
Optimisation de la maintenance d'ouvrages en béton armé corrodés dans le cadre du développement durable

E. Bastidas-Arteaga^{1*} — F. Schoefs¹

¹L'UNAM Université, Université de Nantes-Ecole Centrale Nantes, GeM, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, UMR CNRS 6183, 2 rue de la Houssinière, BP 92208 44322 Nantes cedex 3

* emilio.bastidas@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ. L'optimisation de la Maintenance basée sur la soutenabilité est un défi pour la gestion de structures en béton armé corrodées. Cet article propose une approche pour optimiser la soutenabilité des stratégies de réparation. L'approche proposée intègre l'actualisation intergénérationnelle, la production de déchets et les émissions de CO₂. Cette méthodologie a été appliquée à l'optimisation de l'inspection de structures en béton armé soumises à la pénétration des chlorures. Les résultats montrent qu'une stratégie de maintenance soutenable pourrait générer des surcoûts faibles et pourrait réduire la production de déchets et les émissions de CO₂ considérablement.

ABSTRACT. Maintenance optimization based on sustainability is a challenge for the management of corroding RC structures. This paper proposes an approach for optimizing the sustainability of repair strategies. The proposed approach integrates intergenerational discounting, waste generation and CO₂ emissions. This methodology has been applied to inspection optimization of chloride-contaminated RC structures. The results show that a sustainable maintenance strategy could generate low overcharges and could reduce the waste generation and the CO₂ emissions considerably.

MOTS-CLÉS : béton armé, fiabilité, pénétration chlorures, maintenance, soutenabilité.

KEYWORDS: reinforced concrete, reliability, chloride ingress, maintenance, sustainability.

1. Introduction

Le principal défi en matière de gestion soutenable des ouvrages vieillissants est de formuler une stratégie de maintenance techniquement et économiquement faisable, qui réduise l'impact sur l'environnement et qui assure des niveaux optimaux de fonctionnement et de sécurité. Les approches les plus utilisées pour traiter cette

problématique visent à améliorer la performance des stratégies de réparation par l'optimisation des coûts directs (Frangopol, 2010). Toutefois, les contraintes imposées aujourd'hui par de multiples problèmes environnementaux changent la gestion de ce type d'ouvrages vers un problème majeur pour ses concepteurs, ses propriétaires et ses utilisateurs.

Les nouvelles tendances dans l'optimisation des systèmes structuraux permettent la hiérarchisation des activités de maintenance des structures vieillissantes lorsque la fonction d'optimisation est définie en termes de coûts ou de sécurité (Frangopol, 2010). Par exemple, la méthodologie proposée par Bastidas-Arteaga (2010) combine un modèle probabiliste de pénétration des chlorures avec une approche Markovienne pour déterminer une formulation optimale d'une technique de maintenance. Les résultats de cette approche permettent aux décideurs de déterminer la stratégie de maintenance la plus « rentable ». Cependant, de nos jours, l'évaluation de l'impact environnemental doit être intégrée dans le processus de prise de décision pour déterminer une stratégie de gestion « soutenable ». La principale différence entre les solutions optimales « rentable » et « soutenable » réside dans la prise en compte des contraintes environnementales dans le second cas.

Cet article se centre sur l'évaluation de la soutenabilité d'une stratégie de maintenance pour structures en béton armé exposées aux chlorures. Ainsi, les objectifs de cette étude sont :

- formuler le problème de la soutenabilité dans la gestion des structures vieillissantes et proposer une méthodologie pour sa quantification, *cf.* § 2 ;
- identifier les critères qui peuvent être utilisés pour évaluer la durabilité des stratégies de réparation, *cf.* § 3 ;
- proposer une méthodologie pour la prise de décision lorsque les contraintes environnementales sont ajoutés au problème, *cf.* § 4, et
- illustrer la démarche proposée par une application numérique, *cf.* § 5.

2. Gestion durable d'ouvrages vieillissants

La figure 1 montre les étapes pour l'obtention d'une formulation optimale ou soutenable d'une technique de maintenance. On peut distinguer les étapes suivantes :

Formulation de la stratégie : il s'agit d'une étape cruciale dans le processus de gestion. La formulation doit tenir compte des caractéristiques du processus de dégradation, des étapes de la stratégie de maintenance (inspection, réparation), de la philosophie de maintenance (préventive ou corrective) et de la faisabilité technique et économique de la stratégie choisie.

Modélisation : l'expérimentation est le meilleur moyen de déterminer et d'améliorer les performances des différentes techniques de maintenance. Toutefois, étant donné que ces tests sont coûteux et prennent du temps, la modélisation numérique de la dégradation et des actions de réparation s'avère essentielle pour étudier et/ou améliorer l'efficacité des stratégies de maintenance. En outre,

l'incertitude liée au processus de dégradation et aux actions de maintenance doit être intégrée pour améliorer le caractère prédictif des modèles.

Optimisation de la formulation : la performance de chaque stratégie de maintenance peut être améliorée par l'optimisation de ses paramètres les plus importants. Classiquement, la fonction d'optimisation vise à minimiser les coûts afin de fournir une *technique de maintenance optimale*. Néanmoins, il est nécessaire d'inclure les contraintes environnementales dans le problème d'optimisation. En vertu de ces considérations, l'optimisation conduira à une *technique de maintenance soutenable*.

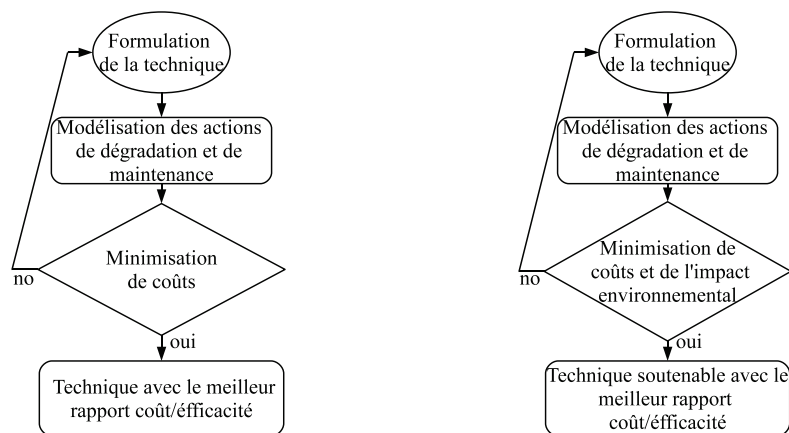


Figure 1. Sélection d'une stratégie de maintenance optimale ou soutenable

La stratégie de maintenance considérée ici a été formulée dans le cadre du projet FUI-MAREO avec la contribution des maîtres d'ouvrage, des entreprises de construction et des centres de recherche. Les modèles de dégradation et des actions de maintenance retenus dans cette étude sont détaillés en (Bastidas-Arteaga, 2010). Ainsi, cet article se centrera sur l'optimisation des stratégies de maintenance dans le cadre du développement durable.

3. Soutenabilité des stratégies de maintenance

Le développement durable cherche à assurer un équilibre entre trois composantes : l'environnement, l'économie et la société. L'analyse de soutenabilité 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 soutenabilité des techniques de réparation est basée sur trois critères: (i) les coûts, (ii) la production de déchets, et (iii) les émissions de dioxyde de carbone.

3.1. Coûts

Deux types de coûts sont généralement pris en compte dans l'analyse économique. Les coûts directs considèrent les frais dépensés pour la construction, l'inspection, la réparation, la réhabilitation, le remplacement et la déconstruction. Les coûts indirects se calculent à partir des frais déployés par les utilisateurs en raison de la non-exploitation de l'ouvrage. On considère uniquement ici les coûts directs. Étant donné que cette étude se centre sur la réparation, les coûts de construction et de déconstruction ne sont pas inclus dans l'analyse.

Dans l'analyse de cycle de vie, l'espérance des coût totaux $E[C_T]$ est :

$$E[C_T] = \sum_{t=0}^{T_i} E[C_j(t)]W(t) \quad [1]$$

où $C_j(t)$ est la $j^{ème}$ dépense au temps t , T_i est la durée du cycle de vie et $W(t)$ est le poids utilisé pour actualiser les $C_j(t)$ à la valeur présent. $C_j(t)$ dépend des propriétés des matériaux d'origine et de réparation, et des caractéristiques de la stratégie de maintenance (par exemple, les intervalles d'inspection, la qualité de l'inspection, du seuil de réparation, etc.). Cette étude tient compte deux $W(t)$ estimés par deux méthodes d'actualisation : classique et intergénérationnelle. Lorsqu'on considère l'actualisation classique, le poids $W(t)$ devient:

$$W_s(t) = 1/(1 + r_s)^t \quad [2]$$

où r_s est le taux d'actualisation classique. Sumalia et Walters (2005) et Prager et Shertzer (2006) ont proposé une expression pour $W(t)$ où les bénéfices sont aussi partagés par les générations futures :

$$W_l(t) = W_s(t) + \frac{W_s(t-1)}{(1 + r_l)^G} \left[\frac{1 - \Delta'}{1 - \Delta} \right] \quad [3]$$

où r_l est le taux d'actualisation intergénérationnel calculé sur une base annuelle, G représente la durée d'une génération, t est exprimé en ans et $\Delta = (1 + r_s)/(1 + r_l)$.

3.2. Production de déchets

Selon les estimations présentées dans le guide de ressources environnementales (American Institute of Architects, 1999), le béton génère au moins le 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 soutenable de structures en béton armé.

Une évaluation exhaustive de la production de déchets devrait inclure les déchets générés pendant la production des matériaux de réparation ainsi que 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 reconstruction). Les déchets produits lors de la réparation dépendent des caractéristiques de la technique

de réparation. Ces caractéristiques définiront le nombre de réparations pendant la durée de vie du projet ou le taux de réparation (Bastidas-Arteaga, 2010).

3.3. Émissions de dioxyde de carbone

Selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2007), les émissions de dioxyde de carbone sont l'une des principales causes du réchauffement climatique. 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). Ainsi, 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 : (i) les émissions produites lors du transport de matériaux, des équipements et des déchets, et (ii) le CO₂ émis pendant la production du matériau de réparation.

Les émissions produites pendant le transport considèrent, d'une part, les émissions du transport de matériaux de réparation, des équipements et de l'élimination des déchets. Ces émissions sont estimées en termes des distances de l'approvisionnement de matériaux de réparation et d'équipements et de l'élimination des déchets. Les émissions produites lors du transport dépendront également des caractéristiques du véhicule de transport.

D'autre part, le CO₂ libéré pendant la production du matériau de réparation est estimé en termes de la teneur en ciment du béton et du CO₂ émis pendant la production du matériau de réparation. Selon l'agence internationale de l'énergie (2007), les émissions de CO₂ pour la production du ciment varient entre 0,65 et 0,92 kg de CO₂ par kg de ciment. Comme il n'existe pas d'information sur les émissions de CO₂ liées à la production des produits de réparation, une valeur de 0.83 kg CO₂/kg de matériau de réparation s'adopte ici.

4. Prise de décision sous contraintes multi-objectifs

Un défi majeur dans la gestion des structures vieillissantes est la prise de décision satisfaisant différentes contraintes. Les propriétaires/gestionnaires sont souvent confrontés à devoir satisfaire simultanément plusieurs critères tels que : la réduction des coûts, les perturbations de la circulation, l'impact environnemental et l'amélioration de la performance, de la fonctionnalité et de la sécurité. Les techniques d'optimisation multicritères sont appropriées pour traiter ce problème. Selon Ballesterio (2007), la programmation de compromis est adéquate pour les problèmes techniques où le décideur ne peut pas se permettre de remplacer une information objective par des opinions subjectives. Par conséquent, la programmation de compromis s'adopte ici pour résoudre le problème multicritères.

Une solution soutenable doit minimiser les coûts et l'impact environnemental. 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 $\mathbf{f}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*]$. Où x_i^* est la solution idéale du critère d'optimisation f_i avec $i = 1, \dots, m$.

Dans ce problème, 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 (Daigle et Lounis, 2006). Un MOI est calculé comme la déviation pondérée et normalisée de la solution idéale $\mathbf{f}^*$. Ainsi, la solution satisfaisante est celle qui minimise le MOI :

$$MOI(x) = \left[\sum_{i=1}^m w_i^p \left| \frac{x_i - x_i^*}{x_{i*} - x_i^*} \right|^p \right]^{1/p} \quad [4]$$

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 avec la pire performance pour le critère. Par exemple, si le critère $i=1$ est lié aux coûts, la valeur x_i^* correspondra au coût minimum tandis que x_{i*} prendra le coût le plus grand. La valeur de w_i varie entre 0 et 1 et $\sum w_i = 1$. Les facteurs de pondération dépendent principalement de l'attitude des maîtres d'ouvrage envers chaque critère. Notons w_c , w_w et w_{CO_2} comme les facteurs de pondération de coûts, de déchets et des émissions CO₂, respectivement. On pourrait imaginer que un gestionnaire dans un pays en voie de développement donne plus de poids aux coûts que aux critères environnementaux ($w_c = 0,7$, $w_w = 0,15$ et $w_{CO_2} = 0,15$). Au contraire, dans un pays développé le gestionnaire pourrait adopter $w_c = 0,3$, $w_w = 0,35$ et $w_{CO_2} = 0,35$ qui aboutiront à une stratégie plus soutenable. Le paramètre p varie entre 1 et ∞ . On considère ici une valeur $p = 2$ qui donne un poids plus élevé aux écarts les plus importants de la solution idéale (Daigle et Lounis, 2006).

5. Exemple numérique

5.1. Description

L'objectif de cet exemple est d'optimiser, des points de vue économiques et environnementaux, la performance d'une stratégie de maintenance utilisée pour réparer une structure en béton armé corrodée par l'action de la pénétration d'ions chlorure. Dans la stratégie de maintenance considérée l'inspection est faite par l'analyse de la teneur en ions chlorure déterminé par un essai destructif. En fonction des résultats d'inspection, la réparation consiste à reconstruire l'enrobage pollué par les chlorures en utilisant plusieurs techniques. Ce type de réparation est préventif et vise à éviter l'initiation de la corrosion tout en assurant un niveau optimal de sécurité pendant la durée de vie du projet.

La performance de la technique de réparation est déterminée sur la base de l'approche markovienne présenté dans (Bastidas-Arteaga, 2010). Cette approche considère les phénomènes les plus influents sur la pénétration des chlorures et sur la maintenance. A savoir, le climat, les incertitudes et les conséquences des « bonnes »

ou de « mauvaises » décisions issues des inspections imparfaites. La description de la procédure pour déterminer la performance de la technique de réparation est au-delà des objectifs de cet article.

On suppose que la structure à réparer est placée dans un climat océanique où la température et l'humidité relative moyennes varient entre 5 et 25 ° C et entre 0,6 et 0,8, respectivement. Ces valeurs seront adoptées pour le modèle probabiliste du climat. Plusieurs études indiquent que la concentration des chlorures à la surface, C_{env} , suit une distribution log-normale (Duracrete, 2000). Cette étude modélise cette variable comme un bruit log-normale avec une moyenne de 6 kg/m³ et un coefficient de variation de 0,2. Ces valeurs correspondent aux concentrations dans la zone d'éclaboussures et de marnage. Les modèles probabilistes des variables aléatoires utilisés dans cet exemple correspondent à un béton ordinaire et se présentent dans le tableau 1.

Variable	Distribution	Moyenne	COV
– Coefficient de diffusion des ions chlorure de référence, $D_{c,ref}$	lognormale	$3 \cdot 10^{-11}$ m ² /s	0.20
– Énergie d'activation du processus de diffusion des ions chlorure, U_c	beta sur [32;44.6]	41.8 kJ/mol	0.10
– Facteur de vieillissement, m	beta sur [0;1]	0.15	0.30
– Coefficient de diffusion de l'humidité de référence, $D_{h,ref}$	lognormale	$3 \cdot 10^{-10}$ m ² /s	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	beta sur [1.4;3.6]	2.5 W/(m°C)	0.20
– Chaleur spécifique du béton, c_q	beta sur [840;1170]	1000 J/(kg°C)	0.10

Tableau 1. Variables aléatoires de base

Paramètre	Valeur
Coût de construction	1000 unités
Coût de l'inspection	5 unités
Coût de la réparation préventive	150 unités
Coût de la réparation corrective	300 unités
Taux d'actualisation classique, r_s	5%
Taux d'actualisation intergénérationnel, r_I	4%
Durée d'une generation, G	25 ans
Durée de vie du projet, T_I	150 ans

Tableau 2. Paramètres retenus dans pour l'exemple

La détermination d'un intervalle d'inspection optimal est très sensible aux modèles de coût. Par conséquent, pour obtenir des résultats pertinents, les coûts

d'inspection, de réparation préventive et corrective ont été définis en tenant compte des dépenses moyennes du port de Nantes Saint-Nazaire pour ce type de réparation (Tableau 2). Ces coûts ont été calculés sur la base d'un coût initial de construction de 1000 unités. Étant donné que l'on suppose que la réparation est préventive, il n'y a aucun coût de défaillance. Le tableau 2 présente également les taux d'actualisation considérés. Le calcul détaillé de l'estimation de la production de déchets et des émissions se présente en (Bastidas-Arteaga, 2010).

5.2. Résultats

La figure 2a présente l'espérance de la longueur des intervalles des réparations préventive et corrective en fonction de la longueur de l'intervalle d'inspection, Δt_I . Ces résultats ont été obtenus en utilisant une approche markovienne. Comme prévu, la longueur de l'intervalle de réparation préventive, t_{pr} , diminue lorsque la structure est inspectée plus régulièrement. Au contraire, la longueur de l'intervalle de réparation corrective, t_{cr} , est inférieure lorsque la structure est moins inspectée. Les longueurs de ces intervalles seront utilisées par la suite pour déterminer le Δt_I qui minimise les coûts et l'impact environnemental. Pour simplifier le calcul, les résultats de la simulation sont ajustés à deux fonctions analytiques qui nous permettent d'estimer t_{pr} et t_{cr} en termes de Δt_I (Figure 2a).

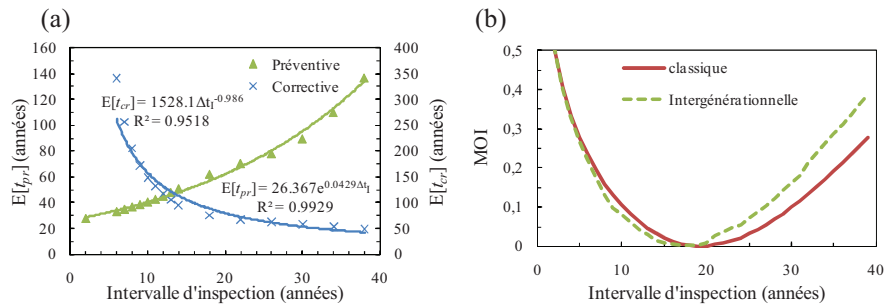


Figure 2. (a) *Espérance des intervalles de réparation préventive et corrective*
(b) *Calcul d'un intervalle d'inspection soutenable*

L'analyse se centrera maintenant sur la détermination d'un intervalle d'inspection qui maintient l'équilibre entre les coûts et l'impact environnemental. La figure 2b montre les indices multi-objectifs pour plusieurs intervalles d'inspection et les deux modèles d'actualisation considérés. Dans les deux cas, on constate que les valeurs du MOI sont importantes pour des intervalles d'inspection très courts ou très grands. Lorsque la structure est inspectée très régulièrement le nombre d'inspections et de réparations préventives est très important et augmentera donc les coûts, la production de déchets et le dégagement de CO_2 . D'une manière similaire, lorsque l'intervalle d'inspection est très grand, le nombre de réparations correctives est supérieur et augmentera aussi les coûts et l'impact sur l'environnement. Cette figure présente également les résultats obtenus en utilisant l'actualisation classique et intergénérationnelle dans l'analyse de coûts. L'intervalle d'inspection optimal

résultant de l'actualisation classique est supérieur à l'intervalle optimal déterminé en utilisant l'actualisation intergénérationnelle. Ce résultat est attendu puisque l'actualisation classique privilégie les réparations lointaines (correctives). Même si les réparations correctives sont en théorie plus coûteuses, à valeur présente elles seront plus économiques pour l'actualisation classique. Au contraire, l'actualisation intergénérationnelle donne plus d'importance aux réparations préventives.

La prise en compte des contraintes environnementales dans l'évaluation de l'intervalle d'inspection peut générer des surcoûts. La sélection d'un intervalle donné dépendra donc des politiques des maîtres d'ouvrage qui devront choisir quels sont les surcharges maximales qu'ils peuvent admettre pour réduire l'impact environnemental. Cette décision est régie par des aspects socio-économiques qui caractérisent une société ou un pays donné. Ces aspects sont mesurés ici par les facteurs de pondération (équation 4). Ainsi, la figure 3a montre les surcoûts générés lorsque le facteur de pondération coût, w_c , varie entre 0 et 1 pour les coûts estimés en utilisant l'actualisation intergénérationnelle. Un facteur de pondération de coût égal à 1 implique que la décision est contrôlée uniquement par les coûts. Au contraire, lorsque $w_c = 0$, le surcoût devient constant. On note que dans la figure 3a, le surcoût maximal est inférieur à 8%. Si le maître d'ouvrage décide d'accorder une importance égale aux critères économiques et environnementaux ($w_c = 0,5$) le surcoût est inférieur à 1,5%. Cela signifie que, l'ajout de contraintes environnementales dans le problème n'entraîne pas des coûts trop importants. Néanmoins, en termes d'impact environnemental, pour $w_c = 0,5$ et pour la réparation d'un port avec une surface de 100000 m², un intervalle d'inspection soutenable pourrait réduire la production de déchets en 130 m³ et les émissions en 75 tonnes de CO₂ (Figure 3b).

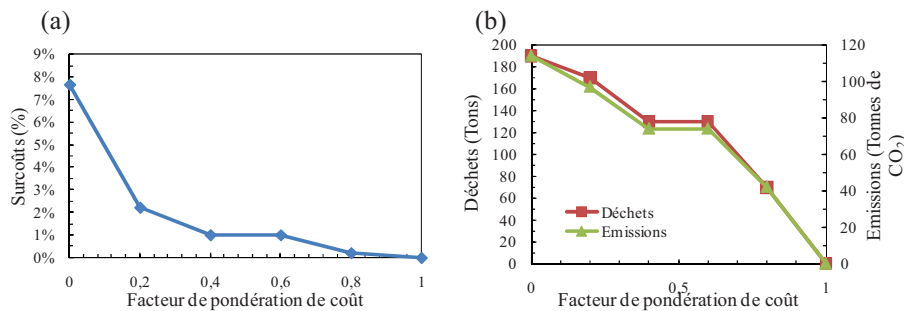


Figure 3. Influence du facteur de pondération de coût sur : (a) les surcoûts et (b) la production de déchets et les émissions de CO₂

6. Conclusions

Le développement durable doit assurer un équilibre entre les aspects économiques, sociaux et environnementaux. Bien que cette étude ait porté sur les contraintes économiques et environnementales, la société se bénéficie directement par des solutions soutenables. Ainsi, l'approche proposée tient compte de trois

critères: les coûts, la production de déchets et les émissions de CO₂. On cherche donc à trouver une solution qui satisfait aux mieux ces critères. Vers ce but, on a mis en œuvre un algorithme d'optimisation multicritères qui optimise la performance d'une technique de réparation sur les plans économique et environnemental. Nous avons illustré la méthodologie proposée avec un problème d'optimisation de l'inspection d'une structure en béton armé corrodée. Les résultats ont montré qu'il existe un intervalle d'inspection soutenable qui réduit l'impact environnemental à des surcoûts faibles.

7. Bibliographie

- American Institute of Architects, *Environmental Resource Guide*, Wiley, 1999.
- Ballesterio E., « Compromise programming: A utility-based linear-quadratic composite metric from the trade-off between achievement and balanced (non-corner) solutions », *European Journal of Operational Research*, vol. 182, 2007, p. 1369–1382.
- Bastidas-Arteaga E., Contribution for sustainable management of reinforced concrete structures subjected to chloride penetration, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2010.
- 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.
- Frangopol D., « Life-cycle performance, management, and optimization of structural systems under uncertainty: Accomplishments and challenges », In Furuta, H., Frangopol, D., and Shinozuka, M., editors, *Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems*, pages 38–60, 2010.
- International Energy Agency, *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions - Energy Indicators*. Paris: OECD, 2007.
- IPCC, *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- Kumar Mehta P., « Durability – critical issues for the future », *Concrete International*, vol. 19, 1997, p. 27-33.
- Prager M.H., Shertzer K.W., « Remembering the future: A commentary on “Intergenerational discounting: a new intuitive approach” », *Ecological Economics*, vol. 60, 2006, p. 24-26.
- Sumalia U.R., Walters C., « Intergenerational discounting: a new intuitive approach », *Ecological Economics*, vol. 52, 2005, p. 135-142.