pour des barres lisses et des barres nervurées. Cette relation est à la base de ce modèle de calcul mais la contrainte maximale τ_{\max} est modifiée afin d'intégrer les effets de la corrosion sur l'adhérence. La méthode de (Cairns, 1979) sera utilisée.

3. Calcul de la contrainte d'adhérence maximale en fonction des modes de rupture

Les barres utilisées en béton armé sont des barres à haute adhérence. Selon le type d'interaction entre la barre et le béton, (Cairns, 1992) et (Andreasen, 1992) ont distingué trois types de rupture d'adhérence. Le premier, illustré par la Figure 1.a, est l'arrachement ou « pull-out ». Le béton est cisailé sur les surfaces de nervure. Ce mode apparaît quand la barre est confinée par le béton environnant. Cependant, quand l'enrobage est inférieur à deux fois le diamètre des barres, la perte d'adhérence a lieu par fendage du béton comme illustré sur la Figure 1.c. Dans le Mode 2 (cf. Figure 1.b), la réaction sur les nervures cause un écrasement du béton au-dessous des nervures et un cisaillement du béton à la surface du béton écrasé. Dans les structures réelles, le mode de rupture par fendage est le plus fréquent. Pour les structures saines, le mode 2 est prépondérant tandis que le mode 3 peut se produire dans des structures corrodées à cause de la lubrification de l'interface due à la corrosion. Dans cet article, seuls les modes 2 et 3 seront examinés. En effet, le mode 1 n'est pas un mode de rupture de la liaison acier béton lorsque les barres sont corrodées.

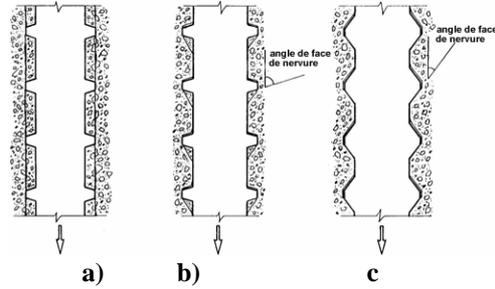


Figure 1. Mode de rupture d'adhérence : (a) Mode 1 pull-out ; (b) Mode 2 fendage avec écrasement et/ou cisaillement du béton au-dessous des nervures ; (c) Mode 3 fendage avec glissement à la surface des nervures (Cairns, 1992).

La géométrie des nervures est caractérisée par l'aire relative de nervure, f_r . L'aire relative de nervure d'une barre f_r est la proportion de l'aire des nervures, projetée sur un plan perpendiculaire à l'axe de la barre, par rapport à la section nominale de la barre :

Cairns (1979, 1995) a proposé des modèles d'évaluation de la capacité d'adhérence. Ces modèles supposent que la résistance d'adhérence se décompose en deux parties, l'une reliée à la résistance de fendage fournie par la section, l'autre reliée au frottement à l'interface béton/acier.

3.1 Mode de rupture 2

L'état de contrainte est présenté sur la figure [2]. La résistance au cisaillement τ_v sur la surface inclinée est évaluée d'après le critère de Morh-Coulomb :

$$\tau_v = f_{coh} + \sigma_n \tan \phi \quad [1]$$

où f_{coh} : cohésion à l'interface béton/acier
 σ_n : contrainte normale au plan de rupture d'adhérence
 ϕ : angle de frottement

En supposant la surface de nervure lisse, la contrainte de réaction sur la nervure est donnée par :

$$\sigma_q = \sigma_{sp} \cot^2 \Omega + 2f_{coh} \cot \Omega \quad [2]$$

La contrainte développée dans la barre par l'adhérence est :

$$\sigma_{bs} = \sigma_q f_r \quad [3]$$

La force d'éclatement du béton est :

$$F = \frac{l_b}{s_r} \sigma_{sp} \cot \Omega l \rightarrow \sigma_{sp} = \frac{F s_r}{l_b \cot \Omega l} \quad [4]$$

$$\sigma_q = \frac{F s_r}{l_b \cot \Omega l} \cot^2 \Omega + 2f_{coh} \cot \Omega = \left(\frac{F s_r}{l_b l} + 2f_{coh} \right) \cot \Omega \quad [5]$$

$$\sigma_{bs} = \sigma_q f_r = \left(\frac{F S_r}{l_b I} f_r + 2 f_{coh} f_r \right) \cot \Omega = \left(\frac{F}{l_b d_s} \frac{n A_r \sin \beta}{\pi d} + 2 f_{coh} f_r \right) \cot \Omega \quad [6]$$

La contrainte d'adhérence τ_{bu} peut donc être évaluée d'après l'équation :

$$\tau_{bu} = \left(\frac{n A_r \sin \beta}{\pi I} \frac{F}{l_b d_s} + 2 f_{coh} f_r \right) \cot \Omega = (k p_{\max} + 2 f_{coh} f_r) \cot \Omega \quad [7]$$

où $k = \frac{n A_r \sin \beta}{\pi I}$, $I = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} h_r \frac{d_b}{2} \cos \Theta d\Theta$ et $p_{\max} = \frac{F}{l_b d_s}$:

p_{\max} est la contrainte maximale de confinement au moment de la rupture d'adhérence déterminée par la méthode de (Tepfers, 1979) (« modèle de l'anneau de béton »).

Les paramètres k , f_{coh} , f_r , $\cot \Omega$ sont fonctions des propriétés géométriques des nervures des barres et des propriétés de l'interface béton/acier.

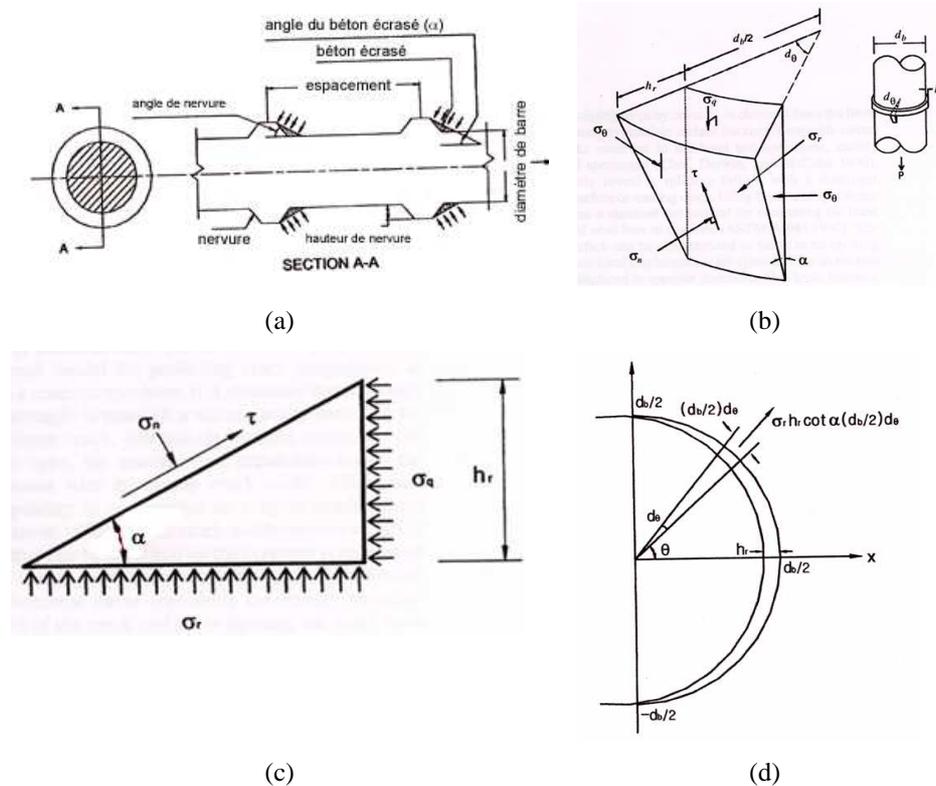


Figure 2. Représentation des contraintes (a) contrainte d'adhérence [Tepfers (1979)] ; (b) contraintes agissant sur la nervure (Cairns, 1979) ; (c) contraintes le long de l'interface du béton écrasé selon l'angle α ; (d) contraintes radiales

3.2 Mode de rupture 3

Pour le mode de rupture 3, la barre glisse sur le béton car la corrosion a provoqué une forte diminution de la hauteur des crânelures. La contrainte d'adhérence ultime est évaluée par :

$$\tau_{bu} = k p_{\max} + \tau_b^0 \quad [8]$$

$$\text{Où, } \tau_b^0 = \frac{n A_r f_{coh} [\cot \delta + \tan(\phi + \delta)]}{\pi d_b s_r}, \quad k = \frac{n A_r \tan(\phi + \delta)}{\pi d_r}, \quad A_r = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} h_r(\theta) r_b d\theta$$

$$\text{et } I_r = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} h_r(\theta) \cos(\theta) r_b d\theta.$$

4. Loi d'évolution de l'adhérence en fonction de la corrosion

L'évolution de l'adhérence avec la corrosion comporte trois phases : phase de pré-fissuration ; phase de fissuration et phase de post-fissuration.

Pour de faibles pourcentages de corrosion (inférieurs à 2%), il apparaît une augmentation du frottement entre l'acier et le béton due à la formation d'une fine couche de rouille stable et adhérente. A la fin de ce stade, l'apparition des fissures primaires diminue l'adhérence, mais le confinement de la barre par le béton est encore important. Le développement de la corrosion, produit une forte dégradation de l'adhérence : l'émoussement des nervures affaiblit les interactions entre l'acier et le béton. De plus, le confinement sera diminué par l'ouverture de fissures longitudinales.

Dans le dernier stade, le confinement de la barre décroît fortement : une augmentation de la corrosion n'aura plus d'effet sur la dégradation de l'interface. Il demeure une contrainte résiduelle.

Le modèle développé est basé sur la relation contrainte d'adhérence–glissement du [CEB-FIP (1992)]. Cependant, certains paramètres du modèle sont modifiés en fonction de la corrosion :

- glissement s_1 interpolé à partir de résultats expérimentaux
- contrainte d'adhérence maximale τ_{\max} déterminée par les modes de rupture

En raison de l'oxydation des barres, les contraintes de frottement et d'adhésion agissant sur les surfaces inclinées des nervures vont évoluer et entraîner une modification de la cohésion f_{coh} et de l'angle de frottement ϕ . De plus, la corrosion affecte l'aire de nervure A_r en diminuant sa hauteur h_r . Enfin, le transfert de contrainte d'adhérence le long de la surface de barre entre les nervures est pris en considération : la surface est rouillée et subit une pression de rouille $p_{rouille}(p)$. En considérant le coefficient de frottement à l'interface $\mu(p)$, une contribution supplémentaire d'adhérence est ajoutée dans l'évaluation de la contrainte

d'adhérence. La diminution de hauteur de nervure de barre h_n est reliée à la profondeur de pénétration de la corrosion p par l'équation [9].

$$h_r(t) = h_r - p(t) = h_r - \alpha_c (t - t_i) r \quad [9]$$

Les diminutions de hauteur de nervure et de diamètre de barre sont aisément calculables. L'aire relative de nervure, f_r permet de quantifier l'influence du degré de corrosion. L'adhésion f_{coh} est rarement reliée à la corrosion dans la littérature. (Coronelli *et al.*, 2002), propose une relation :

$$f_{coh}(p) = 2 - 10(p - p_{cr}) \quad [10]$$

Où p est la profondeur de pénétration à l'instant t de calcul, et p_{cr} est celle correspondant au début de la fissuration. L'intégration de la pression de rouille et du coefficient de frottement μ permet d'exprimer la capacité d'adhérence en fonction de la corrosion :

$$\mu(p) = \tan(\phi) = 0,3 - 0,2(p - p_{cr}) \quad [11]$$

Les constantes des équations [10] et [11] sont issues d'une régression linéaire de données expérimentales.

La contrainte d'adhérence τ_{bu} peut être évaluée en fonction de la corrosion (représentée par la perte de rayon p) par les formules suivantes :

Mode 2 :

$$\tau_{bu2}(p) = [k(p) \cdot p_{max} + 2 \cdot f_{coh}(p) \cdot f_r(p)] \cot \Omega(p) + \mu(p) \cdot p_i(p) + \frac{kA_s f_y}{s\phi} \quad [12]$$

Mode 3:

$$\tau_{bu3}(p) = k(p) \cdot p_{max} + \tau_b^0(p) + \mu(p) \cdot p_i(p) + \frac{kA_s f_y}{s\phi} \quad [13]$$

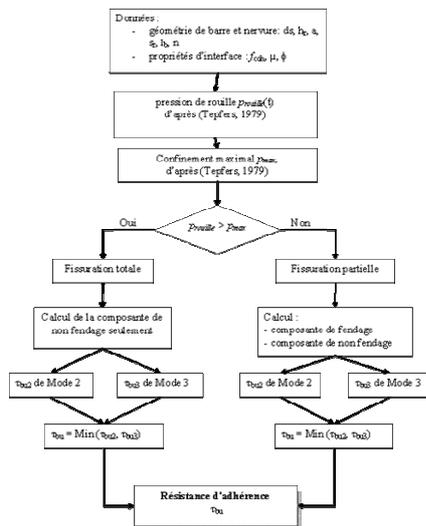


Figure 3. Organigramme de calcul

Il est supposé que les armatures transversales produisent une contrainte d'adhérence indépendante du taux de corrosion et égale à $\frac{kA_s f_y}{s\phi}$.

On évalue l'état de fissuration de la gaine de béton autour de la barre en fonction du pourcentage de corrosion.

Ce taux permet de calculer, par analogie au modèle de l'anneau de béton (Tepfers, 1979), la pression de rouille effective $p_{rouille}$ puis de la comparer à la pression de rouille maximale p_{max} correspondant à la fissuration complète de l'enrobage.

5. Validation du modèle de calcul

Les prédictions du modèle ont été comparées aux résultats expérimentaux issus des travaux de (Rodriguez *et al.*, 1990) et (Al-Sulaimani *et al.*, 1990).

Le modèle, basé sur des lois classiques adaptées pour prendre en compte la corrosion, fournit une estimation correcte des effets de la corrosion sur la contrainte d'adhérence. Cependant, en raison de sa simplicité, il présente certaines limites :

1. il ne tient pas compte de la position des barres dans la section.
2. il ne traduit pas le phénomène d'amélioration de l'adhérence pour de faibles pourcentages de corrosion (< 2%). Ce modèle convient pour des structures présentant une corrosion conséquente.

Cette loi de comportement de la liaison acier-béton établie pour des structures endommagées par la corrosion des armatures a été implantée dans un modèle de simulation du comportement global de poutres corrodées en béton armé ou béton précontraint sous sollicitations de traction, flexion simple et flexion composée. Ce modèle a été évalué « en aveugle » lors du Projet National « Benchmark des poutres de la Rance » au cours duquel il a été modélisé les courbes charges-flèches de 10 poutres en béton armé et béton précontraint sollicitées en traction et flexion simple et conservées pendant quarante ans en ambiance marine dans la zone de marnage. Le principe du modèle de calcul est présenté par (Anh Long *et al.*, 2007). Les effets de la corrosion sur le comportement en flexion sont traduits par la diminution du diamètre des armatures et de la section de béton et la loi d'adhérence fonction de la corrosion.

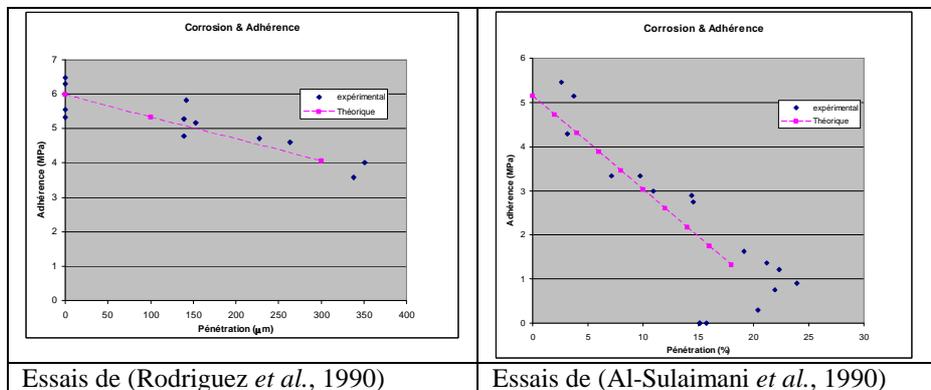


Figure 4. Evolution de l'adhérence en fonction de la corrosion

6. Conclusion

Cet article a présenté une loi contrainte d'adhérence-glisement prenant en compte la corrosion par le biais du pourcentage de corrosion de l'armature haute adhérence. La forme de la loi contrainte d'adhérence-glisement du Code Modèle a été conservée mais ses paramètres ont été modifiés en fonction du taux de corrosion.

Le glissement correspondant au début de la phase de frottement constant est calculé en fonction du taux de corrosion à partir de résultats expérimentaux. La contrainte maximale d'adhérence est fonction du mode de rupture de la liaison (fissuration de la gaine d'enrobage) et de la progression de la fissure de corrosion (confinement) en fonction de la pression de rouille. Le modèle a été utilisé dans une méthode analytique d'évaluation du comportement global de poutres en béton armé ou béton précontraint corrodées sous sollicitations de traction, flexion simple et flexion composée évaluée lors du « Benchmark des poutres de la Rance ».

Bibliographie

- Al-Sulaimani G.J., Kaleemullah M., Basundul I.A., Rasheeduzzafar, « Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete Members », *ACI Structural Journal*, Vol. 87, n°2, 1994, pp. 220-231.
- Andreasen B.S., Anchorage of ribbed reinforcing bars, Proc. Int. Conf. « Bond in Concrete: from Research to Practice », CEB-RTU (Riga Technical University), Riga (Latvia), 1.18-1.27, 1992.
- Anh Long Thang., Maurel O., Buyle-Bodin F., « Numerical assessment of structural behaviour of prestressed concrete beams damaged by corrosion », Benchmark des Poutres de la Rance, *Revue Européenne de Génie Civil*, Vol. 11, n°1-2, pp. 196-213, Jan. Fév. 2007.
- Cairns J., « Analysis of the ultimate strength of lapped joints of compression reinforcement », *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, pp. 19-27, 1979.
- Cairns J., « Design of concrete structures using fusion bonded epoxy coated reinforcement », *Proc. Inst. of Civil Engineers: Structures & Buildings*, Vol. 1, n°94, pp. 93-102, 1992.
- Cairns J., Abdullah R., « An evaluation of bond pullout tests and their relevance to structural performance », *The Structural Engineer*, Vol. 1, n°73, pp. 179-185, 1995.
- Comité Euro-International du Béton (CEB), CEB-FIP Model Code 1990: CEB Bulletin d'information 213-214, Thomas Telford Service Ltd., London, England, 1992.
- Coronelli D., « Corrosion cracking and bond strength modelling for corroded bars in reinforced concrete », *Struct. J., ACI*, 99(3), 267-276, 2002.
- Rodriguez J., Andrade C., « Load-bearing capacity loss in corroding structures », Proceedings of ACI convention, Toronto, Canada, 1990.
- Tepfers R., « Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars », *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, n°106, pp. 3-12, 1979.