
Comparaison de l'efficacité des maintenances systématiques et conditionnelles des structures vieillissantes

F. Schoefs*, E. Sheils*, D. Breysse**, A. O'Connor*****

F. Schoefs, E. Sheils***, D. Breysse**, A. O'Connor****

** Université de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR 6183 CNRS, Faculté des Sciences et des Techniques, 2 rue de la Houssinière, Nantes, F-44000 France. franck.schoefs@univ-nantes.fr*

*** Université Bordeaux1, CDGA, France*

**** Trinity College, Dublin, Ireland*

RÉSUMÉ. Les stratégies de maintenance basées sur les résultats d'inspection présentent une alternative intéressante pour la gestion de structures soumises à des dégradations. L'efficacité économique et/ou technique dépendent d'un grand nombre de facteurs comme la disponibilité, le coût et l'efficacité de techniques d'inspection,, les mécanismes gouvernant la perte de performance, le niveau requis de service et les coûts directs et indirects. Cet article étudie, sur la base de simulations de Monte-Carlo, l'optimisation de la période entre inspections.

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 availability, cost and efficiency of inspection techniques, the mechanisms involved in the loss of performance, 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, this paper studies, using Monte Carlo simulations, the benefits and limitations of an inspection based maintenance strategy.

MOTS-CLÉS: inspection, maintenance, réparation, PoD, PFA, fiabilité, analyse de risque.

KEYWORDS: inspection, maintenance, repair, PoD, PFA, reliability, risk analysis.

1. Introduction

La maintenance des infrastructures ouvre la voie à de nombreuses recherches depuis les années 80. L'objectif des travaux récents est de produire des modèles prédictifs et des simulations permettant d'optimiser les budgets d'Inspection Maintenance Réparation (*IMR*) (Estes *et al.*, 1999, Kong *et al.*, 2005, Lauridsen *et al.*, 2006, Radojicic *et al.* 2001, Stewart *et al.*, 2006). Par rapport à ces approches, cet article présente l'originalité de fournir une méthode générique et paramétrique intégrant un grand nombre des causes d'aléa : le modèle d'évolution, l'inspection, la défaillance. On présente d'abord une modélisation probabiliste des résultats d'inspection, qui guide la politique *IMR*. Les modèles d'évolution, d'inspection et de coût sont proposés dans les deux paragraphes suivants. L'article se conclut sur une illustration dont l'objectif est l'optimisation de la périodicité des inspections.

2. Concepts de base pour la modélisation probabiliste des résultats d'inspection

Dans les années 90, de nombreux travaux ont développé des concepts intégrant les imperfections dans la capacité de détection des techniques de contrôles non-destructifs (CND). Parmi eux, le concept de probabilité de détection *PoD* – probabilité de détecter un défaut existant- a connu une utilisation importante dans la maintenance des structures, donnant naissance aux stratégies de planification des inspections basées sur des analyses de risque (RBI : Risk Based Inspection) (Faber, 2002). Les secteurs les plus avancés dans cette utilisation sont les secteurs maritimes pour lesquels les coûts et les difficultés d'inspection sont des facteurs importants. Les modèles reposent soit sur des statistiques issues de campagnes d'inter-calibration (Barnouin *et al.*, 1993)), soit sur des hypothèses sur la modélisation par la théorie du signal de données d'inspection (Schoefs *et al.*, 2007). Plus récemment (Rouhan *et al.*, 2003), on a montré comment la probabilité de fausse alarme *PFA* – probabilité de détecter un défaut non existant- influait sur la politique de maintenance. Dans ce cas, des combinaisons de techniques permettent de déterminer des optimums intéressants du point de vue analyse de risque (Schoefs *et al.*, 2004).

Dans cet article, le défaut d en un point est supposé déterministe mais inconnu. L'inspection en donne alors une évaluation bruitée $\hat{d}$ [1]. Afin de simplifier les illustrations et de limiter le nombre de paramètres le bruit η est considéré comme centré ; il est aisé d'étendre le modèle au cas d'un biais de mesure. On suppose ici que le bruit est indépendant de la taille du défaut mesuré ce qui est le cas lorsque la qualité d'inspection est fortement affectée par les conditions environnantes (visibilité, difficulté d'accès et de mise en œuvre, etc). Cette hypothèse a été validée à partir d'une campagne de mesures dans le secteur portuaire (Schoefs *et al.*, 2007).

$$\hat{d} = d + \eta \quad [1]$$

3. Modélisation probabiliste de la détérioration et des inspections

3.1. Modèle de détérioration

Le modèle d'évolution aléatoire d'un défaut est décrit par [2]. Un modèle progressif et un modèle introduisant une augmentation brutale du défaut sont introduits. On définit alors une mesure de probabilité associée à ces deux modèles.

$$d_0 \frac{d(t + \Delta t)}{d_0} = \begin{cases} \frac{d(t)}{d_0} & \text{de probabilité} \left(1 - \frac{1}{g}\right) \\ \frac{d(t)}{d_0} (1 + g\alpha) & \text{de probabilité} \left(\frac{1}{g}\right) \end{cases} \quad [2]$$

où $d(t)$ est la taille du défaut à l'instant t , d_0 une taille de défaut de référence, g un paramètre décrivant la mesure de probabilité, Δt le pas de temps et α une variable aléatoire distribuée normalement $N[\mu; \sigma]$ décrivant la cinétique de dégradation. En modifiant la valeur de g , l'évolution du défaut est graduelle ou plus abrupte (Figure 1). La probabilité annuelle de défaillance p_F est calculée à partir d'une fonction de répartition de Weibull [3] d'exposant m , décrivant le mode d'évolution de p_F .

$$p_F(d) = 1 - \left[\exp - \left(\frac{d(t) - d_1}{d_0} \right)^m \right] \quad [3]$$

La taille de défaut limite d_1 [4] indique la valeur à partir de laquelle une mesure de la probabilité de défaillance peut être définie (figure 2).

$$p_F = \begin{cases} 0 & d \leq d_1 \\ p_F(d) & d > d_1 \end{cases} \quad [4]$$

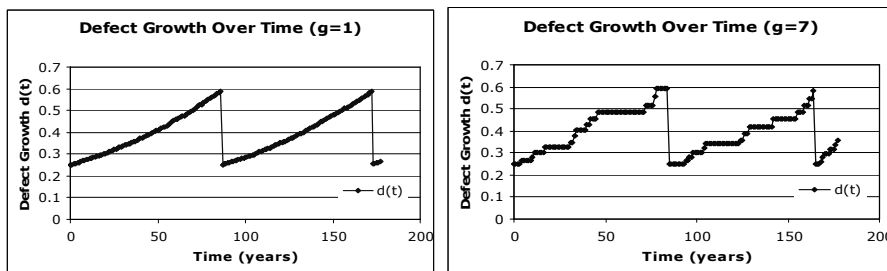


Figure 1. Cinétique de détérioration : $g=1$ (gauche), $g=7$ (droite) - 2 réparations

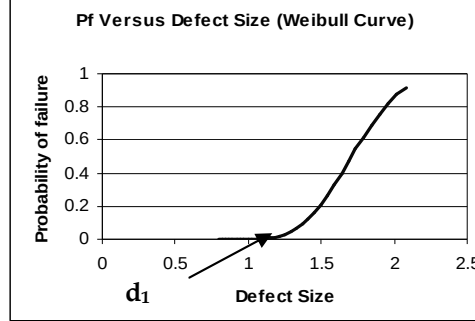


Figure 2. Evolution de la probabilité de défaillance avec la taille de défaut

3.2. Modèle de réparation

La figure 1 illustre le cas de réparations périodiques. Une réparation est réalisée si la taille du défaut détecté dépasse un niveau critique d_c calculé d'après [5] en fonction de p_{FA} , probabilité annuelle admissible de défaillance.

$$d_c = d_1 + d_0 \left[-(\ln(1 - p_{FA})) \right]^{1/m} \quad [5]$$

3.3. Modèle d'inspection

Le bruit η est supposé suivre une loi normale $N[0, \sigma_\eta]$. A partir de [1], on définit la PoD [6] et la PFA [7].

$$PoD = P(\hat{d} \geq d_{min}) \quad [6]$$

où d_{min} désigne le seuil de détection au-dessous duquel aucune détection n'est possible. Le modèle de PoD dépend de la taille du défaut et du type d'inspection. Pour cet article on choisit une fonction de Weibull [7] d'exposant β pour représenter la dépendance de PoD avec la taille du défaut. On suppose que le bruit et le seuil de détection sont constants pour chaque inspection et PFA est une constante.

$$PoD(d) = 1 - \left[\exp - \left(\frac{d - d_{min}}{d_0} \right)^\beta \right] \quad [7]$$

4. Stratégies d'Inspection Maintenance Réparation et modèles économiques

On compare ici plusieurs stratégies d'inspection maintenance réparation à politique fixée : en cas de détection de défaut, il peut y avoir réparation, sinon aucune réparation n'est programmée. L'analyse de risque nécessite un calcul des espérances de coûts. Des modèles de coûts sont proposés. On notera que selon le périmètre des actions, le coût de défaillance peut recouvrir des conséquences indirectes (coûts sociétaux, environnementaux). Ceci est particulièrement vrai dans le cadre d'une politique de développement durable où la reconstruction implique une démolition de l'ouvrage et une absence de disponibilité pendant une période longue.

4.1. Modèles de coût

Le coût de réparation dépend de la taille du défaut à réparer (c.a.d que le coût est directement proportionnel à un paramètre adimensionnel relié à la taille du défaut $d(t)/d_{ref}$). Le modèle est présenté en [8] : est le coefficient de réparation, $d(t)$ la taille du défaut au temps t , et d_{ref} une taille de défaut de référence.

$$C_R = C_0 k_R \left(\frac{d(t)}{d_{ref}} \right) \quad [8]$$

Lorsqu'une réparation est réalisée, le défaut revient à sa taille initiale d_0 .

Le coût d'une inspection unique est calculé selon l'équation [9].

$$C_I = C_0 k_I \left(\frac{Q}{Q_{ref}} \right) \quad [9]$$

où C_0 est le coût initial de construction, Q le coefficient de qualité de la technique et k_I le coefficient de pondération du coût d'inspection.

Le coût d'une défaillance est calculé selon l'équation [10] où k_f est le coefficient de pondération du coût de défaillance.

$$C_F = k_f C_0 \quad [9]$$

4.2. Calcul des espérances mathématiques des coûts

En fonction du résultat d'inspection et de la politique présentée en début de section 4, trois coûts peuvent être engendrés. On formule ici le calcul de leur espérance mathématique :

- si $d < d_{min}$ et $d_1 > d_{min}$: espérance $E(C_{01})$ en [11]
- si $d_{min} < d < d_c$: espérance $E(C_{023})$ en [13]

- si $d_{min} < d_c < d$: espérance $E(C_{045})$ en [14] (on suppose $d_1 < d_c$)

Pour plus de détail voir Sheils *et al.*, 2007.

$$E(C_{01}(t)) = \sum_{j=1}^N C_I P_{jT_i}(d < d_{min}) + \sum_{j=1}^N C_F \frac{T_i}{\Delta t} P_{f,jT_i}(d(jT_i) | d(jT_i) < d_{min}) P_{jT_i}(d < d_{min}) \quad [11]$$

où N est le nombre d'inspections et T_i la date d'inspection ($T_0=0$).

$$E(C_{23}(t)) = \sum_{j=1}^N C_I P_{jT_i}(d_{min} < d(jT_i) < d_c) + \sum_{j=1}^N C_R PFA(d(jT_i) | d_{min} < d(jT_i) < d_c) \\ P_{jT_i}(d_{min} < d(jT_i) < d_c) + \sum_{j=1}^N C_F \frac{T_i}{\Delta t} \left[(1 - PFA(d(jT_i) | d_{min} < d(jT_i) < d_c)) \cdot \right. \quad [13] \\ \left. P_{f,jT_i}(d(jT_i) | d_1 < d(jT_i) < d_c) P_{jT_i}(d_1 < d(jT_i) < d_c) \right]$$

$$E(C_{45}(t)) = \sum_{j=1}^N C_I P_{jT_i}(d_c < d(jT_i)) + \sum_{j=1}^N C_R [PoD(d(jT_i) | d_c < d(jT_i))] P_{jT_i}(d_c < d(jT_i)) \\ + \sum_{j=1}^N C_F \frac{T_i}{\Delta t} \left[(1 - PoD(d(jT_i) | d_c < d(jT_i))) \right. \quad [14] \\ \left. P_{f,jT_i}(d(jT_i) | d_c < d(jT_i)) P_{jT_i}(d_c < d(jT_i)) \right]$$

5. Simulations numériques

Les valeurs numériques choisies sont données dans le tableau 1.

Croissance du défaut

Taux de croissance, moyenne $\alpha(\mu)$ et écart type $\alpha(\sigma)$	0.01 ; 0.002
Taille de défaut initial, d_0	0.25
Paramètre de cinétique de dégradation, g	1
Taille de défaut de référence, d_{ref}	1

Probabilité de défaillance

Exposant de la probabilité de défaillance, m	4
Taille de défaut limite, d_1	0.33
Probabilité annuelle de défaillance acceptable, p_{FY}	0.01

CND

Seuil de détection, d_{min}	0.3
Qualité de l'inspection, Q et qualité de référence Q_{ref}	8 ; 20

PFA	0.5
<i>Modèles de coût</i>	
Coût initial de construction, C_0	1000
Coefficient d'inspection, k_i	0.005
Coefficient de réparation, k_r	0.05
Coefficient d'impact de la défaillance, k_f	1

Tableau 1. Paramètres retenus pour les modèles

On réalise des simulations de Monte-Carlo pour 500 composants de durée de service 25 ans. Les résultats d'évolution de chaque espérance de coût sont présentés en figure 3. On constate que la partie des surcoûts induits par l'inspection est faible devant le coût d'inspection et le coût de réparation. L'optimum, pour ce jeu de paramètre est de 4 ans entre inspection. Des études paramétriques complémentaires sont disponibles dans Sheils *et al.*, 2007.

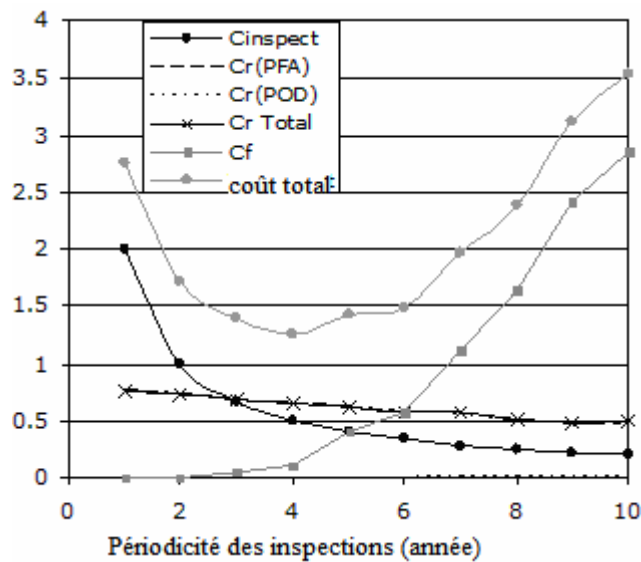


Figure 3. Evolution des espérances des coûts avec la période d'inspection

6. Conclusion

Cet article présente une approche globale de l'optimisation d'une politique d'Inspection-Maintenance-Réparation en présence d'aléas sur l'évolution du défaut et sur sa détection. Les formulations de l'espérance du coût dans différentes situations sont proposées et on conclut sur une illustration permettant de statuer sur

la périodicité optimale des inspections. Le projet Medachs vise à produire des valeurs pour l'ensemble des paramètres en jeu sur un ensemble de structures pilotes.

Remerciements

Cette étude est menée dans le cadre du projet européen MEDACHS, financé par les fonds FEDER, et dédié à l'analyse de la maintenance et de la fiabilité de structures vieillissantes placées en environnement marin.

6. Bibliographie

- Barnouin B., Lemoine L, Dovetr W.D., Rudlin J., Fabbri S., Rebourcet G., Topp D., Kare R., Sangouard D.. « Un-derwater inspection reliability trials for offshore structures ». In ASME NY, editor. *Proc. of the 12th OMAE conference*. Vol. 2 pp. 883-890. 1993.
- Faber, M. H.. « RBI: An Introduction », *Structural Engineering International*, 3/2002, pp 187-194, 2002.
- Kong, J. S. and Frangopol, D. M. « Probabilistic optimization of ageing structures considering maintenance and failure costs». *JSE ASCE*, April 2005.
- Lauridsen, J., Bjerrum, J., Sloth, M. and Jensen, F. M. « Principles for a guideline for probability-based management of deteriorated bridges». *IABMAS 2006*.
- Onoufriou, T. and Frangopol D. M. « Reliability-based inspection optimisation of complex structures: a brief retrospective». *JCS 80*, 2002
- Radojicic, A., Bailey, S. F. and Brühwiler, E. « Probabilistic models of cost for the management of existing structures». *Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems, SEI-ASCE*, August 2001.
- Rouhan, A. et Schoefs, F., « Probabilistic modelling of inspection results for offshore structures ». *Journal of Structural Safety*, vol 25, pp. 379-399, 20 pages, 2003.
- Rudlin JR, Dover WD.. « The ICON database. Assisting underwater inspections ». In: *Offshore technology*, vol. 4. 1996
- Schoefs, F. and Clement, A.. « Multiple inspection modeling for decision making and management of jacket offshore platforms: effect of false alarms ». *International Forum on Engineering Decision Making*, Switzerland, 2004.
- Schoefs F., Clément A., Memet J.B., et Nouy A.. « Spatial dependence of Receiver Operating Characteristic curves for Risk Based Inspection of corroded structures: application to on-pile wharf », à paraître, *Proceeding of I.C.A.S.P'07*, Tokyo, 2007.
- Sheils E., Schoefs F., Breyse D., O'Connor A., « Comparing efficiency of systematic and conditional maintenance for randomly ageing components », à paraître, *Proceeding of I.C.A.S.P'07*, Tokyo, 2007.
- Stewart, M. G. and Mullard, J. A. «Reliability based assessment of the influence of concrete durability on the timing of repair for RC bridges». *IABMAS 2006*.