

Analyse du coût de cycle de vie d'une structure en détérioration pour un plan d'inspection/réparation optimal

Bouchra Kouddane^{1,2}, Zoubir Mehdi Sbartai¹, Sidi Mohammed Elachachi¹, Nouzha Lamdouar²

¹I2M, Université de Bordeaux ; Talence, France, bouchra.kouddane@u-bordeaux.fr

²EMI, Université Mohammed V ; Rabat, Maroc,

Résumé

En général, au cours de leurs durées de service, les systèmes tels que les bâtiments, les ponts et les plates-formes offshore deviennent moins fiables et nécessitent des procédures d'inspection/entretien appropriées. Les décideurs sont souvent confrontés au défi de choisir entre des solutions moins coûteuses et d'autres plus efficaces. Pour y parvenir, une meilleure stratégie d'inspection/maintenance doit être élaborée à l'aide d'une méthode d'optimisation de coût de cycle de vie.

L'objectif de ce travail est d'aider à la prise de décision en choisissant une solution équilibrant les performances de la structure et son coût de cycle de vie. La stratégie d'optimisation s'applique aux dommages dont l'évolution peut être modélisée au fil du temps. En minimisant le coût total du cycle de vie et en maintenant une fiabilité admissible, la meilleure stratégie d'inspection/réparation est définie. Les variables de décision dans l'optimisation sont le temps auquel les inspections/réparations sont effectuées et le nombre d'inspections, au cours de la durée de vie de la structure.

L'effet de plusieurs facteurs est mis en évidence, telles que la qualité de la technique d'inspection, le coût attendu d'une défaillance structurelle, ainsi que les effets des intervalles de temps de contrôle uniformes et non uniformes.

Mots-clefs : optimisation, coût total, minimisation, CND, fiabilité.

I. INTRODUCTION

Faire des estimations quantitatives de la durée de vie des structures en béton est devenu possible grâce à la bonne compréhension de la mécanique et de la cinétique de plusieurs événements qui conduisent à la dégradation du béton. La dégradation de la résistance d'une structure en béton exposée à un environnement agressif peut être évaluée à partir d'un modèle de croissance de dommages (Mori and Ellingwood, 1994). Comprendre les mécanismes de dégradation structurelle est essentiel pour quantifier la performance du cycle de vie des systèmes structurels sous incertitude. Certaines études ont été menées pour déterminer les stratégies d'inspection/maintenance optimales pour les structures métalliques soumises à la fatigue, en supposant qu'un composant est remplacé si l'intensité des dommages détectés dépasse une valeur

critique (Thoft-Christensen and Sørensen, 1987). En ce qui concerne la détection de la dégradation du béton, de nombreuses études ont proposé la mise en œuvre de techniques d'évaluation non destructives. Par exemple, (Kashif Ur Rehman et al., 2016) ont fourni un aperçu intéressant des techniques de CND utilisées pour la détection des défauts dans les ponts en béton armé. Pour mettre en évidence les avantages et les inconvénients des CND, plusieurs études comparatives ont été réalisées (Yehia et al., 2007), (Pushpakumara et al., 2017), (Gucunski et al., 2012).

La stratégie d'optimisation est applicable pour tout type de dommage dont l'évolution peut être modélisée dans le temps. Toute stratégie d'évaluation de la durée de vie implique un certain nombre d'éléments essentiels : un modèle de détérioration, des propriétés matérielles caractéristiques pertinentes, et des facteurs ou marges de sécurité qui prennent en compte les incertitudes du système global (Somerville, 1992), (Bismut and Straub, 2019).

Cet article propose une nouvelle méthodologie pour optimiser la stratégie d'inspection/réparation de la durée de vie d'une structure en minimisant le coût total du cycle de vie tout en satisfaisant différentes contraintes et en introduisant des méthodes d'inspection non destructives. Les variables de décision dans l'optimisation sont les moments auxquels les inspections/réparations sont effectuées et le nombre d'inspections, pendant la durée de vie de l'ouvrage. L'influence du nombre d'inspections peut être prise en compte en résolvant le problème d'optimisation pour un certain nombre de valeurs différentes (de 1 à 10) afin d'identifier la valeur pour laquelle le coût total est minimum.

Un programme Python a été développé pour calculer le problème de minimisation et les coûts attendus. Un plan d'inspection optimal implique plusieurs aspects tels que le coût et la qualité de l'inspection par CND, le coût de la réparation, le coût de défaillance, le taux d'actualisation net, les inspections uniformes ou non uniformes, etc. Le problème fondamental consiste à calculer le nombre d'inspections optimales en tenant compte des aspects indiqués, mais en maintenant également un certain niveau de fiabilité.

II. MODELISATION PROBABILISTE DES DOMMAGES STRUCTURELS

Plusieurs modèles ont été développés pour prédire la durée de vie du béton soumis à des processus de dégradation (Clifton, 1991). Une variété de méthodes CND, chacune avec des coûts et qualités différents, peut être utilisée pour évaluer l'état d'une structure pendant sa durée de vie (Onoufriou and Frangopol, 2002). Dans cet article, l'intensité d'endommagement η , qui définit le degré d'endommagement existant dû à la diminution du module d'Young au fil du temps, est définie comme le rapport :

$$\eta(t) = \frac{E0 - E(t)}{E0} \quad (1)$$

Où $E0$ = module d'Young initial du béton, $E(t)$ = module d'Young au temps t , et t = temps en années.

L'intensité du dommage peut avoir une valeur comprise entre zéro et un. Le module de Young représente l'élasticité du matériau. Dans certains cas particuliers, il peut également être utilisé pour l'étude et la mesure indirecte de la porosité, de la création de fissures, de la dureté, de la résistance à la compression, etc. La technique de vitesse d'impulsion ultrasonique est la plus qualifiée pour déterminer avec précision le module d'Young (Lin, 2018).

Un module de Young $E(t)$ décroissant en fonction du temps peut être calculé comme suit :

$$E(t) = E0 - k * Ti \quad (2)$$

Où k est le taux de croissance des dommages. Par conséquent, après la réparation, le module de Young $E(t)$ est calculé comme suit :

$$E(t) = E_r - k * Ti \quad (3)$$

Où E_r est le module de Young du béton réparé qui peut être estimé par le CND. Le coût associé à une méthode d'inspection réelle est estimé sur la base de la qualité de la détectabilité. Ainsi, pour définir la qualité d'une méthode d'inspection non destructive, une fonction de détectabilité des dommages est nécessaire. En considérant l'intensité des dommages η , la fonction de détectabilité est modélisée dans cette étude comme une fonction de distribution normale cumulative pour chaque méthode du CND (Frangopol et al., 1997).

La probabilité de détection des dommages est approximée comme suit :

$$PoD = \begin{cases} 0, & \eta \leq \eta_{min} \\ \Phi\left(\frac{\eta - \eta_{0.5}}{0.1 \eta_{0.5}}\right), & \eta_{min} < \eta \leq \eta_{max} \\ 1, & \eta > \eta_{max} \end{cases} \quad (4)$$

Où $\eta_{0.5}$ est l'intensité du dommage pour laquelle la méthode CND a une probabilité de détection de 50%. L'intensité minimale des dommages détectables « η_{min} » et l'intensité maximale au-dessus de laquelle la probabilité de détection est de 1 « η_{max} » sont données, sachant que $\sigma = 0.1 \eta_{0.5}$:

$$\eta_{min} = \eta_{0.5} - 3\sigma = 0.7 \eta_{0.5} \quad (5)$$

$$\eta_{max} = \eta_{0.5} + 3\sigma = 1.3 \eta_{0.5} \quad (6)$$

III. LES DIFFERENTS COUTS AU COUR DE LA DUREE DE VIE D'UNE STRUCTURE

A. Coût d'inspection

En général, l'efficacité des méthodes non destructives affecte le coût d'inspection. Le coût associé à une méthode d'inspection, peut être estimé en fonction de la qualité de la détectabilité comme suit, où C_{init} est le coût initial (Mori and Ellingwood, 1994) :

$$C_{insp} = 0,07 C_{init} (1 - 0,7 \eta_{0.5})^{20} \quad (7)$$

Ainsi, le coût d'inspection global attendu pour un plan impliquant N_{insp} inspections est :

$$C_{INSP} = \sum_{i=1}^{N_{insp}} \frac{C_{insp}}{(1+r)^{T_{insp,i}}} \quad (8)$$

Un taux d'actualisation r de 0.02 est utilisé.

B. Coût de réparation

La structure ne sera pas réparée si l'intensité des dommages est inférieure à η_{min} . En cas de réparation après une inspection ayant une détectabilité médiane de $\eta_{0.5}$, l'intensité des

dommages passera de η_i à η_{rep} . Lorsque $\eta_i > \eta_{max}$, l'endommagement de la structure réparée sera réduit à $\eta_{0,5}$.

$$\eta_{rep} = \begin{cases} \eta_i, & \eta_i \leq \eta_{min} \\ \frac{\eta_{min} + \eta_i}{2}, & \eta_{min} < \eta \leq \eta_{max} \\ \eta_{0,5}, & \eta_i > \eta_{max} \end{cases} \quad (9)$$

Ce document suppose que lorsqu'un dommage est détecté, il est réparé. Dans ce cas, le coût de la réparation peut être exprimé comme suit :

$$C_{rep} = m * C_{init} * e_{rep}^Y \quad (10)$$

Où Y est un paramètre du modèle égal à 0,5 et $m = 5$. L'effet d'une activité de réparation e_{rep} peut être quantifié comme suit :

$$e_{rep} = \frac{|\eta_i - \eta_{rep}|}{\eta_{0,5}} \quad (11)$$

Alors le coût total de réparation attendu est :

$$C_{REP} = \sum_{j=1}^n (P(E_j)) * \sum_{i=1}^{N_{insp}} \frac{C_{rep\ i,j}}{(1+r)^{T_{insp,i}}} \quad (12)$$

Où i allant de 1 jusqu'au nombre d'inspections et j de 1 jusqu'au nombre de branches dans l'arbre d'événements. $P(E_j)$ est la probabilité d'occurrence pour chaque branche dans l'arbre d'événements. $C_{rep\ i,j}$ est le coût de réparation dans chaque branche.

C. Coût de défaillance

En utilisant la fonction de distribution cumulative de Weibull, la probabilité de défaillance P_f calculée avant chaque inspection est déterminée comme suit :

$$P_f = \begin{cases} 0, & \eta_i \leq \eta_{min} \\ 1 - \left[\exp - \left(\frac{\eta_i - \eta_{min}}{\eta_{0,5}} \right)^\alpha \right], & \eta_i > \eta_{min} \end{cases} \quad (13)$$

Le coût de défaillance attendu C_{FAIL} peut être exprimé comme suit :

$$C_{FAIL} = C_{fail} * P_{fail} \quad (14)$$

Où C_{fail} est le coût de défaillance et P_{fail} est la probabilité de défaillance sur la durée de vie de la structure calculé à partir de P_f .

L'arbre d'événements est présenté dans la Figure 1, en considérant 2 inspections dans cet exemple. Chaque branche comporte trois probabilités de défaillance (avant la première inspection, avant la deuxième inspection et à la fin du cycle de vie). Après la première inspection, Il existe deux options, P(R) et P(NR), qui indiquent la décision de réparation ou de non-réparation. En considérant les événements P(R) et P(NR) indépendants, la probabilité d'occurrence des trajectoires (E1, E2, E3, et E4) peut être déterminée.

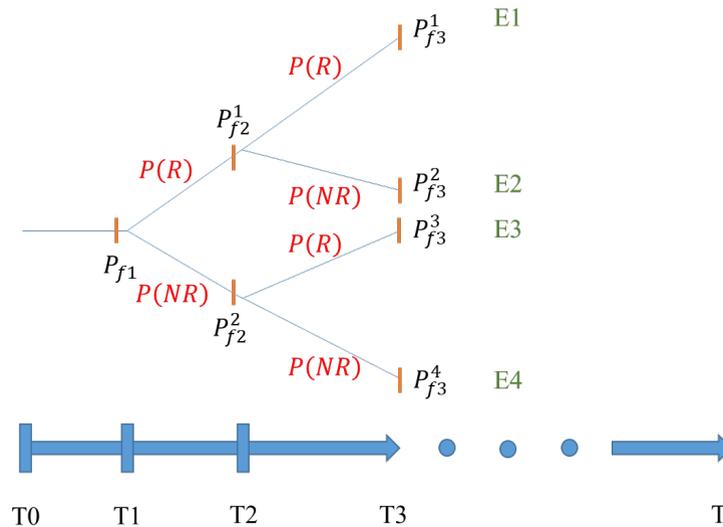


FIGURE 1. Analyse de l'arbre des événements, cas de deux inspections.

D. Coût total attendu

Le coût total annuel de la structure est utilisé pour déterminer le plan optimal de gestion de la maintenance. Le coût total prévu C_T peut être exprimé comme suit :

$$C_T = C_{init} + C_{INSP} + C_{REP} + C_{FAIL} \tag{15}$$

V. RESULTATS ET DISCUSSIONS

a. Intervalles d'inspection

Bien que les intervalles d'inspection réguliers soient plus pratiques et plus faciles à gérer, la prise en compte d'intervalles de temps non uniformes peut permettre de réduire les coûts et d'améliorer l'efficacité. La procédure d'optimisation de la durée de vie pour des intervalles d'inspection non uniformes consiste à déterminer le nombre idéal d'inspections N_{insp} et les moments optimaux pour effectuer les inspections et les réparations.

Trouver le minimum de : $C_T = C_{init} + C_{INSP} + C_{REP} + C_{FAIL}$ (16)

Tel que : $t_{min} \leq t_i \leq t_{max}$

$$\sum_{i=1}^{N_{insp}} t_i \leq T$$

Où T = durée de vie de la structure, $t_i = T_i - T_{i-1}$ intervalle de temps entre les inspections $i - 1$ et i . t_{min} et t_{max} sont les temps d'inspection minimum et maximum. Dans cette étude, on suppose que la durée de vie de la structure est de 100 ans. Initialement, la stratégie d'inspection est limitée à des intervalles de temps uniformes, en considérant le nombre d'inspections N_{insp} . Le problème d'optimisation est résolu pour toutes les valeurs de N_{insp} et ensuite la valeur qui produit le plus petit coût total attendu est considérée comme le nombre optimal d'inspections. La figure 2 montre les résultats de l'analyse des coûts pour différents nombres d'inspections à intervalles uniformes. Pour les mêmes paramètres considérés dans la stratégie d'intervalle uniforme, la figure 3 présente les coûts totaux attendus sur la durée de vie pour différents nombres d'inspections associées à des intervalles de temps non uniformes. Au fur et à mesure que le nombre d'inspections augmente, le coût de réparation augmente, tandis que le coût de défaillance diminue. La figure 2 indique que le

nombre optimal d'inspections sur la durée de vie est de 6 dans le cas d'inspections à intervalle uniforme, avec un coût total attendu minimal de 1146,6. Alors que la stratégie optimale d'intervalle d'inspection non uniforme (figure 3) produit une solution plus économique avec seulement 3 inspections à 61, 75 et 84 ans et un coût total minimum de 1061,3.

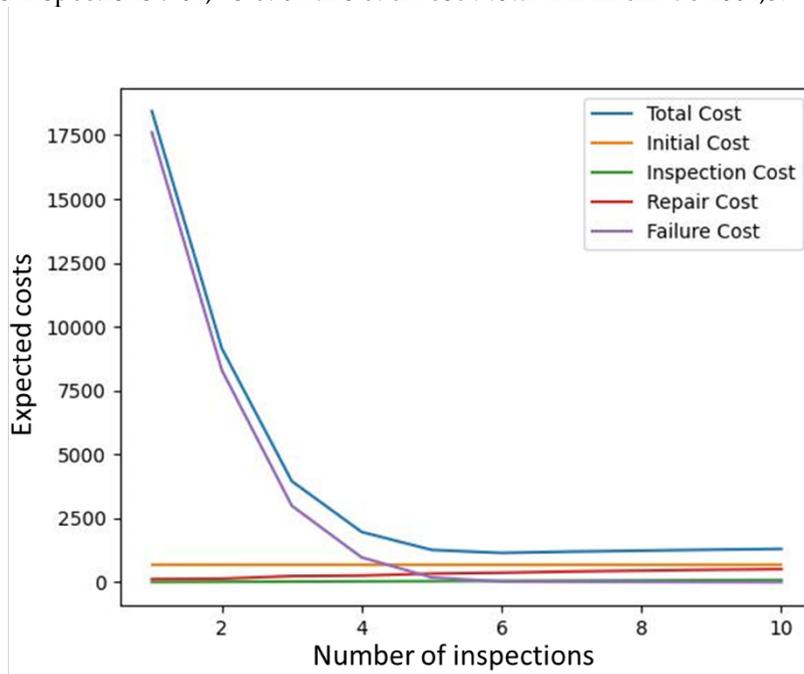


FIGURE 2. Les différents coûts attendus en fonction du nombre d'inspections avec intervalles uniformes

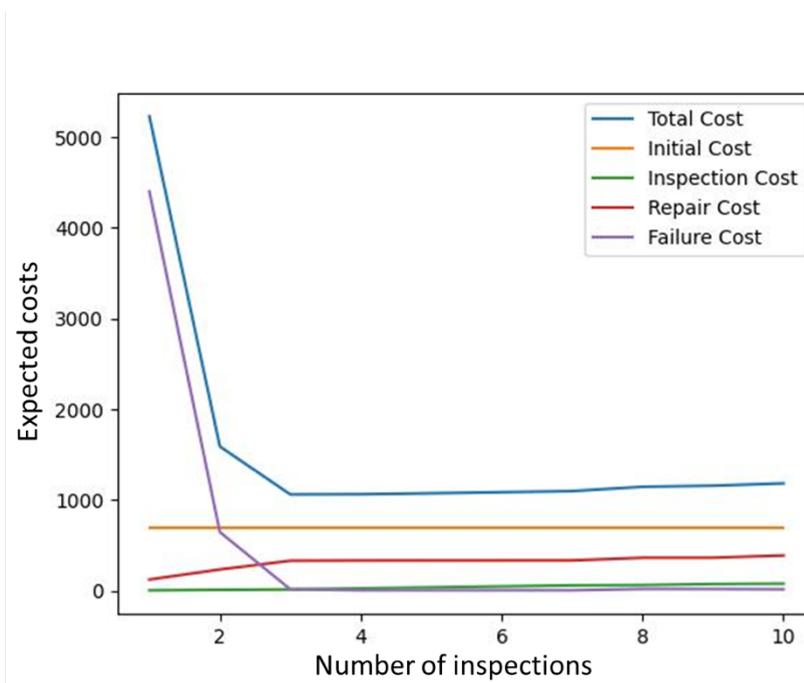
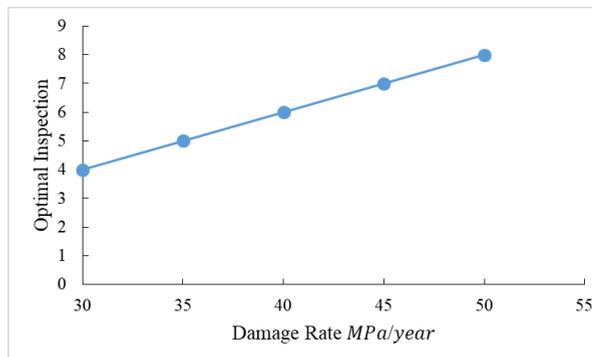


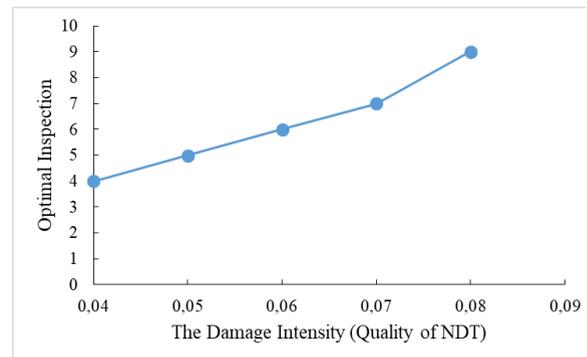
FIGURE 3. Les différents coûts attendus en fonction du nombre d'inspections avec intervalles non uniformes

b. Étude paramétrique sur les variables d'optimisation

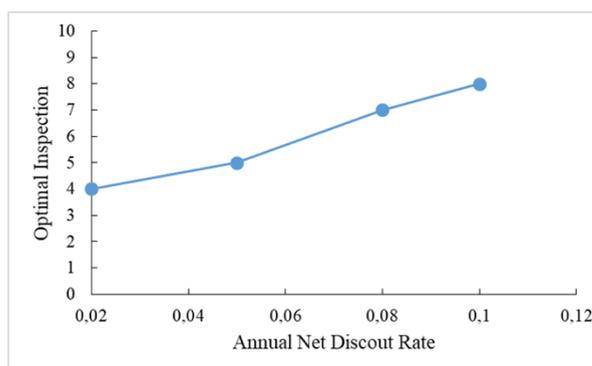
Une analyse paramétrique est introduite dans le cas où les intervalles d'inspection sont uniformes, afin d'évaluer l'influence de chaque variable dans la détermination du nombre optimal d'inspections. Les variables analysées sont : le taux d'endommagement, la qualité du CND, le taux d'actualisation annuel et le coût de défaillance. L'influence du taux d'endommagement est présentée dans la figure 4 (a), lorsque le taux est grand, le nombre d'inspections optimales dans le cycle de vie du composant est élevé. De plus, lorsque le taux d'endommagement augmente, la première inspection apparaît plus tôt et les intervalles de temps entre les inspections successives sont plus petits. La qualité de la technique non destructive a un effet remarquable sur la stratégie optimale d'inspection/réparation. Cet effet est illustré dans la figure 4 (b) en utilisant 5 intensités de dommages différentes. Lors de l'utilisation d'une bonne qualité d'inspection (faible intensité de dommage), le nombre optimal d'inspections diminue de 9 à 4 inspections. La figure 4 (c) présente le nombre optimal d'inspections en fonction du taux d'actualisation annuel (r). Le taux d'actualisation annuel semble être un facteur important dans l'étude d'optimisation, car il influence également la détermination du nombre optimal d'inspections au cours du cycle de vie du composant. Les coûts de défaillance ont également une grande influence sur la détermination du nombre optimal d'inspections. La figure 4 (d) montre que si le coût de la défaillance augmente, alors le nombre d'inspections augmente. Le nombre optimal d'inspections sur la durée de vie est de 5 lorsque le coût de la défaillance est de 10000. Dans les mêmes conditions, lorsque le coût de défaillance est de 50 000, le nombre optimal d'inspections est de 6. Par conséquent, un coût de défaillance plus élevé conduit à une solution optimale nécessitant plus d'inspections.



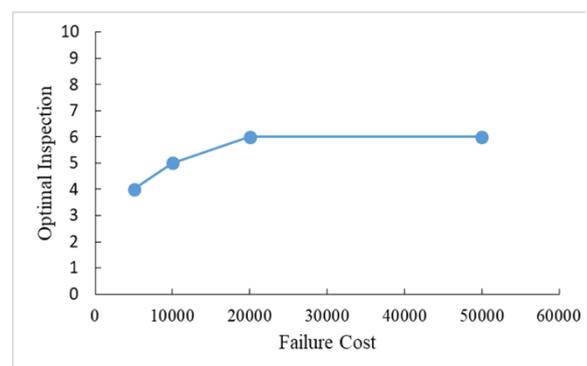
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 4. L'influence du a) taux d'endommagement, b) la qualité du CND, c) le taux d'actualisation annuel net et d) le coût de la défaillance sur le nombre optimal d'inspections (intervalles uniformes).

VI. CONCLUSION

Ce travail montre l'efficacité de la minimisation du coût total attendu du cycle de vie afin de trouver la stratégie optimale d'inspection-réparation des structures qui se détériorent avec le temps. Pour illustrer l'approche, une structure ayant subi une diminution de performances (module d'élasticité) a été utilisée. Le modèle d'arbre d'événements a permis une organisation systématique et une évaluation plus fiable des options de réparation. En ce qui concerne la stratégie d'optimisation, la stratégie d'inspection/réparation à intervalle non uniforme est plus rentable et nécessite moins d'inspections/réparations sur la durée de vie de la structure. Comme indiqué précédemment, les effets de la variation : du taux d'endommagement, de la qualité des techniques d'inspection, du taux d'actualisation annuel net et du coût de la défaillance ne peuvent être négligés. Les résultats montrent que chacun des paramètres impliqués peut être pris en compte pour déterminer le nombre d'inspections optimal à effectuer tout au long de la durée de vie du composant. Par conséquent, la méthodologie développée dans cet article présente un réel potentiel pour combiner les considérations économiques et de sécurité dans la conception structurelle. Des efforts futurs sont nécessaires pour traiter de manière cohérente un autre problème d'optimisation, en minimisant le coût total attendu et en maximisant l'indice de fiabilité.

REFERENCES

- Bismut, E., Straub, D., 2019. Optimal Adaptive Inspection and Maintenance Planning for Deteriorating Structural Systems. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20252.85129>
- Clifton, J.F., 1991. Predicting the remaining service life of concrete (No. NISTIR-4712). National Inst. of Standards and Technology (NML), Gaithersburg, MD (United States). Center for Atomic, Molecular and Optical Physics. <https://doi.org/10.2172/469656>
- Frangopol, D.M., Lin, K.-Y., Estes, A.C., 1997. Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures. *J. Struct. Eng.* 123, 1390–1401. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:10\(1390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:10(1390))
- Gucunski, N., Maher, A., Ghasemi, H., Ibrahim, F., 2012. Segmentation and condition rating of concrete bridge decks using NDE for more objective inspection and rehabilitation planning. pp. 617–624. <https://doi.org/10.1201/b12352-83>
- Kashif Ur Rehman, S., Ibrahim, Z., Memon, S.A., Jameel, M., 2016. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Constr. Build. Mater.* 107, 58–86. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>
- Lin, K., 2018. Non-destructive measurement for Young's modulus using a self-mixing laser diode.
- Mori, Y., Ellingwood, B.R., 1994. Maintaining Reliability of Concrete Structures. II: Optimum Inspection/Repair. *J. Struct. Eng.* 120, 846–862. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:3\(846\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:3(846))
- Onoufriou, T., Frangopol, D.M., 2002. Reliability-based inspection optimization of complex structures: a brief retrospective. *Comput. Struct.* 80, 1133–1144. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00071-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00071-8)

- Pushpakumara, B.H.J., Silva, S.D., Silva, G.H.M.J.S.D., 2017. Visual inspection and non-destructive tests-based rating method for concrete bridges. *Int. J. Struct. Eng.* 8, 74–91. <https://doi.org/10.1504/IJSTRUCTE.2017.081672>
- Somerville, G., 1992. Service Life Prediction--An Overview. *Concr. Int.* 14, 45–49.
- Thoft-Christensen, P., Sørensen, J.D., 1987. Reliability analysis of tubular joints in offshore structures. *Reliab. Eng.* 19, 171–184. [https://doi.org/10.1016/0143-8174\(87\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0143-8174(87)90002-3)
- Yehia, S., Abudayyeh, O., Nabulsi, S., Abdelqader, I., 2007. Detection of Common Defects in Concrete Bridge Decks Using Nondestructive Evaluation Techniques. *J. Bridge Eng.* 12, 215–225. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2007\)12:2\(215\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:2(215))