



HAL
open science

Résultats d'auscultation d'un ouvrage maritime en béton armé

Frédéric Rosquoët, Stéphanie Bonnet, Abdelhafid Khelidj, Xavier Lefort

► **To cite this version:**

Frédéric Rosquoët, Stéphanie Bonnet, Abdelhafid Khelidj, Xavier Lefort. Résultats d'auscultation d'un ouvrage maritime en béton armé: Analyse des profils en chlorure. XXIVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Construire: un nouveau défi, 2006, La Grande Motte, France. hal-01008832

HAL Id: hal-01008832

<https://hal.science/hal-01008832>

Submitted on 22 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Résultats d'auscultation d'un ouvrage maritime en béton armé

Analyse des profils en chlorure

F. Rosquoët, S. Bonnet, A. Khelidj et X. Lefort

GeM, UMR CNRS 6183

Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique

IUT de Saint-Nazaire

58 rue Michel Ange

BP 420

44606 Saint-Nazaire Cedex, France

frederic.rosquoet@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ. L'estimation de la durée de vie d'un ouvrage en béton armé, ainsi que la nécessité éventuelle d'une réparation de l'ouvrage est une des préoccupations principales des maîtres d'ouvrages. Une analyse des profils de concentrations en chlorure sur différents éléments d'un quai du Port Autonome de Nantes Saint-Nazaire est réalisée. Les éléments étudiés ne sont soumis qu'aux embruns et ne sont jamais en contact direct avec l'eau de mer excepté au cours de tempêtes. Un traitement statistique est réalisé, permettant d'estimer l'évolution de la concentration en ions chlorure à une profondeur donnée après un, deux, voir dix ans.

ABSTRACT. The lifespan estimation of a reinforced concrete structure, as well as the need for repairing the structure is the main preoccupation of the building owners. Analysis of the chloride profiles is carried out for various elements of a quay concerning the Port authority of Nantes Saint-Nazaire. The studied elements are subjected only to the spray and are never in direct contact with sea water excepted during the storm. A statistical processing makes possible to estimate the evolution of the chloride ions concentration at a given depth after one, two, or ten years.

MOTS-CLÉS IONS CHLORURE, QUAI, BETON ARME, APPROCHE STATISTIQUE.

KEYWORDS. CHLORIDE IONS, QUAY, REINFORCED CONCRETE, STATISTICAL APPROACH.

1. Introduction

L'estimation de la durée de vie d'un ouvrage en béton armé, ainsi que la nécessité éventuelle d'une réparation ou d'une réhabilitation de l'ouvrage est une des préoccupations des maîtres d'ouvrages et répond à des enjeux économique et réglementaire importants. De nombreux mécanismes peuvent induire des dommages importants voir irréversibles pour les structures en béton armé : c'est le cas notamment de la corrosion des aciers en milieu marin. Le développement de la corrosion est généralement lié à deux mécanismes, la carbonatation et la pénétration des ions chlorures. Nous nous intéressons, lors de cette présente étude, uniquement à la pénétration des ions chlorures. Ces derniers, véhiculés par l'eau ou les embruns, arrivent au voisinage des aciers. Lorsque leur concentration atteint une valeur critique, les aciers vont être dépassivés et la corrosion va s'amorcer. En zone d'embruns, le matériau absorbe l'humidité par condensation capillaire et par capillarité.

Des essais en laboratoire, sur la diffusion des ions chlorure au sein de bétons, nous passons à l'échelle de la structure réelle [Truc, 2000 ; Djerbi *et al*, 2006]. Peu d'ouvrages en service ont fait l'objet en France d'une auscultation suivie d'une analyse scientifique. A l'étranger, plusieurs études ont été menées. Un vaste programme de recherche sur 9 ponts a été réalisé en Hollande [Gaal *et al*, 2003]. Ces ouvrages ont été construits entre 1940 et 1987. Une centaine d'échantillons ont été prélevés sur des parties de structure uniquement soumises aux embruns et dosés en chlorure. Le coefficient de diffusion des ions chlorure dans le béton a été déterminé à partir de la seconde loi de Fick, même si les conditions de l'ouvrage ne correspondent pas au domaine d'application de la loi. Une étude similaire sur un ouvrage situé à Dundee en Ecosse [Wood et Crerar, 1997] présente l'évolution de la concentration en chlorure au sein de l'ouvrage. Ce dernier a été réalisé entre 1963 et 1966. Une première campagne d'essais pour évaluer la concentration en chlorure a été réalisée en 1985 et une seconde campagne en 1993. Le coefficient de diffusion a été déterminé à partir de la seconde loi de Fick, les zones étudiées étant également uniquement soumises aux embruns ou au salage de la chaussée. A partir de ces données, les auteurs ont estimé l'évolution de la concentration au bout de 60 ans et 100 ans par une méthode déterministe. L'étude réalisée par Kirkpatrick *et al* [2002], également sur des ponts (10 au total), introduit une étude probabiliste pour estimer le temps nécessaire avant d'effectuer une intervention sur l'ouvrage ou bien une réhabilitation de ce dernier. Nous nous inspirons de ces travaux pour d'une part étudier la propagation des ions chlorure et d'autre part estimer l'évolution de cette dernière à court et moyen terme.

Cette étude contribue au projet européen Interreg III B intitulé MEDACHS qui porte sur la durabilité et maintenance des ouvrages de la côte Atlantique. Dans ce cadre nous avons engagé un partenariat avec le Port Autonome de Nantes Saint-Nazaire (P.A.N.S.N.) qui nous autorise des prélèvements sur site et des auscultations non-destructives (non traitées dans cet article).

2. Structure étudiée

La structure étudiée est le poste 1 (figure 1) du terminal Agro-alimentaire du P.A.N.S.N. qui a 34 ans (construction en 1971).



Figure 1. Terminal Agro-alimentaire du P.A.N.S.N.

Les données expérimentales utilisées dans cette étude ont été fournies par le P.A.N.S.N. et sont issues d'une campagne d'auscultation réalisée par une entreprise indépendante. Le quai, qui repose sur des pieux métalliques, est constitué d'éléments coulés en place, c'est le cas notamment des poutres transversales, longitudinales et magistrales et d'éléments préfabriqués, les dalles. On décompose ce quai en trois zones, chaque zone comportant différents points de mesures. On représente sur la figure 2, les trois zones du quai ainsi que la position des différents prélèvements. Pour les poutres transversales et longitudinales, chaque point étudié comporte respectivement trois mesures, à l'est, l'ouest et en sous face et nord, sud et sous face.

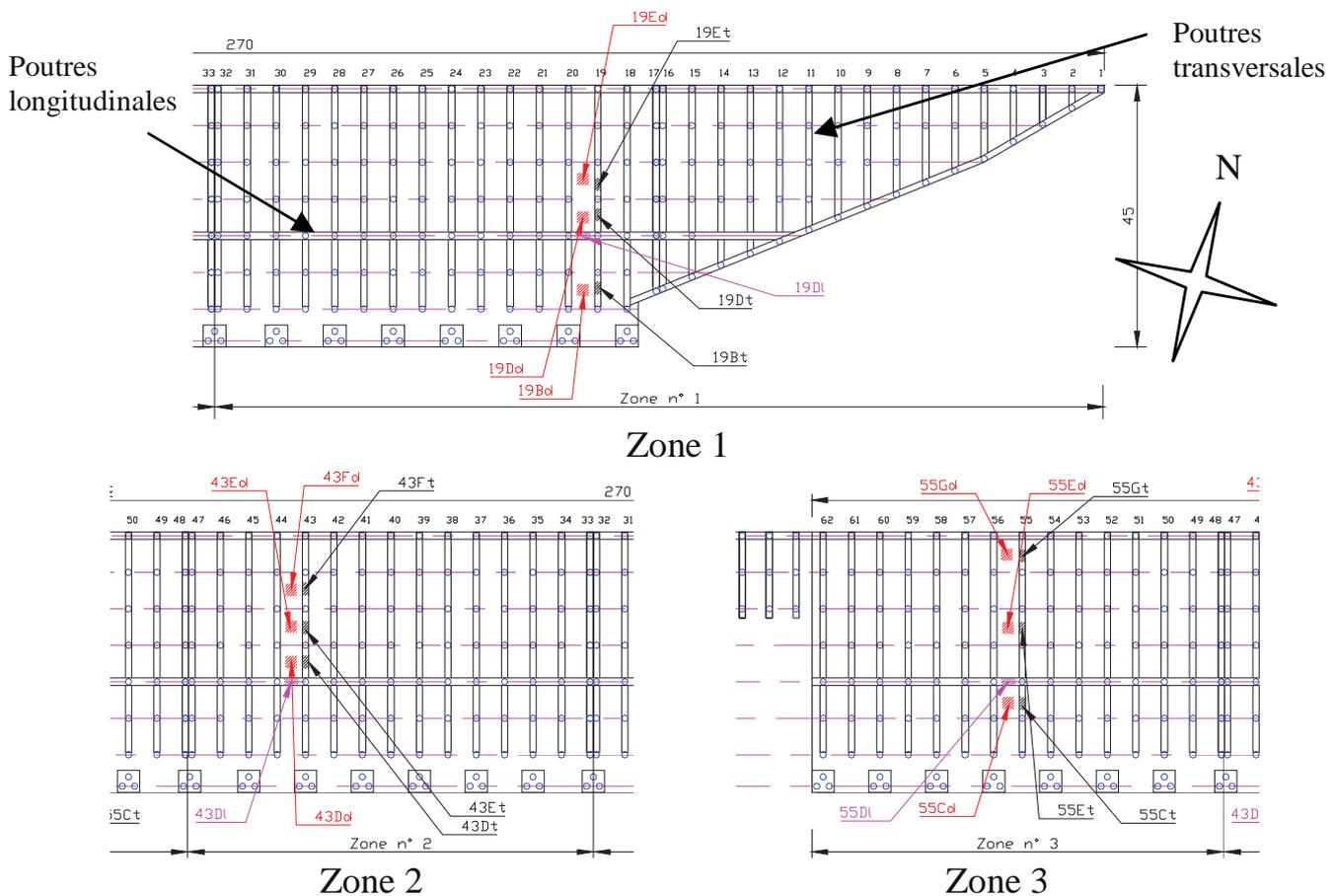


Figure 2. Schéma du Terminal Agro-alimentaire et points de mesures.

Seuls les profils en ions chlorure totaux ont été mesurés sur ces prélèvements. Le protocole de détermination des concentrations est la suivante : les carottes d'un diamètre de 40 mm sur 80 mm de long sont prélevées par voie humide, puis sont sciées et broyées afin d'obtenir une poudre. Il est important de noter que cette méthode n'a pas d'influence sur la concentration mesurée [Gaal *et al*, 2003]. Les ions sont mis en solution puis titrés par la méthode de potentiomètre.

3. Analyse des données

Dans le cadre d'une étude statistique nous souhaitons étudier des éléments de structure semblables, tant sur le point du type de béton utilisé (coulé en place) que sur le type d'environnement. A partir des données qui nous ont été fournies, une analyse des concentrations sur les différents éléments du quai a été effectuée. Certaines constatations nous ont conduit à focaliser notre étude sur les poutres transversales 43 et 55 des zones deux et trois. En effet la zone 1 (poutre 19) semble plus exposée aux embruns marins, de part sa situation particulière en bout de quai et les dalles sont des éléments préfabriqués. Il est important de noter que tous les éléments étudiés ne sont soumis qu'aux embruns et ne sont jamais en contact direct avec l'eau de mer excepté au cours des tempêtes exceptionnelles.

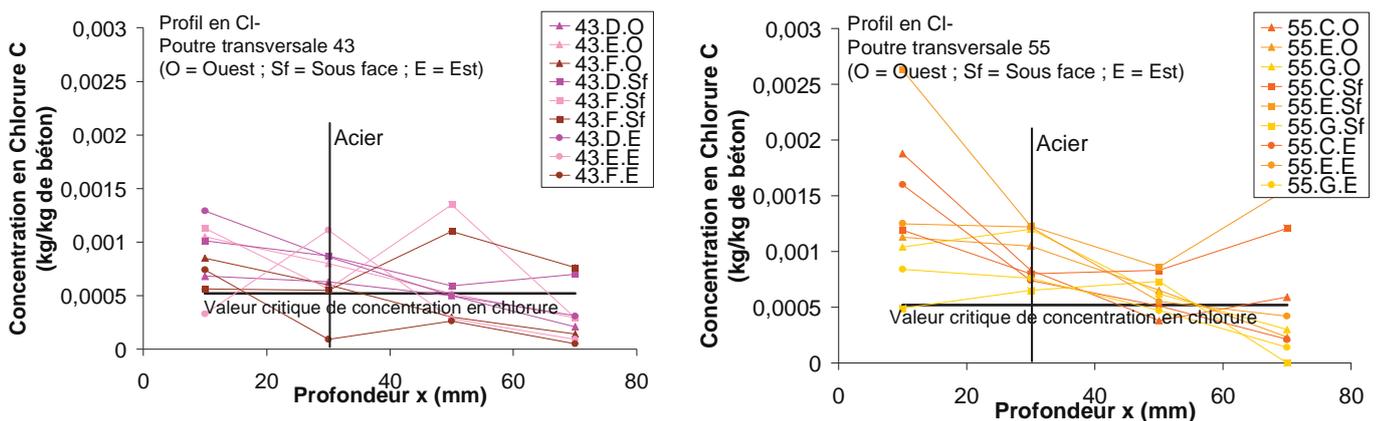


Figure 3. Evolution de la concentration en chlorure en fonction de la profondeur pour la poutre 43 et 55.

Il est possible de représenter (figure 3) l'évolution de la concentration en ions chlorure pour la zone 2 et 3. Une comparaison croisée de ces profils avec la concentration critique en chlorure et la position du premier lit d'armature permet de conclure que presque tous les aciers présentent un risque fort de corrosion, même si celle-ci n'est pas visible en surface. Rappelons que la corrosion s'amorce au droit des armatures lorsque la concentration en ions chlorure atteint une valeur de 0,06% (kg/kg de béton) : valeur de la norme AFNOR P18-325. Ces profils sont ensuite exploités en utilisant la seconde loi de Fick. Théoriquement cette loi n'est adaptée que dans le cas où le béton est constamment saturé d'eau [Breyse et Abraham, 2005]. Toutefois, de part la simplicité de la loi, il arrive qu'elle soit utilisée même

avec nos conditions limites (milieu non saturé). On retrouve d'ailleurs des exemples dans la littérature [Wood, 1997 ; Gaal et al, 2003].

Les coefficients de diffusion et les concentrations en surface sont obtenus en calant courbes expérimentales et équation 1. Celle-ci correspond à la résolution de la seconde loi de Fick.

$$c(x,t) = c_0 + (c_s - c_0) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{\text{eff}} t}} \right) \quad [1]$$

avec :

- $c(x,t)$: la concentration en ions chlorure à la profondeur x et à l'instant t ;
- c_0 : la concentration initiale en ions chlorure ;
- c_s : la concentration en surface en ions chlorure ;
- D_{eff} : le coefficient de diffusion apparent (m^2/s).

Nous représentons, sous forme d'histogramme (figure 4) les résultats obtenus pour le coefficient de diffusion apparent et pour la concentration en surface en ions chlorure obtenus à partir de la loi de Fick. Nous ne différencions ni les poutres ni l'orientation du prélèvement.

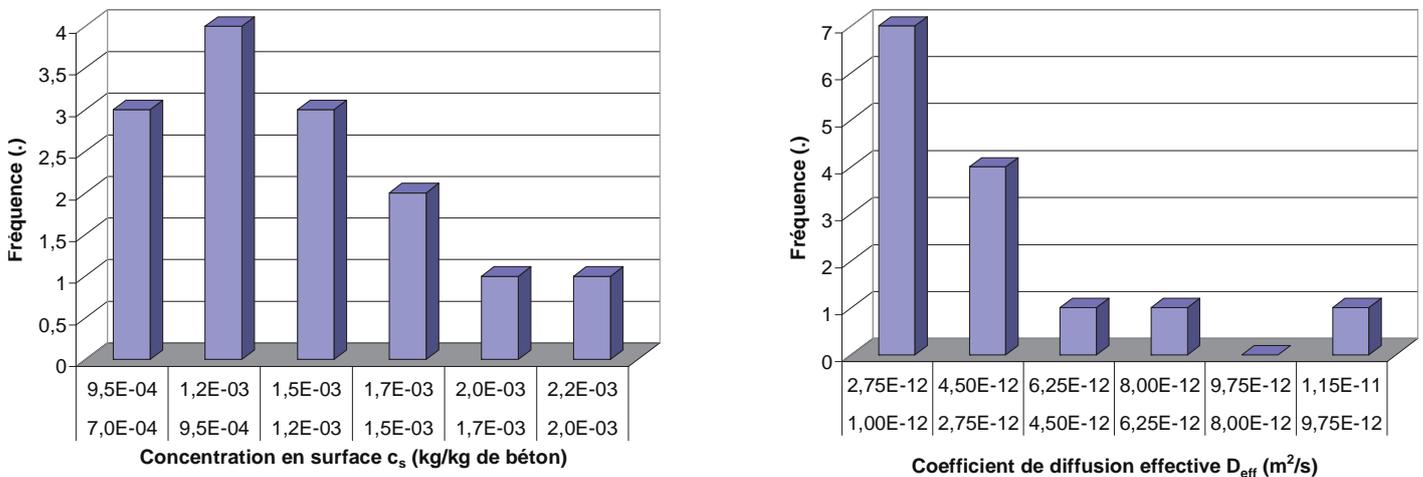


Figure 4. Fréquence de la concentration en surface et du coefficient de diffusion apparent.

L'histogramme obtenu pour le coefficient de diffusion est même complètement dissymétrique. Il décroît à partir d'une valeur moyenne de coefficient qui correspond à celle d'un béton sain : de $1,00 \cdot 10^{-12}$ à $2,75 \cdot 10^{-12}$. Cette décroissance peut s'expliquer physiquement par le « vieillissement » du béton qui se traduit par une augmentation des propriétés de transport. Dans le futur de nouveaux prélèvements vont être effectués afin de compléter notre étude statistique. Avant la détermination

des concentrations en ions chlorure des essais de perméabilité au gaz seront effectués pour quantifier la qualité du béton [Picandet, 2001].

4. Etude statistique

L'estimation des profils de concentration en ions chlorure passe par la prédiction de l'évolution de la concentration en surface et du coefficient de diffusion apparent. Pour cela nous allons mettre en œuvre une étude statistique.

On suppose, dans un premier temps que les phénomènes physiques étudiés sont indépendants et aléatoires. A partir des histogrammes présentés précédemment (figure 4), on en déduit très simplement la densité de probabilité. C'est une fonction non négative comprise entre 0 et 1 (en effectuant le rapport de l'effectif pour une classe sur l'effectif total) représentée par la courbe enveloppe des histogrammes des fréquences. La fonction de répartition est alors la fonction obtenue en calculant l'intégrale de la fonction de densité de probabilité. Un tirage aléatoire, de 20 valeurs par exemple, entre 0 et 1 permet à partir des fonctions de répartition d'avoir des valeurs aléatoires de concentrations en surface et de coefficients de diffusion. En intégrant ces valeurs de c_s et D_{eff} dans la loi de Fick (équation 1) il est possible pour une profondeur donnée et un temps donné de tracer le nuage de point de la concentration à une profondeur donnée. Sachant que nous avons 20 valeurs pour c_s et D_{eff} à chaque profondeur correspondent 400 valeurs de concentration. Nous allons dans un premier temps comparer les résultats obtenus avec les résultats expérimentaux (pour $t = 34$ ans).

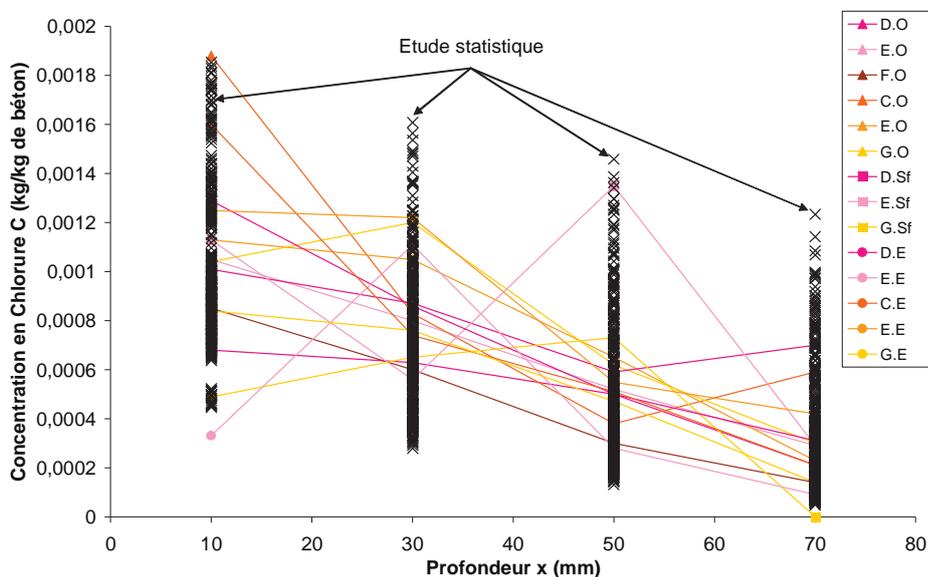


Figure 5. Comparaison des concentrations en chlorure expérimentales et déduites de l'étude statistique.

La bonne corrélation entre les valeurs expérimentales et déduites de l'étude statistique (figure 5) permet de valider cette dernière ainsi que les fonctions de répartition choisies. Souhaitant prédire l'évolution de la concentration au cours du temps, nous allons regarder l'effet de ce paramètre sur la concentration. On

présentera (figure 6) pour chaque profondeur l'évolution de la concentration en chlorure en fonction du temps. Pour simplifier la représentation nous ne présentons que la moyenne des valeurs de concentration obtenues à partir de l'étude statistique. L'écart type pour chaque profondeur est compris entre 0,00037 (à 10 mm) et 0,00022 (à 70 mm)

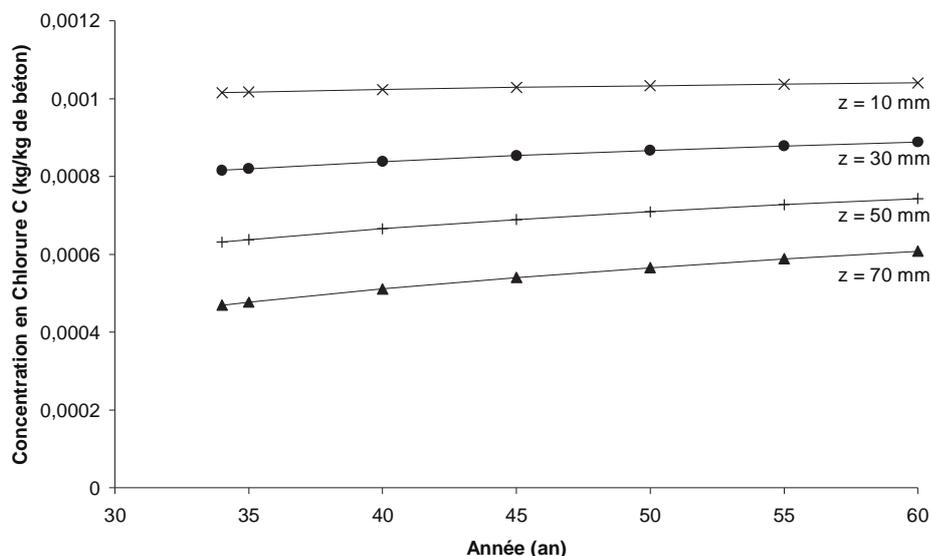


Figure 6. Evolution de la concentration en chlorure en fonction du temps pour différentes profondeurs.

Au regard de la figure 6, il semblerait qu'il y ait une assez faible évolution de la concentration en ions chlorure dans le béton pour les 25 prochaines années. Toutefois il semble que ce ne soit pas l'étude statistique qui puisse être mise en défaut mais plutôt la loi de propagation utilisée.

En effet si l'on étudie la loi de Fick on constate que l'évolution de la concentration en fonction du temps pour une profondeur donnée est importante au début de la vie de l'ouvrage (entre 0 et 15 ans), puis se stabilise.

5. Conclusions

Dans le cadre du projet européen Interreg III B intitulé MEDACHS qui porte sur la durabilité et maintenance des ouvrages nous avons engagé un partenariat avec le Port Autonome de Nantes Saint-Nazaire (P.A.N.S.N.) qui nous a fourni des données d'auscultation d'un quai à 34 ans. Une analyse des concentrations sur les différents éléments du quai a été effectuée et nous a permis de mettre en place une étude statistique pour prédire l'évolution de la concentration en chlorure au cours du temps. La bonne corrélation entre les valeurs expérimentales et déduites de l'étude statistique permet de valider cette dernière ainsi que les fonctions de répartition. Toutefois, il semble que la loi de Fick, de part l'évolution de la concentration en fonction du temps ne nous permet pas d'estimer de façon satisfaisante l'effet du

temps sur la concentration pour cette structure soumise uniquement aux embruns. Pour compléter cette étude, d'autres lois de propagation pourront être testées. De nouveaux prélèvements sur le quai compléteront les données et permettront d'affiner l'étude statistique dans le futur.

Remerciements

Notre équipe remercie le Port Autonome de Nantes Saint-Nazaire pour la mise à disposition des données et l'aide technique apportée au cours de cette étude. Le financement de l'Union Européenne dans le cadre du projet MEDACHS (programme Intereg III B, Espace Atlantique) nous a permis de mener cette étude dans d'excellentes conditions.

Bibliographie

- Breysse D. & Abraham O., « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton », *Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 2005, 555p.
- Djerbi A., Bonnet S., Khelidj A., Baroghel-Bouny V. et Rogel J., « Migrations des ions chlorures dans des bétons fissurés », *Transfert 2006, Lille*, 2006, 10p.
- Gaal G.C.M., van Beek A., Bakker J.D. et Walraven J.C., « Coefficient of diffusion derived from structures exposed to chlorides more than 60 years old », *Life prediction and aging management of concrete structures, 2nd RILEM Workshop, Paris*, 2003, pp. 21-29.
- Kirkpatrick, T.J., Weyers, R.E, Anderson-Cook, C.M. et Sprinkel M.M., « Probabilistic model for the chloride-induced corrosion service life of bridge decks », *Cement and Concrete Research*, vol. 32, 2002, p. 1943-1960.
- Picandet V, Khelidj A, Bastian G, « Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high -performance concrete », *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 1525-1532.
- Truc O, « A new way for determining the chloride diffusion in concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 30, 2000, p. 217-226.
- Wood J.G.M. and Crerar J., « Tay road bridge : Analysis of chloride ingress variability and prediction of long term deterioration », *Construction and Building Materials*, vol. 11, n° 4, 1997, p. 249-254.