

CONTRIBUTION A UNE GESTION DURABLE DE STRUCTURES EN BETON ARME SOUMISES A LA PENETRATION D'IONS CHLORURE

CONTRIBUTION TO SUSTAINABLE MANAGEMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES SUBJECTED TO CHLORIDE PENETRATION

E. Bastidas-Arteaga et F. Schoefs
GeM – Université de Nantes, Centrale Nantes
2, rue de la Hoissinière 44322 Nantes cedex 3

B Capra
Société Oxand
36 bis, avenue Franklin Roosevelt,
77210 Fontainebleau

Résumé

La gestion des infrastructures est souvent basée sur des critères économiques. Cette étude propose une extension à des critères environnementaux : la génération de déchets et le dégagement de dioxyde de carbone. On s'intéresse à l'optimisation de la maintenance et de la réparation de structures en béton armé placées en ambiance maritime. Afin de modéliser les effets de l'inspection et de la maintenance, nous utilisons des processus de Markov et la théorie de la décision. Nous identifions les paramètres des chaînes de Markov à partir de simulations de Monte Carlo d'un modèle stochastique de dégradation. Enfin, nous proposons une analyse multicritères pour l'évaluation de l'impact environnemental des stratégies de maintenance.

Summary

Management of infrastructure is often based on economical criteria. This study proposes an extension to environmental criteria: waste generation and carbon dioxide emissions. This paper focuses on optimizing maintenance and repair of reinforced concrete structures placed in marine atmospheres. Markov processes and decision theory are used to model the effects of inspection and maintenance. The parameters of Markov chains are identified from Monte Carlo simulations of a stochastic deterioration model. Finally, a multi-criteria analysis for assessing the sustainability of maintenance strategies is proposed.

Introduction

La conception et la gestion des ouvrages d'infrastructure doivent considérer les enjeux économiques et environnementaux afin de réduire l'impact environnemental, d'optimiser la gestion des ressources et de diminuer la production des déchets. Dans le cas des structures en béton armé, la corrosion induite par la pénétration des chlorures génère des dégâts importants après 10 ou 20 ans de service (Kumar Mehta, 1997; Poupard et al, 2006; Rosquoët et al, 2006). La corrosion des armatures est donc un problème important pour les structures en béton armé situées dans des zones côtières ou sous l'action de sels de déverglaçage.

A la fin de la construction, les armatures sont protégées de la corrosion par une couche mince de produits de corrosion. Cependant, l'entrée d'ions chlorure dans le béton déclenche la corrosion lorsque la concentration de chlorures au niveau de l'enrobage atteint une valeur seuil. 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. La figure 1 présente un recensement des structures portuaires en France issue du projet GEROM¹. Nous pouvons constater qu'un grand nombre de structures ont plus de 50 ans d'exposition. Par conséquent, étant donné que la durée de l'incubation de la corrosion est courte par rapport à la durée de vie du projet, l'inspection et la maintenance d'ouvrages susceptibles à ce type d'endommagement sont le seul moyen d'assurer un niveau optimal de sûreté.

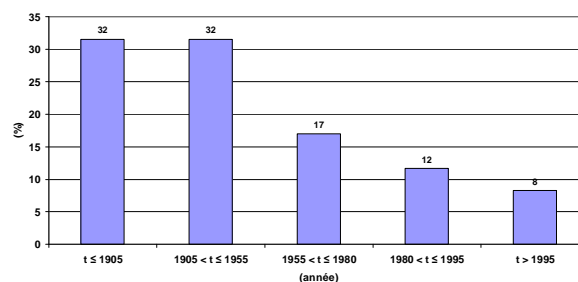


Figure 1. Répartition de l'âge de construction des structures portuaires en France (source : projet GEROM, GeM-Oxand)

A l'heure actuelle, les maîtres d'ouvrage n'ont pas les outils de l'aide à la décision nécessaires pour établir une stratégie d'entretien qui minimise les coûts et l'impact environnemental. Ainsi, ils prennent des décisions sans une vision globale du problème. Cette étude vise à développer un outil d'aide à la décision destiné à ces gestionnaires. Dans ce but, nous nous appuyons sur l'expertise de la société Oxand dans le sujet et sur le retour d'expérience du projet FUI-MAREO². Avec cette collaboration, nous bénéficions de la synergie entre les différents acteurs présents pendant la durée de vie du projet (maîtres d'ouvrage, entreprises et laboratoires de recherche) pour donner des solutions globales au problème. Suivi par des nombreuses discussions avec tous ces acteurs, nous nous sommes fixés les objectifs suivants :

- déterminer les besoins de la gestion des ouvrages en béton armé sensibles à ce type de dégradation ;

¹ GEstion par les Risques des Ouvrages Maritimes et fluviaux

² MAintenance et REparation des Ouvrages littoraux en béton : optimisation par analyse de risque.

- développer et implémenter un modèle numérique de pénétration d'ions chlorure qui prenne en compte les facteurs qui influencent le plus ce processus (la fixation des chlorures, l'action l'humidité et de la température, l'aléa associé au phénomène...);
- optimiser l'inspection et la maintenance de ces ouvrages en considérant les recommandations des maîtres d'ouvrage afin de proposer des stratégies techniquement et économiquement faisables; et
- proposer une méthode pour l'analyse de l'impact environnemental de ces réparations.

Défis de la gestion des structures en béton armé soumises à la corrosion

Un défi majeur dans la gestion des structures en béton armé soumises à la corrosion est qu'il n'existe pas de modèles prédictifs fiables pour évaluer la performance structurelle au cours de la durée de vie opérationnelle. Par conséquent, les propriétaires/gestionnaires doivent prendre des mesures correctives de réparation lorsque quelques signaux de détérioration sont visibles (fissuration du béton, par exemple). Cette approche conduit à deux problèmes principaux: (1) les dépenses ne peuvent pas être estimées sur l'ensemble du cycle de vie, et (2) la sécurité structurelle peut être sérieusement compromise lorsque la réparation n'est pas effectuée à des moments opportuns. L'objectif principal des propriétaires/gestionnaires est d'assurer un niveau optimal de performance au cours de la durée de vie opérationnelle. Néanmoins, pour des structures en béton armé soumises à la corrosion, les propriétaires/gestionnaires sont généralement confrontés aux questions suivantes:

- comment la pénétration des chlorures affectera l'intégrité structurelle ?
- comment et quand l'inspection et la réparation doivent être entreprises ?
- comment déterminer une stratégie de maintenance durable ?

En ce qui concerne la première question, des modèles de détérioration sont disponibles pour évaluer la réduction de la durée de vie produite par la pénétration des chlorures. L'incertitude du phénomène de dégradation et la précision du modèle permettront de prendre des bonnes ou des mauvaises décisions lorsque la structure est réparée aux bons ou mauvais moments. L'évaluation de la durée de vie peut être améliorée par la mise en œuvre d'un modèle réaliste qui tient compte de la détérioration due à l'interaction avec les conditions météorologiques ainsi que des incertitudes impliquées dans le phénomène de détérioration. Comme il existe plusieurs incertitudes dans l'ensemble du processus, les performances structurelles peuvent également être surveillées par des inspections. Alors, pour la deuxième question, le problème consiste à déterminer une méthode efficace et un intervalle optimal d'inspection. En tenant compte des résultats d'inspection et un critère donné de réparation, le propriétaire/gestionnaire décide si la réparation doit être effectuée. La définition du critère de réparation considère différents aspects sociaux, environnementaux et économiques qui dépendent principalement des politiques des propriétaires/gestionnaires. Les structures peuvent être réparées à l'aide de plusieurs techniques. Puis, la troisième question est liée aux problèmes du propriétaire/gestionnaire pour le choix d'une technique optimale de réparation qui minimise les coûts et l'impact environnemental. En conséquence, pour répondre à ces questions, la méthodologie développée dans cette thèse intègre les aspects suivants:

- un modèle probabiliste étendu de pénétration des chlorures,
- les effets de l'inspection et de la réparation sur la sécurité structurelle, et
- l'impact environnemental des réparations.

Cas d'étude : terminal agro-alimentaire

Le terminal agroalimentaire du port de Nantes Saint-Nazaire est une structure concernée par les problèmes précédemment évoqués. Ce terminal fait partie du grand port maritime de Nantes Saint-Nazaire (quatrième plus grand port en France) qui est relié à 400 ports dans le monde entier. Ce quai a été construit en 1971 et est situé à l'ouest de la France (Montoir de Bretagne) dans l'estuaire de la Loire. Les gestionnaires des activités portuaires de cette structure ont observé un problème généralisé de corrosion affectant principalement les poutres en béton armé et ont décidé d'entreprendre une réparation à grande échelle (Rosquoët et al., 2006).

La stratégie de maintenance pour le terminal agro-alimentaire consiste essentiellement en la reconstruction du béton pollué par des techniques de réparation différentes. Le béton contaminé est donc « purgé » avec des jets d'eau à haute pression (hydrodémolition) et l'enrobage est reconstruit en utilisant diverses techniques (figure 2).

- a) Détermination des profils de chlorures à partir de l'inspection par carottage b) Démolition du béton pollué c) Reconstruction de l'enrobage.



Figure 2. Phases d'inspection et de réparation pour la technique sélectionnée.

Ce paragraphe présente les techniques utilisées pour reconstruire l'enrobage des poutres du quai qui seront comparées sur la base de la durabilité. Les exigences de base pour la sélection des techniques de réparation sont résumées comme suit:

- les techniques de réparation devront être facilement mises en œuvre pour réparer les composants de la structure situés dans les zones de marnage (par exemple, les poutres et les piles de quais).
- les techniques de réparation devront être applicables à des réparations de grande envergure; les réparations locales sont au-delà du champ de l'étude.

- les matériaux de réparation devront avoir la même composition (composition à base de ciment) afin de centrer l'analyse sur les techniques et de faciliter les calibrations des techniques de contrôle non-destructives.

Après discussion avec les partenaires participant au projet MAREO, trois techniques de réparation ont été retenues: (1) béton projeté par voie humide; (2) béton projeté par voie sèche et (3) béton coffré. Comme il n'y a pas d'expérience sur les performances des matériaux et des techniques de réparation, les solutions choisies ont été testées sur douze poutres qui ont été exposées à l'eau de mer pendant 80 ans (Vilvoisin et Aury, 2009).

Apports méthodologiques

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 d'ions chlorure et des stratégies de maintenance, et situé dans un cadre de développement durable. Avec cette contribution nous fournissons un outil d'aide à la décision qui permet de choisir la stratégie de réparation qui réduit les coûts et l'impact environnemental. La méthode développée prend donc en compte l'interaction entre :

- La pénétration d'ions chlorure,
- les actions d'inspection et de maintenance menées pendant la durée de vie utile et
- l'impact environnemental de ces actions.

1 Modèle étendu de pénétration des ions chlorure

La pénétration des ions chlorure est contrôlée par des interactions complexes entre des processus physiques et chimiques qui ont été généralement simplifiées comme un problème de diffusion régi par la seconde loi de Fick. Jusqu'à présent, la plupart des études ont utilisé une solution simplifiée de la loi de Fick où la concentration en chlorures à un instant et une position donnés sont estimés par la fonction d'erreur complémentaire (Tuutti, 1982). Cette solution analytique est uniquement valable quand le coefficient apparent de diffusion des chlorures est constant dans le temps et l'espace, la concentration en chlorures dans l'environnement reste constante et le béton est saturé. Toutefois, en vertu de ces simplifications, il n'est pas possible d'envisager l'action d'autres phénomènes comme: la fixation des chlorures, les interactions entre la diffusion des ions chlorure et les conditions environnementales, la pénétration des chlorures par convection, etc. Sur la base des travaux de Saetta et al., (1993) puis de Martín-Pérez et al., (2001), Bastidas-Arteaga et al., (2010a) présentent un modèle probabiliste étendu de pénétration des chlorures. La formulation proposée tient compte de l'interaction entre trois phénomènes: la pénétration des chlorures, la diffusion de l'humidité et le transfert de chaleur. Le processus de pénétration des ions chlorure est donc représenté par un ensemble d'équations aux dérivées partielles qui est résolu par un couplage d'éléments finis avec des différences finies. Cette approche permet de prendre principalement en compte les phénomènes suivants:

- la capacité de fixation des ions chlorure ;
- la variabilité dans le temps et l'influence de la température, de l'humidité et de la concentration de chlorures dans le milieu voisin ;
- la réduction de la diffusivité des ions chlorure du béton avec son âge et
- le flux des ions chlorure dans des conditions de non-saturation et en deux dimensions.

Les caractéristiques du modèle de pénétration et la considération de l'aléa inhérent au problème, permettent de faire des modélisations plus réalistes. En effet, les effets de réchauffement climatique peuvent être intégrés à l'estimation de la durée de vie (Bastidas-Arteaga et al, 2010a). D'après le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2007), les effets du réchauffement climatique sur la température entraineront une augmentation variant entre 1 et 6 °C dans la centurie à venir. Etant donné que le processus de pénétration des chlorures dans le béton est fortement influencé par les conditions climatiques extérieures, l'estimation de la durée de vie de ce type d'ouvrages devrait aussi considérer l'effet du réchauffement climatique. Afin de tenir compte de cette interaction, nous avons développé un modèle stochastique du climat qui permet de représenter : les variations saisonnières, une augmentation linéaire de la température et de l'humidité produite par le réchauffement climatique et l'aléa lié au climat. (Bastidas-Arteaga et al, 2010a).

La figure 3 montre les effets du réchauffement climatique sur la réduction de la durée de vie des structures en béton armé soumises à la pénétration des chlorures. Cet exemple considère deux scénarios de réchauffement climatique (attendu et pessimiste) et trois environnements différents (continental, tropical et océanique). Pour les milieux marins, on s'intéresse aussi à l'influence de la proximité de la mer d .

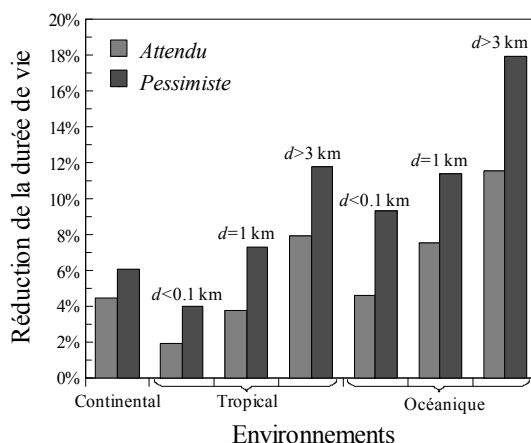


Figure 3. Réduction de la durée engendrée par le réchauffement climatique

La réduction de la durée de vie illustrée dans la figure 3 prend comme référence un cas où le réchauffement climatique n'a pas été considéré. Il est observé que le réchauffement climatique induit des réductions de durée de vie variant de 2 à 12% pour le scénario « attendu » et de 4 à 18% pour le scénario « pessimiste ». En comparant la réduction de la durée de vie moyenne pour tous les environnements, la plus grande influence correspond à l'environnement océanique (10,4%), suivie par l'environnement tropical (6,1%) et enfin l'environnement continental (5,3%). Ces résultats justifient la mise en œuvre d'un modèle étendu de pénétration des ions chlorures afin d'adopter des actions de maintenance appropriées qui assurent des niveaux optimaux de sécurité et de fonctionnalité.

2 Optimisation du management des structures en béton armé corrodées

L'objectif des stratégies de maintenance est d'assurer un niveau optimal de fonctionnement et de sécurité au cours de la vie de la structure. Par conséquent, lorsque la performance structurelle est fortement affectée par la cinématique du processus de détérioration, la réparation ou le remplacement des composants structurels sont les seuls moyens d'atteindre cet objectif. La stratégie de maintenance étudiée ici est divisée en deux étapes: inspection et réparation. L'inspection peut être effectuée en employant des méthodes destructives et/ou non-destructives. En ce qui concerne les méthodes non-destructives, l'inspection visuelle est une technique habituellement utilisée pour évaluer l'état des structures en béton armé (Roelfstra et al., 2004). Les résultats des inspections alertent les propriétaires/gestionnaires lorsque le seuil de détérioration est atteint. La valeur seuil peut être liée à la fissuration du béton ou à la perte de section transversale des armatures. Toutefois, pour l'inspection visuelle, l'évaluation de l'état de la structure demeure très incertaine lorsque l'inspection est effectuée. À l'heure actuelle, des avancées significatives voient le jour dans le développement des méthodes d'auscultation basées sur le contrôle non-destructif. Les techniques d'auscultation non-destructives ont pour but de quantifier la valeur instantanée ou l'évolution d'une variable donnée dans le temps (la résistance des matériaux, les concentrations en chlorures, le taux de corrosion, etc.), et pourtant, leurs résultats sont fortement influencés par les conditions environnementales qui réduisent alors sa précision. La précision des résultats de l'inspection est largement améliorée en utilisant des techniques de contrôle destructives. Cependant, elles sont plus coûteuses et exigent un plus grand nombre de tests quand il y a une grande variabilité des paramètres contrôlés. La sélection d'une ou la combinaison de plusieurs techniques d'inspection dépend de plusieurs aspects tels que:

- le type de phénomène inspecté -par exemple, la résistance du matériau, la concentration en chlorure, etc ;
- la taille du projet -par exemple, une structure particulière ou un réseau de structures ;
- l'usage de la structure -par exemple, nucléaire, transport, etc. Ce point est lié au risque admissible par le propriétaire/gestionnaire ; et
- d'autres aspects socioéconomiques -par exemple, les priorités du pays, la disponibilité des ressources, etc.

Cette étude fait référence à des structures en béton armé soumises à la pénétration des chlorures et se concentre sur la maintenance des infrastructures (ports, ponts, etc.). Les besoins relatifs à la stratégie de maintenance ont été définis dans le cadre du projet FUI MAREO avec la collaboration des entreprises de construction, des organismes et des centres de recherche. Dans la stratégie de maintenance considérée ici, l'inspection est faite par l'analyse de la concentration en chlorures à la profondeur de l'enrobage sur des carottes en béton (méthode destructive). Ensuite, en fonction des résultats de l'inspection, la technique de réparation consiste à reconstruire une épaisseur de béton pollué par plusieurs méthodes (figure 2). L'avantage de l'approche proposée est que la réparation est plus préventive que corrective. Cette caractéristique assure un niveau optimal de sécurité pendant la durée de vie du projet.

Tenant compte du fait que de nombreux facteurs influent sur le processus de détérioration et les effets de la maintenance, les modèles numériques sont indispensables pour prendre des décisions optimales. De nombreux systèmes de gestion de structures utilisent des chaînes de Markov pour simuler la dégradation et la réparation des structures au cours du temps (Cesare et al., 1992, Scherer et Glangola, 1994, Roelfstra et al., 2004). Par conséquent, cette étude utilise également une approche markovienne qui intègre les aspects suivants :

- un modèle étendu de pénétration des chlorures ;
- la précision de la technique d'inspection ; et
- l'incertitude inhérente à la pénétration des chlorures, l'initiation de la corrosion et les résultats de l'inspection.

Afin de modéliser les effets de l'inspection et de la maintenance, nous nous servons de l'approche développée par Sheils et al., (2010) qui utilise des processus de Markov et la théorie de la décision. Le couplage entre la méthode d'inspection/maintenance et le modèle de dégradation se fait en identifiant les paramètres des chaînes de Markov à partir de simulations de Monte-Carlo du modèle de pénétration des chlorures (Bastidas-Arteaga et al, 2010b). Dans cette approche, le processus de dégradation et les actions de maintenance peuvent s'intégrer facilement dans la modélisation. La quantité d'intérêt, dans ce problème, est la concentration de chlorures à la profondeur d'enrobage. On s'intéresse à ce paramètre parce qu'il contrôle l'initiation de la corrosion. En plus, elle peut être déterminée à partir de campagnes d'inspection et peut être par la suite utilisée par le gestionnaire pour décider si la réparation doit s'effectuer.

Dans plusieurs applications des chaînes des Markov, la matrice de transition est obtenue à partir des campagnes expérimentales ou par jugement d'expert. Cependant, pour la pénétration des chlorures, l'estimation de la matrice de transition à partir des mesures expérimentales pose deux problèmes. D'abord, étant donné la longue durée des essais de pénétration, il est difficile d'étudier l'évolution de la concentration des chlorures avant la construction autrement que par des essais accélérés aux résultats particulièrement difficiles à transposer à la cinétique réelle. Une alternative pour résoudre ce problème est l'utilisation des données obtenues pour des matériaux similaires. Le second problème est lié à la grande quantité de mesures nécessaires pour bien représenter le phénomène. Par conséquent, on propose ici de calculer numériquement la matrice de transition sur la base d'un modèle numérique de pénétration des ions chlorure et ensuite d'utiliser les valeurs estimés pour déterminer la matrice de transition.

Les matrices de transition sont obtenues à partir de simulations de Monte Carlo du modèle de pénétration des ions chlorure en considérant les variables aléatoires présentées dans le tableau 1. Pour les simulations, on enregistre l'évolution dans le temps de la concentration des chlorures à la hauteur de l'enrobage. Après avoir réalisé un grand nombre de simulations, on dispose des résultats de cette expérimentation numérique à chaque pas de temps ; on détermine alors la fréquence pour les

concentrations d'appartenir à chaque état considéré (*i.e.*, histogramme). La probabilité d'appartenir à un état j à un instant t est estimé à partir de :

$$\hat{q}_j(t) = \frac{n_o(t)}{N} \quad \{1\}$$

où $n_o(t)$ est le nombre d'observations dans l'état j mesurées à un instant t et N le nombre de simulations. Le tableau 2 montre les plages de variation (valeurs maximum et minimum) pour les 10 états utilisés pour discrétiser la variable d'intérêt.

Variable	Unité	Distribution	Moy.	COV
Coefficient de référence de la diffusion des ions chlorure, $D_{c,ref}$	m ² /s	log-normale	$3 \cdot 10^{-11}$	0.20
Énergie d'activation du processus de diffusion des ions chlorure, U_c	kJ/mol	beta sur [32;44.6]	41.8	0.10
Facteur de réduction de l'âge, m		beta sur [0;1]	0.15	0.30
Coefficient de référence de la diffusion de l'humidité, $D_{h,ref}$	m ² /s	log-normale	$3 \cdot 10^{-10}$	0.20
Paramètre représentant le quotient $D_{h,min}/D_{h,max}$, α_0		beta sur [0.025;0.1]	0.05	0.20
Paramètre caractérisant l'étendue du saut en D_h , n		beta sur [6;16]	11	0.10
Conductivité thermique du béton, λ	W/(m°C)	beta sur [1.4;3.6]	2.5	0.20
Capacité thermique spécifique du béton, c_q	J/(kg°C)	beta sur [840;1170]	1000	0.10
Densité du béton, ρ_c	kg/m ³	normale	2400	0.05

Tableau 1. Modèles probabilistes pour les variables du problème

État i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
minimum (kg/m ³)	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6
maximum (kg/m ³)	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0

Tableau 2. États utilisés pour la discretization de la concentration des chlorures à la profondeur de l'enrobage.

La figure 4 montre la variation dans le temps de \hat{q}_j (courbe simulation) pour le dernier état en tenant compte les 10 états présentés dans le tableau 2.

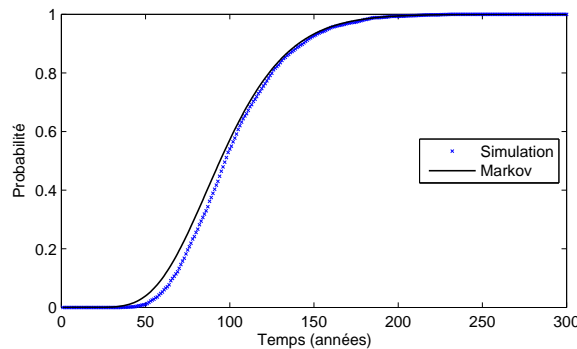


Figure 4. Comparaison entre probabilités obtenues avec les simulations de Monte Carlo et le modèle de Markov pour l'état final.

Lorsque les probabilités $\hat{q}_i(t)$ ont été estimées, on peut utiliser des différentes méthodes pour calculer les probabilités de transition. La difficulté pour trouver \mathbf{P} est liée au nombre de paramètres a_{ij} que l'on veut estimer. Plusieurs études utilisent une matrice de Markov à deux paramètres dont un paramètre à déterminer par état (Pappas *et al.* 2001 ; Roelfstra *et al.* 2004) :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \{2\}$$

où pour un i fixe, $a_{i2} = 1 - a_{i1}$. Dans ce cas, les paramètres de \mathbf{P} peuvent être estimés à partir d'une régression non-linéaire. Cependant, ce modèle à deux degrés de liberté par état de la matrice \mathbf{P} ne permet pas une bonne représentation de phénomènes stochastiques complexes (Roelfstra *et al.* 2004). Afin de résoudre cet inconvénient, nous proposons une méthode qui cherche les valeurs a_{ij} en minimisant la différence entre des probabilités $\hat{q}_i(t)$ provenant des simulations et celles obtenues avec le modèle de Markov **Erreur ! Source du renvoi introuvable..** Comme l'évolution dans le temps a une cinétique différente pour chaque état, nous avons M fonctions à minimiser :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\mathbf{a}} \max_{\mathbf{F}} \mathbf{F}(\mathbf{a}) = (f_1(\mathbf{a}), f_2(\mathbf{a}), \dots, f_M(\mathbf{a}))^T \\ \text{s.c. } a_{ij} \geq 0 \text{ et } \sum_{j=0}^{\infty} a_{ij} = 1 \end{array} \right. \quad \text{où } f_j(\mathbf{a}) = \sum_{t=0}^{t_{ana}} |\hat{q}_j(t) - q_j(t, \mathbf{a})| \quad \{3\}$$

où \mathbf{a} est un vecteur contenant les probabilités de transition et t_{ana} représente la période d'analyse considéré pour faire l'ajustement. Ce problème d'optimisation multi-objectif est résolu à l'aide du « toolbox » d'optimisation de Matlab®. La méthode d'optimisation choisie minimise la valeur maximale d'un jeu de fonctions multi-variable à partir d'une valeur initiale.

2.1 Exemple numérique

Cet exemple étudie l'influence de l'intervalle d'inspection sur les coûts du projet afin d'établir sa valeur optimale. La structure considérée est placée dans un climat océanique avec une température variant, en moyenne, de 5 à 25°C, et une humidité relative variant entre 0.6 et 0.8. Le modèle stochastique du climat est décrit en (Bastidas-Arteaga et al. 2010a). La structure est située dans un environnement avec une concentration moyenne des chlorures à la surface C_{env} de 6 kg/m³. Cette concentration correspond à la limite entre les niveaux hauts et sévères d'environnement corrosif. Nous modélisons C_{env} comme un processus stochastique généré par des nombres indépendants suivant une loi log-normale (bruit log-normal) avec un coefficient de variation de 0.2. Les variables aléatoires concernant le modèle de pénétration des chlorures et les propriétés du matériau sont présentées dans le tableau 1. La justification du choix du type de distribution, de la moyenne et du coefficient de variation COV, est détaillée dans (Bastidas-Arteaga, et al. 2010a). Etant donné les non-linéarités et la complexité du système d'équation aux dérivées partielles, les méthodes de simulation 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. Afin de simplifier l'étude, on suppose que le matériau de réparation a les mêmes caractéristiques que le matériau de construction.

Pour estimer la matrice de Markov nous avons considéré $M = 10$ états et 27 probabilités de transition à déterminer. Les paramètres de \mathbf{P} ont été obtenus avec la procédure précédemment décrite en utilisant 10000 simulations pour un enrobage de 5 cm. La figure 4 compare les probabilités d'appartenance à l'état 10 estimées avec les simulations et le modèle de Markov. On constate que les probabilités de transition calculées par le modèle de Markov représentent bien le phénomène.

La figure 5 montre l'évolution des coûts en fonction de la longueur de l'intervalle d'inspection. Cette figure distingue les coûts d'inspection, de réparation, de défaillance et totaux. Pour cet exemple, les coûts totaux sont optimaux lorsque la structure est inspectée tous les 11 ans. Il est donc possible de conclure, sur la base de ces résultats, qu'il existe un intervalle d'inspection qui minimise la somme des coûts d'inspection, de réparation et de défaillance en maintenant un niveau de sûreté approprié.

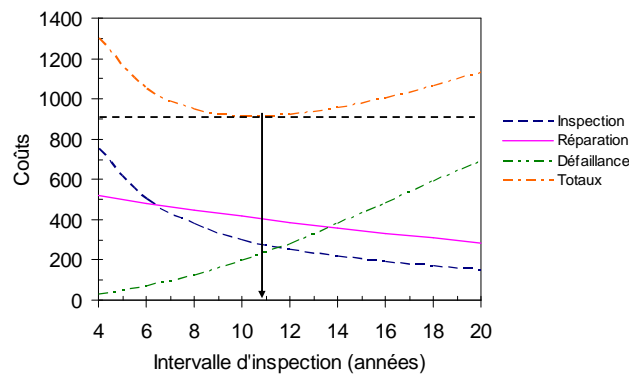


Figure 5. Evolution des coûts avec l'intervalle d'inspection.

3 Formulation d'une stratégie de maintenance dans le cadre du développement durable

Le principal défi en matière de gestion durable des structures en béton armé sujettes à la corrosion est de formuler une stratégie de maintenance techniquement et économiquement faisable, qui réduit l'impact environnemental et qui assure un niveau optimal de fonctionnement et de sécurité pendant la durée de vie opérationnelle. Les progrès récents dans la gestion visent à améliorer la performance des stratégies de réparation en optimisant les coûts directs (Frangopol, 2010). Cependant, plusieurs exigences imposées par les contraintes environnementales transforment aujourd'hui l'optimisation de la planification de la maintenance en un défi majeur pour les concepteurs, les propriétaires et les utilisateurs des structures.

Ce paragraphe se centre sur l'évaluation de la « durabilité » d'une stratégie de maintenance des structures en béton armé exposés aux chlorures. D'après Andre (1999) « ...les processus et les institutions durables répondent à certains critères : ils n'épuisent pas les ressources nécessaires aux générations futures; ils renforcent continuellement les capacités des individus et des institutions; les responsabilités et les avantages sont largement partagés... ». Dans ce contexte, cette étude tire parti du savoir-faire de plusieurs intervenants qui sont concernés par la gestion de ces structures: les propriétaires, les concepteurs, les entrepreneurs, les secteurs industriels, les centres de recherche, les intérêts régionaux et les organismes gouvernementaux. Les stratégies de maintenance sont destinées à garantir le bon fonctionnement et la sécurité au cours de l'exploitation et/ou d'augmenter le cycle de vie des structures. Par exemple, pour la corrosion provoquée par la pénétration des ions chlorures dans le béton, la peinture protectrice et/ou la reconstruction de l'enrobage sont des stratégies qui augmentent le temps nécessaire pour que la concentration seuil en chlorures atteigne les barres d'acier. Ainsi, ces actions augmentent le temps

d'initiation de la corrosion. La stratégie de maintenance de la reconstruction de l'enrobage en utilisant différentes techniques de réparation a été choisie ici pour illustrer la méthodologie proposée.

Selon Struble et Godfrey (2004), les trois composantes de la durabilité sont : l'environnement, l'économie et la société. Pour atteindre son objectif, le développement durable doit assurer un équilibre entre ces éléments (Sanchez-Silva et Rosowsky, 2008). L'analyse de durabilité proposée dans cette étude considère principalement les composantes environnementales et économiques. Toutefois, la société est directement impliquée dans des décisions qui influent sur ces composants. Ainsi, l'évaluation de la durabilité des techniques de réparation est basée sur la comparaison de trois critères:

- coûts,
- production de déchets, et
- émissions de dioxyde de carbone.

3.1 Coûts

Deux types de coûts sont généralement pris en compte dans l'analyse économique: les coûts des propriétaires/gestionnaires et des utilisateurs. Les coûts des propriétaires/gestionnaires sont des coûts directs dépensés au cours du cycle de vie, y compris les coûts de construction initiaux et les coûts associés à l'inspection, à la réparation, à la réhabilitation, au remplacement et à la déconstruction. Les coûts des utilisateurs représentent les frais déployés par les utilisateurs en raison des inconvénients et des perturbations de la circulation tels que les coûts des retards de voyage, les coûts d'exploitation des navires et les coûts d'accident.

Étant donné que cette étude se concentre sur la réparation des structures en béton armé, les coûts directs dépensés par l'organisme incluent les coûts liés à la maintenance (inspection, réparation et défaillance). Les coûts initiaux de construction ne sont pas inclus dans l'analyse car il est supposé qu'ils seront les mêmes pour toutes les solutions de maintenance. Comme il n'est pas possible de déterminer l'utilisation finale de la structure à la fin du cycle de vie (déconstruction ou démolition), le coût résiduel (ou de sauvetage) n'est pas considéré.

3.2 Production de déchets

Le béton a été reconnu comme le matériau le plus important et visible dans la production des déchets de construction et de démolition. Selon les estimations présentées dans le guide de ressources environnementales (American Institute of Architects, 1999), le béton produit un maximum de 67% en poids de déchets de construction et de démolition (53% en volume), avec seulement 5% actuellement recyclé. Par conséquent, la production de déchets constitue un élément majeur de la gestion de structures en béton armé.

Une évaluation exhaustive de la production de déchets devrait inclure les déchets générés pendant la production du matériau de réparation et pendant les opérations de réparation. Toutefois, compte tenu de la difficulté d'estimer les déchets générés pendant la production du béton, cette étude ne considère que les déchets produits pendant les opérations de réparation (démolition et de reconstruction). La production de déchets est exprimée en m³ de déchets générés pour réparer 1 m³ de béton pollué. Par conséquent, les déchets produits lors de la démolition sont égaux à 1 m³. Les déchets produits lors de la réparation dépendent des caractéristiques de la technique de réparation.

3.3 Émissions de dioxyde de carbone

Selon le groupe intergouvernemental d'experts sur les changements climatiques (IPCC, 2007), les émissions de dioxyde de carbone sont identifiées comme l'une des principales causes du réchauffement climatique. Par conséquent, en tenant compte du fait que la production annuelle mondiale de 1,6 milliards de tonnes de ciment représente environ 7% des émissions mondiales de CO₂ dans l'atmosphère (Kumar Mehta, 1997), l'évaluation des émissions de dioxyde de carbone produit au cours des opérations de réparation est cruciale pour le développement durable. Cette analyse prend deux sources de dioxyde de carbone en compte:

- les émissions produites lors du transport de matériaux, des équipements et des déchets, et
- le CO₂ émis pendant la production du matériau de réparation.

Les émissions produites pour réparer 1 m³ de béton pollué pendant le transport sont calculés en additionnant les émissions produites lors du transport de matériaux de réparation, d'équipements et de l'élimination des déchets. Selon l'agence internationale de l'énergie (International Energy Agency, 2007) les émissions de CO₂ moyennes varient de 0,65 à 0,92 kg de CO₂ par kg de ciment pour plusieurs pays. Comme il n'existe pas d'information sur les émissions de CO₂ liées à la production des produits de réparation, une émission moyenne pondérée de 0.83 kg de CO₂/kg de matériau de réparation est adoptée ici pour tous les produits de réparation.

3.4 Prise de décision sous contraintes multi-objectifs

Un défi majeur dans la gestion des structures vieillissantes est la prise d'une décision satisfaisant différentes contraintes. Les propriétaires/gestionnaires sont souvent confrontés à satisfaire simultanément plusieurs critères tels que: la réduction des coûts, les perturbations de la circulation, l'impact environnemental et l'amélioration de la performance, la fonctionnalité et la sécurité. Les techniques d'optimisation multi-critères ou multi-objectifs sont appropriées pour traiter ce problème. Nous proposons donc une analyse multicritères pour l'évaluation de l'impact environnemental des stratégies d'inspection/réparation sélectionnées. Selon Lounis (2006), les approches suivantes sont disponibles dans la littérature pour traiter ce problème :

- la théorie de l'utilité multi-attribut ;
- l'approche de la somme pondérée ;
- la programmation de compromis ;
- l'approche par contraintes ; et
- l'optimisation séquentielle.

Chaque méthode est utile en fonction des circonstances et des environnements donnés. Cependant, la programmation de compromis est plus appropriée pour les problèmes des finances ou techniques où le décideur ne peut pas se permettre de

remplacer une information objective par des opinions subjectives. Par conséquent, la programmation de compromis est adoptée ici pour résoudre le problème multi-objectif.

Pour ce problème, une solution optimale doit minimiser les coûts et l'impact environnemental. La solution optimale peut être obtenue en utilisant l'optimisation multi-objective. La programmation de compromis minimise la distance de l'ensemble des optima de Pareto à la solution « idéale ». La solution idéale est définie comme celle qui donne des valeurs optimales pour tous les objectifs à la fois. Pour m fonctions objectifs, la solution idéale peut être associée au vecteur suivant :

$$\mathbf{F}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*] \quad \{4\}$$

où x_i^* est la solution idéale du critère d'optimisation f_i avec $i = 1, \dots, m$. Dans ce cas particulier, il y a trois critères à évaluer : (i) les coûts, (ii) la production de déchets et (iii) les émissions de CO₂. Étant donné que chaque critère a son propre système d'unités, cette étude utilise un index multi-objectifs (MOI) pour déterminer la technique optimale (Lounis, 2006). Un MOI est défini pour chaque technique comme la déviation pondérée et normalisée de la solution idéale \mathbf{F} mesurée par la famille de paramètres L_p . Ainsi, la solution satisfaisante est celle qui donne un MOI minimum :

$$\text{MOI}(x) = \left[\sum_{i=1}^m w_i^p \left| \frac{x_i - x_i^*}{x_{i*} - x_i^*} \right|^p \right]^{1/p} \quad \{5\}$$

où w_i est le facteur de pondération du critère d'optimisation f_i , p est un paramètre qui indique l'importance accordée aux différentes déviations de la solution idéale, et x_{i*} est la solution anti-idéal de f_i . La valeur de w_i varie entre 0 et 1 avec $\sum w_i = 1$. Les facteurs de pondération dépendent principalement de l'attitude des propriétaires/gestionnaires vers chaque critère. Le paramètre p varie entre 1 et ∞ . Pour $p = 1$, tous les écarts par rapport à la solution idéale sont considérés en proportion directe de leur importance, ce qui correspond à une utilité de groupe. Pour $p = 2$, un poids plus élevé est associé à des écarts plus importants de la solution idéale et L_2 représente la distance euclidienne. Pour $p = \infty$, uniquement le plus grand écart est pris en compte. L_∞ représente la distance de Chebyshev ou de mini-max critère qui correspond à une utilité purement individuelle (Lounis, 2006). Nous avons considéré la norme euclidienne dans ce travail.

3.5 Exemple numérique

Cette analyse compare les coûts, la génération de déchets et le dégagement de CO₂ de trois stratégies de maintenance et vise à trouver une solution qui optimise ces trois critères. Ces stratégies sont : projection de béton par voie sèche, projection de mortier par voie humide et traitement par béton coffré. Les caractéristiques de la structure sont les mêmes que celles décrites dans la section 2.1. Le tableau 3 présente les coûts, le pourcentage de déchets générés par rapport au volume de béton réparé et les kg de béton dégagé lors de la réparation du béton pour plusieurs durées de vie, T . Les valeurs présentées ici sont basées sur un retour d'expérience "chantier" mené dans le cadre du projet MAREO (Vilvoisin et al., 2009). Ces résultats sont valables pour réparations de grande échelle.

Durée de vie (années)	Coûts (€/m ³)			Déchets (m ³)			CO ₂ (kg CO ₂ /m ³)		
	50	75	100	50	75	100	50	75	100
Voie humide	3487	3487	3906	2,10	2,10	3,15	1171	1171	1757
Voie sèche	3119	3735	4264	2,60	3,90	6,50	1431	2146	3576
Coffré	2910	3285	3680	3,15	4,20	6,30	1804	2405	3607

Tableau 3. Coûts, génération de déchets et dégagement de CO₂ pour chaque technique de réparation

La difficulté à établir des priorités parmi ces trois techniques est évidente puisque la réparation par béton coffré optimise les coûts tandis que la réparation par voie humide diminue l'impact environnemental. Cette étude adopte la programmation de compromis pour résoudre le problème d'optimisation multi-objectif (Bastidas-Arteaga et al, 2010c). Étant donné que chaque critère a un propre système d'unités, nous utilisons un index multi-objectif (MOI) pour déterminer la technique optimale (Lounis, 2006). La figure 6 présente la hiérarchisation des techniques sur la base de l'index multi-objectif. La comparaison de la MOI euclidienne indique que la sélection d'une solution optimale dépend de la durée de vie considérée. La solution optimale est le béton projeté par voie sèche pour une durée mineure à 50 ans, alors que c'est le béton projeté par voie humide pour une durée supérieure à 50 ans. Bien que le béton coffré soit la solution la moins coûteuse, elle est loin d'être optimale, car elle a été pénalisée par son fort impact sur l'environnement.

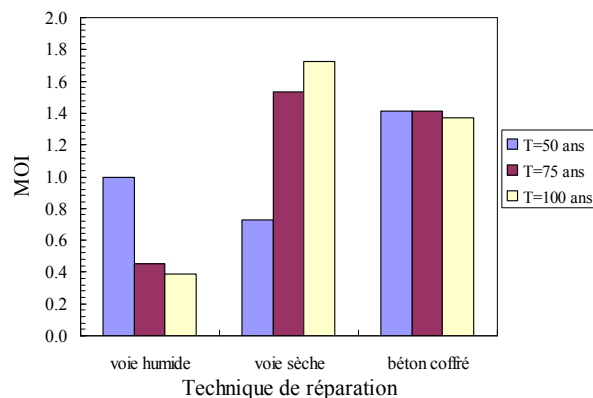


Figure 6. Hiérarchisation des techniques de réparation sur la base de l'index multi-objectif MOI

Applicabilité et impact industriel

Le champ d'application de la méthodologie développée est vaste. En plus d'infrastructures portuaires, le parc d'ouvrages d'art (ponts et viaducs) est également soumis à la pénétration d'ions chlorure provenant des sels de déverglaçage et donc concerné par ce problème. La méthode proposée peut être aussi adaptée pour la gestion de structures construites avec d'autres matériaux (acier, bois, mixtes, etc.) ou soumises à d'autres processus de dégradation (fatigue, biodétérioration, fluage, etc.).

Concernant l'impact industriel, trois acteurs peuvent bénéficier directement de ce travail :

- Le marché de la réhabilitation : qui représente aujourd'hui la moitié de l'activité du bâtiment et très peu de l'activité des travaux publics (TP). Les entreprises considèrent que, comme pour le bâtiment, l'activité de réhabilitation va considérablement se développer en TP et devrait atteindre un volume voisin des travaux neufs. Les entreprises de travaux ont donc tout intérêt à maîtriser ce secteur d'avenir.
- Les maîtres d'ouvrages : qui sont en attentes de méthodologies validées.
- Les entreprises de service : qui désirent des prestations et des modèles éprouvés.

Conclusion

Cette étude vise à développer une méthodologie pour la gestion durable de structures en béton armé soumises à la pénétration d'ions chlorure. Dans ce but, nous avons intégré des modèles probabilistes de dégradation et d'inspection/maintenance avec une méthode pour l'analyse de l'impact environnemental. La formulation du problème et le développement de la méthode ont été fortement appuyés sur l'expertise des maîtres d'ouvrage et la société Oxand. Cette étroite collaboration nous a permis de proposer des solutions techniquement et économiquement faisables.

Remerciements

Cette étude a été menée dans le cadre du projet FUI MAREO avec le support de la société Oxand.

Références

André P. 1999, L'évaluation des impacts sur l'environnement - Processus, acteurs et pratiques, Presses internationales polytechniques, p. 416 .

American Institute of Architects, 1999, Environmental Resource Guide, Wiley,

Bastidas-Arteaga E, Chateauneuf A, Sánchez-Silva M, Bressolette Ph, Schoefs F, 2010a. Influence of weather and global warming in chloride ingress into concrete: a stochastic approach Structural Safety. Structural Safety, Vol. 32, p. 238-249.

Bastidas-Arteaga E, Schoefs F, Chateauneuf A, Breysse D, Sheils E, O'Connor A, 2010b. Approche stochastique pour l'optimisation de l'inspection de structures de béton armé soumises à la pénétration des ions chlorure. 6èmes journées nationales de fiabilité, Toulouse 24-26 Mars.

Bastidas-Arteaga E, Schoefs F, Chateauneuf A, Sánchez-Silva M, Capra B, 2010c. Probabilistic evaluation of the sustainability of maintenance strategies for RC structures exposed to chloride ingress. Accepted pour publication: International Journal of Engineering Under Uncertainty.

Cesare M, Santamarina C, Turkstra C, Vanmarcke, E, 1992, Modelling bridge deterioration with Markov chains, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 118 p. 820-833.

Frangopol D, 2010, Life-Cycle performance, management, and optimization of structural systems under uncertainty: Accomplishments and challenges, In: Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems, Furuta, H.; Frangopol, D. & Shinozuka, M. (ed.), p. 38-60.

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

IPCC, 2007, Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.; Tignor, M. & Miller, H. (ed.) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.

Kumar Mehta P, 1997, Durability – Critical Issues for the Future. Concrete International, Vol. 19, p. 27-33.

Lounis Z, 2006, Uncertainty modeling of chloride contamination and corrosion of concrete bridges, In: Applied research in uncertainty modeling and analysis, Attoh-Okine, N. & Ayyub, B. (ed.), Springer, p 491-51.

Martín-Pérez B, Pantazopoulou S, Thomas M, 2001, Numerical solution of mass transport equations in concrete structures, Computers and Structures, Vol. 79, p. 1251-1264.

Poupard O, L'Hostis V, Catinaud S, & Petre-Lazar I, 2006, Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment, Cement and Concrete Research, Vol 36, p. 504-520.

Roelfstra G, Hajdin R, Adey B, Brühwiler E, 2004, Corrosion evolution in bridge management systems and corrosion-induced deterioration, Journal of Bridge Engineering ASCE, Vol. 9, p. 268-277.

Rosquoët F, Bonnet S, Schoefs F, Khelidj A, 2006, Chloride propagation in concrete harbor. In: 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering. Marchand, J. Bissonnette, B. Gagné, R. Jolin, M. and Paradis, F. RILEM Publications SARL. Quebec, Canada.

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

Sánchez-Silva M, Rosowsky D, 2008, Structural reliability and risk in the developing world and its relationship with sustainability, ICE – Structures, Vol. 161, p. 189-198.

Sheils E, O'Connor A, Breysse D, Schoefs F, Yotte S, 2010, Development of a two-stage inspection process for the assessment of deteriorating infrastructure, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 95 p. 182-194.

Scherer W, Glangola D, 1994, Markovian models for bridge maintenance management, Journal of Transportation Engineering Vol. 120, p. 37-51.

Struble L, Godfrey J, 2004, How sustainable is concrete?, International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, p. 201-211.

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

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