

Projet MAREO : Evaluation probabiliste de la dégradation et des stratégies de maintenance durables de structures en béton armé en environnement maritime

Franck Schoefs, Emilio Bastidas-Arteaga, Luc Barbot

▶ **To cite this version:**

Franck Schoefs, Emilio Bastidas-Arteaga, Luc Barbot. Projet MAREO : Evaluation probabiliste de la dégradation et des stratégies de maintenance durables de structures en béton armé en environnement maritime. Essais et Simulations, 2011, 107, pp.24-32. hal-00798826

HAL Id: hal-00798826
https://hal.science/hal-00798826

Submitted on 10 Mar 2013

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.

Projet MAREO : Evaluation probabiliste de la dégradation et des stratégies de maintenance durables de structures en béton armé en environnement maritime

Franck Schoefs*, Emilio Bastidas-Arteaga*, Luc Barbot**

**LUNAM Université/Institut Universitaire Mer et Littoral, GeM, UMR CNRS 6183- Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, BP 92208 - 44322 Nantes cedex, franck.schoefs@univ-nantes.fr*

*** ARCADIS, 17, place Magellan, Le Ponant 2 - Zone Atlantis - BP 10121, 44817 Saint-Herblain Cedex*

RÉSUMÉ. L'optimisation de la maintenance de structures est souvent basée sur des critères économiques. Cet article propose une extension à des critères environnementaux : la génération de déchets et le dégagement de CO_2. On s'appuie sur une problématique traitée dans le cadre du projet MAREO : la maintenance de structures en béton armé placées en ambiance maritime. Trois techniques de réparations sont comparées et leur performance est évaluée d'un point de vue stochastique.

ABSTRACT. Maintenance optimization of infrastructures is generally based on cost functions. This paper suggests an extension of this analysis to environmental criteria: waste generation and CO_2 emissions. This paper takes advantage of the problem studied within the framework MAREO project: maintenance of reinforced concrete structures placed in marine environments. Three repair techniques are compared and their performance is evaluated from a stochastic point of view.

MOTS-CLÉS : corrosion, béton armé, fiabilité, pénétration des chlorures, réparation, maintenance, développement durable, pollution,

KEYWORDS: corrosion, reinforced concrete, reliability, chloride ingress, repair, maintenance, sustainable development, pollution.

1. Introduction

La conception ou la réhabilitation des infrastructures se base principalement sur des études de faisabilité techniques et économiques. Néanmoins les nouvelles tendances de conception et de maintenance s'orientent progressivement vers le développent durable avec lequel nous cherchons des projets économiquement viables avec les caractéristiques suivantes (Daigle *et al.,* 2006) :

– la réduction de l'impact environnemental ;

– l'optimisation du management des ressources naturelles ; et

– la diminution de la génération des déchets.

De plus, cette philosophie de conception devra considérer toutes les étapes de la durée de vie de la structure : construction, maintenance, réparation, réhabilitation, remplacement et élimination de la structure à la fin de la durée de vie. Plusieurs types de coûts sont présents pendant la durée de vie de la structure. Ces coûts sont : les coûts du propriétaire, les coûts de l'usager et les coûts environnementaux. Avec les méthodes actuelles on cherche à minimiser les deux premiers. Toutefois, comme les effets du réchauffement climatique deviennent de plus en plus importants, la minimisation des coûts environnementaux tend à avoir un rôle également prépondérant.

Ce travail est dédié à l'évaluation de la soutenabilité des stratégies de maintenance ou de réparation appliquées aux structures en béton armée exposées à des chlorures. Les points de vue économiques, opérationnels et environnementaux sont considérés. Les stratégies de maintenance ou de réparation sont destinées à assurer l'efficacité opérationnelle et la sûreté de fonctionnement pendant la durée d'opération ou à élargir la durée de vie de la structure. Dans le cadre du projet FUI

(2007-2010) MAREO (MAintenance et REparation des Ouvrages littoraux en béton : optimisation par analyse de risque), du pôle de compétitivité Génie Civil Eco-construction (www.pole-geniecivil-ecoconstruction.fr), deux stratégies de maintenance et de réparation sont étudiées: (1) l'application de peinture sur la surface du béton qui empêche l'entrée des ions chlorure et (2) la reconstruction de l'enrobage contaminé avec de nouveau béton. Ces stratégies ont été conçues pour augmenter le temps à l'issu duquel la concentration des ions chlorure au niveau de l'enrobage atteint un niveau seuil afin d'éviter ou d'arrêter l'initiation de la corrosion. La comparaison entre les stratégies de maintenance sur la base des coûts environnementaux inclut : la consommation de l'énergie et des matériaux, les émissions de dioxyde de carbone et la production des déchets. Le travail présenté ici s'appuie sur le point (2) uniquement. Trois techniques de réparation sont comparées : projection par voie humide, par voie sèche et coffrage.

La conception d'une structure qui intègre ces tendances doit s'appuyer sur une modélisation appropriée de tous les phénomènes auxquels la structure est soumise pendant sa durée de vie (dégradation de la résistance, inspections, interventions de maintenance, etc.). En conditions opérationnelles, les structures subissent l'effet d'actions d'origine environnementale, opérationnelle et humaine qui affectent leur performance. Ce travail cherche à intégrer les actions d'origine environnementale, en particulier, l'entrée des ions chlorure dans le béton, son interaction avec la température et l'humidité et avec les interventions de maintenance et de réparation (Bastidas *et al.,* 2011). La corrosion des armatures induite par l'entrée des ions chlorure est un problème important pour les structures en béton armé qui sont situées dans des zones côtières ou sous l'action de sels de déverglaçage. A la fin de la construction, à cause de l'importante alcalinité du béton, une couche mince de produits de corrosion protège les armatures. Cependant, la corrosion est initiée lorsque la concentration de chlorures au niveau de l'enrobage atteint une valeur seuil détruisant cette couche protectrice. Les principaux mécanismes pour lesquels la corrosion affecte la performance (résistance) des structures sont : la perte de section des armatures, la réduction de l'adhérence acier-béton et la fissuration du béton.

Le modèle de dégradation est couplé à des méthodes probabilistes pour considérer l'ensemble des aléas présents dans le problème. On considère trois sources d'aléas et d'incertitudes : les propriétés du matériau, le modèle et ses paramètres et les actions environnementales. Autrement dit, la prédiction de la durée de vie des structures est ici basée sur des modèles probabilistes et des modèles mécaniques étendus qui prennent en compte l'interaction entre plusieurs processus de dégradation de la résistance.

Les objectifs principaux de cet article sont :

1. de coupler un modèle complet d'entrée des ions chlorure dans le béton avec des stratégies de maintenance et de réparation ;
2. de placer le problème dans un cadre probabiliste ;
3. de comparer d'un point de vue pratique et environnemental les stratégies de maintenance étudiées.

L'originalité de ce travail réside dans la modélisation réaliste (stochastique) des actions environnementales (température, humidité et concentration des ions chlorure à la surface) couplé à des modèles mécaniques d'entrée des ions chlorure et des stratégies de maintenance, et situé dans un cadre de développement durable. Avec cette contribution nous fournissons des outils d'aide à la décision permettant de choisir la méthode de réparation avec un faible impact environnemental. Suite à la description de la problématique générale, on présente les produits sélectionnés, le modèle probabiliste de dégradation et, enfin, les résultats en termes d'impact environnemental sous les angles de la génération de déchets et de l'émission de CO_2. La pertinence de la modélisation est illustrée par la capacité du modèle à rendre compte de la propagation de chlorures à partir de l'intérieur lorsque la purge n'est pas complète.

2. Description des enjeux de la maintenance portuaire et de la problématique scientifique

80% des échanges commerciaux, une économie de pêche et une offre de loisir (plaisance), une situation stratégique pour la défense européenne : les infrastructures portuaires françaises jouent un rôle capital. Toutefois, 60% d'entre elles ont plus de 50 ans (Boero et al. 2009a et 2009b). Ce

vieillissement fait émerger des préoccupations majeures : quel est l'état réel des ouvrages ? faut-il déconstruire ou réhabiliter ? quelle sera la tenue dans le temps des réparations ?

Pour répondre à ces questions qui engagent des enjeux touristiques, économiques, de défense et environnementaux, aucune norme ni étude fiable ne guide le choix entre de multiples possibilités techniques.

Incubé au sein du PGCE sous l'impulsion du GeM et labellisé par le GiS MRGenCi, le projet MAREO a rapidement convaincu un large éventail d'acteurs : entreprises d'ingénierie et de construction, maîtres d'ouvrage, services de l'État, centres de recherche et de formation. Une synergie qui témoigne d'attentes fortes en matière d'acquisition de connaissances pour enclencher des programmes de maintenance et réparations d'ouvrages portuaires.

Les enjeux sont particulièrement aigus en zone de marnage où se concentrent une grande partie des poutres en béton armé sur lesquelles se concentre cet article : difficulté de modélisation de pénétration des chlorures, difficulté d'inspection et difficulté de mise en œuvre des réparations.

3. Présentation des produits sélectionnés

Dans cet article on se limite à la purge de béton « pollué » par les ions chlorure et à la reconstitution d'une épaisseur l'enrobage. Les données utilisées ici pour le cas d'étude reposent sur les premières tendances et résultats de ce projet. Des poutres ont été réparées dans des situations reproduisant des conditions opérationnelles selon des procédures usuelles (Aury, 2009). Ces corps d'épreuve proviennent de la démolition en 2006 d'une estacade en béton armé à Lorient, au port de pêche de Keroman (figure 1). La construction de l'estacade date de 1927, ce qui implique des bétons à réparer âgés de plus de 80 ans. La technique de démolition utilisée dans tous les cas a été l'hydrodémolition et quatre techniques différentes ont été testées pour la reconstruction (Figure 2):

1. projection de béton par voie sèche ;
2. projection de mortier par voie humide ;
3. traitement par béton coffré et
4. mise en œuvre manuelle de mortier.

Les travaux ont été réalisés par les entreprises ETPO et Semen TP sur le site Semen TP de Coueron (Aury, 2009,Vilvoisin et al., 2009).



Figure 1. *Corps d'épreuves utilisés dans le projet MAREO.*

Les critères de sélection des techniques et produits pour ce projet sont les suivants:

– Sélection de produits de composition similaire afin de privilégier la comparaison de techniques et de faciliter la calibration de techniques de contrôles non-destructifs.

– Application des techniques pour des réparations d'envergures (outre ou quai) ; les réparations locales (type « patch ») ne rentrent donc pas dans le périmètre de l'étude.

– Réparations localisées dans des zones d'embruns ou de marnage (poutres et pieux de quais) nécessitant des durées de prise particulières et des accès difficiles.


a) Poutre après hydrodémolition


b) Projection mortier voie humide


c) Béton coffré

Figure 2. *Phases de préparation et réparation par les techniques sélectionnées.*

Le tableau 1 récapitule les principales caractéristiques des techniques sélectionnées. Les critères de sélection des techniques et produits pour ce projet sont les suivants:

Caractéristique	Produit 1 / projection - humide	Produit 2 / projection - sèche	Produit 3 / béton coffré
Résistance initiale	20 MPa à 24 heures	11 MPa à 3 heures	4 MPa à 3 heures
Epaisseur par passe	Jusqu'à 50 mm	Jusqu'à 100 mm	Jusqu'à 100 mm
Prise	Rapide	Rapide	Rapide
Adhérence	Excellente	Excellente	Excellente

Tableau 1. *Principales caractéristiques des produits sélectionnés.*

Après mise en œuvre, un retour d'expérience "chantier" a immédiatement été formalisé (Vilvoisin *et al.*, 2009). Il a conduit à une comparaison selon plusieurs critères présentés dans le tableau 2 : coût des produits (référence 2009), exigence de personnel, génération de déchets et finition (pour peinture éventuelle). La génération de déchets lors de la mise en œuvre est négligeable pour la projection par voie humide et la qualité de finition est correcte et peut être améliorée par talochage. Cependant le produit utilisé pour cette réparation est le plus onéreux et exige un plus grand nombre de personnels ; le matériel doit par ailleurs être nettoyé plusieurs fois par demi-journée et des fissures de retrait peuvent être observées après 2 ou 3 jours. Bien que les déchets de produit issus de la technique par voie sèche soient les plus importants, ils sont faciles à nettoyer si le platelage est bien confiné. Toutefois, en site maritime, les rebonds peuvent être importants et ce confinement difficile à obtenir. Enfin, cette technique implique l'utilisation d'un produit prêt à l'emploi ce qui est intéressant pour les opérations de grande envergure. Par son extrême fluidité (aucun besoin de vibration pour compacter le béton) et sa grande ouvrabilité, le béton coffré conduit à la meilleure finition. Son utilisation est toutefois limitée aux sites où ce coffrage peut être installé.

Critère	Produit 1 / projection- humide	Produit 2 / projection - sèche	Produit 3 / béton coffré
Coût du produit	17€ / 25 kg	7€ / 25 kg	5€ / 35 kg
Personnel	5 personnes	3 personnes	2 personnes
Déchets	non significatifs <5%	important > 30%	non significatifs <5%
Finition	Satisfaisante	rugueuse	très satisfaisante

Tableau 2. *Comparaison des différentes réparations.*

4. Modélisation probabiliste de la pénétration des ions chlorure après réparation

4.1. *Pénétration des ions chlorure dans le béton*

La pénétration des ions chlorure dans le béton est contrôlée par une interaction complexe entre des mécanismes physiques et chimiques qui ont souvent été simplifiées par des problèmes gouvernés uniquement par le phénomène de diffusion (seconde loi de Fick). De plus, la plupart des

études utilisent une solution simplifiée de la loi de Fick qui estime la concentration en ions chlorure en un point et à une date donnés à partir de la fonction d'erreur complémentaire (Tuutti, 1982). Cette approche classique de la diffusion considère le coefficient de diffusion apparent comme constant en temps et homogène en espace, suppose que la concentration en ions chlorure dans l'environnement est constant et que le béton est saturé. Cette approche simplifiée comporte donc plusieurs limites comme la prise en compte du phénomène de convection, important en environnement non-saturé (embruns, marnage). Dans le prolongement des travaux de Saetta *et al*. (1993) et de Martín-Pérez *et al*. (2001), Bastidas-Arteaga *et al* (2011) ont présenté un modèle complète qui considère l'interaction entre trois phénomènes physiques: (i) pénétration des ions chlorure, (ii) diffusion de l'humidité et (iii) transfert thermique. Le phénomène couplé est décrit par un ensemble d'équations aux dérivées partielles qui est résolu en mixant des méthodes aux différences et aux éléments finis. Cette approche prend en compte:

– la capacité de fixation des ions chlorure (i.e. l'interaction entre les ions chlorure et les produits d'hydratation de la pate de ciment);

– la variabilité en temps et l'influence de la température, de l'humidité et de la concentration en ions chlorure dans l'environnement ;

– la modification (diminution) de la diffusivité des ions chlorure du béton avec le vieillissement ; et

– le flux d'ions chlorure en milieu on saturé.

Dans cet article, nous exploiterons ce modèle mais ne détaillons pas sa formulation.

4.2. *Probabilité d'initiation de la corrosion*

Le temps d'initiation de la corrosion, t_{ini}, se calcule généralement comme le moment où la concentration en ions chlorure à une profondeur égale à l'épaisseur d'enrobage c_t est supérieure à une valeur limite C_{th}. Pour cet évènement, la fonction d'état limite devient :

$$g(\underline{x},t) = C_{th}(\underline{x}) - C_{tc}(\underline{x},t,c_t) \qquad [1]$$

où $\underline{x}$ est le vecteur des variables aléatoires de base et $C_{tc}(\underline{x};\ t;\ c_t)$ est la concentration totale en ions chlorure à la profondeur c_t et au temps t, obtenue par résolution du système d'équations gouvernant la pénétration des ions chlorure (voir 4.1). L'évaluation de la fonction d'état limite [1] conduit à la probabilité d'initiation de la corrosion définie par [2].

$$p_{corr}(t) = \mathrm{P}\left[g(\underline{x},t) \le 0 \mid t\right] \qquad [2]$$

Etant donné les non-linéarités et la complexité du système d'équations aux dérivées partielles, les méthodes de simulations semblent les plus appropriées pour résoudre le problème. Pour réduire les temps de calcul, cette étude combine les simulations par la méthode de Monte Carlo et l'échantillonnage par Hypercube Latin.

4.3. *Modèles probabilistes pour les variables aléatoires de base*

Les incertitudes présentes dans le problème sont modélisées par des variables aléatoires qui représentent à la fois les paramètres du modèle et les propriétés du matériau. Des processus stochastiques modélisent les actions environnementales comme la température, l'humidité et la concentration en ions chlorure dans l'environnement.

Les caractéristiques de ce modèle probabiliste sont présentées dans le tableau 3. Pour la pénétration des ions chlorure, la moyenne du coefficient de référence de diffusion des ions chlorure, $D_{c,ref}$, est attribuée selon les valeurs expérimentales présentées par (Saetta *et al.,* 1993) pour un rapport eau-ciment, w/c = 0.5. Le modèle probabiliste et le coefficient de variance (COV) de $D_{c,ref}$ suivent tous deux les préconisations de (Val *et al.,* 2008; Duracrete, 2000). En définissant C_{th} comme la teneur en ions chlorure critique à laquelle de l'acier est dépassivée et la corrosion est initiée, les caractéristiques probabilistes de C_{th} sont déterminées à partir des valeurs publiées (Duracrete, 2000). Selon (Vu *et al.,* 2000) et (Duracrete, 2000), l'épaisseur d'enrobage, c_t, suit une distribution normale tronquée par valeurs inférieures avec la moyenne et le COV indiqués dans le

tableau 3. Selon des études expérimentales (Page *et al.*, 1981), on suppose que l'énergie d'activation U_c du processus de diffusion des ions chlorure suit une distribution beta dont les paramètres sont donnés dans le tableau 3. Le facteur de réduction de l'âge m suit aussi une distribution beta (Val, 2006).

Pour le processus de diffusion de l'humidité, le coefficient de référence de la diffusion $D_{h,ref}$ suit une distribution log-normale de moyenne et COV définis à partir de (Saetta *et al.*, 1993; Val *et al.*, 2008; Duracrete, 2000). Les paramètres α_0 (représentant le quotient $D_{h,min}/D_{h,max}$) et n (caractérisant l'étendue du saut en D_h) suivent une distribution beta dont les paramètres proviennent des études expérimentales de (Bažant Z. *et al.*, 1971 et 1972).

Pour le transfert de chaleur, la conductivité thermique du béton λ et la capacité thermique spécifique du béton c_q suivent des distributions beta de moyenne proposée par (Neville, 1981) et varient ente des limites établies expérimentalement. En considérant que la densité type ρ_c du béton classique représente la moyenne de cette quantité, on suppose que cette variable est distribuée selon une loi normale de COV de 0.05.

Problème physique	Var.	Unité	Distribution	Moy.	COV
Pénétrat. chlorures	$D_{c,ref}$	m^2/s	log-normale	$3 \cdot 10^{-11}$	0.20
	C_{th}	wt% cim	normale	0.48	0.30
	c_t	mm	normale (tr. 10mm)	50	0.25
	U_c	kJ/mol	beta sur [32;44.6]	41.8	0.10
	M		beta sur [0;1]	0.15	0.30
Diffusion humidité	$D_{h,ref}$	m^2/s	log-normale	$3 \cdot 10^{-10}$	0.20
	α_0		beta sur [0.025;0.1]	0.05	0.20
	N		beta sur [6;16]	11	0.10
Transfert chaleur	λ	W/(m°C)	beta sur [1.4;3.6]	2.5	0.20
	c_q	J/(kg°C)	beta sur [840;1170]	1000	0.10
	ρ_c	kg/m^3	normale	2400	0.05

Tableau 3. *Modèles probabilistes pour les variables du problème.*

Après la première réparation, le coefficient de référence pour la diffusion des chlorures $D_{c,ref}$ dépend des caractéristiques du matériau de réparation. Les résultats expérimentaux ne sont pas encore disponibles. Au vu du premier retour d'expérience sur la mise en œuvre et sur du jugement d'expert, on propose les valeurs suivantes pour la moyenne :

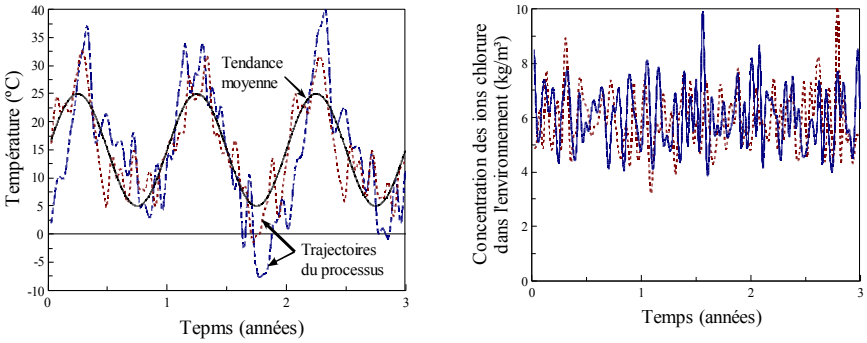
– Produit 1: $D_{c,ref} = 3.0\ 10^{-11}\ m^2/s$
– Produit 2: $D_{c,ref} = 4.1\ 10^{-11}\ m^2/s$
– Produit 3: $D_{c,ref} = 5.2\ 10^{-11}\ m^2/s$

Afin de ne pas multiplier les hypothèses et études de sensibilité, on attribue un COV identique de 0.2 à tous les modèles probabilistes de ce coefficient.

4.4. *Détermination de la date de réparation*

La probabilité d'initiation de la corrosion est évaluée sur la base des modèles probabilistes présentées dans le tableau 3. L'influence des conditions climatiques sur la pénétration des chlorures est considérée en supposant que la structure est placée dans un climat océanique avec une température variant de 5 à 25 ºC, avec une humidité relative entre 0.6 et 0.8. La nature stochastique des conditions climatiques et de la concentration en chlorures dans l'environnement est intégrée au problème en utilisant la méthodologie présentée dans (Bastidas-Arteaga *et al.*, 2011). La figure 5 présente des réalisations (trajectoires du processus) de la température et de la concentration en ions chlorure dans l'environnement. Pour modéliser la température, une perturbation stochastique est ajoutée à une tendance déterministe sinusoïdale des variations saisonnières, en utilisant une discrétisation de Karhunen-Loève (Ghanem *et al.*, 1991). La discrétisation tronquée implantée dans ce calcul inclut 30 termes et la longueur de corrélation est de 0.1 an. Comme plusieurs études

indiquent que la concentration en ions chlorure de l'environnement C_{env} suit une distribution log-normale (Vu *et al.*, 2000; Duracrete, 2000), notre travail adopte un processus stochastique généré par des nombres indépendants suivant une loi log-normale (bruit log-normal). La moyenne est de 6 kg/m^3 et correspond à la limite entre les niveaux hauts et sévères d'environnement corrosif (Weyers, 1994). Un coefficient de variation de 0.2 est considéré.



a) Température

b) Concentration en chlorures dans l'environnement

Figure 3. *Deux trajectoires de la température et de la concentration environnementale.*

Les autres hypothèses sont :

– l'isotherme de Langmuir est utilisée pour déterminer la fixation des chlorures; les coefficients sont α_L=0.1185 et β_L=0.09;

– les dates de réparation sont déterminées avec l'hypothèse d'une pénétration d'ions chlorure suivant une dimension;

– la première réparation est réalisée après 15 ans d'exposition pour toutes les techniques de réparation et

– les variables aléatoires sont indépendantes et ne variant pas spatialement.

Par simulation, on obtient l'évolution des probabilités d'initiation de la corrosion pour les différents matériaux sélectionnés. A partir de ces résultats, on déduit la date de réparation en la définissant comme la date à laquelle la probabilité d'initiation de la corrosion est de 95% c.a.d $p_{corr}(t)$ =0.95. Alors les dates de réparation t_r pour chacun des matériaux valent: produit 1: t_r =30 ans, produit 2: t_r =20 ans et produit 3: t_r =15 ans.

Le tableau 4 présente la synthèse des activités de réparation. Pour chaque alternative, la première réparation est réalisée à 15 ans et on analyse plusieurs durées de vie du projet : T = 50, T = 75 et T = 100 ans. Plus le matériau est performant (projection voie humide) plus le nombre de réparation est réduit.

Durée d'exploitation (années)	Projection par voie humide		Projection par voie sèche		Béton coffré	
	Nb de réparat	Dates réparat°	Nb de réparat°	Dates réparat°	Nb de réparat°	Dates réparat°
T= 50	22	15, 45	2	15, 35	3	15, 30, 45
T= 75	22	15, 45	3	15, 35, 55	4	15, 30, 45, 60
T= 100	33	15, 45, 75	5	15, 35, 55, 75, 95	6	15, 30, 45, 60, 75, 90

Tableau 4. *Synthèse des activités de réparation.*

4.5. *Pertinence du modèle*

Il n'existe malheureusement pas de banque de données actuellement en essais naturels en disposant de toutes les informations pour valider ou calibrer de tels modèles. Toutefois, la capacité du modèle à représenter des profils réels atteste de sa pertinence. De plus, il est en mesure de visualiser, pour la

première fois, des informations jamais étudiées : il s'agit de la pénétration de chlorures de l'intérieur vers l'extérieur. En effet, lorsque l'on purge du béton, on est en général limité à quelques centimètres et notamment un ou deux centimètres derrière l'armature. Dans le cas de béton fortement pollué, la diffusion des chlorures piégés après réparation est possible. C'est ce qui a été illustré dans (Schoefs *et al*., 2010). En la figure 4, on représente l'évolution de la quantité de chlorures à trois profondeurs (3, 5 et 7 cm) pour une réparation systématique tous les 12 ans avec le produit 2, consistant à l'enlèvement de 5 cm de béton. Des évolutions déterministes sinusoïdales de la température et de l'humidité et une concentration environnementale constante sont considérées.

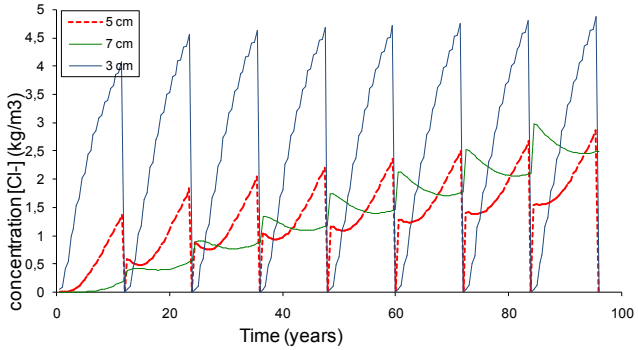


Figure 4. *Profils de chlorures à 3, 5 et 7 cm pour une réparation systématique tous les 12 ans.*

On observe qu'à 3 cm et à 5 cm la quantité de chlorures est ramenée à 0 tous les 12 ans. A 5 cm l'augmentation est de plus en plus importante après réparation. Ceci s'explique par « l'alimentation » interne en chlorures provenant du béton qui n'a pas été enlevé. Ce phénomène est plus important à 7 cm, où la quantité de chlorures décroît durant chacune de ces périodes de 12 ans après 36 ans : les chlorures se déplacent de cette zone vers l'intérieur et l'extérieur. Toutefois, cette zone subit une forte augmentation des chlorures dans la première année après la réparation. Ceci provient de la forte diffusion de chlorures de la zone 5-7 cm vers cette zone avant retournement de situation. On constate un effet de stockage-déstockage. Ce travail prospectif n'est pas pris en compte dans cet article qui admet que la réparation est suffisamment préventive pour que la quantité de chlorures restante soit négligeable.

5. Analyse technico-écologique.

La comparaison des techniques utilisées est réalisée selon deux critères : (i) la génération de déchets, (ii) le dégagement de CO_2.

5.1. *Cas test.*

Afin d'illustrer cette problématique, nous avons sélectionné un terminal-agro-alimentaire (figure 5a) situé dans l'estuaire de la Loire au sein du Port Atlantique de Nantes St Nazaire (PANSN), quatrième port commercial français. Ce quai a été construit en 1971. Il est constitué de poutres en coffrage béton armé perdu, de dalles préfabriquées et repose sur des pieux métalliques.

Face à de sérieux problèmes de corrosion des poutres en béton armé (figure 5), le PANSN a décidé de procéder à une campagne de réparation d'ampleur. La figure 6 présente les caractéristiques dimensionnelles essentielles de ce quai. L'objet de cet article est de comparer les techniques de réparation d'un point de vue performantiel au sens large : critère d'efficacité technique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre en ce concentrant sur le CO_2. Il s'agit là d'une étude préliminaire. Des travaux ultérieurs intégreront d'autres critères environnementaux (NOx, dangerosité pour la santé, …).



a) Vue générale b) Etat de corrosion

Figure 5. *Terminal agro alimentaire étudié*

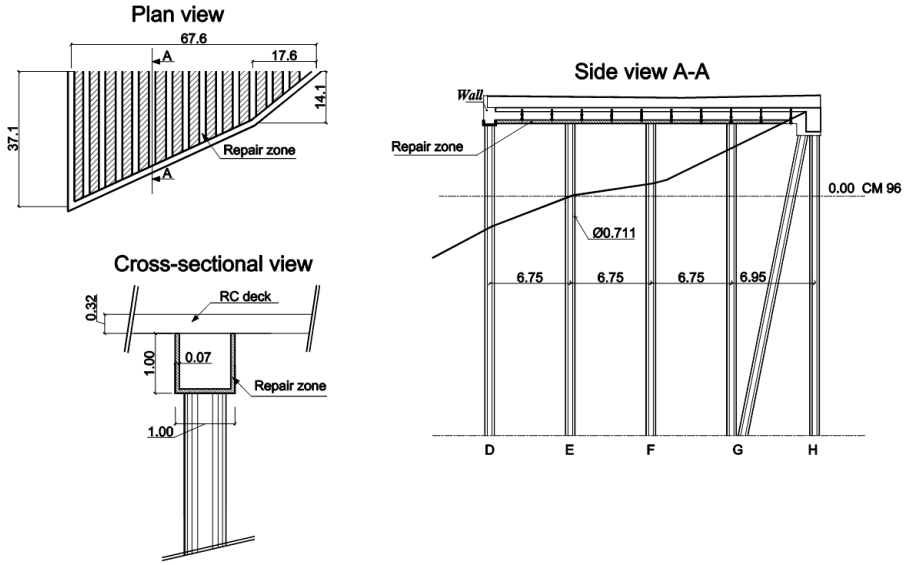
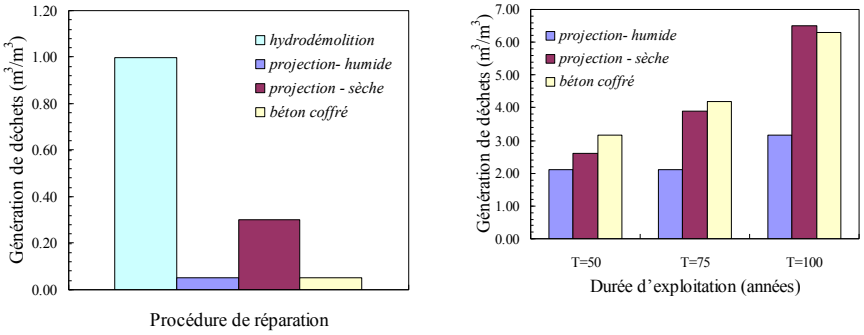


Figure 6. *Plan et dimensions du quai étudié.*

5.2. *Génération de déchets.*

La génération de déchets comporte deux sources : le matériau 'pollué' extrait et le matériau perdu lors de la réparation. On estime alors simplement les volumes correspondants. On présente en la figure 7a une comparaison de la production de déchets pour une seule réparation, exprimée en m^3 de déchets par m^3 de béton réparé. Le volume de déchets produits par l'hydrodémolition est considéré égal au volume de béton retiré (1 m^3/ m^3). Pour la reconstitution de l'enrobage, la production de déchets est estimée par retour d'expérience selon le tableau 2.



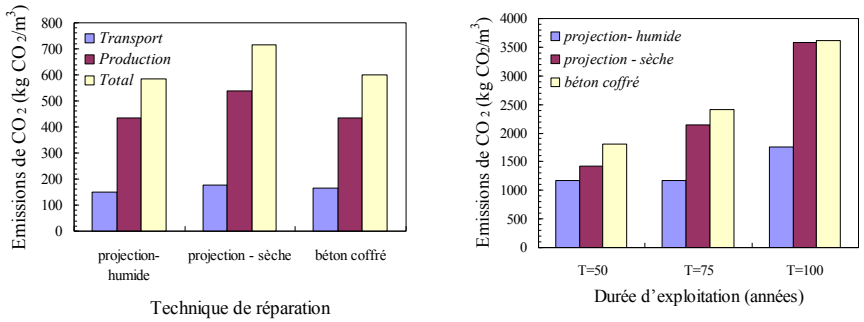
a) déchets pour une réparation b) déchets sur la période d'exploitation

Figure 7. *Déchets générés par les différentes techniques pour des durées d'exploitation différentes*

Même si les déchets sont majoritairement générés par l'hydrodémolition, on constate une contribution importante du matériau perdu lors de la projection par voie sèche. La figure 7b présente les déchets générés pour chaque technique pour chaque durée d'exploitation. On retrouve que le maximum de déchets est obtenu lorsque à la fois le nombre de réparations et la perte de matériau de réparation sont importants (projection voie sèche et béton coffré). De ce point de vue, la projection par voie humide a un effet moins nocif sur l'environnement.

5.3. *Dégagement de CO_2.*

On considère dans cette section deux sources de dégagement de CO_2 : l'émission durant le transport de matériaux, des équipements et des déchets d'une part et le rejet durant la production des produits de réparation. Selon les données de (Norton *et al.*, 1998) on suppose dans cet article que l'émission moyenne de CO_2 pour un camion est de 1700 g/km. Cette estimation suppose aussi que tous les transports de matériaux et de déchets sont réalisés avec un camion de capacité 8 m^3. Les distances d'approvisionnement en matériaux et équipements et de dépôt des déchets sont respectivement de 100 et 150 km. Selon l'International Energy Agency (2007), le niveau moyen de dégagement de CO_2 varie de 0.65 à 0.92 t/t de ciment selon le pays avec une moyenne pondérée de 0.83. En l'absence d'information sur la production des produits utilisés ici on retient cette dernière valeur pour l'étude. La figure 8a présente les émissions de CO_2 par volume de béton réparé (en kg CO_2/m^3) pour une opération de réparation en distinguant les différentes sources.



a) émissions pour une réparation b) émissions sur la durée d'exploitation

Figure 8. *Emissions de CO_2 pour les différentes techniques pour des durées d'exploitation différentes*

Pour toutes les techniques alternatives on remarque que l'émission durant la production représente 75% du total des émissions. Les émissions produites durant la projection par voie humide et le coffrage sont pratiquement identiques tandis que la projection par voie sèche est celle qui produit le plus de CO_2. Ce comportement s'explique par le fait que pour un même volume de produit mis en œuvre cette technique requiert plus de matériaux (30% de perte selon le tableau 2), augmentant par la même les émissions de transport et de production.

La comparaison des émissions de CO_2 pour les différentes stratégies de réparations, couplant durée d'exploitation et technique de réparation, sont présentées en la figure 8b. La projection par voie humide est la moins 'émissive' sur l'ensemble des durées d'exploitation envisagées car elle réduit le nombre d'opérations de réparation. Pour une durée d'exploitation de 100 ans, les émissions sont deux fois moindres qu'avec les autres techniques. De ce point de vue, cette technique est la moins nocive pour des durées d'exploitation élevées.

6. Conclusion.

Cet article propose la prise en compte de critères environnementaux pour la comparaison de stratégies de maintenance de structures. On s'appuie pour cela sur l'exemple des structures lacées

en milieu maritime et sujettes à la corrosion par pénétration des ions chlorure. On intègre un modèle complet, en environnement stochastique de pénétration des chlorures en une dimension pour évaluer la probabilité d'initiation de la corrosion. Trois techniques de réparation sont alors comparées : la projection par voie humide, par voie sèche et le coffrage. On s'appuie sur les premiers résultats du projet MAREO. On introduit alors l'impact environnemental de ces techniques à la fois en termes de génération de déchets et d'émission de CO_2. On montre que selon ces deux critères et quelle que soit la durée d'exploitation (50, 75 ou 100 ans), la technique de projection par voie humide est la moins nocive.

Les perspectives de ce travail résident dans une comparaison complète, notamment par rapport à la solution déconstruction/reconstruction. L'environnement estuarien se prête mal écologiquement à cette solution et une analyse économique pourrait étoffer cette étude. A cette fin, ce travail a été étendu à une analyse multicritères (Bastidas *et al*., 2010).

7. Remerciements.

Les auteurs remercient l'état et la région pays de la Loire pour le soutien financier à ce projet dans le cadre des appels d'offre FUI, ainsi que le Pôle Génie Civil et Eco-construction et le GiS MRGenCi pour avoir labellisé ce projet. Enfin ce projet n'aurait pu se tenir sans l'implication des autres partenaires : IFSTTAR (ex-LCPC), CERIB, CETE de l'Ouest, OXAND, LMDC, GPMNSN, CG44, SEMEN-TP, ETPO.

8. Bibliographie

Aury F., Notes de procédure d'exécution des réparations, Rapport n°3 v 1, projet FUI (2007-2010) MAREO, janvier 2009.

Bastidas-Arteaga E., Chateauneuf A., Sánchez-Silva M., Bressolette P., Schoefs F., « A comprehensive probabilistic model of chloride ingress in unsaturated concrete ». *Engineering Structures*, Vol. 33, p.720–730, 2011.

Bastidas-Arteaga E., Schoefs F., Chateauneuf A., Sánchez-Silva M., Capra B., « Probabilistic evaluation of the sustainability of maintenance strategies for RC structures exposed to chloride ingress ». *International Journal of Engineering Under Uncertainty: Hazards, Assessment and Mitigation (IJEUU:HAM)*, Vol. 2, p. 61-74, 2010.

Bažant Z.P., Najjar L.J., « Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem ». *Cement and Concrete Research*, vol. 1, 1971, p. 461-473.

Bažant Z.P., Najjar L.J., « Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete ». *Materials and Structures*, vol. 5, 1972, p. 3-20.

Boéro J., Schoefs F., Capra B., Rouxel N., « Risk management of French harbour structures. Part 1: Description of built assets», *PARALIA*, Published on line December 21th 2009, Vol. 2, p 6.1-6.11, 2009a.

Boéro J., Schoefs F., Capra B., Rouxel N., «Risk management of French harbour structures. Part 2: Current practices, needs– Experience feedback of owners», *PARALIA*, Published on line December 21th 2009, Vol. 2, pp 6.13-6.24, 2009b.

Daigle L., Lounis Z.A., Life cycle cost analysis of high performance concrete bridges considering their environmental impacts. Institute for Research in Construction. Report No. NRCC-48696 ; 2006.

Duracrete, Statistical quantification of the variables in the limit state functions. The European union, BriteEuRam III, contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347. Report No. BE95-1347/R7, 2000.

Ghanem R.G., Spanos P.D., *Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach*. New York: Springer. 1991.

International Energy Agency, Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions - Energy Indicators. Paris: OECD, 2007.

Martín-Pérez B., Pantazopoulou S.J., Thomas M.D.A., « Numerical solution of mass transport equations in concrete structures ». *Computers and Structures* vol. 79, 2001, p. 1251-1264.

Neville A., *Properties of Concrete*. Harlow, England: Longman Scientific & Technical, 1981.

Norton P., Vertin K., Bailey B., Clark N.N., Lyons D.W., Goguen S., Eberhardt J., « Emissions from trucks using Fischer-Tropsch diesel fuel ». *SAE technical paper series*, 982526 SP 1391, 1998.

Saetta A.V., Scotta R.V., Vitaliani R.V., « Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete ». *ACI Materials Journal*, vol. 90, 1993, p. 441-451.

Schoefs F., Bastidas-Arteaga E., Capra B., « Modelling and sensitivity analysis of maintenance of chloride-contaminated RC structures by cover rebuilding », *Proc. 2nd International Conference on Applications Heritage and Constructions in Coastal and Marine Environment, (MEDACHS'010)*, session Probabilistic Modelling, paper #4, 28-30 April 2010, La Rochelle

Tuutti, K. Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Institute. 1982.

Val D.V., « Service-life performance of RC structures made with supplementary cementitious materials in chloride-contaminated environments ». *In: Proceedings of the international RILEM-JCI seminar on concrete durability and service life planning*, Ein-Bokek. 363-373. Israel, 2006.

Val D.V., Trapper P.A., « Probabilistic evaluation of initiation time of chloride-induced corrosion ». *Reliability Engineering and System Safety*, vol 93, 2008. p. 364-372.

Vilvoisin P., Aury F., Retour d'expérience « Chantier » de l'utilisation des produits de réparation, Rapport n°4 v 1, projet FUI (2007-2010) MAREO, janvier 2009.

Vu K.A.T., Stewart M.G., « Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models ». *Structural Safety*, vol. 22, 2000, p. 313-333.

Weyers R.E., Concrete Bridge Protection and Rehabilitation: Chemical and Physical Techniques - Service Life Estimates. SHRP-S-668, Strategic Highway Research Program, National Research Council. 1994.