



HAL
open science

Optimisation des campagnes d'inspection dans le cadre de processus stochastiques de dégradation

Rodrigue Décatoire, Franck Schoefs, Sidi Mohammed Elachachi, Thierry Yalamas

► **To cite this version:**

Rodrigue Décatoire, Franck Schoefs, Sidi Mohammed Elachachi, Thierry Yalamas. Optimisation des campagnes d'inspection dans le cadre de processus stochastiques de dégradation. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03440653

HAL Id: hal-03440653

<https://hal.science/hal-03440653>

Submitted on 22 Nov 2021

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.

Optimisation des campagnes d'inspection dans le cadre de processus stochastiques de dégradation

R. DÉCATOIRE^a, F. SCHOEFS^b, SM. ELACHACHI^c, T. YALAMAS^a

a. Phimeca Engineering, Cournon d'Auvergne

b. LUNAM Université, GeM, Université de Nantes, Ecole Centrale de Nantes, UMR CNRS 6183, IUML, FR CNRS 3473

c. Université Bordeaux 1, I2M, département GCE, Bât. B18, Avenue des facultés, 33405 Talence

Résumé :

L'avènement des sociétés modernes a vu la construction de nombreuses structures et infrastructures telles que les centrales nucléaires ou bien les bâtiments à usage d'habitation. Il est désormais nécessaire d'optimiser les plans d'inspection et de maintenance pour la viabilité de ces structures. En considérant différents types de processus de dégradation, comme la pénétration des ions de chlorure ou la carbonatation du béton, il est possible de prédire l'évolution d'indicateurs de dégradations construits à partir de méta-modèles probabilistes de type markoviens. Ces prévisions visent à optimiser les processus d'inspection de ces structures à l'aide d'évaluations ou de contrôles non-destructifs, déclenchés à partir d'un niveau seuil de fiabilité de la structure. Les résultats d'inspections et leurs erreurs peuvent être introduits dans le processus de dégradation Markovien. En associant les gestionnaires d'ouvrages dans le choix des indicateurs de dégradations, cette méthode permettra de rationaliser les coûts de suivi de leurs parcs d'ouvrages.

Abstract :

The advent of modern societies has seen the construction of numerous structures and infrastructures like nuclear power plants or buildings for residential use. It is now necessary to optimize their inspection and maintenance plans for the reliability of these structures. By considering different degradation processes, like chloride ingress or concrete carbonation, it is feasible to predict the evolution of degradation indicators built from the use of probabilistic markovian surrogate models. These predictions aim to optimize the inspection processes of these structures done with non-destructive evaluations or inspections, triggered at a reliability threshold of the structure. Inspections results and their errors can be introduced into the markovian degradation process. By associating the stakeholders in the choice of the degradation indicators, this method will allow to rationalize the monitoring costs of their structures.

Mots clefs : Processus Markovien ; Inspection ; Dégradation

1 Introduction

Depuis le XIX siècle, l'expansion des pays développés et la rapide augmentation de leur population a conduit à la création de très nombreuses structures et infrastructures, afin de répondre aux besoins en énergie, aux besoins de logements ou bien aux besoins d'infrastructures routières et ferroviaires. Ces constructions, majoritairement réalisées en béton armé, sont soumises à de nombreux phénomènes de dégradation qui altèrent leur intégrité. Leur importance implique que leur sécurité soit assurée à tout instant, tant pour des raisons économiques qu'humanitaires. Afin de garantir des niveaux seuils de fiabilité de ces structures, elles sont régulièrement inspectées et maintenues suivant des plans définis par les gestionnaires d'ouvrages. Cependant, les coûts induits par ces opérations et le contexte économique global créent le besoin d'optimiser ces processus afin de rationaliser les coûts de suivi à long termes de ces structures. Dans le cadre du béton armé, de nombreux types de dégradations peuvent se présenter,

tels que la carbonatation du béton ou bien la pénétration des ions chlorure. Ces modèles s'avèrent complexes à manier dans un cadre probabiliste qui est induit par la variabilité des caractéristiques du béton et des paramètres environnementaux pilotants la dégradation. Il est nécessaire de les rendre facilement utilisables par les gestionnaires dans une optique de contrôle des coûts sur le long terme. Ces objectifs sont les objectifs pilotes du projet ANR EVADEOS (Evaluation non destructive pour la prédiction de la Dégradation des structures et l'Optimisation de leur Suivi), débuté fin 2011. Cette communication comporte trois parties. La première s'appuie sur l'utilisation de processus de Markov pour remplacer ces processus de dégradation afin entre autre de les rendre moins coûteux en temps de calcul. La section suivante est une illustration qui démontre la capacité de cette modélisation à répondre aux exigences des gestionnaires. Enfin, la dernière partie explique les différentes perspectives envisagées qui permettront d'améliorer la méthodologie présentée.

2 Modèles de dégradations et chaînes de Markov

2.1 Carbonatation du béton et pénétration des ions chlorure

Nous nous intéressons ici à deux types de dégradation du béton : la carbonatation (diffusion du CO_2) et la pénétration des ions chlorure. Si les mécanismes de propagation sont différents, ces deux phénomènes conduisent à la dépassement des armatures du béton, initiant donc la corrosion de celles-ci, ce qui affecte directement l'intégrité des structures. De nombreux modèles sont disponibles dans la littérature afin de modéliser ces phénomènes. Des modèles dits "d'ingénierie", plus simples, comme les modèles de Petre-Lazar, de Baker, de Hyvert pour la carbonatation [7], ou bien les modèles de Collepardi, du projet européen Duracrete ou bien de Hetek [4], et d'autre dits "éléments finis" comme celui de Bastidas pour la chloruration [2]. Chacun d'eux modélise les phénomènes avec plus ou moins de fidélité, et nécessite donc plus ou moins de paramètres d'entrée suivant la complexité de modélisation. Ces paramètres sont des variables intrinsèquement aléatoires, dû à la nature même du béton, certaines (telle que l'humidité relative) étant même représentées par des champs aléatoires.

2.2 Processus de Markov

Un processus de Markov du premier ordre est un processus à temps discret et à espace d'états E discret de taille n qui suit la propriété fondamentale de Markov explicitée dans l'équation 1. L'évolution future de l'état du processus du premier ordre dépend uniquement de l'état présent, c'est donc un processus *sans mémoire*. C'est une hypothèse forte car elle donne au processus une capacité prédictive sans aucun historique long.

$$\begin{aligned} Pr(X_{t+1} = x | X_t = x_t, X_{t-1} = x_{t-1}, \dots, X_0 = x_0) \\ = Pr(X_{t+1} = x | X_t = x_t) \end{aligned} \quad (1)$$

Une chaîne de Markov est le plus souvent représentée par une matrice de transition, comme par exemple cette chaîne comportant 4 états :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

où chaque composante a_{ij} désigne la probabilité de passage de l'état i à l'état j . Plusieurs types de matrices peuvent être considérées (voir [2]). Dans le cadre d'une dégradation, une matrice de transition triangulaire supérieure complète est utilisée. Cette catégorie de matrice ne permet pas de retour d'états, ce qui correspond bien à une problématique de dégradation.

Dans le cas des chaînes de Markov homogènes, les probabilités de passages sont indépendantes du temps et la probabilité que la chaîne soit dans un état j après un temps t est donc déduite de l'équation de Chapman-Kolmogorov, ce qui donne :

$$Pr(X_t = j) = \sum_{i \in E} Pr(X_0 = i) \mathbf{P}^t(i, j) \quad (3)$$

La distribution de probabilité d'états en fonction du temps est elle simplement calculée par :

$$q_t = q_0 \mathbf{P}^t \quad (4)$$

Où q_0 est un vecteur de taille N représentant la distribution initiale des défauts.

Communément utilisés dans la littérature ([1, 2, 6, 8, 10, 11]), la discrétisation résultante de l'utilisation d'un processus de Markov comporte deux avantages. Premièrement, l'état des structures n'est connu qu'à certains instants discrets par les gestionnaires, la nécessité d'avoir un processus en temps continu n'est donc pas primordiale. De plus, la discrétisation en états correspond bien à la volonté des gestionnaires qui est de disposer d'un petit nombre d'indicateurs pour orienter leurs décisions.

La détermination d'un processus de Markov est composée de 3 enjeux majeurs, conditionnés par le coût de calcul :

- l'optimisation de la taille des matrices ;
- l'optimisation du pas de temps ;
- le choix de la méthode d'identification, discuté dans la suite.

De nombreuses méthodes, référencées dans la littérature [8, 9], permettent d'estimer les probabilités de transitions. Deux d'entre elles sont expliquées ci-après. La première nécessite d'observer les transitions. Cette méthode est identique à une méthode du maximum de vraisemblance, pour laquelle chaque a_{ij} serait l'estimateur associé. Les composantes sont calculées par :

$$a_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_k N_{ik}} \quad (5)$$

Où N_{ij} représente le nombre de transitions observées de l'état i à l'état j . La deuxième méthode nécessite de connaître l'état d'une structure à un instant donné, ce qui est donc moins riche que l'observation des transitions. Il s'agit de calculer la probabilité observée p_t^k qu'une structure d'être dans un état k à un instant t , et de résoudre le problème d'optimisation de l'équation 3 afin d'obtenir une chaîne de Markov qui donnerait le même résultat. Les contraintes de ce problème d'optimisation sont liées à la nature probabiliste des composantes a_{ij} .

$$\min_{a_{ij}} \sum_t \sum_k (p_t^k - P(X_t = j))^2 \quad (6)$$

sous contraintes que

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N a_{ij} = 1, & \forall i \\ 0 \leq a_{ij} \leq 1, & \forall i, j \in \{1, \dots, N\} \end{cases}$$

La précision de chaque méthode sera évaluée en calculant l'erreur des moindres carrés déterminée par [2] :

$$ESS = \sum_t \sum_k (p_t^k - P(X_t = j))^2 \quad (7)$$

3 Illustration

L'enjeu de cette illustration est simple. Il s'agit de déterminer quelle est la meilleure méthode pour déterminer la matrice de transition à partir des simulations du modèle de dégradation.

3.1 Données

Pour illustrer le propos de cet article, c'est le modèle de diffusion des ions chlorure de Colleparidi [4], présenté dans l'équation 8, qui est utilisé pour sa simplicité.

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Da(t - t_{ex})}} \right) \quad (8)$$

C_i est la concentration initiale de chlorure dans le béton, C_s (en % du poids du béton) est la concentration à la surface du béton, x et t sont respectivement la profondeur de béton et le temps considérés. Le Tableau 1 donne les différents lois et valeurs utilisées pour les paramètres du modèle de Collepardi de cet exemple [5]. Les classes sont équitablement répartie entre 0 et 0.5% de concentration de chlorure.

C_s	$\sim LN(\mu = 0.108, \frac{\sigma}{\mu} = 17.2\%)$
Da	$\sim LN(\mu = 4.14 \times 10^{-12}, \frac{\sigma}{\mu} = 13.6\%)$
C_i	$= 0\%$
t_{ex}	$= 0s$
x	$= 4cm$

Tableau 1 – Données de l'illustration

En d'autre termes, la dernière classe correspond à une concentration en chlorure donnée par le modèle de Collepardi comme étant supérieur à 0.5%.

3.2 Qualité de l'estimation de la matrice de transition en fonction du nombre d'états

La première partie de ces résultats concerne donc l'estimation de la matrice de transition. Pour cela, 100 000 simulations de Monte Carlo ont été réalisées grâce au modèle de Collepardi (équation 8 et Tableau 1). La Figure 1 montre que la méthode d'optimisation (équation 6) est beaucoup plus performante que la méthode d'estimation directe. Cette dernière étant sensible au nombre de simulations, l'augmentation du nombre d'états augmentant les chances que des états soient évités diminue le nombre d'observations pour certains états ce qui crée donc un biais de la chaîne. La méthode d'estimation directe pose donc la difficulté de convergence de l'erreur avec une valeur minimale (ici pour 5 états) qui peut ne pas être négligeable comparée aux résultats obtenus par optimisation. L'évaluation du modèle de Collepardi étant coûteuse, il est donc préférable d'utiliser l'optimisation plutôt que d'envisager l'augmentation du nombre de simulations.

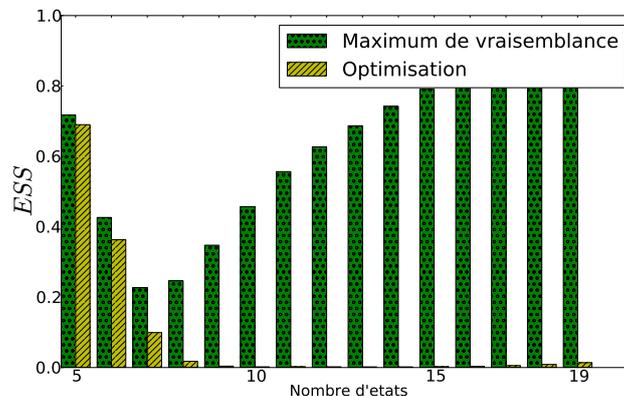


FIGURE 1 – Évaluation de la précision des méthodes d'évaluation de la matrice de transition markovienne

4 Perspectives

Les perspectives de ce travail sont multiples. Le schéma de la Figure 2 intègre les résultats de ce travail ainsi que les pistes d'évolutions envisagées dans le cadre de la prédiction. La Figure 3 présente quant à elle les interactions qui se présenteront entre les différentes données lorsqu'une inspection se déroulera et que les résultats serviront à actualiser les prédictions. Quelques-unes de ces pistes sont décrites ci-dessous. Tout d'abord le passage en champs stochastique pour les paramètres d'entrée va

être effectué. La prise en compte de la corrélation spatiale sera donc le point clé de ce travail. Deux cas sont à considérer, (i) le cas où le contrôle non-destructif fournit un indicateur de durabilité (paramètre influent de la cinétique de dégradation), et (ii) le cas où c'est une mesure du niveau de dégradation qui sera fournie. Dans le premier cas, le passage par le modèle de dégradation empêchera d'identifier la corrélation qu'il y a entre plusieurs points de l'espace. Une piste de résolution est de simuler le champs d'entrée en n points clés, d'estimer l'évolution de la dégradation en ces points afin de déterminer n matrices de transitions. L'usage d'un méta-modèle de type krigeage sera alors envisagé pour réaliser une régression entre ces n points afin d'obtenir une cartographie de la dégradation. Dans le deuxième cas, la solution est plus simple car il sera possible d'identifier le champs de la dégradation et donc de le simuler, suivant une décomposition de Karhunen-Loève par exemple.

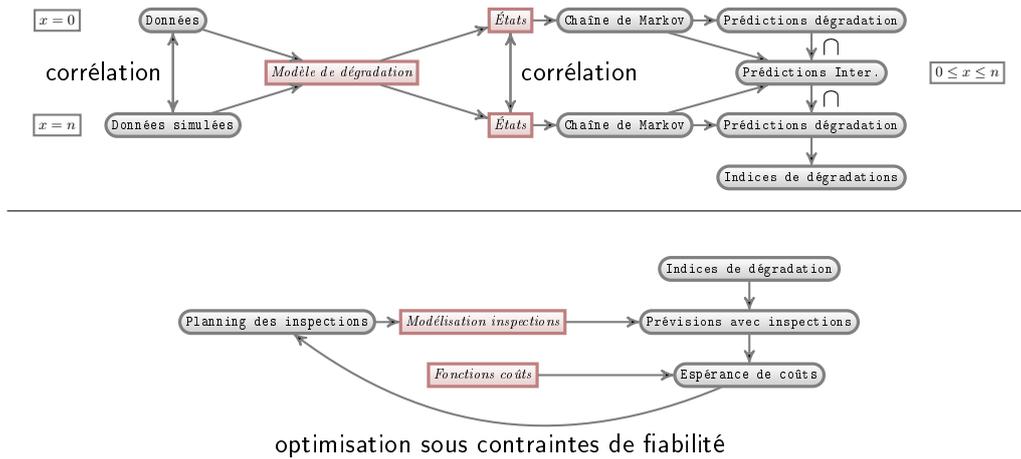


FIGURE 2 – Représentation du processus d'optimisation de l'espérance du coût global annuel d'une structure utilisant une modélisation markovienne.

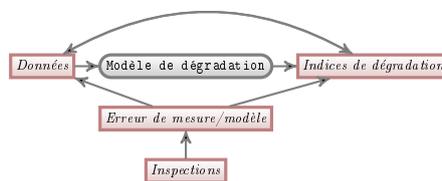


FIGURE 3 – Représentation des différents chemins d'actualisation après une inspection.

Une deuxième piste d'amélioration concerne l'actualisation. En effet il peut être très intéressant de se servir des données d'inspections pour actualiser les prévisions des modèles. Toujours suivant les types de résultats CND, il sera possible (i) d'actualiser directement les indicateurs de durabilité et leur corrélation, ou bien (ii) de les actualiser par analyse bayésienne inverse. L'intégration de l'erreur de mesure permettra de déduire des intervalles de confiance sur la prédiction de la dégradation, qui servira à déterminer si un raffinement de l'actualisation est nécessaire ou non.

Un troisième axe, qui n'est pas développé dans cet article, est d'intégrer dans la matrice de transition des simulations d'inspection afin de déterminer le pas d'inspection optimal, comme présenté dans l'article de Sheils et al [10].

Enfin, dans cet article la chaîne markovienne utilisée est indexée sur un pas de temps annuel. Afin de mieux prendre en compte la variabilité temporelle de certains indicateurs de durabilité tel que la température, il peut être intéressant de descendre à une échelle plus petite. Dans ce cas, il sera nécessaire de supprimer l'hypothèse des maintenances instantanées. Une piste de résolution est l'intégration dans la chaîne d'un état tampon dans lequel le système entrerait lors d'une maintenance, et ne pourrait en

ressortir qu'après un certain temps, d'une façon similaire au système markovien récemment proposé par Bocchini [3].

5 Conclusions

Cet article présente une méthode permettant d'optimiser l'espérance de coût global d'une structure soumise à un cycle d'inspection à pas constants, se basant sur l'utilisation de chaînes de Markov. L'avantage de cette méthode est multiple, elle accélère considérablement les temps de calculs et est capable de correctement se substituer à un modèle non-linéaire. Deux techniques différentes pour estimer la matrice de transition de cette chaîne ont été investiguées, l'une provenant d'une évaluation du maximum de vraisemblance, l'autre ayant pour origine l'optimisation. Cette dernière a été montrée comme étant la plus efficace. Une fois le nombre d'états optimum et la matrice de transition calculée, la simulation des inspections et l'intégration des résultats dans la chaîne permet donc de déduire quel pas d'inspection est à privilégier.

Différentes pistes de travail ont été évoquées, avec notamment la prise en compte de l'aléa spatial et l'apport de la théorie bayésienne pour l'actualisation des prédictions, afin de développer cette méthodologie pour qu'elle puisse fournir aux gestionnaires un processus décisionnel complet concernant les plannings d'inspections.

6 Remerciements

Cette publication s'inscrit dans le cadre du projet EVADEOS financé par l'Agence Nationale pour la Recherche.

Références

- [1] H-S. Baik, H.S. Jeong, and D.M. Abraham. Estimating transition probabilities in markov chain-based deterioration models for management of wastewater systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132 :15–24, 2006.
- [2] E. Bastidas-Arteaga. *Contribution for sustainable management of reinforced concrete structures subjected to chloride penetration*. PhD thesis, ECOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGENIEUR, GEOSCIENCES, ARCHITECTURE, 2010.
- [3] P. Bocchini, D. Saydam, and D.M. Frangopol. Efficient, accurate and simple markov chain model for the life-cycle analysis of bridge groups. *Structural Safety*, 40 :51–64, 2012.
- [4] F. Deby. *Approche probabiliste de la durabilité des betons en environnement marin*. PhD thesis, Université de Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [5] DuraCrete. Statistical quantification of the variables in the limit state functions. Technical report, The European Union - Brite EuRam III - Contract BRPR-CT95-0132 - Project BE95-1347/R9, 2000.
- [6] S.M. Elachachi and D. Breyse. Sewer assets maintenance management : comparison by two approaches, markovian process, and probabilistic neural networks. 2007.
- [7] N. Hyvert. *Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2009.
- [8] M-J. Kallen. *Markov processes for maintenance optimization of civil infrastructure in the Netherlands*. PhD thesis, Delft University of Technology, 2007.
- [9] C.M.L Kelton and W.D. Kelton. Comparison of inference techniques for markov processes estimated from micro vs macro data. Technical report, The University of Michigan, 1985.
- [10] E. Sheils, A. O'Connor, D. Breyse, F. Schoefs, and S. Yotte. Development of a two-stage inspection process for the assessment of deteriorating infrastructure. *Reliability Engineering and System Safety*, 95 :182–194, 2010.
- [11] E. Sheils, A. O'Connor, F. Schoefs, and D. Breyse. Investigation of the effect of the quality of inspection techniques on the optimal inspection interval for structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8 :557–568, 2010.