



HAL
open science

Utilisation dynamique du contrôle non destructif pour une maintenance basée sur les risques des ouvrages de génie civil

D Breysse, S M Elachachi, S Yotte

► **To cite this version:**

D Breysse, S M Elachachi, S Yotte. Utilisation dynamique du contrôle non destructif pour une maintenance basée sur les risques des ouvrages de génie civil. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-01495665

HAL Id: hal-01495665

<https://hal.science/hal-01495665>

Submitted on 26 Mar 2017

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Utilisation dynamique du contrôle non destructif pour une maintenance basée sur les risques des ouvrages de génie civil

D. BREYSSE, S.M.ELACHACHI, S. YOTTE

Université Bordeaux I, Ghymac, Avenue des facultés, 33405 Talence cedex

Résumé :

Les stratégies de maintenance basée sur l'inspection fournissent une solution intéressante pour faire face à la dégradation des composants et ouvrages du génie civil. L'efficacité technique et/ou économique de telles stratégies dépend de nombreux facteurs comme les mécanismes impliqués, la disponibilité, la qualité et le coût des techniques d'inspection, la relation entre les observables et les performances du système étudié, les exigences attendues pour l'ouvrage et les conséquences directes et indirectes d'une perte de performance. Sur cette base, on propose d'étudier, sur la base de simulations de Monte-Carlo, les apports et les limites de telles stratégies. La qualité de la technique est analysée en termes de sa capacité à préciser l'intensité exacte des défauts (pour mesurer les défauts critiques en évitant les fausses alarmes). L'étude repose sur une série de trois modèles (croissance de défauts et défaillance, inspection, coûts) qui peuvent couvrir un large champ d'applications concrètes. L'influence de plusieurs paramètres est mise en avant, en privilégiant le rôle de la qualité de la technique d'inspection et de la probabilité acceptable de défaillance.

Abstract :

Inspection based maintenance strategies can provide an efficient alternative for ageing civil engineering components subjected to ageing and degradation. The technical and/or economic efficiency of such strategies depends on many factors such as the mechanisms involved in the loss of performance, the availability, cost and efficiency of inspection techniques, the relation between what can be measured through inspections and the level of performance of the structure, the level of required serviceability of the structure, and the direct and indirect economic losses due to a reduction in the performance of a structure. On this basis, it is studied here, using Monte Carlo simulations, the benefits and limitations of an inspection based maintenance strategy. The quality of the inspection technique is analyzed in terms of its discriminant ability (detection of a real defect, while avoiding false alarms). This study is carried out with ageing characteristics, inspection models and cost assumptions that can cover a wide field of ageing assets. The influence of several factors is highlighted, to see how they influence optimal strategies: a focus is given on the quality of inspections and on the allowable probability of failure.

Mots clefs : contrôle non destructif, coûts, défaillance, incertitudes, maintenance

1 Introduction

La maintenance basée sur les risques consiste à définir, après une analyse des risques attachés au système étudié, des critères d'intervention sur le système à entretenir (réparation ou remplacement) et des moyens de surveillance et de contrôle qui permettent de vérifier si ces critères sont atteints. Les techniques de contrôle non destructif peuvent être mises en œuvre dans ce but. L'ensemble du processus (inspection, maintenance, réparation) se place alors dans un contexte probabiliste dans la mesure où :

- les propriétés des matériaux présentent une certaine hétérogénéité [1] et les cinétiques de dégradation (corrosion, vieillissement chimique, propagation de l'endommagement...) revêtent un caractère fortement aléatoire, comme les défaillances qui en résultent,
- les techniques de mesure fournissent des informations imparfaites (bruit, environnement mal maîtrisé...) [2],
- les réparations peuvent être elles-mêmes imparfaites. caractère aléatoire de la défaillance du système, à partir des valeurs atteintes par les paramètres critiques (taille de fissure, de zone endommagée, degré de

corrosion...).

Ces caractéristiques sont a priori communes à tout système technique complexe requérant de la maintenance. La spécificité de chaque systèmes est relative à :

- la nature et la cinétique du processus de dégradation qui dépend des matériaux et de leur environnement,
- la nature et les coûts des interventions possibles, fonction des techniques d'inspection et des solutions de maintenance,
- l'intensité et le coût des conséquences de la défaillance.

Dans le domaine des constructions civiles, les procédures de maintenance entrent le plus souvent dans le cadre d'un schéma organisé a priori, qui prévoit des adaptations selon les informations provenant des inspections. Ces procédures ne sont optimales ni en termes de coûts (on procède inutilement à des inspections trop rapprochées), ni en termes de risques, dans la mesure où il est difficile d'anticiper des défaillances aléatoires.

Dans les pays occidentaux, une forte proportion des ouvrages, construits autour de 1960, parviennent à la fin de leur durée d'utilisation prévue et montrent des signes manifestes de dégradation. En conséquence, les coûts de maintenance croissent et les risques se développent, comme le traduisent quelques accidents spectaculaires : effondrement de ponts métalliques (Hintze Ribeiro au Portugal le 4 mars 2001, Minneapolis le 1/08/1997), de ponts en béton armé (Concorde-Montréal le 1 octobre 2006), rupture de parkings en béton armé (Wolverhampton le 20 mars 1997, Montréal le 26 novembre 2008)... Dans le cas courant, la dégradation ne conduit pas à l'effondrement de l'ouvrage, mais elle a des impacts économiques, puisqu'elle multiplie les coûts de réparation. Le défi majeur auquel sont confrontés les gestionnaires d'ouvrages est de planifier la maintenance de manière optimale, dans un cadre où les informations sont incomplètes, les ressources financières limitées et où les défaillances peuvent avoir des conséquences catastrophiques.

De nombreux travaux de recherche sont consacrés au développement de méthodes de management pour optimiser les budgets [3-10]. Nombre de ces méthodes reposent sur des données d'inspection quantitatives, ce qui confère une grande importance aux données issues de la surveillance et de l'inspection. Le travail que nous présentons ici montre comment des procédures intégrant les informations, même imparfaites, issues du contrôle non destructif peuvent être plus efficaces en termes de maîtrise des risques et des coûts que des procédures figées. Une procédure sera considérée comme « optimale » si elle minimise les coûts sur l'ensemble du cycle de vie du système. Elle résulte du choix approprié de nombreux paramètres, parmi lesquels la qualité de la technique de CND, les délais entre inspections et les niveaux des critères déclenchant les décisions de maintenance. Nous allons étudier le rôle que jouent ces paramètres et leurs interactions.

2. Description des modèles développés

Les modèles de dégradation sont établis sous la forme d'une évolution temporelle d'un indicateur d (taille de fissure, variable de dommage, pourcentage corrodé d'une surface donnée...). Les techniques de contrôle non destructif donnent un accès, direct ou indirect à cet indicateur. L'estimation de l'indicateur diffère de sa valeur réelle, du fait de nombreuses incertitudes : un défaut existant peut ne pas être détecté, ou être vu à une taille différente de la réalité [5, 11-12], dans d'autres cas, on peut même détecter un défaut inexistant (fausse alarme) [13]. On montre cependant que l'exploitation des informations fournies peut être utile pour procéder à une réévaluation de l'état du matériau ou, si l'on dispose de plusieurs informations recueillies à différentes périodes, à une évaluation de la cinétique de dégradation. La qualité des techniques d'inspection peut être évaluée de différentes manières. On peut, par exemple, construire les courbes « ROC » qui mettent en relation, pour un défaut de taille donnée et une technique de mesure donnée, dans un environnement de mesure particulier, la probabilité de non détection et la probabilité de fausse alarme [14]. On peut aussi exploiter des campagnes de mesures conçues pour identifier la plus ou moins grande répétabilité d'une technique de mesure et le bruit attaché à la mesure [15].

2.1. Modèles de croissance de défaut et de défaillance

Le modèle de croissance temporelle du défaut est régi par l'équation :

$$d(t + \Delta t) / d(t) = 1 + k \quad (1)$$

dans laquelle le taux de croissance k est une variable aléatoire gaussienne, supposée constante au cours d'un cycle de vie, c'est à dire pour un composant, jusqu'à ce qu'il soit réparé ou remplacé (k varie par contre d'un cycle à l'autre). A chaque pas de temps (annuel), la probabilité de défaillance, p_F , est calculée à partir de la taille du défaut. Nous avons choisi d'exprimer une relation sous la forme d'une loi de Weibull :

$$p_F(d) = 1 - \left[\exp - \left(\frac{d(t) - d_1}{d_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

où les trois paramètres d_0 , d_1 et m conditionnent la forme de la loi de répartition. La défaillance ne doit pas être interprétée comme l'effondrement de l'ouvrage, même si une telle loi a été utilisée par exemple pour décrire la distribution de résistance de composants en bois, mais dans le sens plus général d'atteinte d'un état-limite (ultime, de service ou de durabilité).

2.2. Modèles pour l'inspection et la décision

L'objectif de la maintenance optimisée est de détecter et réparer les dommages assez tôt, avant qu'ils n'induisent des risques ou des coûts trop élevés. Il s'agit donc de limiter la probabilité de défaillance entre deux inspections à un seuil particulier (probabilité acceptable p_{FA}), ce qui induit, par inversion de l'équation (2) une taille « critique » d_c pour les défauts au moment de leur inspection.

$$d_c = d_1 + d_0 \left[-(\ln(1 - p_{FA})) \right]^{1/m} \quad (3)$$

A chaque technique d'inspection, on peut attacher un degré de qualité Q , auquel correspond un bruit de mesure n , qui peut être décrit par une variable aléatoire. La valeur mesurée du défaut se distingue donc de la valeur vraie :

$$d_{mes} = d + n \quad (4)$$

Nous avons choisi d'exprimer l'intensité du bruit n en fonction de l'inverse de la qualité :

$$n = (1 / Q') d_{ref} \quad (5)$$

où d_{ref} est un paramètre de référence arbitraire, qui permet de donner au bruit la même dimension que l'intensité du défaut. La figure 1 illustre le processus de croissance et de mesure des défauts, superposant les effets de la croissance, de l'inspection et de la réparation. Les figures en carré correspondent aux valeurs mesurées de d au cours des inspections (avec une fréquence quinquennale). La qualité imparfaite implique que la valeur mesurée diffère de la valeur vraie. C'est sur la base de la valeur mesurée que l'on décide (à tort ou à raison) de la réparation, si la taille dépasse la taille critique d_c , qui vaut ici 0.41. Le défaut réparé retourne à sa taille initiale et un nouveau cycle débute, avec un taux de croissance indépendant du précédent.

Pour une technique d'inspection de qualité (figure 3a) la valeur mesurée est voisine de la valeur exacte et la décision (réparation ou non) est prise en général à bon escient. Quand la technique est moins bonne (figure 3b), donc moins coûteuse, on peut prendre des décisions de réparations prématurées (alors que le risque de défaillance reste faible) ou on n'a pas réparé quand il l'aurait fallu (et risquer la défaillance). Dans les deux cas, on induit des coûts inutiles, qui ne sont pas forcément compensés par les économies faites sur l'inspection.

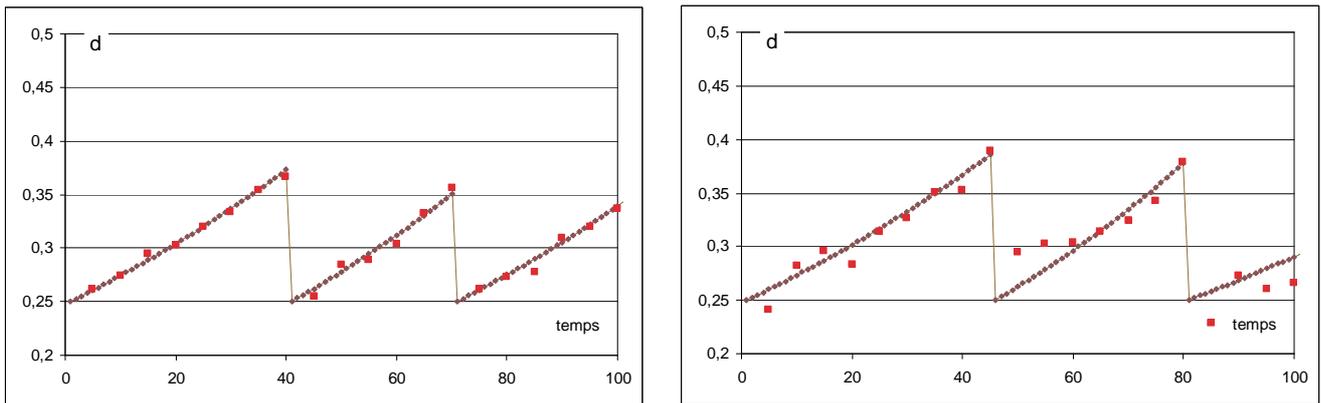


FIG.- 3. Cycle d'un vie d'un composant: comparaison entre une bonne technique (3a -gauche) et une mauvaise (3b - droite)

2.3. Expression des coûts

Les coûts se décomposent en coûts d'inspection, coûts de maintenance/réparation et coûts de défaillance. Les uns sont systématiques (l'inspection est menée selon une fréquence prédéfinie), les autres conditionnels (respectivement en cas de réparation et en cas de défaillance). La modélisation requiert l'expression des coûts unitaires, qui est fournie par les équations (6) à (8). Tous les coûts sont normalisés par rapport à un coût de référence C_0 qui est le coût du composant neuf.

Le coût unitaire d'inspection s'exprime :

$$C_i = C_0 k_i (Q')^a \quad (6)$$

où k_i est un coefficient qui quantifie le coût d'inspection et a est un exposant positif qui exprime la manière dont le coût d'inspection croît avec sa qualité.

Le coût unitaire de réparation s'exprime :

$$C_r = C_0 k_r d \quad (7)$$

où k_r est un coefficient qui quantifie le coût de réparation. Le modèle exprime que le coût de réparation est proportionnel à la taille du défaut.

Le coût de défaillance s'exprime de manière similaire :

$$C_f = C_0 k_f \quad (8)$$

où k_f est un coefficient qui quantifie l'intensité des conséquences de la défaillance. Il peut être très élevé quand la défaillance a un impact (en termes techniques, environnementaux ou de sécurité par exemple) qui dépasse largement le périmètre du composant ou de l'ouvrage. On peut raisonnablement penser que la valeur de la probabilité admissible de défaillance p_{FA} est adaptée à l'intensité des conséquences redoutées de cette défaillance.

L'ensemble des coûts peut être affecté d'un facteur d'actualisation r qui permet de tenir compte de l'inflation.

3. Paramètres influents de l'efficacité de la stratégie d'inspection

3.1. Cadre de simulation

Tous les modèles ayant été définis, on peut procéder aux simulations. Nous avons choisi de travailler dans le cadre de simulations de Monte-Carlo, qui permettent de gérer efficacement le caractère aléatoire des différentes variables qui régissent la croissance des défauts, la défaillance et les résultats de l'inspection. Etant donné que de nombreux paramètres ont été introduits dans les différents modèles (de croissance de défaut, d'inspection, de coûts), l'analyse des stratégies se doit de focaliser sur certains aspects. Le Tableau 1 rassemble les valeurs des paramètres utilisés. Les valeurs retenues pour la loi de croissance des défauts conduisent à une défaillance naturelle après environ 60 années en l'absence de maintenance. La simulation de Monte-Carlo est

conduite sur une durée de 10.000 ans, ce qui revient à simuler environ 150 à 250 cycles de vie successifs. Les résultats de la simulation sont traités de manière à calculer l'ensemble des coûts et leur répartition entre coût d'inspection, de réparation et de défaillance. On comptabilise aussi combien de réparations sont effectuées à la suite d'une bonne décision ou d'une fausse alarme (réparation prématurée).

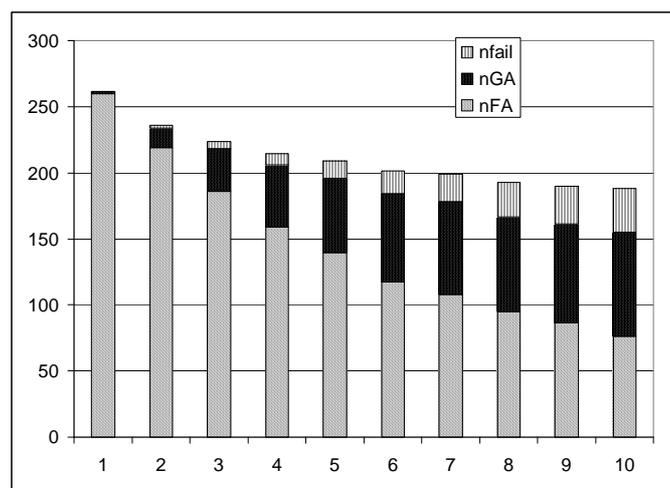
Modèle de croissance de défaut et de défaillance	
Taux de croissance k (moyenne et écart-type)	0,01; 0,002
Taille initiale de défaut, d_0	0,25
Exposant de la loi de Weibull, m	4
Taille limite de défaut, d_1	0,33
Probabilité annuelle acceptable, p_{FA}	0,01
Modèle de la technique de contrôle	
Qualité de l'inspection, Q'	8
Exposant de coût, a	0,5
Modèles de coûts unitaires	
Coût de construction, C_0	1000
Coefficient d'inspection, k_i	0,005
Coefficient de réparation, k_r	0,05
Coefficient d'impact de défaillance, k_f	1
Facteur d'actualisation, r	0

TABLEAU 1. – Paramètres des modèles

3.2. Durée optimale entre inspections

On étudie dans un premier temps comment la durée optimale peut dépendre des hypothèses faites sur les différents coûts unitaires. La Figure 2 synthétise les résultats obtenus quand on fait varier la durée d'inspection ΔT de 1 à 10 ans. On note que :

- le nombre de défaillances (nfail) augmente avec ΔT , puisque des inspections trop éloignées ne peuvent prévenir efficacement la défaillance (lors de l'inspection, le défaut est sous la taille critique, mais il croît ensuite),
- le nombre de réparations après une fausse alarme (nFA) est plus élevé que celui suite à de bonnes décisions (nGA), et la différence est plus grande quand ΔT diminue. Cela provient de l'erreur de mesure, dont la conséquence est, une fois sur deux, de surestimer la taille du défaut. On le fait d'autant plus souvent que l'on inspecte à des intervalles rapprochés. Une conséquence directe est que la durée de vie moyenne passe de moins de 40 ans ($38,1 = 10\,000/262,6$ si $\Delta T = 1$ an) à plus de 50 ans ($53,0 = 10\,000/188,6$ si $\Delta T = 10$ ans).

FIGURE 2. – Effectif des différentes causes de fin de vie, en fonction de ΔT entre 2 inspections

Les coûts calculés pour différents ΔT sont comparés sur la Figure 3, en distinguant ceux liés à l'inspection, à la défaillance et à la réparation. Dans ces derniers, on différencie les coûts résultant d'une fausse alarme (FA) de ceux résultant d'une bonne décision (GD). Avec le jeu de paramètres retenus, les coûts de réparation demeurent

faibles et la durée optimale entre deux inspections s'explique par le fait que si la durée augmente, les coûts de défaillance augmentent plus vite que les coûts d'inspection ne décroissent. L'optimum est ici à 4 ans.

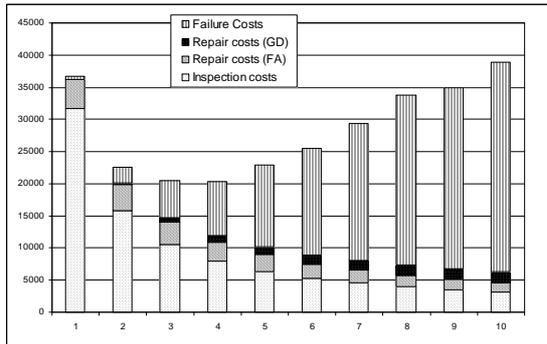


FIGURE 3. – Variation des différents coûts en fonction de ΔT entre 2 inspections

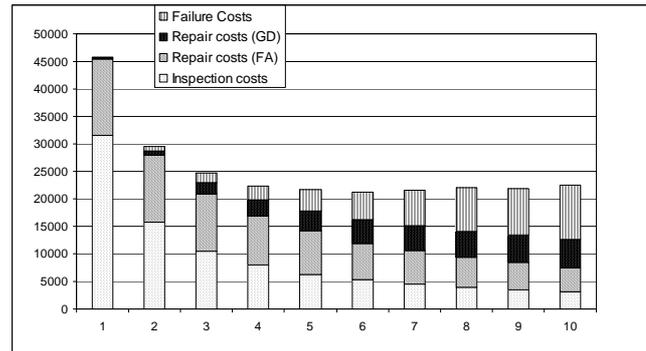


FIGURE 4. – Variation des différents coûts en fonction de ΔT entre 2 inspections (coûts unitaires modifiés)

Il suffit de modifier les coefficients attachés aux différents coûts pour déplacer cet optimum. Par exemple, si l'on affecte un coût plus élevé aux réparations ($k_r = 0,15$ au lieu de $0,05$) et un coût plus faible aux défaillances ($k_f = 0,3$ au lieu de $1,0$), on obtient les résultats de la Figure 4. Ces résultats montrent une grande sensibilité aux hypothèses économiques.

3.3. Effet de la qualité d'inspection

La qualité d'inspection a une influence directe sur la prise de décision, du fait de la réduction des bruits (Eq. 5), et sur les coûts d'inspection (Eq. 6). La Figure 5 montre comment, pour une durée entre deux inspections égale à 7 ans, l'ensemble varie pour une large plage de variation de la qualité d'inspection. Dans ce cas, les coûts unitaires considérés sont : $k_r = 0,001$, $k_r = 0,15$, $k_f = 0,3$. La simulation montre que l'optimum est obtenu pour une technique de qualité intermédiaire : une technique trop sophistiquée voit les coûts d'inspection augmenter sans que le bénéfice en termes de prévention de la défaillance ou de réduction des fausses alarmes ne le compense. Bien entendu, la position de la valeur optimale dépend fortement du coefficient α (relation entre coût et qualité de l'inspection). Pour que de tels raisonnements ne demeurent pas purement formels, il conviendra de s'appuyer sur des données issues de l'expérimentation, telles que celles obtenues dans le Projet Senso [15] sur l'évaluation non destructive des ouvrages en béton armé pour fournir des éléments concrets alimentant les équations 5 et 6.

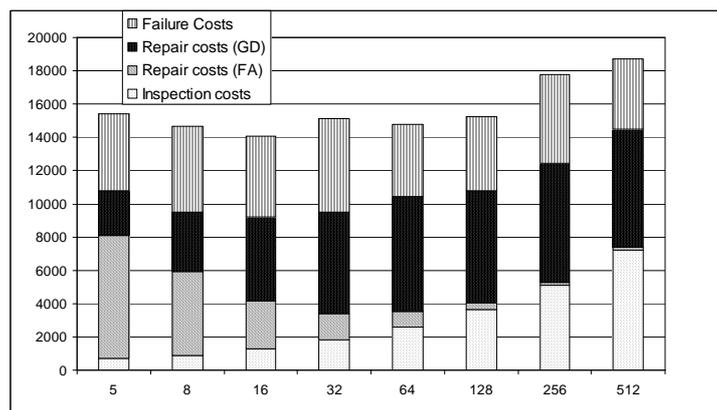


FIGURE 5. – Influence de la qualité d'inspection sur les coûts.

3.4. Effet de la probabilité acceptable de défaillance

Dans les simulations précédentes, la probabilité annuelle acceptable de défaillance était fixe ($p_{FA} = 10^{-2}$). Ce paramètre résulte en fait du choix du décideur, qui le choisit en fonction, entre autres du degré de gravité des conséquences possibles de la défaillance. Si ce paramètre est considéré comme un degré de liberté supplémentaire, l'optimalité de la stratégie de maintenance correspond à un triplet ΔT , Q et p_{FA} . Nous avons fait

varier la valeur de p_{FA} entre 10^{-4} et 10^{-1} . Cette plage de valeurs permet de couvrir des défaillances très redoutées et des défaillances plus bénignes, qui n'ont pas de conséquences catastrophiques. Elle correspond à des probabilités pour une période de référence de 50 ans couvrant la plage de 0,5 % à 50 %, ce qui correspond typiquement aux Etats Limites de Service définis par les règlements de construction.

Pour rechercher la solution optimale en termes de triplet $\{\Delta T, Q', p_{FA}\}$, nous avons augmenté le nombre de simulations de Monte-Carlo, en simulant 100.000 ans, ce qui correspond à un nombre de cycles de l'ordre de 2500 à 4500 (selon Q'). Ce nombre plus élevé permet d'améliorer la qualité de la convergence en réduisant le bruit statistique, comme on peut le voir sur les figures 6 à 8 qui indiquent comment varie, en fonction de ΔT et de Q , pour deux valeurs de p_{FA} : le nombre de fausses alarmes (nFA – figure 6), le nombre de bonnes décisions (nGA – figure 7) et le nombre de défaillances (nfail). Sur ces graphiques, la qualité Q' a été remplacée par Q avec $Q' = 2^Q$ de manière à mieux voir l'influence de la qualité de la technique. Ainsi, une valeur $Q' = 8$ utilisée ci-dessus correspond à $Q = 3$. Les mêmes tendances peuvent être observées pour les deux niveaux de p_{FA} et la forme observée des surfaces est conforme à ce que l'on avait observé précédemment. Par exemple, le nombre de fausses alarmes décroît quand ΔT augmente, car les effets parasites du bruit de la technique de mesure se réduisent. Toutefois, pour une très bonne technique ($Q > 5$ ou $Q' > 32$), le nombre de fausses alarmes est très bas. La figure 8 montre que le nombre total de défaillances augmente avec ΔT , mais il augmente moins pour une bonne technique.

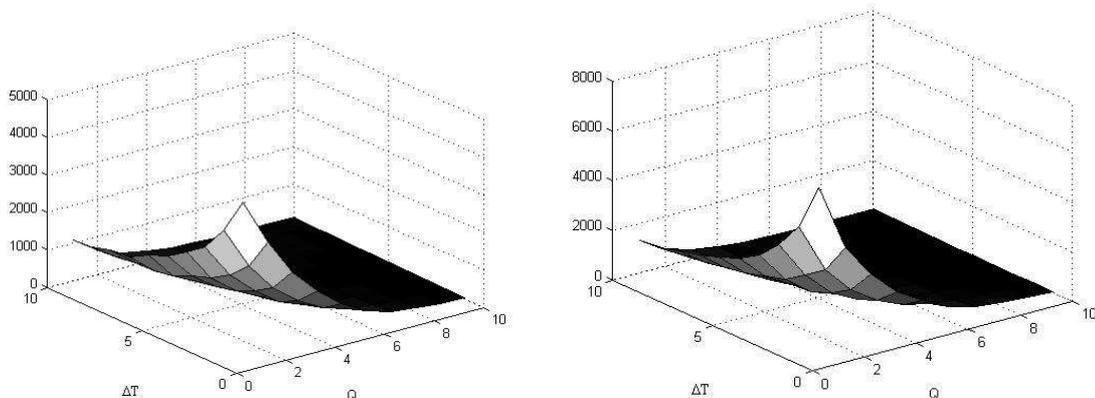


FIGURE 6. Nombre de fausses alarmes en fonction de la qualité de la technique Q et de la durée ΔT entre deux inspections (gauche: $p_{FA} = 10^{-2}$, droite: $p_{FA} = 10^{-3}$)

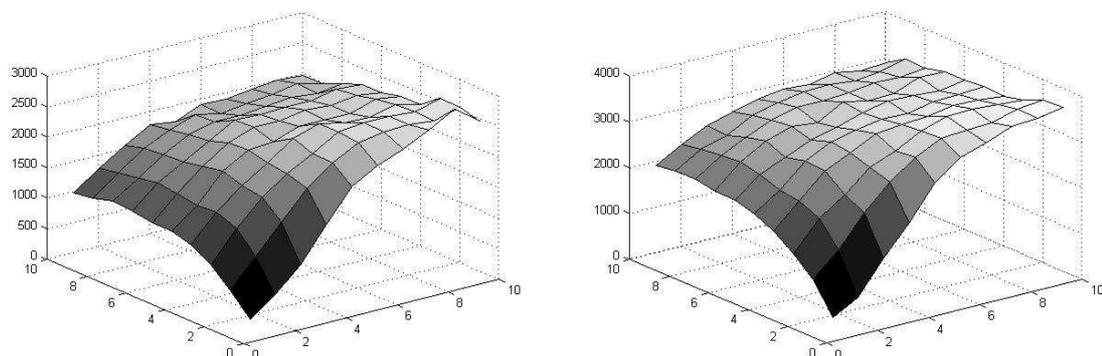


FIGURE 7. Nombre de bonnes décisions en fonction de la qualité de la technique Q et de la durée ΔT entre deux inspections (gauche: $p_{FA} = 10^{-2}$, droite: $p_{FA} = 10^{-3}$)

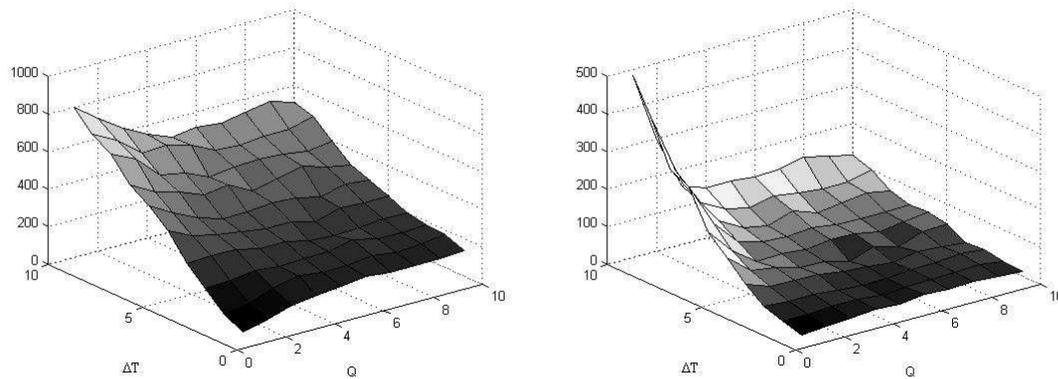


FIGURE 8. Nombre de défaillances en fonction de la qualité de la technique Q et de la durée ΔT entre deux inspections (gauche: $p_{FA} = 10^{-2}$, droite: $p_{FA} = 10^{-3}$)

On peut aussi observer que modifier la valeur de p_{FA} a deux effets contradictoires en termes de coût total : une probabilité acceptable plus sévère abaisse le nombre de défaillances mais elle augmente le nombre de réparations (la durée de vie moyenne diminue). Cela confirme l'intérêt de considérer ce paramètre pour optimiser la stratégie globale. Puisque tous les résultats concernant l'optimalité des coûts dépendent fortement des valeurs des coefficients de coûts unitaires (k_i , k_r et k_f introduits aux Equations 6 à 8), il a été décidé d'en choisir des valeurs arbitrairement et d'analyser l'optimalité pour ces valeurs. Pour des applications concrètes, il sera bien entendu nécessaire d'identifier, à partir de données issues du terrain, des valeurs des coefficients de coûts unitaires aussi représentatives que possible de la réalité. La figure 9 montre ce que l'on obtient avec deux ensembles légèrement différents : ensemble A $\{k_i = 0,0007, k_r = 0,1, a = 0,06, k_f = 1\}$, ensemble B $\{k_i = 0,0007, k_r = 0,1, a = 1,5, k_f = 1\}$. La différence entre ces deux ensembles porte sur le coefficient a , qui traduit la manière dont le coût d'inspection augmente avec sa qualité. Une forte valeur de ce coefficient (ensemble B) pénalise les très bonnes techniques, dont l'aptitude à bien détecter les défauts n'est pas contrebalancée par leur coût. Les surfaces optimales ont été construites en considérant quatre valeurs de $p_{FA} = \{10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}\}$ et en retenant celle qui donne le moindre coût pour chaque couple $\{\Delta T, Q\}$ du domaine de valeurs explorées.

La solution optimale correspond au domaine $\{p_{FA}, \Delta T, Q\} = \{10^{-3}, 5, 6-7\}$ avec l'ensemble A et à $\{p_{FA}, \Delta T, Q\} = \{10^{-3}, 6, 3-4\}$ avec l'ensemble B, confirmant la grande sensibilité de la solution optimale à la manière dont les coûts sont pris en compte. En fait, si le coût d'inspection s'élève rapidement avec leur qualité, il vaut mieux utiliser une technique grossière (ensemble B) et espacer les inspections, ce qui peut induire un certain nombre de défaillances. A l'inverse, si le fait d'utiliser une très bonne technique n'induit pas de coûts prohibitifs, cela justifie des inspections plus fréquentes, qui permettent de réduire le nombre de défaillances. Le nombre de défaillances observées à l'optimum passe de 50 pour l'ensemble B à moins de 20 pour l'ensemble A, ce qui correspond à des probabilités effectives respectives de $0,5 \cdot 10^{-3}$ et de $0,2 \cdot 10^{-3}$. Ces valeurs sont très inférieures aux valeurs acceptables de p_{FA} , puisqu'elles incluent les effets de la politique de maintenance préventive.

4. Un cadre général pour une modélisation plus riche

4.1. Cinétiques avec temps de latence

Les simulations conduites ci-dessus ont fait l'hypothèse d'une croissance monotone des défauts (équation 1). En fait, la cinétique de développement de la corrosion dans le béton armé se caractérise par l'existence d'une période de latence [16, 17], qui correspond au processus de carbonatation et de diffusion des ions chlorures dans le béton. Ce n'est qu'après un certain temps qui dépend, entre autres, de la concentration en CO_2 et en Cl^- de l'environnement et des coefficients de diffusion du béton et de l'épaisseur d'enrobage des armatures), que les conditions sont telles à la surface des armatures métalliques, que la corrosion peut se développer.

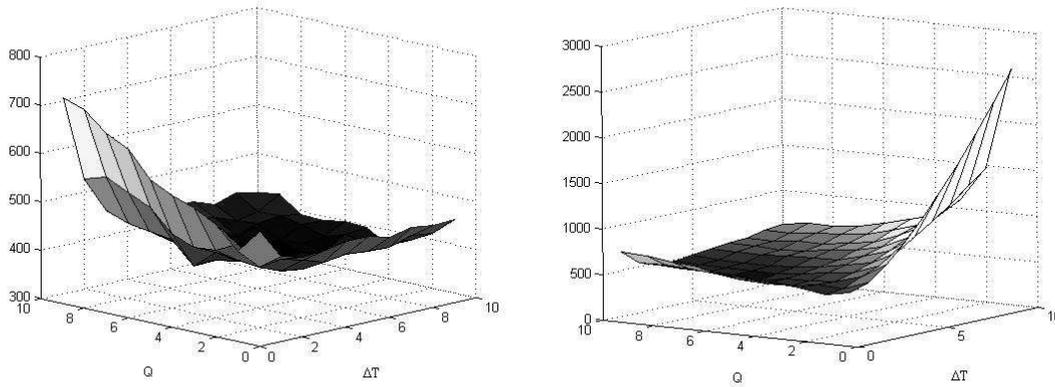


FIGURE 9.- Coût total en fonction de Q et ΔT (gauche : ensemble A, droite : ensemble B)

	ΔT = 1 an	ΔT = 10 ans
Q = 1 (mauvaise qualité d'inspection)	Cas 1	Cas 2
Q = 10 (très bonne qualité d'inspection)	Cas 3	Cas 4

TABLEAU 2. – Valeurs choisies de ΔT et Q.

Nous avons donc adapté la cinétique du modèle de développement des défauts pour décrire ce processus, qui est celui induisant les coûts les plus élevés d'entretien dans les structures en béton armé. Cette cinétique est adaptée en intégrant une variable additionnelle (considérée comme aléatoire) : le temps de latence T_{lat} . Tant que l'âge du composant lui est inférieur, les défauts (ou macro-défauts) ne progressent pas. A titre d'exemple une loi de distribution de type Lognormale ($m=10ans$, $\sigma=5ans$) a été utilisée, sachant que d'autres lois de type extrême (Weibull, Gumbel III) sont également utilisées pour décrire T_{lat} . La distribution de la durée de vie des composants pour quatre cas de combinaison de $\{\Delta T, Q\}$ discriminants (tableau 2) et pour deux probabilités acceptables de défaillance $p_{FA} = \{10^{-2}, 10^{-3}\}$ a été obtenue.

La figure 10 présente les fonctions de répartition des durées de vie après réparation ou remplacement. L'on peut observer que pour une mauvaise qualité d'observation (cas 1 et 2), la durée de vie médiane augmente respectivement, pour le jeu de paramètres utilisés, de 7 ans ($p_{FA} = 10^{-2}$) ou 9 ans ($p_{FA} = 10^{-3}$) lorsque la durée d'inspection ΔT est plus longue. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'on inspectant fréquemment avec une technique médiocre, on déclenche de nombreuses fausses alarmes et on provoque des interventions précoces. Le problème ne se produit plus lorsque la qualité d'inspection est meilleure (cas 3 ou 4).

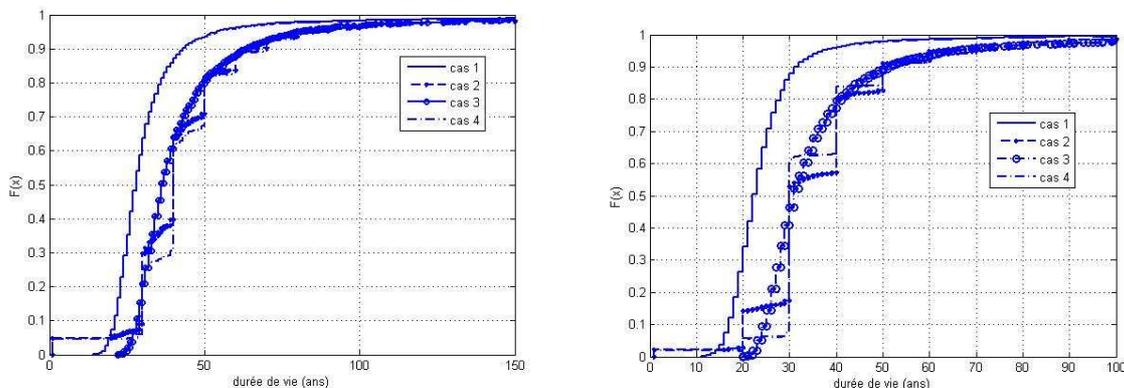


FIGURE 10.- Durée de vie après réparation/remplacement (gauche: $p_{FA} = 10^{-2}$, droite: $p_{FA} = 10^{-3}$)

La figure 11 présente les fonctions de répartition des durées de vie pour les seuls cycles se terminant par une

upture. Malgré les 100.000 ans (soit un nombre de cycles de l'ordre de 2500 à 4500, selon la qualité d'inspection Q), le nombre de ruptures observées peut être faible, voire nul (cas 1 pour $p_{FA} = 10^{-3}$), ce qui peut poser un problème d'échantillonnage. La recherche d'une stratégie optimale devra analyser plus en détail cette question, surtout quand les conséquences des ruptures sont prohibitives.

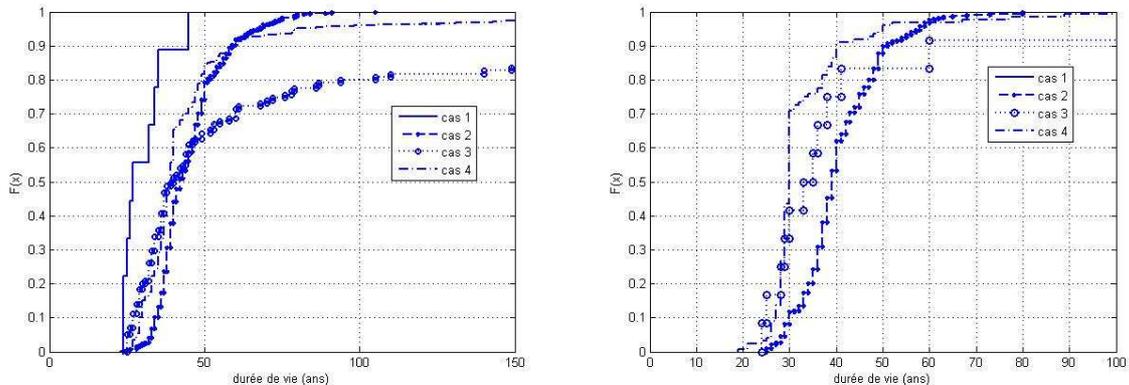


FIGURE 11.- Durée de vie après rupture (gauche: $p_{FA} = 10^{-2}$, droite: $p_{FA} = 10^{-3}$)

4.2. Inspection dynamique

Une autre voie d'utilisation du modèle développé est l'utilisation dynamique des résultats issus de l'inspection pour adapter en temps réel, non seulement la décision de réparation mais aussi le temps avant la prochaine inspection. Dans ce cadre, le paramètre ΔT n'est plus considéré comme fixe a priori, mais devient une variable, dont la valeur changera au fil du temps. Le principe est simple : si l'on connaît la taille critique du défaut à ne pas dépasser et si l'on peut estimer la cinétique de développement du défaut (dès que l'on dispose de 2 ou plus résultats d'inspection), on peut estimer la durée nécessaire pour que le défaut atteigne la taille critique. Il suffit dès lors de programmer la prochaine inspection en fonction de cette estimation. Les résultats disponibles pour ce type d'inspection seront présentés lors de la communication orale.

5. Conclusions

La maintenance basée sur l'inspection est une alternative économique à la maintenance systématique, dans la mesure où l'entretien et la réparation ne sont décidés que sur la base des résultats d'inspection. Mais sa réussite requiert que les décisions soient prises sur une base assurée, en particulier, par une quantification correcte de l'état de développement des dégradations. Si ce n'est pas le cas, des surcoûts peuvent être induits du fait de décisions conservatrices ou à cause de défaillances non prévues. C'est la raison pour laquelle nous avons développé un modèle complet de simulation de la maintenance basée sur l'inspection pour des ouvrages de génie civil, dans un contexte incertain. La modélisation des incertitudes porte à la fois sur les cinétiques de dégradation, sur les résultats d'inspection et sur les défaillances. Les modèles développés sont à caractère générique et peuvent être adaptés aisément à un contexte plus particulier.

Bien sur, dans la mesure où la description du système fait appel à de nombreux paramètres (croissance des défauts, défaillance, techniques de détection, modélisation des coûts...), on ne peut tirer de conclusions universelles. Nous avons préféré étudier l'effet de quelques paramètres qui nous paraissent essentiels. Ce travail démontre que la prise en compte des coûts et de la qualité des inspections ont une influence majeure sur le caractère optimal d'une procédure d'inspection, et donc sur les coûts totaux sur l'ensemble du cycle de vie d'un composant. Du fait des nombreux couplages entre les effets des différents paramètres, ces études devront être poursuivies, en particulier en alimentant les modèles de données issues de la pratique (dispersion des propriétés matériaux, qualité et coûts des techniques, conséquences économiques de la défaillance...). La simulation offre toutefois, dès à présent, un outil très puissant pour mieux comprendre le rôle de chaque paramètre. Elle permet aussi d'ouvrir de nouvelles pistes, comme celle de la maintenance dynamique où la procédure d'inspection est actualisée en temps réel, sur la base des résultats de mesure. Les travaux à venir devront s'appuyer sur des

campagnes de mesures spécifiques, permettant de quantifier la qualité et la fiabilité des techniques d'inspection pour les ouvrages de génie civil en environnement réel. Les recherches menées dans le programme SENSO sur les techniques de contrôle non destructif permettent de constituer des bases de données sur les matériaux et les techniques de contrôle qui pourront être valorisées dans ce cadre.

Références

- [1] Breyse D., Lataste J.F., Balayssac J.P., Garnier V., Quality and accuracy of concrete assesment provided by NDT measurement, 6th Int. Workshop on probabilities and materials, Darmstadt, 26-28/10/2008.
- [2] Breyse D., Yotte S., Salta M., Schoefs F., Uncertainties in NDT condition assessment of corroding structures, 1st Medachs conf., Lisbon, 27-30 jan. 2008.
- [3] Estes, A. C. and Frangopol, D. M. 1999. Repair optimization of highway bridges using system reliability approach. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, July 1999
- [4] Faber, M. H. 2002. RBI: An Introduction. *Structural Engineering International*, 3/2002, pp 187-194
- [5] Faber, M. H and Sorensen, J. D. 2002. Indicators for inspection and maintenance planning of concrete structures. *Journal of Structural Safety* 24, 2002
- [6] Kong, J. S. and Frangopol, D. M. 2005. Probabilistic optimization of ageing structures considering maintenance and failure costs. *Journal of Structural Engineering ASCE*, April 2005
- [7] Lauridsen, J., Bjerrum, J., Sloth, M. and Jensen, F. M. 2006. Principles for a guideline for probability-based management of deteriorated bridges. IABMAS 2006 Conference, Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto
- [8] Stewart, M. G. 2005. Life-cycle cost analysis considering spatial and temporal variability of corrosion-induced damage and repair of concrete surfaces. ICOSAR 2005
- [9] Stewart, M. G. and Mullard, J. A. 2006. Reliability based assessment of the influence of concrete durability on the timing of repair for RC bridges. IABMAS 2006 Conference, Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto
- [10] Breyse D., Vasconcelos E., Schoefs F., 2007, Management strategies and improvement of performances of sewer networks, *Computer Aided Civil and Infrasturcture Eng.*, 22, 462-477.
- [11] Onoufriou, T. and Frangopol D. M. 2002. Reliability-based inspection optimisation of complex structures: a brief retrospective. *Journal of Computers and Structures* 80, 2002
- [12] Straub, D, and Faber, M.H. 2003. Modeling dependency in inspection performance. *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, Rotterdam, 2003
- [13] Rouhan, A. and Schoefs, F. 2003. Probabilistic modeling of inspection results for offshore structures. *Journal of Structural Safety*, March 2003
- [14] Schoefs, F. and Clement, A. 2004. Multiple inspection modeling for decision making and management of jacket offshore platforms: effect of false alarms. *International Forum on Engineering Decision Making*, Switzerland, 2004
- [15] Breyse D., Elachachi S.M., Balayssac J.P., Laurens S., 2008, Méthodologie de qualification des observables issus du contrôle non destructif pour diagnostiquer l'état du béton, *Eur. J. Civ. and Env. Eng.*, 12, 459-472.
- [16] Kuniewski S.P., Van der Weide A.M., Van Noortwijk J.M. 2009, Sampling inspection for the evaluation of time-dependent reliability of deteriorating systems under imperfect defect detection, *Reliability engineering & system safety*, doi:10.1016/j.res.2008.11.013
- [17] Ceravolo R., Pescatore M., De Stefano A. 2009, Symptom based reliability and generalized repairing cost in monitored bridges, *Reliability engineering & system safety*, doi:10.1016/j.res.2009.02.010