

Identification bayésienne de l'effet de chargement statique et cyclique sur le mécanisme de pénétration des ions chlorures dans le béton

H.M. IMOUNGA^{1,2}, T.B. TRAN², E. BASTIDAS-ARTEAGA², R. MOUTOU PITTI^{3,4}, S. EKOMY ANGO⁴, X.H. WANG⁵,

1. USTM, BP 941, Franceville, Gabon, henriette.imounga@etu.univ-nantes.fr

2. Université de Nantes, GeM, BP 92208, 44000 Nantes, France

3. UCA, Institut Pascal, BP 10448, 63000 Clermont Ferrand, France

4. IRT, CENAREST, Libreville, Gabon

5. Université Maritime de Shanghai, Shanghai 201306, Chine

Résumé :

Les ouvrages offshore en béton armé sont soumis à des phénomènes couplés de corrosion et de fissuration due aux chargements, qui affectent leurs durabilités. Pour comprendre les effets de couplage, plusieurs essais expérimentaux ont été réalisés puis implémentés. Le modèle numérique élaboré est fait à partir des données de l'étude d'une poutre en béton armé de dimension 300x120x1500 mm soumise à des chargements statiques et cycliques, puis exposée dans un environnement contenant des ions chlorures. Il permet de mettre en évidence les effets du chargement sur le mécanisme de pénétration des ions chlorure dans le béton et d'identifier, par la méthode des réseaux bayésiens, un facteur d'accélération de la diffusion des ions chlorure dû au chargement. Les résultats obtenus indiquent que l'approche utilisée est capable d'intégrer des données des essais de chloration et chargement pour la détermination des paramètres probabilistes d'un modèle.

Abstract:

The off-shore structures in reinforced concrete are subjected to phenomenon coupled with corrosion and cracking due to loadings, which affect their durability. To understand the coupling effects, several experimental tests were carried out and implemented. The developed model is based on data from the study of a reinforced concrete beam of dimension 300x120x1500 mm; subjected to static and cyclic loadings, and then exposed in an environment containing chloride ions. It allows to highlight the loading effects on the mechanism of penetration of chloride ions into concrete and to identify, by using Bayesian Networks, a factor of acceleration of diffusion of chloride ions due to loading. The results obtained indicate that the approach proposed is capable of integrating data from chloride ingress and loading tests to identify the model parameters.

Mots clefs : Réseaux bayésiens, chloration, béton armé, chargement cyclique, corrosion, fissuration

1 Introduction

Le béton armé est un matériau résistant et durable qui est très utilisé dans la construction d'ouvrages d'arts. Cependant, les structures placées en zones côtières et offshore sont exposées au phénomène de corrosion induite par chloration. La pénétration des ions chlorure dans le béton est l'une des principales causes de dégradation des ouvrages en béton armé [1]. Pour les structures soumises à des chargements et exposées à des ions chlorure, l'interaction entre ces mécanismes peut accélérer le début de la corrosion [2].

Dans cette étude nous nous intéressons au couplage entre les chargements (cycliques et statiques) et les mécanismes de chloration sur une poutre en béton armé. L'objectif est donc d'identifier, à partir des données expérimentales et en utilisant l'approche des réseaux bayésiens, les paramètres d'un modèle de dégradation du béton ainsi que le facteur d'accélération de la diffusion des ions chlorures dû à la fissuration.

La première partie de ce travail fait la description générale des essais expérimentaux en présentant le matériel, la méthode et les données d'inspection qui seront utilisées pour l'identification des paramètres (Section 2). Dans la section 3, l'implémentation numérique du réseau bayésien dans le logiciel Matlab est détaillée. Enfin les résultats sont présentés et discutés dans la section 4.

2 Description des essais

2.1 Description Générale

Dans la partie expérimentale de l'étude, les échantillons de poutre en béton armé de dimension 300x120x1500 mm (fig. 1), dimensionnés selon les normes chinoises GB/T 50081-2016 [3], ont été soumis à des charges statiques (charge unique de 18kN) et de fatigue (500 000 cycles de chargement 5.4kN à 18kN) avant d'être exposées aux ions chlorures. Pour générer les fissures, chaque poutre est placée dans la configuration d'essai de chargement à trois points. Les déplacements à mi-portée et les points pivots des supports de chaque poutre ont été mesurés par des traducteurs de déplacement ; et une cellule de charge a été utilisée pour contrôler et enregistrer les magnitudes des charges statiques et cycliques [4].

Après les tests mécaniques, les poutres ont complètement été immergées dans une solution de NaCl à 3,5% ~ 5% et séchées à l'air ; ces cycles de mouillage/séchage se sont poursuivis pendant 388 jours [5]. Une fois les expositions aux chlorures terminées, des cylindres de $\phi 100 \times 120$ mm ont été percés dans la longueur centrale 300mm et coupées en tranches de 10mm. Ces tranches ont été séchées au four et broyées en poudre pour faire un mélange complet [2]. Les poudres obtenues ont été utilisées pour mesurer la teneur totale en chlorures de béton à différentes profondeurs (5mm, 15mm, 25mm et 35mm).

Trois groupes d'éprouvettes ont été étudiés dans les essais en fonction des conditions de chargement ; le groupe 1 pour les éprouvettes non chargés, les groupes 2 et 3 pour celles soumises respectivement à des chargements statiques et cycliques.

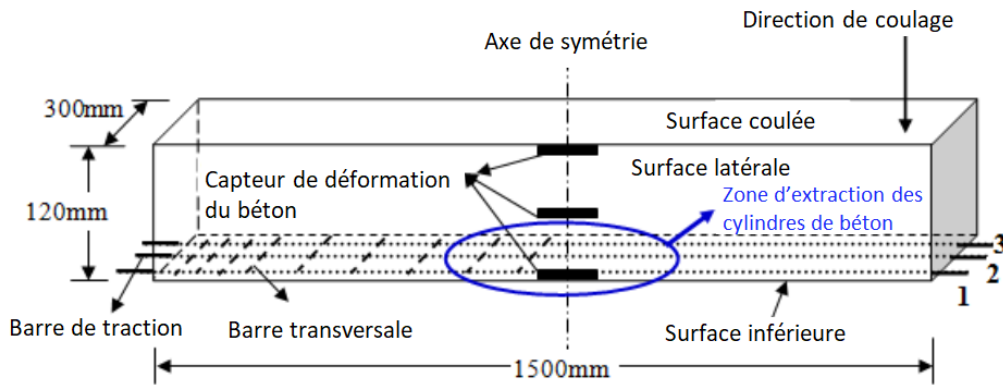


Figure 1 – Dimensions de la poutre en béton armé

2.2 Résumé des résultats expérimentaux

Les résultats des essais présentés dans cette section seront utilisés pour illustrer la méthodologie proposée pour l'identification du facteur d'accélération de diffusion des ions chlorure dans le béton. L'évolution de la moyenne et l'écart type des mesures de chlorure dans le béton en fonction de la profondeur de chaque mesure et selon les groupes est présentée dans la figure 2. On observe que les charges statiques et de fatigue augmentent la moyenne et l'écart type de la teneur en chlorures contenue dans le béton pour les profondeurs de béton supérieures à 15mm [2].

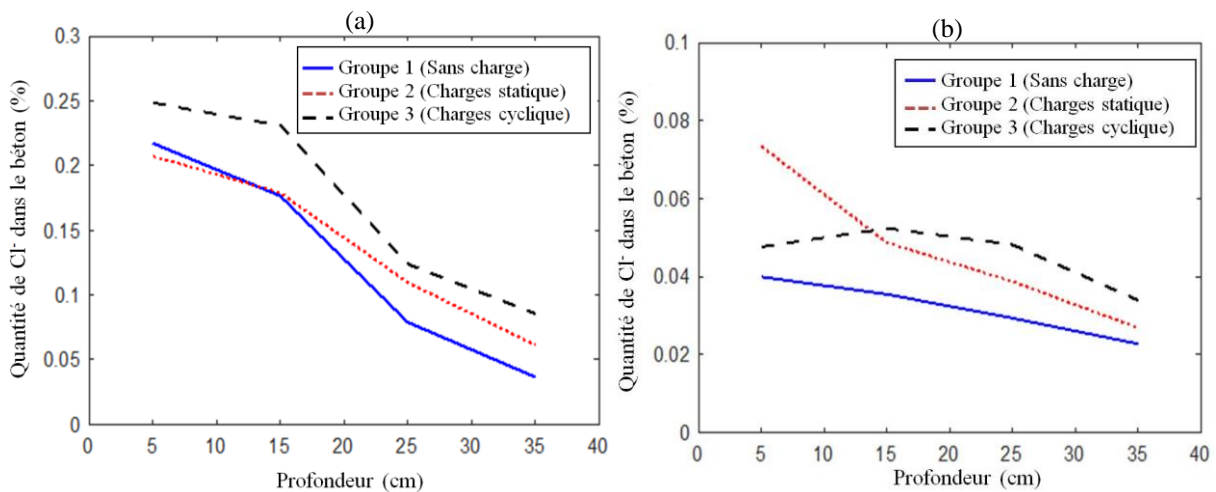


Figure 2 – Moyenne (a) et écart type (b) de la concentration totale de chlorure à différentes profondeurs

L'ajustement des paramètres d'entrée d'un modèle simple de diffusion des ions chlorure dans le béton basé sur la loi de Fick [6], (la concentration d'ions chlorures à la surface C_s et le coefficient effectif de diffusion D) à partir des données expérimentales a montré que les différents chargements augmentaient les valeurs identifiées pour la moyenne et l'écart-type de ces paramètres par rapport à l'état déchargé (tableau 1). Par ailleurs, l'évaluation probabiliste du temps d'initiation la corrosion pour ces essais a indiqué que la charge statique et la charge de fatigue diminuent la moyenne de celui-ci respectivement de 1 et 1.5 ans [2].

Tableau 1 – Moyenne et écart-type des paramètres du modèle de diffusion des ions chlorure pour les différents chargements.

Groupe	Moyenne Cs (% cl)	Ecart type Cs (% cl)	Moyenne D (mm ² /j)	Ecart type D (mm ² /j)
1(sans chargement)	0.28	0.05	0.94	0.52
2(chargement statique)	0.27	0.06	1.31	0.60
3(chargement cyclique)	0.30	0.05	1.65	0.77

3 Implémentation numérique

Cette section décrit la méthodologie proposée pour l'identification d'un facteur d'accélération de la diffusion des ions chlorure dû au chargement que l'on nommera alpha (α) par l'approche bayésienne. Pour modéliser la diffusion des chlorures, nous utilisons un modèle simplifié (équation 1) où le facteur d'accélération α multiplie le coefficient de diffusion D.

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha D \cdot t}} \right) \right] \quad (1)$$

3.1 Configuration du réseau bayésien

La configuration du réseau bayésien dépend des conditions de chargement (chargé ou non-chargé) des essais. Nous avons donc deux configurations selon que la poutre soit chargée ou non. Le nombre de points d'inspection étant les mêmes pour toutes les conditions de chargement, le nombre de nœuds enfants reste égale à quatre (points d'inspection à $x_i = 5\text{mm}$, 15mm , 25mm et 35mm) dans les deux cas. Pour les essais sans chargement nous avons donc 6 nœuds dont deux nœuds parents (C_s et D) et quatre nœuds enfants ($C(x_1, t)$, $C(x_2, t)$, $C(x_3, t)$ et $C(x_4, t)$); et pour les essais avec chargement, le paramètre α s'ajoute comme nœud donnant donc 7 nœuds pour ce réseau (voir figure 3). Toutes les inspections sont faites au même temps $t = 388$ jours.

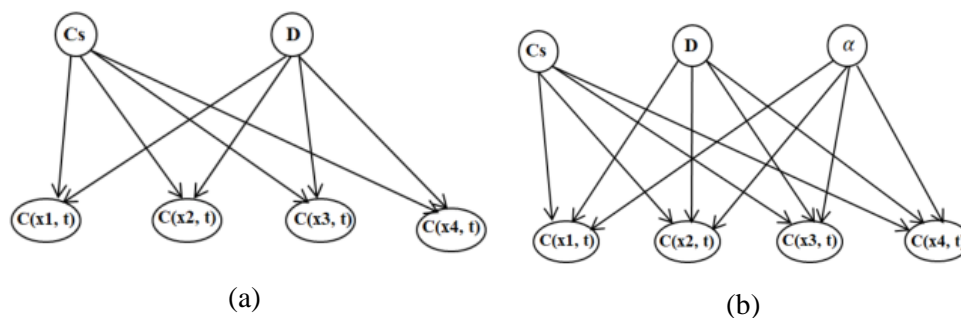


Figure 3 – Configuration des réseaux bayésiens sans chargement (a) et avec chargement (b)

Le tableau 2 présente les modèles probabilistes (essais expérimentaux), utilisés pour générer 50000 valeurs aléatoires des paramètres C_s , D et α par la méthode du Latin Hypercube Simple (LHS). Ces valeurs nous permettent de calculer 50000 valeurs indépendantes de profils en chlorure avec équation 1 qui sont utilisées pour calculer les évidences introduites dans le réseau bayésien. Les détails de la discrétisation et les informations à priori des différentes variables sont résumés dans les tableaux 3 et 4.

Tableau 2 – Valeurs expérimentales pour générer les évidences

Paramètres	Sans chargement		Chargement statique		Chargement cyclique		Distribution
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	
Cs (kg/m ³)	6.58	1.17	6.34	1.41	7.05	1.17	Log normale
D (mm ² /j)	0.94	0.52	1.31	0.60	1.65	0.77	Log normale

Tableau 3 – Discrétisation des nœuds et information à priori de réseau bayésien 1

Paramètres	Nombre d'états par nœud	Distribution à priori	Borne des nœuds
Cs (kg/m ³)	100	Uniforme	[10-12 ; 20]
D (mm ² /j)	100	Uniforme	[10-3 ; 2]
C (x _i , t) (kg/m ³)	80	-	[0 ; 10]

Tableau 4 – Discrétisation des nœuds et information à priori de réseau bayésien 2

Paramètres	Nombre d'états par nœud	Distribution à priori	Borne des nœuds
Cs (kg/m ³)	100	Histogramme du test sans chargement	[10-12 ; 20]
D (mm ² /j)	100	Histogramme du test sans chargement	[10-3 ; 2]
α	100	Uniforme	[10-12 ; 10]
C (x _i , t) (kg/m ³)	80	-	[0 ; 10]

3.2 Procédure d'identification

La méthodologie proposée pour identifier α est décrite dans la figure 4 la première étape consiste à identifier les paramètres C_s et D à partir des données des essais sans chargement. Comme information a priori de ces paramètres, la distribution uniforme est choisie pour ne pas biaiser le résultat d'identification du réseau bayésien [1]. Le facteur α est identifié dans l'étape 2 en utilisant les évidences des tests avec chargement (statique/cyclique). Les histogrammes de C_s et D a posteriori dans l'étape 1 sont utilisés comme information à priori de l'étape 2 ; permettant ainsi d'améliorer d'avantage l'identification de ces deux paramètres aléatoires avec des données issues des essais de chargement.

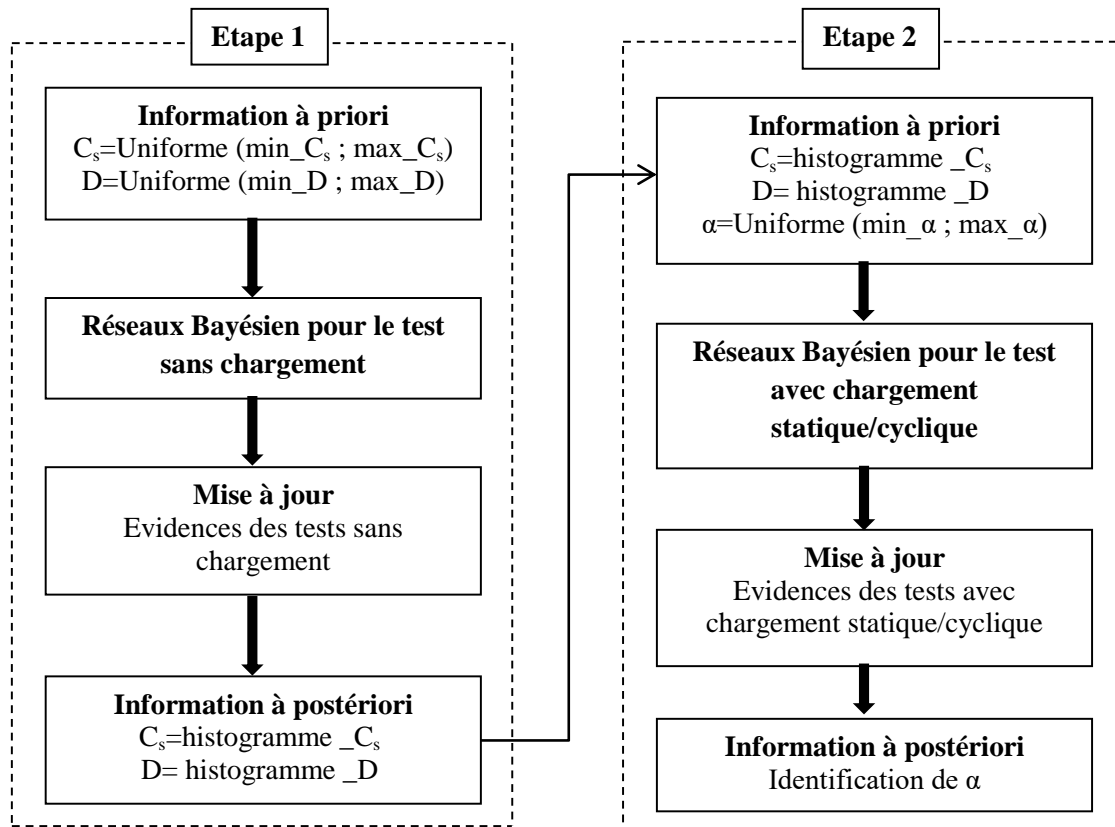


Figure 4 – Organigramme de la méthodologie proposée

4 Résultats numériques

Les moyennes et écarts types des paramètres C_s , D et α obtenus des réseaux bayésiens sont résumés dans le tableau 5 pour chacun des cas (sans chargement, chargement statique et cyclique). Les moyennes de C_s et D obtenues à partir du réseau bayésien sont très proches des valeurs données dans le tableau 2 ; par exemple pour C_s et les poutres non chargées nous avons une moyenne de 6.45 kg/m^3 pour une moyenne expérimentale de 6.58 kg/m^3 . Pour les poutres chargées, les valeurs exactes du coefficient de diffusion D déterminées par le réseau bayésien, correspondent à la multiplication de α par D . La moyenne de D augmente avec le chargement, on passe de $0.95 \text{ mm}^2/\text{j}$ à $1.48 \text{ mm}^2/\text{j}$ (0.89×1.66) pour le chargement statique et à $1.89 \text{ mm}^2/\text{j}$ (0.99×1.91) pour le chargement cyclique. Les valeurs de α obtenues du réseau bayésien sont 1.66 et 1.91 respectivement pour les chargements statique et cyclique. L'on observe donc que les valeurs de D et α augmentent lorsque les poutres sont chargées (plus fissurées); plus les fissures sont nombreuses et plus les valeurs de ces paramètres augmentent. Dans les deux cas de chargement, l'application des deux étapes de la méthodologie permet d'optimiser d'avantage l'identification des paramètres C_s et D en intégrant les résultats des essais avec et sans chargement.

Tableau 5 – Moyennes et écarts types des valeurs à postériori

Paramètres	Sans chargement		Chargement statique		Chargement cyclique	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
C_s (kg/m^3)	6.45	1.79	5.91	0.81	6.47	0.78
D (mm^2/j)	0.95	0.42	0.89	0.37	0.99	0.38
α	-	-	1.66	0.66	1.91	0.63

Les histogrammes de α obtenus pour les différents chargements ont été ajustés à une distribution log-normal de moyenne 1.69 et 1.95, et d'écart-type 0.64 et 0.52 pour respectivement les chargements statique et cyclique, car elle fournissait la meilleure estimation du maximum vraisemblance [7]. La figure 5 montre les histogrammes a posteriori de α et les densités de probabilité des lois log-normal ajustées de chaque chargement.

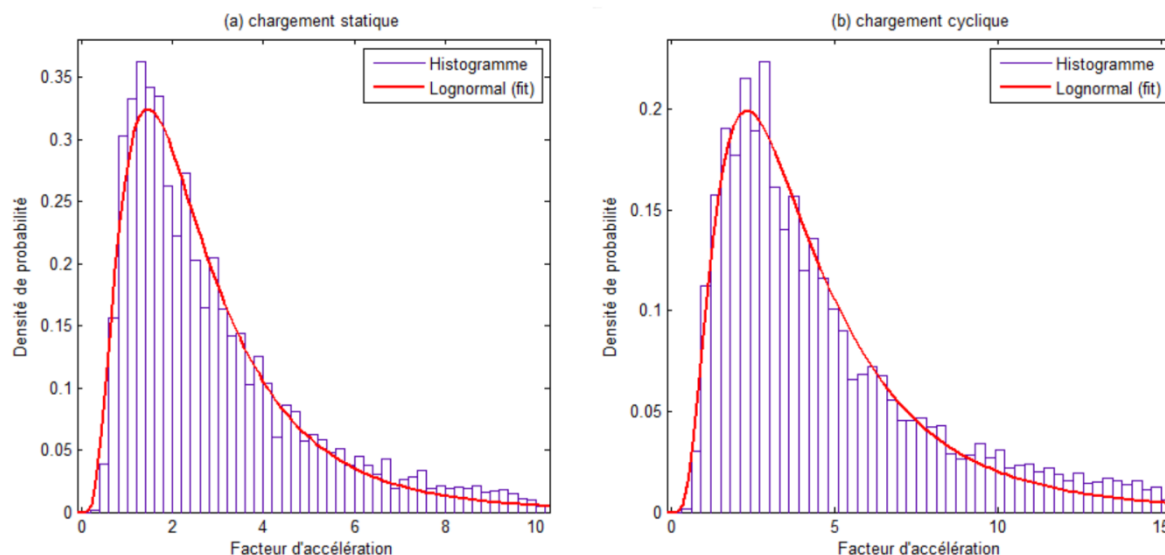


Figure 5 – Histogrammes postérieurs de α pour les différents chargements

5 Conclusion

L'étude propose une méthodologie pour l'identification d'un facteur d'accélération de la diffusion des ions chlorures dans le béton dû au chargement par l'approche bayésienne. La méthodologie a été illustrée et testée avec des données obtenues à partir d'une poutre en béton armé soumise à des chargements (statique et cyclique) et exposée à l'attaque des ions chlorures. Les moyennes des paramètres C_s et D obtenues, proches des valeurs théoriques, montrent qu'après chaque étape les informations des essais intégrées permettent d'optimiser l'identification de ces paramètres. Par ailleurs, l'équation de Fick utilisée dans la méthodologie, qui ne prend pas en compte le vieillissement du béton, limite la méthode d'identification ; il serait donc judicieux d'appliquer la méthodologie en considérant la complexité du matériau.

L'identification probabiliste du paramètre d'accélération est cruciale pour améliorer l'évaluation du temps d'initiation de la corrosion. Ces résultats nous permettront, dans une prochaine étude, de déterminer l'estimation de la probabilité d'initiation de la corrosion, l'effet des mécanismes couplés de chloration et de fatigue sur la durée de vie des structures en béton et de faire l'estimation de l'amorçage et propagation de fissures dans le béton sous chargement cyclique.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la région Pays de la Loire pour le soutien financier du projet étoile montante BUENO 2018-20 (Béton dUurable pour l'EolieN Offshore).

References

- [1] T.B. TRAN (2015). “A Bayesian Network framework for probabilistic identification of model parameters from normal and accelerated tests: application to chloride ingress into concrete.” Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- [2] X.H. Wang, E. Bastidas Arteaga, Y. Gao, Probabilistic analysis of chloride penetration in reinforced concrete subjected to pre-exposure static and fatigue loading and wetting drying cycles, *Eng. Fail. Anal* 84 (2018) 205-219.
- [3] GB/T 50081-2016, Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete, National Standards of Peoples Republic of China, Beijing, China, 2016.
- [4] X.-H. Wang, B. Chen, Y. Gao, J. Wang, L. Gao, Influence of external loading and loading type on corrosion behaviour of RC beams with epoxy-coated reinforcements, *Constr. Build. Mater.* 93 (15) (2015) 746–765.
- [5] X.-H. Wang, Y. Gao, Corrosion behaviour of epoxy-coated reinforced bars in RC test specimens subjected to pre-exposure loading and wetting-drying cycles, *Constr. Build. Mater.* 119 (2016) 185–205.
- [6] K. Tuutti, *Corrosion of Steel in Concrete*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
- [7] B.F. Ginos, Parameter estimation for the lognormal distribution (MSc Thesis), Department of Statistics, Brigham Young University, 2009.