



HAL
open science

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

Emilio Bastidas-Arteaga, Franck Schoefs, Alaa Chateauneuf, M. Sanchez-Silva, Bruno Capra

► To cite this version:

Emilio Bastidas-Arteaga, Franck Schoefs, Alaa Chateauneuf, M. Sanchez-Silva, Bruno Capra. Projet MAREO : Evaluation probabiliste des stratégies de maintenance durables de structures en béton armé en environnement maritime. XXVIIe Rencontres Universitaires de Génie Civil : Génie Civil et Développement Durable (AUGC'09), 2009, Saint Malo, France. hal-01008697

HAL Id: hal-01008697

<https://hal.science/hal-01008697>

Submitted on 29 Apr 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.

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

E. Bastidas-Arteaga* — F. Schoefs* — A. Chateauneuf*** —
M. Sánchez-Silva** — B. Capra ******

* *GeM, UMR CNRS 6183- Université de Nantes*
2 rue de la Houssinière, BP 92208 - 44322 Nantes cedex 3
emilio.bastidas@gmail.com — franck.schoefs@univ-nantes.fr

** *Département de Génie Civil – Université de Los Andes*
Carrera 1 E. 19A-40 Edificio Mario Laserna. Bogotá, Colombie
msanchez@uniandes.edu.co

*** *LaMI - Politech' Clermont-Ferrand*
Campus universitaire des Cezeaux BP 206 - 63174 Aubière cedex
alaa.chateauneuf@polytech.univ-bpclermont.fr

**** *OXAND SA*
36 bis avenue F. Roosevelt - 77210 Avon
Bruno.capra@oxand.com

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 CO₂. 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 fiabiliste.

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 CO₂ emission. This paper takes advantage of the MAREO project for the application to

RC structures placed in marine environment. Three repair techniques are compared and their reliability is evaluated from a stochastic modelling.

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

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

1. Introduction

La conception ou la réhabilitation des infrastructures se base principalement sur des études de faisabilité économique. Néanmoins les nouvelles tendances de conception s'orientent progressivement vers le développement 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, des techniques et des matériaux constructifs: 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'utilisateur et les coûts environnementaux. Avec les méthodes actuelles on cherche à minimiser les deux premiers. Les effets du réchauffement climatique devenant de plus en plus importants, la minimisation des coûts environnementaux tend à avoir un rôle également prépondérant.

Afin de concevoir une structure qui intègre ces tendances, il est aussi nécessaire de faire une modélisation appropriée de tous les phénomènes auxquels la structure est soumise pendant sa durée de vie (dégradation de la résistance, interventions de maintenance, réparation etc.). En conditions opérationnelles, les structures sont sous 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.*, 2009a). 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 de la corrosion. Cependant, la corrosion induite par l'entrée des ions chlorure 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 entre le béton et l'acier et la fissuration du béton.

Ce travail est dédié à l'évaluation de la viabilité 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 ce travail, nous considérons deux stratégies de maintenance et de réparation étudiées 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 Ouest : (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 auquel 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.

Afin de prendre en compte l'ensemble des aléas présents dans le problème, le modèle de dégradation est couplé à des méthodes probabilistes pour considérer l'aléa du processus d'entrée des chlorures. On considère trois sources d'aléas et incertitudes dans le problème : les propriétés du matériau, le modèle et ses paramètres et les actions environnementales. Autrement dit, la prédiction de la durée de vie des structures devrait être 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 étendu 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 ; et
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 qui permettant de choisir comment réparer en réduisant l'impact environnemental. Après une

présentation de la problématique générale, on présente les produits sélectionnés, on présente les modèles probabilistes pour le calcul de fiabilité et enfin on présente les résultats en termes d'impact environnemental sous les angles de la génération de déchets et de l'émission de CO₂.

2. Description de la problématique générale

Cet article considère les structures portuaires comme sujet d'application. Ces structures ont la particularité d'être situées en zones sensibles d'un point de vue environnement et de présenter des enjeux économiques souvent majeurs (approvisionnement ou exportation alimentaire, énergétique, ...). Afin d'illustrer cette problématique, nous avons sélectionné un terminal-agro-alimentaire (figure 1a) 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 1b), le PANSN a décidé de procéder à une campagne de réparation d'ampleur. La figure 2 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 CO₂. Il s'agit là d'une étude préliminaire. Des travaux ultérieurs intégreront d'autres critères environnementaux (NO_x, dangerosité pour la santé, ...).



a) Vue générale



b) Etat de corrosion

Figure 1. Terminal agro alimentaire étudié

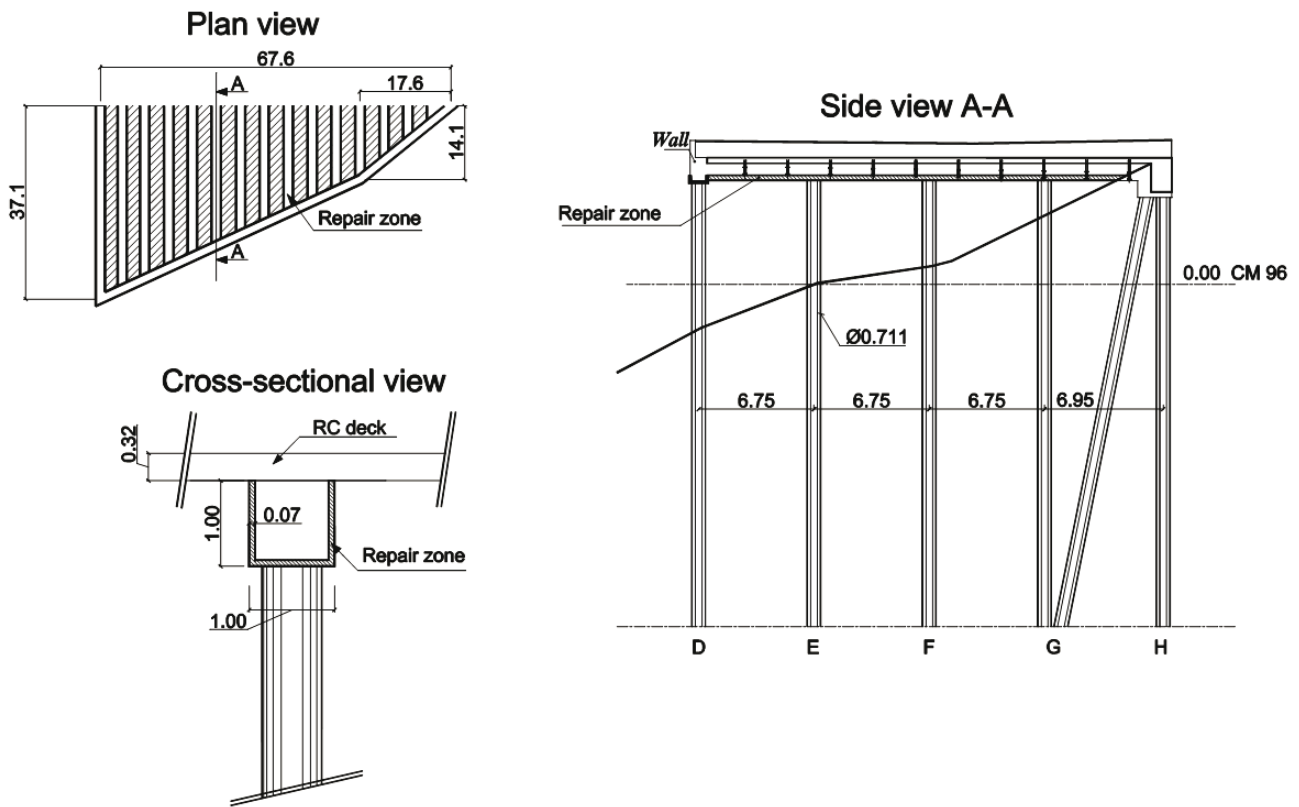


Figure 2. Plan et dimensions du quai étudié.

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. Le projet MAREO –Maintenance et REparation des Ouvrages littoraux en béton: optimisation par analyse de risque 2007-2010 - (MAREO sur www.pole-geniecivil-ouest.fr) a pour objectif d'analyser, d'un point de vue statistique, l'efficacité de réparations en zone de marnage. 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 d'une estacade en béton armé réalisée en 2006 à Lorient, au port de pêche de Keroman (figure 3). 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 :

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 3. *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. Cette condition est aussi importante pour 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 4. *Phases de préparation et réparation par les techniques sélectionnées.*

Le tableau 1 récapitule les principales caractéristiques des produits sélectionnés. 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, 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 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

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 (2009a) ont présenté un modèle étendu 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 nature variable 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 :

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

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].

$$p_{corr}(t) = P[g(\underline{x}, t) \leq 0 | t] \quad [2]$$

Etant donné les non-linéarités et la complexité du système d'équation 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 présentées dans le problème sont modélisées par des variables aléatoires qui représentent à la fois les paramètres du modèle et les propriétés du matériau et 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 entre 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 0.2.

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	0.20

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 du matériau. 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 :

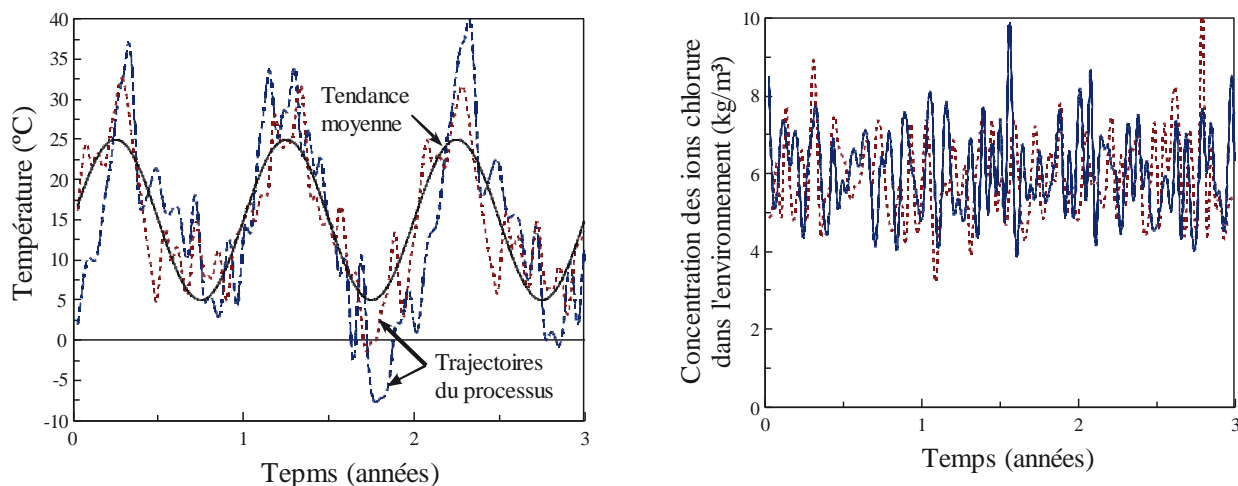
- Produit 1: $D_{c,ref} = 3.0 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$
- Produit 2: $D_{c,ref} = 4.1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$
- Produit 3: $D_{c,ref} = 5.2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

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 °C, 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.*, 2009a). 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

Figure 5. Deux trajectoires de la température et de la concentration environnementale.

Les autres hypothèses sont:

- l'isotherme de Langmuir est utilisée pour déterminer la liaison des chlorures; les coefficients sont $\alpha_L=0.1185$ et $\beta_L=0.09$;
- 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 varient pas spatialement.

L'évolution des probabilités d'initiation de la corrosion pour les différents matériaux sélectionnés sont présentées en la figure 6. La probabilité d'initiation de la corrosion est plus importante à un instant t pour les matériaux ayant une diffusivité plus élevée. 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: $t_r = 30 \text{ yr}$,
- Produit 2: $t_r = 20 \text{ yr}$, et
- Produit 3: $t_r = 15 \text{ yr}$.

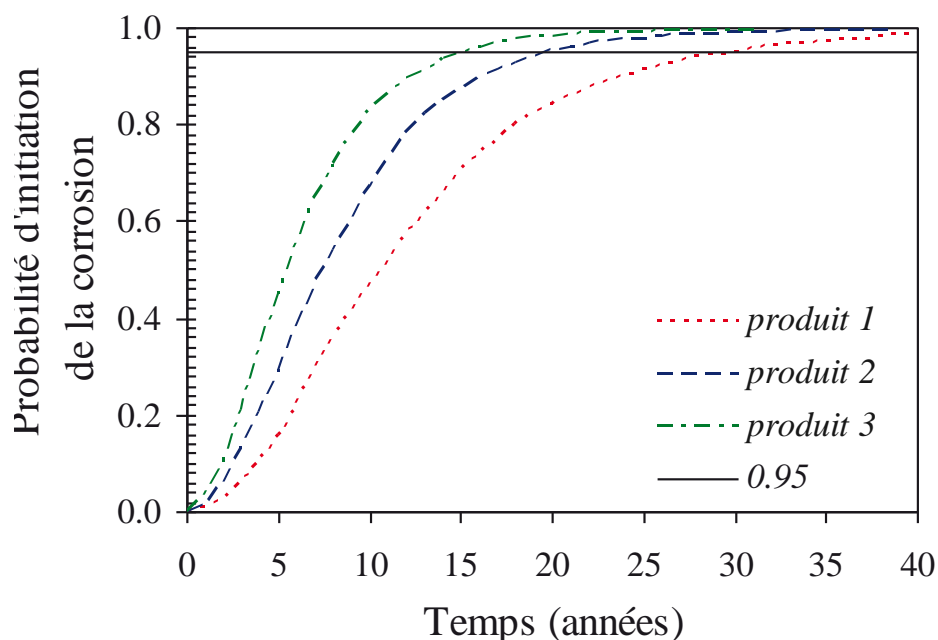


Figure 6. Evolution de la probabilité d'initiation de la corrosion pour les produits sélectionnés.

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 $T = 50$, $T = 75$ 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

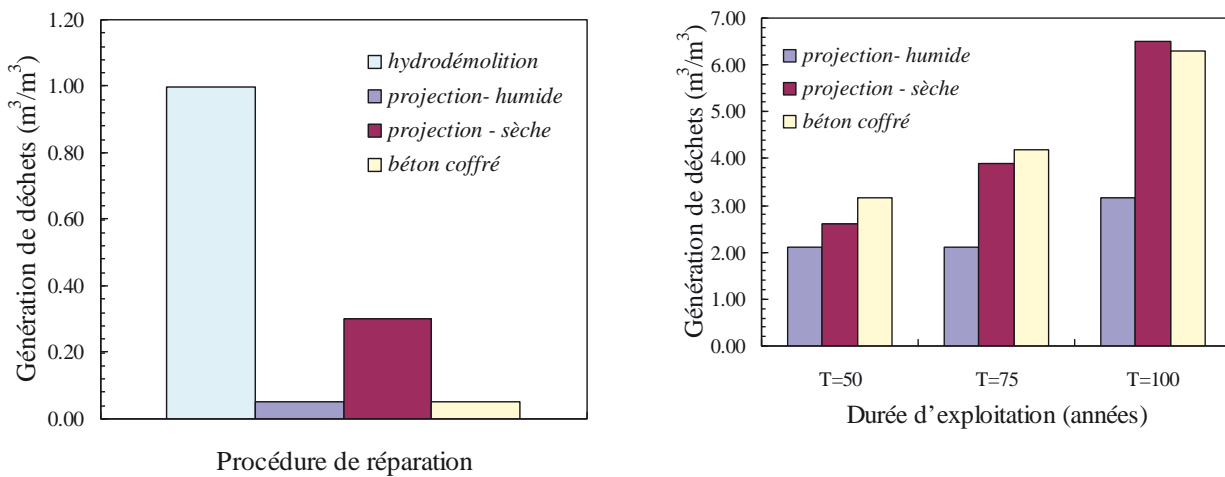
Tableau 4. Synthèse des activités de réparation.

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. 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 ($1 \text{ m}^3/ \text{m}^3$). 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

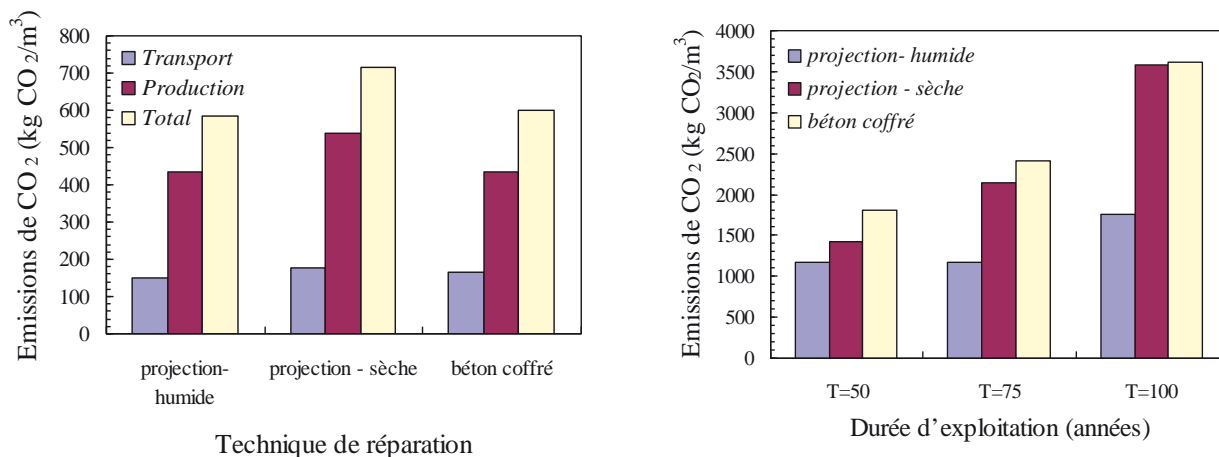
Figure 7. Déchets générés par les différentes techniques pour des durées d'exploitation différentes

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 importantes (projection voie sèche et béton coffré). De ce point de vue la projection par voie humide a un effet moins nocif sur l'environnement.

5.2. 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 CO₂ pour un camion est de 1700 grammes/km. Cette estimation suppose aussi que tous les transports de matériaux et de déchets sont réalisés avec un camion de capacité 8 m³. Les distances d'approvisionnement en matériaux et équipements, L_p et de dépôt des déchets L_d sont respectivement de 100 et 150 km. Selon l'International Energy Agency (2007), le niveau moyen de dégagement de CO₂ varie de 0.65 à 0.92 tonne par tonne 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 CO₂ par volume de béton réparé (en kg CO₂/m³) 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 CO₂ 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 CO₂. 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 CO₂ pour les différentes stratégies de réparations, couplant durée d'exploitation et technique de réparation, sont présentées en la figure 10b. 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 présente 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 d'abord de ce point de vue fiabiliste : 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 CO₂. 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.*, 2009b).

7. 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 ». Papier soumis à *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2009a.
- 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 ». In: *proceedings of Fourth International Forum on Engineering Decision Making (IFED) "Long-term Policy Makings for Sustainable Society"*, May 13-16 2009b, Kanagava, Japan, 16 p.
- 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.
- 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.
- 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.