



JOURNÉES
FIABILITÉ DES MATÉRIAUX ET DES STRUCTURES
26-28 MARS 2008, NANTES

RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS



Table des matières

Programme	3
Session TS1-A Mercredi 26 mars 14 : 15 - 15 : 45	9
Session TS1-B Mercredi 26 mars 18 : 00 - 19 : 15	19
Session TS2-A Judi 27 mars 12 : 00 - 13 : 15	28
Session TS2-B Judi 27 mars 14 : 30 - 15 : 45	37
Session TS3 Judi 27 mars 18 : 30 - 19 : 15	47
Session TS4-A Vendredi 28 mars 8 : 30 - 9 : 45	52
Session TS4-B Vendredi 28 mars 10 : 00 - 11 : 00	59
Plan de Nantes et Transports	66

Programme

Mercredi	26	Mars	2008
-----------------	-----------	-------------	-------------

Session d'ouverture	Amphi L. Pasteur	9:00 - 9:15
----------------------------	-------------------------	--------------------

COURS 1	9:15 - 10:45
----------------	---------------------

Président de session : D. Breyse
Traitement statistique de faibles échantillons
G. Celeux

COURS 2	11:15 - 12:00
----------------	----------------------

Président de session : D. Breyse
Approches non-probabilistes : comment modéliser l'incertain ?
D. Boissier

COURS 3	12:00 - 12:45
----------------	----------------------

Président de session : D. Breyse
Fusion de données
A. Talon

SESSION TS1-A	14:15 - 15:45
----------------------	----------------------

Président de session : G. Celeux

Prise en compte des données expérimentales dans un modèle probabiliste de propagation de fissures
F. Perrin, B. Sudret

Modélisation de l'erreur lors de mesures de paramètres sur des structures : application aux structures marines
F. Schoefs, S. Bonnet, J. Boero, A. Clement

La fusion de données de contrôle non destructif au service du diagnostic de l'état du béton : qualité des données et réduction des incertitudes
M-A Ploix, D. Breyse, V. Garnier, M. Sbartai

Méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance d'ouvrages de génie civil
A. Talon, C. Curt, D. Boissier

Prise en compte de la variabilité des propriétés élastiques du béton dans le calcul de la tenue des enceintes de confinement

T. de Larrard, JB. Colliat, F. Benboudjema, JM. Torrenti

COURS 4	15:45 - 16:45
----------------	----------------------

Président de session : D. Boissier
Modélisation stochastique des données à partir d'essais sur matériaux
D. Breyse

COURS 5	17:00 - 18:00
----------------	----------------------

Président de session : D. Boissier
Présentation des méthodes géo-statistiques
C. Bacconnet

SESSION TS1-B

18:00 - 19:15

Président de session : F. Schoefs

Identification de variable aléatoire sur le chaos polynomial : application aux données d'inspection et d'instrumentation de structures existantes

A. Clement, H. Yáñez-Godoy, F. Schoefs, A. Nouy

Méthode MCMC pour l'actualisation bayésienne des déformations différées du béton d'une enceinte de confinement modélisée par éléments finis

M. Berveiller, Y. Le Pape, B. Sudret, F. Perrin

Evaluation fiabiliste de l'impact des conditions environnementales sur la corrosion des structures en béton armé sujettes à la pénétration de chlorures

J. El Hassan, A. Chateaneuf, P. Bressolette

Application aux barrages et aux bâtiments de la méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance

A. Talon, C. Curt, D. Boissier

Jeudi

27

Mars

2008

COURS 6

9:00 - 10:30

Président de session : B. Sudret

Conception fiable des structures

M. Lemaire

COURS 7

11:00 - 12:00

Président de session : B. Sudret

Méthodes Eléments Finis Stochastiques

A. Nouy

SESSION TS2-A

12:00 - 13:15

Président de session : M. Lemaire

Analyse de sensibilité par éléments finis stochastiques d'un essai d'arrachement

J. Humbert, J. Baroth, L. Daudeville

Fluid Bearing Failure Probability Evaluation using Finite Element Modelling

A. Charki, D. Bigaud, S. Cloupet, F. Guérin

Développements par chaos polynomiaux creux et adaptatifs - application à l'analyse de fiabilité

G. Blatman, B. Sudret

Méthode éléments finis stochastiques étendus pour la prise en compte des incertitudes géométriques dans le calcul de structures

A. Clément, A. Nouy, F. Schoefs

SESSION TS2-B

14:30 - 15:45

Président de session : A. Chateauneuf

L'algorithme du gradient projeté avec contrôle d'erreur pour la fiabilité structurale

F. Duprat, A. Sellier, X.S. Nguyen

Dimensionnement probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin

F. Deby, M. Carcasses, A. Sellier

²SMART : SVM et Subset pour la fiabilité

F. Deheeger, M. Lemaire, T. Yalamas

Propagation d'incertitude : Analyse de la variation paramétrique d'une surface de réponse polynomiale

A. Yaméogo

Approche multi-échelle du transport d'incertitude pour les matériaux composites

L. Guillaumat, F. Dau, A. Alzina

COURS 8

15:45 - 16:45

Président de session : A. Sellier

Optimisation mécano-fiabiliste

A. Chateauneuf

COURS 9

17:00 - 18:00

Président de session : A. Sellier

Fiabilité Time-variant – modélisation par processus, modélisation des

B. Sudret

COURS 10

18:00 - 18:30

Président de session : A. Nouy

Analyse de risque : définition des fonctions de coût et échelles de temps

F. Schoefs

SESSION TS3

18:30 - 19:15

Président de session : L. Guillaumat

Une approche fiabiliste fonction du temps appliquée au vieillissement des structures navales à comportement non-linéaire

M. Cazuguel, M. Mejri, J.Y. Cognard

Optimisation de l'inspection de structures protégées à dégradation multi-phasique

D. Breyse, F. Schoefs, A. O'Connor

Vendredi

28

Mars

2008

SESSION TS4-A

8:30 - 9:45

Président de session : J.M. Bourinet

Estimation of fragility curves for seismic probabilistic risk assessment by means of numerical experiments

I. Zentner, A. Nadjarian, N. Humbert, E. Viallet

Analyse probabiliste du tassement de consolidation primaire d'une fondation superficielle

L. Rouaski, S. Belkacemi

Etude d'une cabane d'ostréiculteur

S. Yotte, SM Elachachi

Extrapolation des effets extrêmes du trafic sur un pont autoroutier

D. Siegert, B. Jacob

SESSION TS4-B

10:00 - 11:00

Président de session : T. Yalamas

Mieux appréhender la durabilité des bétons par l'approche probabiliste

N. Hyvert, A. Sellier, F. Duprat, P. Francisco

La fiabilité au service de la gestion d'un ouvrage

M. Pendola, T. Yalamas

Du parc de structures à la structure : avantages et inconvénients du i-form

O. Priou, F. Schoefs, A. Nouy, M. Birades, V. Quiniou

COURS 11

11:00 - 13:00

Président de session : M. Lemaire

Présentation de logiciels libres

T. Yalamas et J.M. Bourinet

Session TS1-A

Mercredi 26 mars

14 : 15 - 15 : 45

F. Perrin, B. Sudret.

Prise en compte des données expérimentales dans un modèle probabiliste de propagation de fissures.

F. Schoefs, S. Bonnet, J. Boero, A. Clément.

Modélisation de l'erreur lors de mesures de paramètres sur des structures : application aux structures marines.

M-A Ploix, D. Breysse, V. Garnier, M. Sbartai.

La fusion de données de contrôle non destructif au service du diagnostic de l'état du béton : qualité des données et réduction des incertitudes.

A. Talon, C. Curt, D. Boissier.

Méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance d'ouvrages de génie civil.

T. de Larrard, JB. Colliat, F. Benboudjema, JM. Torrenti.

Prise en compte de la variabilité des propriétés élastiques du béton dans le calcul de la tenue des enceintes de confinement.

Prise en compte des données expérimentales dans un modèle probabiliste de propagation de fissure

Frédéric PERRIN¹ et Bruno SUDRET²

¹ PHIMECA Engineering S.A., 34 rue de Sarliève 63800 Cournon d’Auvergne, perrin@phimeca.com

² EDF R&D, département Mécanique des Matériaux et Composants

Mots-clés : identification probabiliste ; actualisation probabiliste ; propagation de fissure.

1 Introduction

Le comportement d’un système physique est souvent représenté par un modèle mathématique \mathcal{M} , qui peut être de complexité variable (formule(s) analytique(s), codes de calcul “boîtes noires”, etc.). Le modèle prend en entrée un vecteur de paramètres, noté \boldsymbol{x} , à valeurs dans \mathbb{R}^M et fournit en sortie un vecteur $\boldsymbol{y} = \mathcal{M}(\boldsymbol{x})$ à valeurs dans \mathbb{R}^N . Le modèle est supposé suffisamment précis pour prédire le comportement du système et les éventuelles approximations faites dans la modélisation sont supposées maîtrisées (e.g. hypothèses simplificatrices, imprécisions numériques, etc.).

Depuis une trentaine d’années, des méthodes probabilistes ont été développées pour évaluer l’aléa de la réponse \boldsymbol{Y} à partir de la connaissance du vecteur aléatoire \boldsymbol{X} modélisant les incertitudes sur les paramètres d’entrée et du modèle \mathcal{M} . Plusieurs classes de méthodes performantes ont été développées. Les méthodes de *fiabilité des structures* [1] permettent d’évaluer la probabilité de défaillance d’un composant ou d’un système mécanique relativement à un critère de défaillance donné. Le chaos polynomial a été introduit dans le développement des *éléments finis stochastiques spectraux* par [2] pour prendre en compte l’aléa dans des problèmes mécaniques. Ce type de méthode vise à obtenir une expression fonctionnelle de la réponse aléatoire du système, via une décomposition de l’aléa sur la base du chaos polynomial couplée à la discrétisation spatiale de type éléments finis.

Cependant, dans la plupart des cas, le point faible de la chaîne de calcul est la construction approximative du modèle probabiliste des données d’entrée, souvent par absence ou manque de données sur ces paramètres. Il arrive que les données expérimentales disponibles ne soient pas directement relatives aux paramètres d’intérêt. Dans le but de mieux évaluer l’aléa de la réponse d’un modèle, il est capital de développer un formalisme général d’identification des modèles probabilistes à partir des données expérimentales disponibles directement ou indirectement. Dans ce contexte, on propose une formulation pour évaluer le vecteur aléatoire des paramètres d’entrée d’un modèle pour les deux cas de figure suivant [4] :

- en phase de conception du système étudié : à partir d’une collection de mesures disponibles sur la réponse, on s’intéresse à la prédiction de la variabilité globale de la réponse \boldsymbol{Y} du modèle : il s’agit de traiter un *problème inverse probabiliste* ;
- en phase de suivi de maintenance d’un système mécanique particulier : à partir des données expérimentales issues d’inspections sur le système, l’objectif est d’actualiser la description probabiliste réalisée en phase de conception.

2 Développements méthodologiques

On s’intéresse dans ce papier à prédire l’évolution de la longueur d’une fissure sous l’action d’un chargement cyclique à partir d’un modèle de propagation de fissure. Virkler *et al.* [7] ont montré, à partir d’une campagne d’essais réalisée sur 68 éprouvettes en aluminium 2024-T3, que ce phénomène présente une dispersion expérimentale assez forte. La base de données obtenue par Virkler *et al.* a donné lieu à différentes analyses statistiques [3] dont l’objectif est l’identification des paramètres probabilisés de la loi de propagation utilisée (i.e. la loi de Paris-Erdogan). Cette identification statistique est nécessaire pour prédire la dispersion des courbes de propagation de fissure obtenues expérimentalement.

Il s’agit dans un premier temps d’identifier l’incertitude aléatoire des paramètres du modèle en utilisant des données d’essais de plusieurs courbes de propagation de fissure obtenues sur des éprouvettes identiques. Pour

ce faire, une méthodologie est proposée [5] : elle repose sur une description statistique particulière des données observées et sur une représentation semi-paramétrique des variables aléatoires à identifier. On introduit pour ce faire les développements de type chaos polynomial. L'incertitude aléatoire des variables intervenant dans la loi de Paris-Erdogan est paramétrée par les coefficients du chaos polynomial. Ces derniers sont identifiés à partir des 68 trajectoires expérimentales de longueur de fissure. Le modèle identifié permet de prédire de manière satisfaisante les données observées expérimentalement.

Dans un second temps, on s'intéresse à une cinétique de propagation particulière et l'objectif est de prédire la trajectoire de la longueur à partir des premières mesures disponibles après l'application de quelques cycles de chargement. Une méthode d'actualisation inspirée du formalisme bayésien classique est développée [6]. Elle permet d'actualiser les incertitudes portées par les deux paramètres d'entrée du modèle de Paris-Erdogan à partir de *simulations de Monte-Carlo par chaînes de Markov* (MCMC). Le modèle probabiliste actualisé permet de mieux prédire la cinétique de propagation liée à une éprouvette particulière que le modèle probabiliste identifié sur l'ensemble des trajectoires.

3 Conclusions

Les résultats obtenus permettent de montrer qu'une démarche d'identification probabiliste peut être menée de la conception à la maintenance. Appliquées sur des modèles représentatifs de structures réelles, les méthodes proposées permettraient d'apporter des informations significatives en vue d'optimiser les stratégies de maintenance, qui constituent une perspective naturelle au travail présenté.

Références

- [1] O. Ditlevsen and H.O Madsen. *Structural reliability methods*. J. Wiley and Sons, Chichester, 1996.
- [2] R.G Ghanem and P.D Spanos. *Stochastic finite elements - A spectral approach*. Springer Verlag, 1991.
- [3] Z. A. Kotulski. On efficiency of identification of a stochastic crack propagation model based on virkler experimental data. *Arch. Mech.*, 50(5) :829–847, 1998.
- [4] F. Perrin. *Prise en compte des données expérimentales dans les modèles probabilistes pour la prévision de la durée de vie des structures*. PhD thesis, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 2008.
- [5] F. Perrin, B. Sudret, G. Blatman, and M. Pendola. Use of polynomial chaos expansion and maximum likelihood estimation for probabilistic inverse problem. In *18^{ème} Congrès Français de Mécanique, CFM 2007, Grenoble, 2007*.
- [6] F. Perrin, B. Sudret, M. Pendola, and E. de Rocquigny. Comparison of Markov chain Monte-Carlo simulation and a FORM-based approach for Bayesian updating of mechanical models. In *Proc. 10th Int. Conf. on Applications of Stat. and Prob. in Civil Engineering, ICASP 10, Tokyo, 2007*.
- [7] D. A. Virkler, B. M. Hillberry, and P. K. Goel. The statistical nature of fatigue crack propagation. *Trans. the ASME, J. Eng. Mat. Tech.*, 101 :148–153, 1980.

Modélisation de l'erreur lors de mesures de paramètres sur des structures

Application aux structures marines : bilan des projets Gerom et Medachs

F. Schoefs¹, S. Bonnet¹, J. Boero², A. Clément¹

¹ GeM, Institut de Recherches en Génie Civil et Mécanique, UMR CNRS 6183, Université de Nantes

² OXAND SA, Lyon

Mots clés: Erreur de mesure, béton, acier, corrosion, inspection, contrôle.

1. Introduction

La mesure in-situ de caractéristiques de matériaux est souvent une étape essentielle de mise à jour des paramètres de dégradations des structures en vue d'un calcul de fiabilité. De nombreux travaux ont été développés pour analyser les paramètres ou groupes de paramètres physiques les plus pertinents, les outils non ou faiblement destructifs pour les mesurer et l'optimisation des périodes de mesure au sens d'une approche basée sur les risques.

Ce dernier point nécessite de fournir des caractéristiques de performance des appareils. On utilise alors les mesures de probabilité appropriées et on définit la probabilité de détection d'un défaut existant et la probabilité de fausse alarme. Dans de nombreux projets, des campagnes d'inter-calibration permettent d'accéder directement à ces grandeurs et de définir notamment le seuil de détection. Ces projets sont coûteux et il est parfois nécessaire de modifier l'approche.

Cet article se place dans ce contexte où aucune campagne d'intercalibration n'est disponible. On a montré que dans ce cas (Schoefs et Clément 2004), des courbes dites ROC (Receiver Operating Characteristics) peuvent être introduites dans des schémas d'aide à la décision. Elles relient les valeurs des probabilités de détection et de fausse alarme pour toute la gamme de seuils de détection possibles.

La modélisation de l'erreur dans le protocole de mesure est alors nécessaire. Cet article développe une approche générale de l'erreur de mesure basée sur la sommation de deux niveaux d'erreurs : l'erreur due à l'opérateur et l'erreur due au protocole. On décompose alors l'erreur en un biais déterministe et une erreur centrée.

L'article se propose d'évaluer cette erreur dans deux situations d'inspections de structures de nature très différente :

- le cas où l'ensemble du contrôle est réalisé in-situ : cas de l'inspection par ultra-sons de structures métalliques corrodées. On montre alors que l'erreur a une dépendance spatiale importante.
- le cas où un prélèvement est réalisé et des mesures effectuées en laboratoire : cas de la mesure du taux d'ions chlorures dans le béton.

On conclut sur les principes de prise en compte de l'impact de cette erreur dans les outils d'aide à la décision mais aussi dans l'évaluation de la fiabilité de composants structurels.

2. Modélisation de l'erreur de mesure

L'erreur de mesure suite à un contrôle peut avoir de multiples causes. Toutefois, pour être évaluée, elle doit correspondre à un suivi de protocole normalisé, disposant d'un suivi qualité. Dans ce cas on peut distinguer les sources d'erreur suivante :

- erreur due au protocole (erreur organisationnelle et technologique),
- erreur due à l'opérateur (facteur humain),

Seuls de rares cas (Barnouin et al., 1993) ont permis d'évaluer ces erreurs. Dans la majeure partie des cas l'erreur est globalisée dans un même terme. On considère ici qu'elle peut s'écrire (1) :

$$e = e_p + e_s + e_h \quad (1)$$

On décompose chaque terme dans l'article en modélisant l'erreur comme la somme d'un biais et d'une erreur centrée.

3. Application à la probabilité de détection

La probabilité de détection et de fausse alarme dépendent fortement de cette erreur. Après modélisation, l'article propose :

- dans le cas du protocole de mesure d'ions chlorures dans le béton, la probabilité de détection en figure 1, en fonction de l'écart par rapport à la concentration critique,
- pour la mesure de corrosion in situ par ultra-sons, la distribution bruitée du défaut (en barres vides) et la distribution de l'erreur (en rouge), sont présentées en figure 2.

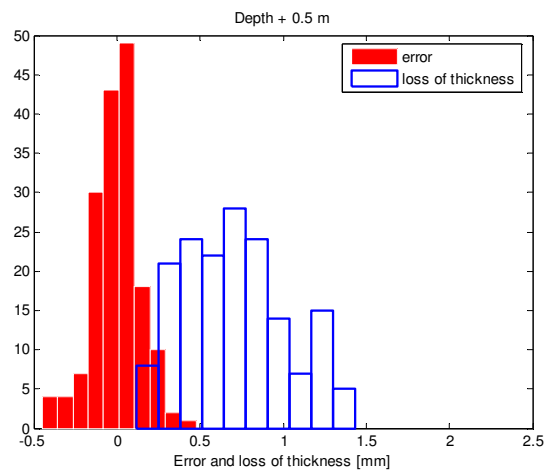
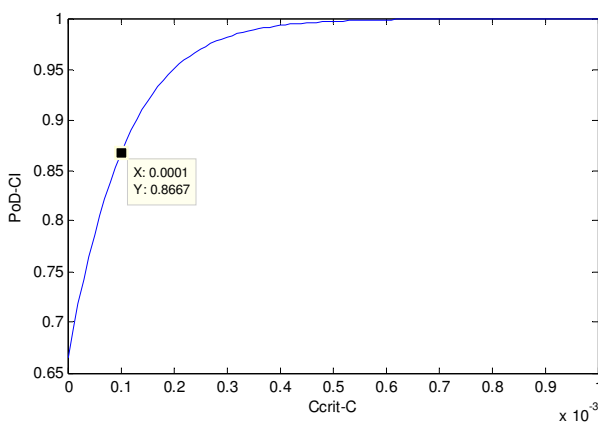


Fig.1 Courbe PoD en fonction de $C_{crit} - C$.

Fig.2 Distribution de l'erreur et du signal (zone immergée).

4. Conclusion

La réalisation de contrôles intrusifs ou non sur structures de grandes échelles nécessite d'utiliser des techniques hors du contexte maîtrisé du laboratoire. Parfois les techniques de laboratoire nécessitent des phases de calibration ou encore un grand nombre d'étapes qui peuvent être autant de facteurs d'erreurs. Les résultats sont alors sensibles à l'environnement qui va les entacher d'erreur, biaisée ou non, ou au nombre d'étapes. Cet article présente tout d'abord les concepts nécessaires à la prise en compte d'erreur de mesure dans un contexte de décision. Des applications à des protocoles de mesure d'ions chlorures ou à des inspections de structures corrodées sont alors proposées.

Les auteurs tiennent à remercier le projet européen Medachs, le projet GEROM, en particulier le Port Autonome de Nantes Saint Nazaire et la Société Oxand pour leur soutien.

La fusion de données de C.N.D. au service du diagnostic de l'état du béton : qualité des données et réduction des incertitudes

Marie-Aude PLOIX¹, Denys BREYSSE², Vincent GARNIER¹, Mehdi SBARTAI³

¹ LCND, IUT Aix-en-Provence, marie-aude.ploix@univmed.fr

² Université Bordeaux 1, Ghymac, d.breysse@ghymac.u-bordeaux1.fr

³ Université Bordeaux 1, US2B, zm.sbartai@us2b.u-bordeaux1.fr

Mots clés: béton, contrôle non destructif, diagnostic, fusion de données, incertitudes

La dégradation des ouvrages en béton armé sous l'effet des actions climatiques et environnementales (corrosion, carbonatation, micro-fissuration...) induit des coûts de maintenance importants, de manière à garantir les conditions d'un fonctionnement satisfaisant et à réduire les probabilités de défaillance brutale des ouvrages. Le recours au contrôle non destructif se développe, dans la mesure où il peut fournir des informations utiles dans une stratégie d'entretien qui serait optimisée.

L'estimation de l'état de dégradation du béton des ouvrages souffre cependant de plusieurs difficultés :

- les observables issus des mesures de contrôle non destructif sont des données pour lesquelles on ne sait pas si la variabilité spatiale, voire temporelle, est caractéristique de la variabilité réelle du matériau, ou si elle est induite par des variations des conditions de mesure,
- les observables usuels sont sensibles à de nombreuses caractéristiques de la microstructure (porosité, teneur en eau, degré de saturation...) et l'impossibilité de découpler ces effets nuit au diagnostic,
- les mesures elles-mêmes sont imparfaites et leur reproductibilité est imparfaite,
- le couplage de techniques fournit en théorie une piste intéressante pour réduire les incertitudes, mais il est le plus souvent proposé sans qu'une réelle stratégie y préside. La valeur ajoutée qui peut résulter de la multiplication des mesures est alors discutable.

Une vaste campagne expérimentale de caractérisation non destructive du béton a été entreprise dans le cadre du Projet ANR-SENSO. Elle a permis, dans sa première phase, d'étudier la sensibilité de nombreux observables à des variations d'indicateurs essentiels des propriétés physiques et mécaniques du matériau, tels que sa porosité (et sa résistance mécanique) et sa teneur en eau. Une étude approfondie de la variabilité des mesures à différentes échelles a été entreprise. A partir de la qualité des mesures et de la sensibilité aux indicateurs recherchés, une batterie d'observables ont été identifiés, pour lesquels les corrélations empiriques entre les indicateurs et les observables ont été établies.

Ces corrélations sont, dans un deuxième temps, exploitées dans le cadre de la fusion de données. Celle-ci consiste à tirer le meilleur parti de deux (ou plusieurs) mesures d'observables pour améliorer l'estimation des indicateurs recherchés. En exploitant la base de données expérimentales, nous montrerons sur quels principes repose la procédure de fusion (bases du formalisme, forme des opérateurs) et comment sa mise en œuvre peut contribuer à l'amélioration du diagnostic. Nous illustrerons aussi clairement la notion de complémentarité des observables, ouvrant ainsi la voie à une approche plus rationnelle de la combinaison des techniques de CND.

Méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance d'ouvrages de génie civil

A. TALON¹, C. CURT¹, D. BOISSIER²

¹ CEMAGREF, aurelie.talon@cemagref.fr, corinne.curt@cemagref.fr

² Polytech' Clermont-Ferrand / Laboratoire Génie Civil, daniel.boissier@cust.univ-bpclermont.fr

Mots clés: agrégation des données, fusion des données, qualité des données, données multi-sources, données multi-échelles, théorie des possibilités.

1 Introduction

Dans le contexte économique, sociologique et environnemental actuel, le maintien de la performance dans le temps des ouvrages de génie civil est l'une des clés de voûte de la maîtrise des risques. Différentes approches ont été développées pour modéliser au mieux le comportement des ouvrages dans le temps et ainsi déduire leur niveau de performance : les approches probabilistes, les approches statistiques, les approches possibilistes, etc. Nous proposons ici une démarche basée sur une approche possibiliste. Ce type d'approche est adapté dans le cas où sont par exemple manipulées des connaissances expertes (dires d'experts) ou des connaissances hétérogènes (observations, expérimentations, instrumentations, simulations, probabilités, statistiques, dires d'experts).

2 Méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance

La démarche proposée ici se décompose en quatre phases : (1) l'analyse de la qualité des données disponibles, (2) la fuzzification, (3) l'unification par fusion et / ou agrégation des données et (4) la défuzzification. Nous présentons dans cet article les méthodologies qui sous-tendent cette démarche. Deux applications comparées de cette démarche sont proposées dans un deuxième article [3], en insistant sur les spécificités et similitudes liées à ces deux applications.

Les principales phases de la démarche sont les suivantes :

L'analyse de la qualité des données collectées : cette phase a pour objectif d'estimer la confiance que l'on peut accorder à chacune des données collectées et qui est modélisée ici par une masse de croyance. Elle s'appuie sur la méthode NUSAP (« Numerical Unit Spread Assessment Pedigree ») développée par Funtowicz et Ravetz en 1990 [2]. Pour assurer l'homogénéité de l'évaluation de la qualité des données nous proposons une grille de qualité applicable à tous types de données. Le résultat de cette phase est un ensemble de couples {donnée ; masse de croyance}.

La fuzzification : cette phase consiste à transformer la donnée collectée dans un format possibiliste, ici une fonction d'appartenance ; cette fonction d'appartenance peut être déclarée par un expert ou encore obtenue de manière automatique par la prise en compte de l'évaluation de la qualité des données issue de la phase précédente.

L'unification des données par fusion et/ou agrégation (l'application de l'une ou de l'autre de ces méthodes dépend du type de relation « problème – données » considérée) :

- ⇒ La fusion des données est basée sur la théorie de l'évidence ; elle consiste à combiner l'ensemble des données disponibles relatives à un même problème et provenant de sources différentes puis à exploiter la complémentarité de ces sources pour obtenir une donnée consensuelle et un indicateur de qualité de cette donnée consensuelle. Par exemple, plusieurs sources (statistiques, dires d'expert, etc.) donnent une estimation de la durée de vie d'un produit ; ces sources n'ont pas la même fiabilité et les estimations fournies n'ont donc pas la même qualité. La fusion construira une durée de vie consensuelle obtenue à partir des estimations provenant des différentes sources.
- ⇒ L'agrégation des données est basée sur la théorie des sous ensembles flous et consiste à exploiter au mieux l'ensemble des données disponibles relatives à différents sous-problèmes distincts du problème afin d'obtenir (comme pour la fusion) une donnée consensuelle et un indicateur de

qualité de cette donnée consensuelle. La Figure 1 schématise cette méthode d'agrégation pour l'estimation de la durée de vie (DDV) d'un produit à partir de la fusion des données (D_i) sur la durée de vie de ses composants.

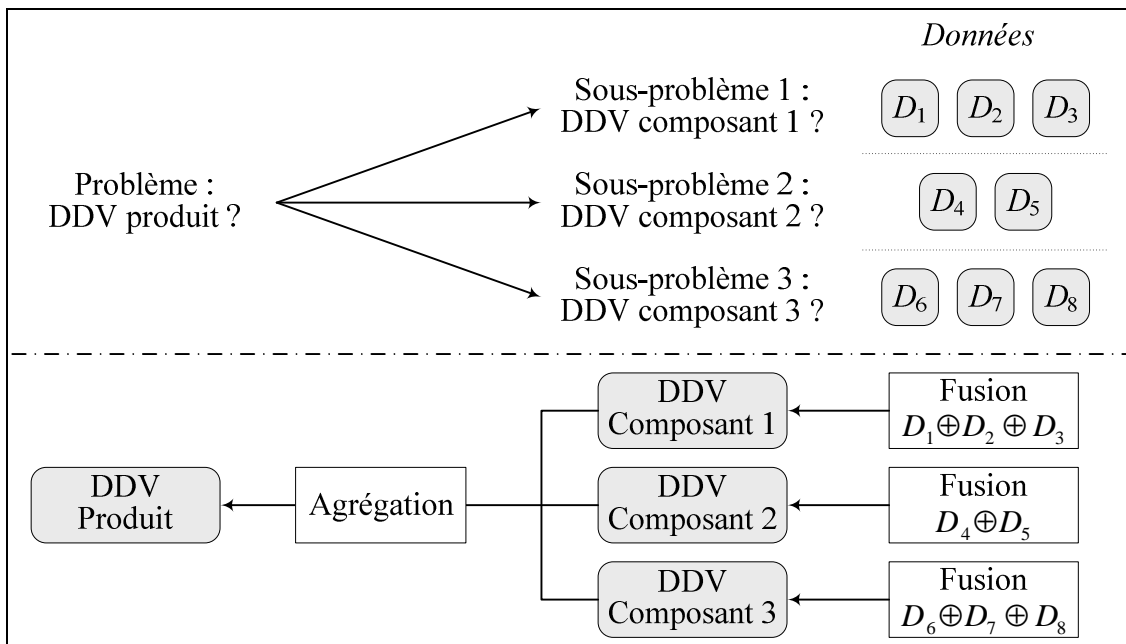


Fig. 1- Illustration de l'unification de données de durées de vie d'un produit de construction

La défuzzification : cette phase consiste à extraire l'information juste nécessaire à l'aide à la décision et représentant au mieux les résultats de la fusion et / ou de l'agrégation des données. Différentes méthodes de défuzzification existent qui mènent à des résultats différents : il est donc essentiel de faire un choix de méthode pertinent car le résultat obtenu constitue la variable sur laquelle s'appuie la prise de décision ultérieure (réparation, maintenance...).

3 Conclusion

Nous avons développé cette approche dans un objectif d'évaluation de la performance d'ouvrages de génie civil : performance d'une fonction, performance d'un ouvrage par rapport à un mode de rupture. Nous l'avons appliquée sur deux types d'ouvrages de génie civil : les bâtiments [4] et les barrages [1]. Cette démarche générique devrait pouvoir être étendue à d'autres ouvrages de génie civil. Par ailleurs, il faut souligner que dans chaque phase de la méthodologie, différentes méthodes sont disponibles et sont à décliner en fonction des besoins explicites de l'application traitée.

Références

- [1] Curt C., Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances, Thèse de doctorat, Université de Clermont-Ferrand, CEMAGREF et LGC, 2008.
- [2] Funtowicz S.O., Ravetz J.R., *Uncertainty and Quality in Science for Policy*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [3] Talon A., Curt C., Boissier D., « Application aux barrages et aux bâtiments de la méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance », *Actes de la conférence Fiabilité des matériaux et des structures*, Nantes, 26-28 mars 2008.
- [4] Talon A., Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction, Thèse de doctorat, Université de Clermont-Ferrand, CSTB et LGC, 2006.

Prise en compte de la variabilité des propriétés élastiques du béton dans le calcul de la tenue des enceintes de confinement

T. de LARRARD, J.-B. COLLIAT, F. BENBOUDJEMA, J.-M. TORRENTI

LMT Cachan, 61 av. du Président Wilson, 94230 Cachan, France, delarrard@lmt.ens-cachan.fr

Mots-clés : variation du module d'Young, génération de champ aléatoire, méthode de Monte-Carlo, décomposition de Karhunen-Loève, CTL

1 Introduction

Les travaux présentés ici portent sur une variation du module d'Young dans la géométrie de la structure. Pratiquement le point de départ de ce travail a été la seule connaissance d'un jeu de valeur statistique sur le module d'Young : une valeur moyenne et un écart-type. Il a ensuite été observé l'influence de cette variation sur le comportement mécanique de la structure et plus particulièrement sur les contraintes et les déformations maximales, dont une évolution par rapport aux valeurs dimensionnantes issues d'un calcul déterministe pourrait avoir des conséquences significatives en terme de fissuration ou d'endommagement du matériau.

2 Structure étudiée et choix des quantités d'intérêt

La structure étudiée est une enceinte de confinement, modélisée de la façon la plus simple possible. La structure a été étudiée en deux dimensions. Un premier cas a porté sur une coupe horizontale de l'enceinte, étudiée en contraintes planes et en déformations planes, et un autre sur une coupe verticale pour une étude axisymétrique. Les quantités d'intérêt sur lesquelles vont être observées les conséquences de cette variation du module d'Young sont les contraintes et les déformations orthoradiales. En effet, un des objectifs de cette étude est de vérifier si la variation du module ne risquerait pas d'entraîner le béton dans des comportements où les valeurs en traction seraient plus importantes que celles retenues à partir d'un calcul déterministe pour dimensionner la précontrainte.

3 Méthode de Monte-Carlo et décomposition de Karhunen-Loève

Le principe général de la méthode de Monte-Carlo est d'estimer la valeur d'une fonction continue sur un espace probabilisé par la calcul d'un certain nombre de réalisations de cette fonction. Pratiquement, pour l'étude présentée ici, il va donc suffire de générer un nombre suffisamment important de réalisations du module d'Young, grâce à la décomposition modale de Karhunen-Loève, et d'effectuer un calcul mécanique pour chacune d'entre elles. De chaque calcul, on retirera les quantités d'intérêt qui nous intéressent.

4 Résultats et conclusions

Les résultats sont ici considérés en terme de borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %. En ce qui concerne les calculs en contraintes planes et déformations planes, sur la coupe horizontale, on observe :

- pour la **contrainte principale majeure** : 12 MPa, au lieu de 10 MPa (calcul déterministe), soit une *augmentation de 20%* ;
- pour la **déformation principale majeure** :
 - 0,86 mm/m, au lieu de 0,61 mm/m (calcul déterministe), soit une *augmentation de 41%* dans le cas des *contraintes planes* ;
 - 0,93 mm/m, au lieu de 0,65 mm/m (calcul déterministe), soit une *augmentation de 43%* dans le cas des *déformations planes*.

Dans le cas du calcul axisymétrique sur la coupe verticale, on observe :

- pour la **contrainte orthoradiale** : 14 MPa, au lieu de 10 MPa (calcul déterministe), soit une *augmentation de 40%* ;
- pour la **déformation orthoradiale** : 0,48 mm/m, au lieu de 0,437 mm/m (calcul déterministe), soit une *augmentation de 30%*.

Références

- [1] T. de Larrard. Prise en compte de la variabilité des propriétés élastiques du béton pour le calcul des enceintes de confinement. Rapport de stage de m2, LMT - ENS Cachan, 2007.
- [2] M. Hautefeuille. Mise en oeuvre d'une méthode éléments finis spectrale de résolution des problèmes stochastiques. Rapport de stage de m2, LMT - ENS Cachan, 2005.
- [3] A. Keese. *Numerical solution of systems with uncertainties - a general purpose framework for stochastic finite elements*. Phd thesis, Technische Universität Braunschweig, Germany, 2003.
- [4] H.G. Matthies, R. Niekamp, and J. Steinford. Algorithms for strong coupling procedures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195 :2028–2049, 2006.
- [5] H.G. Matthies. Quantifying uncertainty : modern computational representation of probability and applications. Technical report, Institute of Scientific Computing Technische Universität Braunschweig, Germany, 2005.
- [6] A.J. Newman. Model reduction via the karhunen-loeve expansion - part i : an exposition. Technical report, University of Maryland, USA, 1996.
- [7] P.D. Spanos and R.G. Ghanem. *Stochastic finite element, a spectral approach*. Dover Publication, revised edition, 2002.
- [8] R.L. Taylor and O.C. Zienkiewicz. *The finite element method*. Elsevier, Oxford, 6th edition, 2005.

Session TS1-B
Mercredi 26 mars
18 : 00 - 19 : 15

A. Clement, H. Yáñez-Godoy, F. Schoefs, A. Nouy.

Identification de variable aléatoire sur le chaos polynomial : application aux données d'inspection et d'instrumentation de structures existantes.

M. Berveiller, Y. Le Pape, B. Sudret, F. Perrin.

Méthode MCMC pour l'actualisation bayésienne des déformations différées du béton d'une enceinte de confinement modélisée par éléments finis.

J. El Hassan, A. Chateauneuf, P. Bressolette.

Evaluation fiabiliste de l'impact des conditions environnementales sur la corrosion des structures en béton armé sujettes à la pénétration de chlorures.

A. Talon, C. Curt, D. Boissier.

Application aux barrages et aux bâtiments de la méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance.

Identification de variable aléatoire sur le chaos polynomial : application aux données d'inspection et d'instrumentation de structures existantes

Alexandre Clément¹, Humberto Yáñez-Godoy², Franck Schoefs¹, Anthony Nouy¹

¹ Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), Université de Nantes Atlantique Ecole centrale de Nantes UMR CNRS 6183 France, anthony.nouy@univ-nantes.fr

² OXAND S.A, 62 bvd Niels Bohr, BP 2132, F-69603 Villeurbanne, FRANCE

Mots-clés : Inspection, instrumentation, processus stochastique, chaos polynomial

1 Introduction

Classiquement, l'identification d'une variable aléatoire peut être réalisée à partir de lois *a priori* (loi normale, valeurs extrêmes etc.), mais ce type d'identification ne conduit pas nécessairement à une bonne représentation de la variable aléatoire et des grandeurs d'intérêt qui gouvernent l'aide à la décision. En effet, on ne dispose pas toujours d'informations sur les distributions théoriques des variables à identifier. Ainsi quand la distribution d'une variable aléatoire $X(\theta)$ ne suit pas une densité de probabilité classique, on peut choisir de représenter cette variable à l'aide d'une décomposition sur le chaos polynomial [1] :

$$X(\theta) = \sum_{i=0}^p h_i(\xi(\theta)) X_i$$

où ξ est une variable aléatoire centrée réduite, h_i le polynôme d'Hermite normalisé de degré i et p est l'ordre de troncature de la décomposition sur le chaos polynomial. Dans [2], il a été proposé une méthode d'identification sur le chaos polynomial basée sur le principe de maximum de vraisemblance. Les coefficients de la décomposition X_i sont alors solution d'un problème d'optimisation. La méthode proposée permet notamment de formuler le problème d'optimisation sur une hyper-sphère de dimension $p - 1$ [3]. Cette méthode d'identification est utilisée ici pour deux applications : la modélisation de résultats d'inspection et de données d'instrumentation de structures existantes.

2 Modélisation probabiliste de données d'inspection

La première application concerne l'optimisation des inspections de structures en milieu littoral qui est un enjeu majeur afin de maintenir leur utilisation en toute sécurité. Il apparaît nécessaire de trouver l'équilibre optimal entre le nombre croissant de structures vieillissantes et les moyens financiers disponibles pour poursuivre leur utilisation [4, 5]. En effet, la démolition et le remplacement de ces grandes structures conduisent à des coûts économiques et environnementaux très élevés. Afin de pouvoir évaluer l'état de ces structures, des campagnes d'inspection sont menées à l'aide de contrôles non destructif (CND). Ces structures étant situées en milieu marin ou côtier, les conditions d'inspection peuvent être particulièrement difficiles (présence de bio-salissures, visibilité réduite en grandes profondeurs ou en milieu estuarien, etc.). Le coût de ces campagnes d'inspection pouvant être très élevé, il est important d'avoir une description précise de la performance des techniques utilisées : les concepts de probabilité de détection (PoD) et de probabilité de fausse alarme (PFA) se sont révélés utiles pour réaliser des études de risque incorporant ces données d'inspection. Connaissant les fonctions f_{signal} et f_{bruit} donnant respectivement les densités de probabilité du (signal+bruit) et du bruit venant de la mesure, la PoD et la PFA s'écrivent :

$$PoD = \int_{a_d}^{+\infty} f_{signal}(\hat{d}) d\hat{d} \quad (1)$$

$$PFA = \int_{a_d}^{+\infty} f_{bruit}(\eta) d\eta \quad (2)$$

où a_d est le seuil de détection et \hat{d} et η sont respectivement le défaut mesuré et le bruit sur la mesure. Les probabilités de détection et de fausse alarme sont alors reliées sous formes de courbes paramétriques appelées "Receiver-Operating-Characteristics curves" (courbes ROC). Ces courbes permettent de caractériser la performance d'une inspection liée aux conditions environnementales, au protocole de mesure ainsi qu'à l'inspecteur. Afin d'obtenir une représentation continue de ces courbes ROC permettant de les incorporer dans un modèle, les données d'inspection doivent être modélisées sous formes de variables aléatoires. Dans cet article, cette modélisation est réalisée à l'aide de lois prédéfinies et à partir de l'identification sur le chaos polynomial. Pour cela, on considère que les résultats de la campagne d'inspection CND donnent accès, sous certaines hypothèses, à des réalisations des variables aléatoires \hat{d} et η . On montre que l'identification de ces variables sur le chaos polynomial donne de meilleurs résultats au sens du maximum de vraisemblance. De plus, comme le montre la figure 1, les courbes ROC obtenues sont très proches des courbes ROC discrètes obtenues directement à partir des mesures CND.

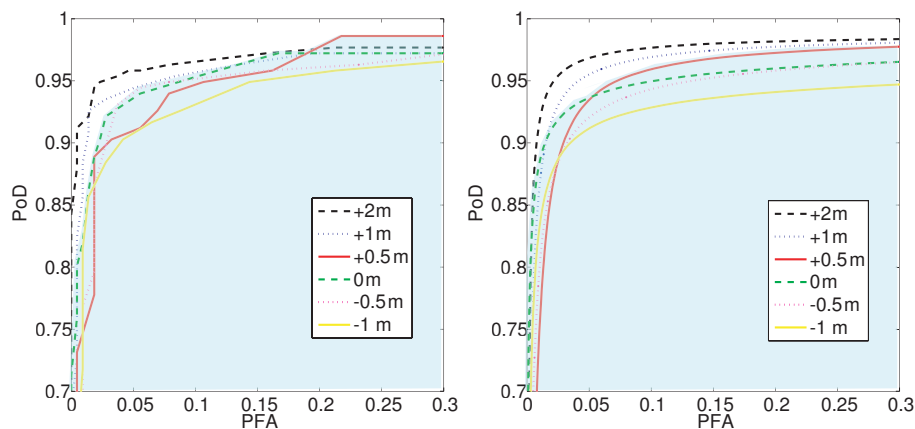


Fig. 1 – Comparaison entre les courbes ROC expérimentales (gauche) et obtenues par identification sur le chaos polynomial (droite) pour tous les niveaux d'inspection.

3 Conclusion

Cet article présente une méthode d'identification de variable aléatoire sur le chaos polynomial basé sur l'estimation du maximum de vraisemblance. Les inconnues du problème sont alors les coefficients de la décomposition de la variable aléatoire sur le chaos polynomial. Les résultats de la méthode sont comparés à ceux obtenus avec des lois prédéfinies. A l'aide de deux applications, on montre que cette méthode est plus efficace au sens du maximum de vraisemblance. La première concerne la modélisation de données d'inspection afin d'évaluer la qualité de la technique CND utilisée. La seconde application concerne la modélisation de paramètres de modèles à partir de données d'instrumentation d'un quai sur pieux.

Références

- [1] R. Ghanem and P. Spanos. *Stochastic finite elements : a spectral approach*. Springer, Berlin, 1991.
- [2] C. Desceliers, C. Soize, and R.G. Ghanem. Identification of chaos representations of elastic properties of random media using experimental vibration tests. *Computational Mechanics*, 39 :831–8, 2007.
- [3] H. Yanez-Godoy, F. Schoefs, and A. Nouy. Soil-rod-anchoring stiffness identification of a monitored pile-supported wharf by a polynomial chaos representation. *Structural Safety*, 2007.
- [4] A. Radojicic, S.F. Bailey, and E. Brühwiler. Probabilistic models of cost for the management of existing structures. *Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems*, 2001.
- [5] M.G. Stewart, A.C. Estes, and D.M. Frangopol. Bridge deck replacement for minimum expected cost under multiple reliability constraints. *Journal of Structural Engineering*, 2004.

Méthode MCMC pour l'actualisation bayésienne des éformations différées du béton d'une enceinte de confinement modélisée par éléments finis stochastiques non intrusifs

Marc Berveiller¹, Yann Le Pape¹, Bruno Sudret¹, Frédéric Perrin²

¹ EDF R&D Division, Site des Renardières, F-77818 Moret-sur-Loing, marc.berveiller@edf.fr

² Phimeca Engineering S.A., Centre d'Affaires du Zénith, 34, rue de Sarliève, F-63800 COURNON d'AUVERGNE

Mots clés: actualisation bayésienne, Markov chain Monte Carlo (MCMC), chaos polynomial, approche non intrusive

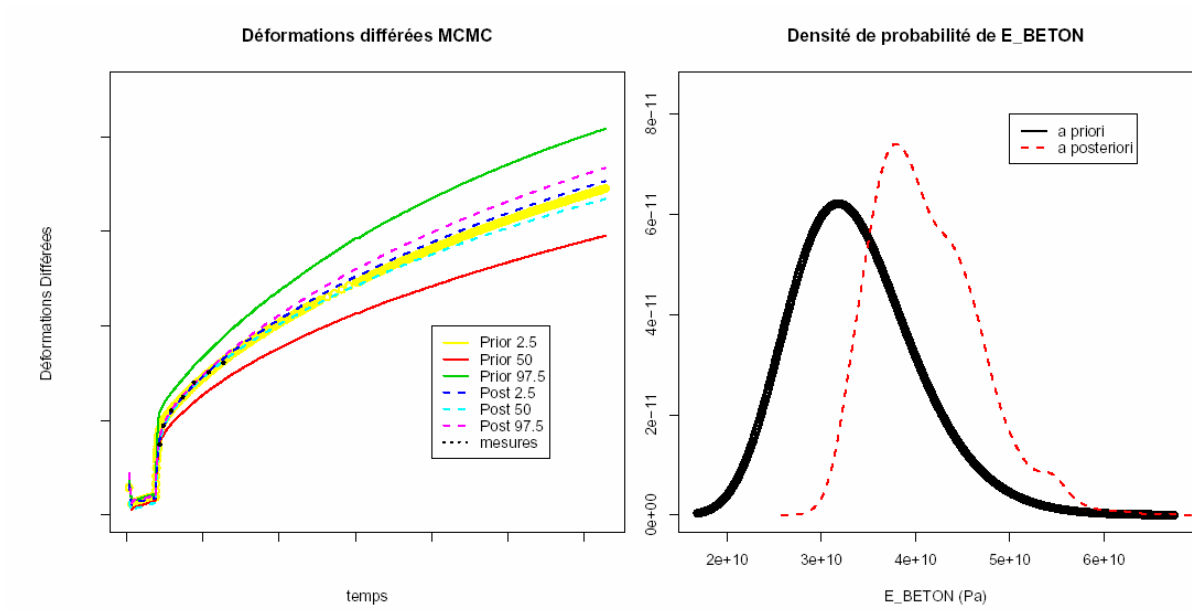
Les enceintes de confinement des centrales nucléaires françaises de 1300-1450 MW sont constituées de deux parois en béton. Le mur intérieur est précontraint dans les directions verticales et horizontales. L'intégrité de la structure dépend de l'état de compression du béton en service et en situation accidentelle. Ainsi, la perte de précontrainte dans le béton des enceintes de confinement impacte la durée de vie des centrales REP. En effet, la réglementation impose lors des épreuves en pression, une compression résiduelle d'au moins 1 MPa dans l'enceinte, afin de s'assurer qu'elle joue toujours son rôle de 3ème barrière contre toute contamination extérieure. Cette exigence nécessite donc de bien estimer le comportement à long terme du fluage du béton. La modélisation de ce comportement est un domaine relativement complexe qui s'appuie en partie sur des données empiriques. Les enceintes de confinement sont instrumentées et permettent donc d'avoir un retour d'expériences (données d'auscultation) sur les déformations du béton. Il est donc nécessaire d'améliorer les prédictions des déformations différées des enceintes à 60 ans en s'appuyant sur ces données collectées tout au long de la vie de l'ouvrage.

Les méthodes de simulation par chaînes de Markov permettent d'actualiser les densités de probabilité des paramètres d'entrée du modèle en prenant en compte les mesures d'auscultation [1,2]. Une fois les paramètres d'entrée actualisés, on peut obtenir l'évolution *a posteriori* du modèle en l'évaluant à partir de l'échantillon obtenu par la méthode de simulation par chaînes de Markov. Cette méthode est coûteuse en nombre d'appels au modèle.

L'approximation du modèle par une surface de réponse stochastique (chaos polynomial d'Hermite) qui va dépendre des variables aléatoires d'entrée du modèle, permet de contourner cette difficulté. La méthode non intrusive de régression [3] permet d'obtenir le développement de la réponse sur la base du *chaos polynomial*. Le calcul des coefficients est obtenu en minimisant l'erreur quadratique entre la réponse exacte et la réponse approchée pour un plan d'expériences choisi judicieusement.

L'algorithme de Metropolis-Hastings, qui permet de simuler des densités conditionnelles en s'appuyant sur les chaînes de Markov, est ensuite appliqué à l'actualisation des variables gaussiennes centrées réduites sous-jacentes au chaos polynomial. Les échantillons *a posteriori* de ces variables peuvent être retransformés en échantillon *a posteriori* des variables d'entrée du problème. On obtient par ailleurs les prédictions *a posteriori* du modèle (réponse actualisée).

Dans le cas d'étude, l'évolution des déformations différées est obtenue à partir de calculs aux éléments finis sur partie courante d'enceinte de confinement [4]. Les déformations différées totales sont la somme des déformations élastiques, de dilatation thermique, de retrait endogène, de retrait de dessiccation, de fluage propre et de fluage de dessiccation. Un méta-modèle de type chaos polynomial est dans un premier temps calculé, pour chaque pas de temps sur l'intervalle d'étude considéré, puis actualisé selon la technique décrite précédemment.



Références

- [1] Burden E., Low Z., Bianchi P., and Tan S.M., Reinforced Concrete Dimensioning based on Element Nodal Forces. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 120(6), 1718-1731, 2002.
- [2] Smith L., *Limit Analysis and Concrete Plasticity*, Prentice Hall, New York, 2003.

Evaluation fiabiliste de l'impact des conditions environnementales sur la corrosion des structures en béton armé sujettes à la pénétration de chlorures

Jinane EL HASSAN¹, Alaa CHATEAUNEUF¹, Philippe BRESSOLETTE¹, Khaled EL-TAWIL²

¹ Université Blaise Pascal, BP 206, 63174 Aubière cedex, France, jinane_hasan@hotmail.com

² Université Libanaise, Faculté de Génie- branche II, El Hadath, Beyrouth, Liban.

Mots clés: béton armé – chlorures – coefficient de diffusion – corrosion – environnement – fiabilité.

L'environnement auquel les structures en béton armé sont exposées à des conséquences physiques et chimiques, déclenchant des mécanismes de dégradation sur le béton et sur les armatures qui ne sont généralement pas pris en considération lors de la conception. La corrosion des armatures est reconnue comme étant le mécanisme de dégradation prédominant dans ces structures, affectant sérieusement leur durabilité ; elle est liée à des réactions chimiques ou électrochimiques entre l'acier et son environnement. Selon le cas, la corrosion peut être concentrée localement pour former des piqûres, ou s'étendre sur une surface importante : on parle alors de corrosion généralisée. Quelle que soit sa forme, la corrosion des armatures peut se traduire par la réduction de la section d'acier, par la perte d'adhérence entre le béton et les armatures, par la fissuration et par la dégradation du béton d'enrobage.

Dans ce travail, un modèle général de corrosion des structures en béton armé est présenté. Il tient compte de plusieurs paramètres intervenant dans le phénomène de corrosion et traite leurs incertitudes par une modélisation à l'aide de variables aléatoires représentant les conditions environnementales, les caractéristiques du béton et le chargement appliqué.

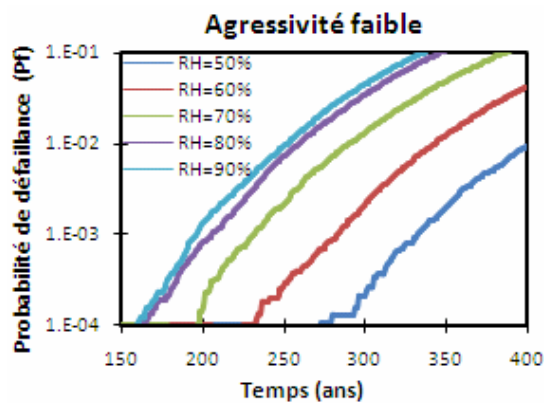
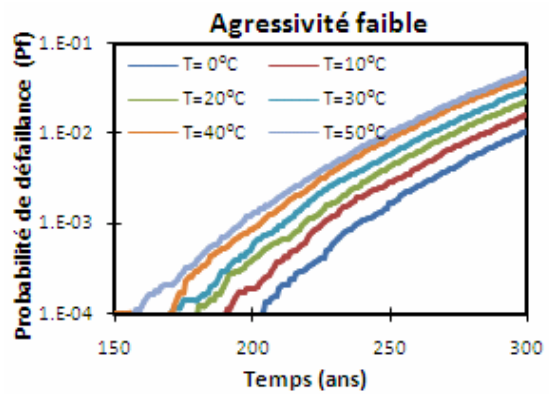
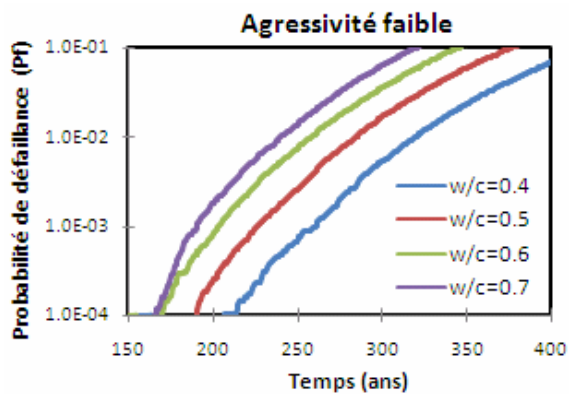
Ce modèle mécano-fiabiliste décrit la durée de vie en trois étapes. La première étape représente l'initiation de la corrosion durant laquelle la couche protectrice de l'acier est dépassivée par les chlorures qui pénètrent dans le béton par diffusion. La seconde étape est la nucléation des piqûres qui est le résultat d'un processus électrochimique induit par la corrosion. Et enfin, la troisième étape concerne la croissance des piqûres qui s'arrête lorsque leur taille conduit à la défaillance de la structure. Le mode de défaillance considéré dans ce modèle est l'état limite de flexion ; i.e. la structure n'est plus fiable lorsque la section résiduelle des armatures n'assure plus la résistance vis-à-vis du chargement.

L'effet de l'environnement sur la durée de vie est pris en compte en considérant quatre niveaux d'agressivité, définis par l'enrobage, le taux de corrosion et la concentration surfacique en chlorure. Les paramètres présentant des incertitudes sont représentés par des variables aléatoires.

L'initiation de la corrosion dépend de la pénétration des ions de chlorure dans le béton. Le coefficient de diffusion de chlorures est généralement exprimé en fonction de la température, du temps et de l'humidité relative dans les pores du béton. Pour étudier l'effet des paramètres sur le mécanisme de corrosion, le coefficient de diffusion des chlorures est considéré en fonction de la teneur en eau du béton, de la température ambiante et de l'humidité relative.

L'application numérique est effectuée sur une poutre de pont soumise à des environnements de différents niveaux de contamination par les chlorures. L'analyse de la fiabilité en fonction du temps a été réalisée par simulations de Monte Carlo. Le temps de nucléation des piqûres obtenu s'est révélé très inférieur au temps d'initiation de la corrosion et, par conséquent, il a été négligé dans le reste de l'étude. Des courbes du temps d'initiation de la corrosion et de la probabilité de défaillance de la structure ont été tracées pour différentes valeurs de la teneur en eau (w/c), de la température (T) et de l'humidité relative (RH) et pour différents niveaux d'agressivité.

A titre d'exemple, les courbes ci-dessous présentent les probabilités de défaillance de la structure située dans un environnement faiblement agressif.



Une réduction de la fiabilité peut être observée avec l'augmentation de la teneur en eau du béton, de la température et de l'humidité relative. De plus, on peut remarquer qu'au-delà d'une humidité relative de 80%, la probabilité de défaillance de la structure ne varie que légèrement. Ces conclusions concernent aussi le temps d'initiation de la corrosion.

L'analyse de l'ensemble des résultats a permis de décrire qualitativement l'effet de la teneur en eau, de la température et de l'humidité relative sur le mécanisme de corrosion et sur la probabilité de défaillance des structures sujettes à la corrosion par piqûres. Elle a également permis de formuler des recommandations quant à la teneur en eau du béton.

Application aux barrages et aux bâtiments de la méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance

A. TALON¹, C. CURT¹, D. BOISSIER²

¹ CEMAGREF, aurelie.talon@cemagref.fr, corinne.curt@cemagref.fr

² Polytech' Clermont-Ferrand / Laboratoire Génie Civil, daniel.boissier@cust.univ-bpclermont.fr

Mots clés: agrégation des données, fusion des données, qualité des données, données multi-sources, données multi-échelles, théorie des possibilités.

1 Introduction

Les ouvrages de génie civil présentent un objectif commun de maintien de leur performance dans le temps. L'atteinte de cet objectif passe par le développement de méthodes et d'outils d'évaluation de cette performance à différents instants de leur cycle de vie. Nous avons présenté, dans un premier article [2], la méthodologie développée pour l'évaluation possibiliste de la performance basée sur quatre phases : (1) l'analyse de la qualité des données collectées, (2) la fuzzification, (3) l'unification des données par fusion et / ou agrégation et (4) la défuzzification. Dans cet article, nous nous proposons d'appliquer cette méthodologie sur deux familles d'ouvrages : les bâtiments et les barrages puis d'analyser les invariants de la méthodologie face aux spécificités des deux familles.

2 Application de la méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance

2.1 Applications aux bâtiments et aux barrages

Application aux bâtiments [3]

L'application aux bâtiments a pour objectif l'estimation de la durée de vie des produits en conception, estimation traditionnellement très délicate et au résultat très imprécis.

Elle se base sur l'utilisation de données multi-sources : observations, expérimentations, instrumentations, simulations, statistiques, dires d'experts. L'analyse de la qualité des données collectées consiste à estimer la confiance relative que l'on peut accorder à chacune des données en fonction de la source, de l'adéquation entre le problème posé et les données collectées et de leur informativité ; elle est aidée par une grille de qualité. La fuzzification consiste à transformer ces types de données sous un format possibiliste intégrant la confiance accordée à la donnée considérée. Concernant l'étape de fusion et d'agrégation, nous disposons généralement de plusieurs données relatives à plusieurs sous-problèmes (ici les durées de vie des composants d'un bâtiment) caractérisant notre problème (ici la durée de vie d'un bâtiment) ; par conséquent nous menons successivement des fusions au niveau de chacun des sous-problèmes puis agrégeons ces résultats pour obtenir le résultat associé au problème. La phase de défuzzification permet d'obtenir différents indicateurs de la durée de vie et de la qualité qui leur est associée.

Application aux barrages [1]

L'application aux barrages a pour objectif la détermination de la performance d'un barrage en service.

Dans leur pratique, les experts utilisent des données de natures différentes : observations visuelles, données issues de l'auscultation, données calculées, données de conception / réalisation.

Lors de l'application de la méthodologie les experts « traduisent » tout d'abord ces différentes données par des indicateurs qu'ils déclarent sous la forme d'une fonction d'appartenance, la paramétrisation de la fonction d'appartenance dépendant de l'analyse, implicite actuellement, que l'expert aura faite sur les données. La démarche procède ensuite par une agrégation des fonctions d'appartenance afin d'obtenir la performance et la conformité de l'ouvrage aux règles de l'art. Une défuzzification par utilisation de l'opérateur flou Maximum est ensuite conduite.

Nous avons en parallèle établi une grille d'analyse de la qualité des données et nous travaillons actuellement sur l'explicitation des relations entre cette analyse et la paramétrisation de la fonction d'appartenance telle que fournie par l'expert.

2.2 Similitudes et spécificités

La Figure 1 présente les spécificités et similitudes des deux applications :

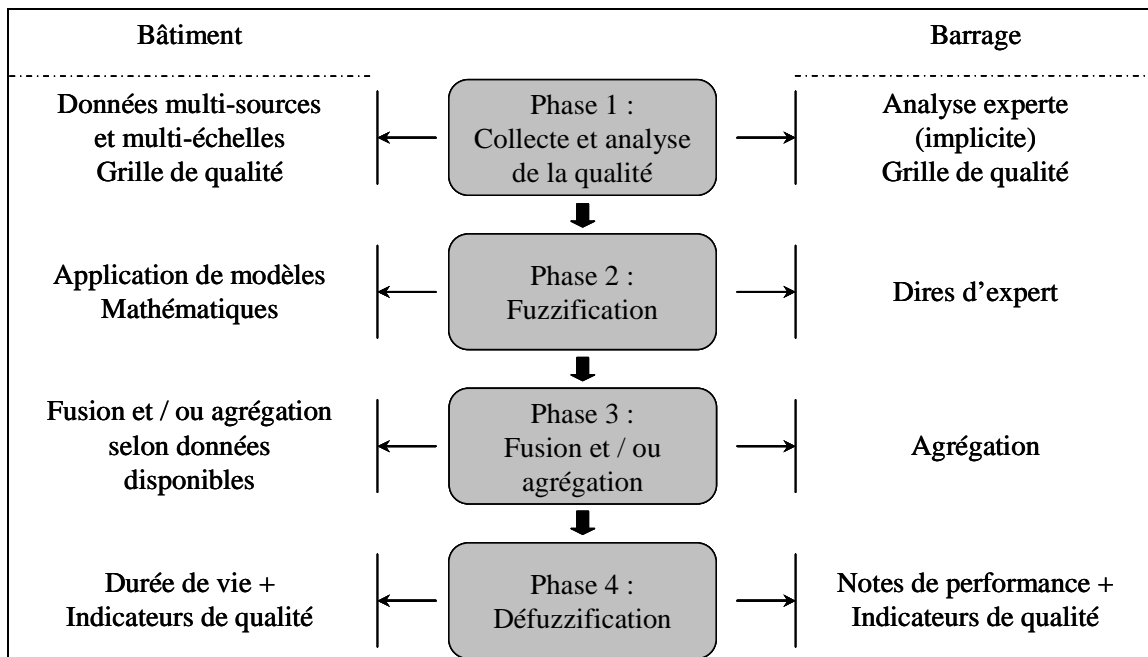


Fig. 1- Similitudes et spécificités des applications bâtiments et barrages

Comme vu précédemment, les deux applications sont basées sur l'utilisation de plusieurs sources de données de nature différente.

La démarche pour l'analyse de la qualité des données collectées est similaire : proposition d'une grille de qualité des données et obtention de couples {donnée ; masse de croyance}. Si l'objectif de ce développement est le même (automatisation de la fuzzification), le développement est fait sur des données de conception dans le bâtiment et sur des données en cours de vie pour les barrages.

Le résultat de la fuzzification est commun pour les deux applications puisqu'il s'agit d'une fonction d'appartenance associée à chacune des données collectées. Toutefois, la fuzzification est réalisée par l'application de modèles mathématiques pour les bâtiments et est déclarée par un expert pour les barrages.

Pour les barrages, ne sont réalisées que des agrégations, tandis que pour les bâtiments sont menées fusions et agrégations ; la méthodologie met donc en œuvre des méthodes différentes : théorie de l'évidence pour la fusion et logique floue pour les agrégations.

3 Conclusion

Ces applications montrent qu'il est possible d'utiliser la démarche générale d'évaluation possibiliste de la performance sur des ouvrages de génie civil. Par ailleurs, il faut souligner que dans chaque phase de la méthodologie, différentes méthodes sont disponibles qui sont à décliner en fonction des besoins explicites de l'application traitée.

Références

- [1] Curt C., Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances, Thèse de doctorat, Université de Clermont-Ferrand, CEMAGREF et LGC, 2008.
- [2] Talon A., Curt C., Boissier D., « Méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance d'ouvrages de génie civil », *Actes de la conférence Fiabilité des matériaux et des structures*, Nantes, 26-28 mars 2008.
- [3] Talon A., Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction, Thèse de doctorat, Université de Clermont-Ferrand, CSTB et LGC, 2006.

Session TS2-A

Jeudi 27 mars

12 : 00 - 13 : 15

J. Humbert, J. Baroth, L. Daudeville.

Analyse de sensibilité par éléments finis stochastiques d'un essai d'arrachement.

A. Charki, D. Bigaud, S. Cloupet, F. Guérin.

Fluid Bearing Failure Probability Evaluation using Finite Element Modeling.

G. Blatman, B. Sudret.

Développements par chaos polynomiaux creux et adaptatifs - application à l'analyse de fiabilité.

A. Clément, A. Nouy, F. Schoefs.

Méthode éléments finis stochastiques étendus pour la prise en compte des incertitudes géométriques dans le calcul de structures.

Analyse de sensibilité par éléments finis stochastiques d'un essai d'arrachement

Jérôme HUMBERT¹, Julien BAROTH¹, Laurent DAUDEVILLE¹

¹ Université Joseph Fourier / Institut National Polytechnique de Grenoble / CNRS
Laboratoire Sols, Solides, Structures – Risques (3S-R), BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9, France

Mots clés: essai d'arrachement, méthode d'éléments finis stochastiques, simulation de Monte Carlo, étude de sensibilité, mécanique non linéaire de l'endommagement.

1 Introduction

La prise en compte de la propagation d'incertitudes dans un modèle mécanique peut s'effectuer à l'aide de méthodes probabilistes. Développées depuis une trentaine d'années, les méthodes d'éléments finis stochastiques (MEFS) [1] sont des alternatives aux simulations de Monte-Carlo, dans le cas où les modèles éléments finis (EF) sont complexes. Parmi ces méthodes, on distingue les MEFS « non-intrusives », *i.e.* ne modifiant pas le modèle EF. Ces méthodes ont fait l'objet de travaux utilisant des développements de polynômes de Lagrange [2]. Cette « MEFS Lagrange » est appliquée ici à l'étude de l'assemblage composé d'une tige d'acier ancrée dans une éprouvette de béton (« pull-out test ») ; son but est de caractériser en termes de moments statistiques, de densité de probabilité et d'intervalle de confiance, l'incertitude sur l'évolution de la force d'arrachement de l'ancrage étudié en fonction de sa longueur de scellement et de la variabilité de 3 paramètres d'entrée : module d'Young du béton, limites d'élasticité du béton et de l'acier.

2 Présentation du problème

Les paramètres d'entrée et de sortie sont modélisés sous forme de variables aléatoires (v.a.) Y_i de lois connues choisies en entrée et Z_j à caractériser en sortie. Cette MEFS est basée sur l'utilisation des polynômes de Lagrange, et permet une caractérisation des Z_j en termes de moments statistiques et de fonctions de densité de probabilité (FDP) associées à un intervalle de confiance [2]. Le domaine d'application concerne les systèmes mécaniques complexes donc coûteux en temps de calcul (modèle EF non linéaire, etc.) pour lesquels un nombre faible de paramètres incertains d'entrée, de l'ordre de 4 à 6, est envisagé.

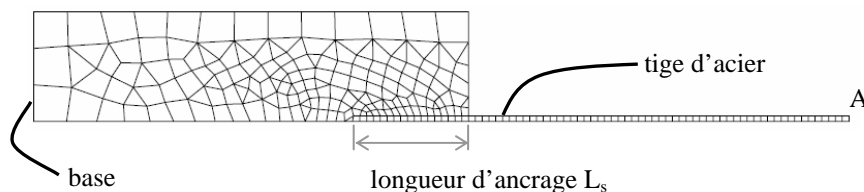


Fig. 1 - Modèle EF du demi-assemblage mixte acier-béton.

Le modèle EF est 2D axisymétrique (Fig. 1), avec une loi non linéaire fondée sur la mécanique de l'endommagement pour le béton (modèle de Mazars), et sur un modèle élastoplastique avec écrouissage linéaire pour l'acier. Les paramètres du modèle sont calés sur les essais expérimentaux, ou à défaut sur les valeurs règlementaires. Trois modes de rupture sont possibles : perte d'adhérence à l'interface acier / béton (mode 1) ; rupture de la tige acier (mode 2) ; rupture d'une zone conique du béton (mode 3). Les deux 1^{ers} modes sont observés expérimentalement, tandis que le 3^{ième} mode n'est pas observable en raison d'un confinement induit près de l'extrémité de l'éprouvette par le dispositif expérimental. Il n'est donc pas considéré dans cette étude. Des critères numériques sur l'endommagement moyen à l'interface acier / béton ($D_i \leq 98\%$) et la déformation maximale de l'acier ($\varepsilon_s \leq 10\%$; d'après [3]) permettent de déterminer la force à la rupture F de l'assemblage lorsque l'on applique un déplacement à l'extrémité libre A de la tige d'acier (Fig. 1), la base de l'éprouvette béton étant bloquée.

3 Résultats

Une première étude préliminaire dans la phase de comportement linéaire (élastique) du modèle permet la comparaison d'une méthode de Monte-Carlo de référence et de la MEFS Lagrange. Une seule v.a. Y est prise en entrée, correspondant à la variabilité du module d'Young du béton E_b , de moyenne $\mu_Y = 3.10^{10}$ Pa et de coefficient de variation $C_v = 10\%$. La v.a. de sortie modélise la variabilité de la force maximale F_{max} pour un déplacement imposé à la tige d'acier de $1\ \mu\text{m}$. La FDP de Z pour le mode 1 présente une bonne adéquation

entre une simulation de Monte-Carlo à 10^5 tirages, et la méthode de Lagrange à 3 et 7 points d'intégration. Les résultats sont analogues pour 4 et 6 points d'intégration. Il en est de même pour la distribution du mode 2. On en déduit que $N = 4$ points d'intégration suffisent pour obtenir des résultats satisfaisants en termes de FDP et de moments statistiques en comparaison avec Monte-Carlo (10^5 tirages). Vu le temps d'exécution important d'un modèle complexe (non linéaire, quelques heures), on choisit d'utiliser une MEFS de Lagrange à 4 points d'intégration par la suite.

Une série de calculs à la rupture est alors effectuée en prenant en entrée une ou deux v.a. modélisant les variabilités des paramètres mécaniques tels que module d'Young du béton E_b ou limites d'élasticité des matériaux (f_{c28} béton ; f_y acier), et en sortie une v.a. modélisant les variabilités de la force à la rupture F . On met ainsi en évidence la sensibilité de F à ces paramètres : forte influence de f_{c28} et faible influence de f_y en mode 1 (perte d'adhérence à l'interface acier / béton), et inversement en mode 2 (rupture de l'acier).

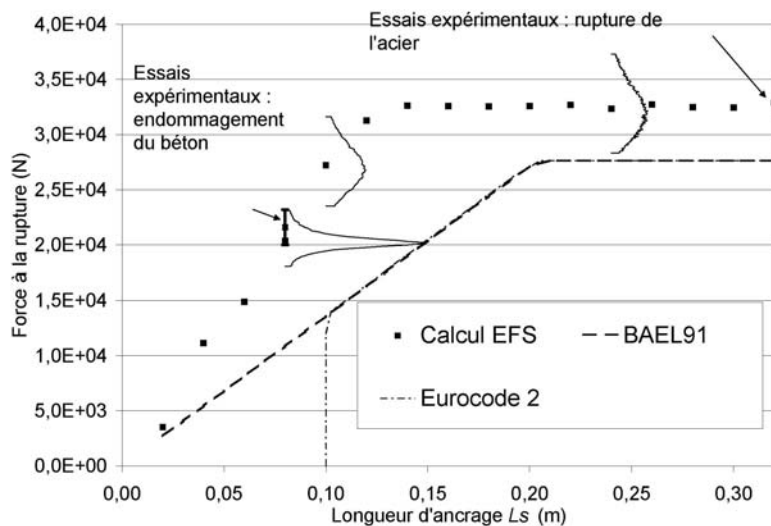


Fig. 2 - FDP tronquées à des intervalles de confiance à 95% de la v.a. \tilde{Z} pour des longueurs d'ancrages $L_s = 8, 10$ cm (paramètre incertain : f_{c28}) et $L_s = 24$ cm (paramètre incertain : f_y), et limites réglementaires (Eurocode 2 et BAEL91)

Une telle étude de sensibilité est ensuite menée pour différentes valeurs de L_s afin de caractériser les modes de rupture (Fig. 2). Trois séries de calculs sont effectuées successivement, correspondant aux trois paramètres d'entrée distincts cités précédemment. Pour chaque calcul, la FDP de Z est évaluée avec un niveau de confiance de 95%, en appliquant Monte-Carlo sur l'approximation \tilde{Z} de la réponse mécanique obtenue par la méthode Lagrange. On la compare alors à la valeur de F préconisée par les règlements BAEL [3] et Eurocode2 [4]. On constate alors d'après la figure 2 que les règlements semblent globalement plus sécuritaires pour le mode 1. Cette interprétation doit cependant être confirmée par des modélisations EF puis probabiliste plus approfondies.

4 Conclusion

Une telle démarche conduit à la possibilité d'une étude critique sur le niveau de confiance des règlements. Les auteurs soulignent deux originalités de ce travail : cette étude probabiliste est complémentaire aux nombreuses études déterministes existant sur cet essai ; la MEFS présentée a été appliquée pour la 1^{re} fois à un assemblage à la rupture, ce qui laisse présager des possibilités d'applications plus ambitieuses.

Références

- [1] Lemaire M., *Fiabilité des structures*, Hermès, 2005.
- [2] Baroth J., Chauvière C., Bressolette P., Fogli M., An efficient SFE method using Lagrange Polynomials: application to nonlinear mechanical problems with uncertain parameters, *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, 196: 4419-4429, 2007.
- [3] AFNOR, *Règles BAEL 91 : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites*, DTU P18-702, 1999.
- [4] CEN (Comité Européen de Normalisation), *Eurocode 2 : Calcul des structures en béton*, EN 1992, Bruxelles, Belgique, 2005.

Fluid Bearing Failure Probability Evaluation using Finite Element Modelling

A. Charki, D. Bigaud, S. Cloupet, F. Guérin

LASQUO, Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers
62 avenue Notre Dame du Lac, 49 000 Angers, France
abderafi.charki@istia.univ-angers.fr

KEYWORDS : Fluid Bearing, Finite Element Method, Reliability, Monte Carlo Simulation, Stochastic Response Surface Method.

1 Introduction

Fluid bearings are critical components for machines rotors, mechatronic and metrology systems. The design approach of a fluid bearing is usually based on deterministic static characteristics. However, it is subjected to load and pressure fluctuations or to fluid film gap perturbations induced by defects of the slideways surfaces geometry and of the type of supply inlet (groove, orifice, pocket, etc.). These factors induce excitations in the bearing dynamic response; which may eventually lead to bearing instability. The prediction of the reliability of a fluid bearing under operating conditions is then necessary for applications requiring high accuracy movements or positioning within a micrometer to nanometer repeatability.

In reliability analysis, the limit state function (which is commonly defined as stress-strength limit state function in structural reliability analysis) should be defined precisely for a fluid bearing. Different approaches can be used to define the limit state function for a fluid bearing. For example, reliability is studied based on a maximum load capacity of the bearing that results in a film gap as small as possible. Alternatively, reliability is studied based on a given load capacity for a fixed film gap higher than that of the corresponding maximum load capacity. The first case is more of interest because of the instability of the bearing may occur around the maximum load capacity (Stiffler [1]) which immediately leads to the failure of the system supported by the bearing.

In this paper, a method is proposed for the evaluation of the failure probability by MCS and SRSM of a fluid bearing. A finite element model which considers several variables of a fluid bearing is developed for the Reynolds non linear equation calculation of the film fluid characteristics.

2 Failure Probability of a Fluid Bearing

The failure of a fluid bearing may generally occur because of the instability phenomenon due to the quality of lubrication, the geometry of machined surfaces, the rotor misalignment, the choice of the characteristics of the bearing such as the type of feeding, the supply pressure and Reynolds number and others. Generally, the failure occurs when the friction coefficient of the film fluid becomes very high.

Boffey [2] concludes that a critical aspect (a pneumatic hammer phenomenon) may occur if the bearing is not correctly designed. In this case, the failure of a fluid bearing generally causes the destruction of systems or machines rotors parts.

We determine the failure probability of a fluid bearing using the common definition utilized for mechanical structures; namely stress-strength relationship. The equivalent of the strength for the bearing is the maximum load capacity which can be supported by the film fluid taking into account the optimum of stiffness obtained. In this condition, the fluid film gap is very small (lower than 10 μm for air thrust bearing) and a solid contact is possible if an unstable state appears.

Thus, the limit state function g is defined as:

$$g(X) = W_e - W_{e\text{-max}}$$

where $W_{e\text{-max}}$ is the maximum load capacity of the bearing, W_e is the operating load capacity of the bearing.

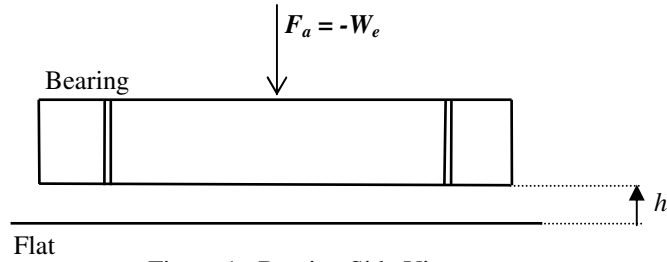


Figure 1. Bearing Side View

A finite element code (Bonis and Charki [3]) was developed for an aerostatic fluid bearing in order to study the effect of several design and working parameters on the characteristics of fluid film gap, such as discharge coefficient, supply pressure, diameter and number of orifices and position of orifice rows, and external load.

Table 1 shows the results obtained with different methods (MC and SRSM) using $W_{e-\max} = 500$ N. The sample size in simulations is taken to be 1.10^4 . SRSM offers the best alternative for the reliability assessment of fluid bearing problems through a finite element code. This last method proves to be computationally more efficient than full scale Monte Carlo Simulation.

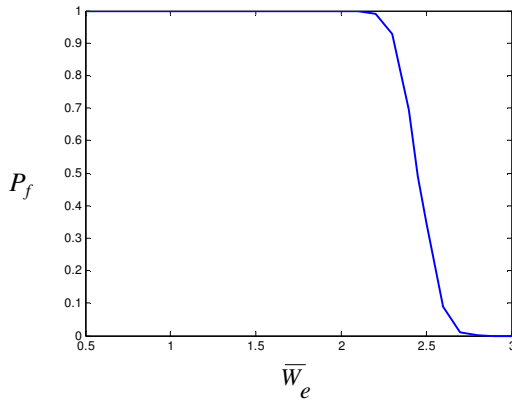


Figure 2. Failure Probability versus Dimensionless Load Capacity

Method	P_f	CPU (s)
MCS	0.491	3570
SRSM (2 nd order)	0.442	15

Table 1. Failure Probability P_f for Each Method

Figure 2 presents the failure probability versus dimensionless load capacity of a film fluid bearing. The calculation is obtained by using SRSM. The analysis of this figure give us the critical margin of the load capacity not to use for a system design.

3 Conclusion

This paper presents an approach for the evaluation of failure probability of a complex fluid mechanical system which is modelled by the finite element method. The evaluation of failure probability is determined by two methods MCS and SRSM. The results show that the SRSM method provides a good estimate of failure probability in short computational times. This approach proposed can be utilized for studying the reliability for other types of fluid bearings (hydrostatic, hydrodynamic, aerodynamic) and for other geometries (cylindrical, spherical).

References

- [1] Stiffler A. K., Analysis of the Stiffness and Damping of an Inherently Compensated, Multiple-inlet, Circular Thrust Bearing, *Journal of Lubrication Technology*, 329-336, 1974.
- [2] Boffey D. A., 1985, Experimental investigation into the performance of an aerostatic industrial thrust bearing, *Tribology international*, Vol. 18, No. 3, 165-168, 1985.
- [3] Bonis M. and Charki A., Modélisation des Caractéristiques Statiques et de la Stabilité des Paliers de Butée Aérostatiques par la Méthode des Eléments Finis, *Revue européenne des éléments finis*, Vol. 10, 755-767.

Développements par chaos polynomiaux creux et adaptatifs – Application à l’analyse de fiabilité

G. BLATMAN^{1,2}, B. SUDRET²

¹ LaMI, Institut Français de Mécanique Avancée et Université Blaise Pascal, Campus des Cézeaux, F-63175 Aubière Cedex, France, gerald.blatman@edf.fr

² EDF, R&D Division - Site des Renardières, F-77818 Moret-sur-Loing, bruno.sudret@edf.fr

Mots-clés : Eléments finis stochastiques adaptatifs ; chaos polynomial creux ; collocation stochastique ; régression ; fiabilité

1 Introduction

Les développements de type chaos polynomial (CP) [Ghanem and Spanos, 2003, Soize and Ghanem, 2004] permettent de représenter explicitement la réponse stochastique d’un modèle mécanique, dont les paramètres d’entrée sont des variables et/ou des champs aléatoires. L’approximation globale ainsi obtenue permet tout aussi bien des analyses de tendance centrale (moments statistiques, indices de sensibilité) qu’une analyse de fiabilité, à un coût de calcul relativement faible. Les travaux Berveiller [2005], Berveiller et al. [2006] montrent en effet que les coefficients du CP peuvent être évalués de manière efficace au moyen d’une technique non intrusive de régression. Cependant, le nombre d’évaluations du modèle - autrement dit le coût de calcul - augmente avec la taille du CP, qui s’accroît elle-même considérablement avec le nombre de variables d’entrée, lorsque l’on applique le schéma usuel de troncature de la série. Néanmoins, pour une large classe de problèmes de mécanique, de nombreux termes du CP peuvent être éliminés car les interactions d’ordre élevé sont négligeables d’une part, et parce que toutes les variables d’entrée n’influencent pas la réponse du modèle de la même manière d’autre part.

2 Développements/Résultats

Dans ce papier, les auteurs proposent une procédure itérative pour construire une représentation creuse par CP. Premièrement, un plan d’expériences numériques est sélectionné et toutes les évaluations du modèle sont effectuées une fois pour toutes. Ensuite, une approximation par CP de la réponse est construite en incrémentant son degré total ainsi que l’ordre d’interaction de ses polynômes de base. A chaque étape, on ne retient que les termes du CP qui contribuent de manière significative à la diminution de l’erreur d’approximation. Cette dernière est estimée par le manque d’adéquation empirique et l’erreur de type leave-one-out (voir par exemple Elisseff and Pontil [2002]). Au final, l’algorithme produit une approximation creuse par CP, autrement dit qui ne comporte qu’un nombre relativement faible de termes. Il est par conséquent possible de calculer les coefficients correspondants à partir d’un nombre considérablement réduit d’évaluations du modèle, comparé à une approximation complète (ou pleine).

3 Conclusion/Bilan

L’algorithme est déroulé pas à pas sur un modèle polynomial, montrant ainsi sa capacité à retrouver la structure creuse. La méthode proposée est ensuite appliquée à l’analyse de fiabilité d’une ossature de bâtiment, faisant intervenir 21 variables aléatoires corrélées. La probabilité de défaillance est obtenue avec une grande précision, pour un nombre de termes dans le chaos à peu près 4 fois plus petit que dans une représentation classique. Le coût de calcul (nombre d’appels au code éléments finis) est de façon corrolaire divisé par un facteur compris entre 4 et 9.

Références

- M. Berveiller. *Eléments finis stochastiques : approches intrusive et non intrusive pour des analyses de fiabilité*. PhD thesis, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 2005.
- M. Berveiller, B. Sudret, and M. Lemaire. Stochastic finite elements : a non intrusive approach by regression. *Revue Européenne de Mécanique Numérique*, 15(1,2,3) :81–92, 2006.
- A. Elisseff and M. Pontil. Leave-one-out error and stability of learning algorithms with applications. In G. Horvath J. Suykens and S. Basu et. Al, editors, *Learning Theory and Practice*. NATO ASI Series, IOS Press, Amsterdam, 2002.
- R. Ghanem and P. Spanos. *Stochastic Finite Elements : A Spectral Approach*. Courier Dover Publications, 2003.
- C. Soize and R. Ghanem. Physical systems with random uncertainties : chaos representations with arbitrary probability measure. *SIAM J. Sci. Comput.*, 26(2) :395–410, 2004.

Méthode éléments finis stochastiques étendus pour la prise en compte des incertitudes géométriques dans le calcul de structures

Alexandre Clément, Anthony Nouy, Franck Schoefs

¹ Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), Université de Nantes, Ecole centrale de Nantes, UMR CNRS 6183 France, anthony.nouy@univ-nantes.fr

Mots-clés : Calcul stochastique, X-FEM, chaos polynomial, géométrie aléatoire

1 Introduction

La prise en compte d'incertitudes liées aux propriétés matérielles, aux chargements, ou à la géométrie dans le calcul de structure apparaît aujourd'hui indispensable si l'on cherche à obtenir des prédictions numériques fiables. Cette nécessité a conduit à un développement rapide de méthodes numériques ad-hoc, telles que la méthode des éléments finis stochastiques [1]. Ces méthodes conduisent à des solutions d'une grande précision qui sont explicites en fonction des variables aléatoires décrivant les sources d'aléa. Cependant, il n'existe pas encore de méthode efficace pour résoudre des problèmes mécaniques où l'aléa porte sur la géométrie bien que cette problématique soit rencontrée dans de nombreuses applications : modélisation des aléas sur un procédé de fabrication, sur des pertes de matières, sur la géométrie de la micro-structure d'un matériau hétérogène, etc.

Une manière naturelle de résoudre des problèmes stochastiques définis sur un domaine aléatoire est d'utiliser un code éléments finis déterministe couplé à une méthode stochastique classique telle que les approches de Monte-Carlo ou la méthode des surfaces de réponse. Cependant, ces approches nécessitent un nombre important de calculs déterministes pour lesquels un maillage conforme de la géométrie doit être systématiquement créé. Dans le cas de problèmes à géométrie aléatoire, elles conduisent alors à des coûts de calcul trop élevés et ne permettent pas d'obtenir une description explicite de la solution.

Récemment, une nouvelle méthode éléments finis stochastiques a été proposée pour la résolution de ce type de problème [4]. Cette méthode, baptisée eXtended Stochastic Finite Element Method (X-SFEM), est basée sur l'extension au cadre stochastique de la méthode X-FEM [3]. Dans cet exposé, la méthode est présentée dans le cadre d'un calcul d'une structure présentant une interface matérielle aléatoire et nous montrons l'efficacité de la méthode à l'aide d'un exemple numérique.

2 La méthode X-SFEM

Dans cet exposé, nous présentons la formulation mathématique d'un problème mécanique avec une interface matérielle aléatoire dans le cadre de l'élasticité linéaire.

2.1 Représentation de la géométrie par la technique des level sets

Dans le cadre de la méthode X-SFEM, la géométrie aléatoire est représentée implicitement en utilisant la méthode des level sets [5] consistant à représenter une hyper-surface aléatoire à l'aide de l'iso-zéro d'une fonction appelée level set. En pratique, la fonction level-set est discrétisée en utilisant une interpolation sur un maillage éléments finis fixe. La géométrie aléatoire est alors complètement caractérisée par la donnée des valeurs nodales de la level-set, qui sont des variables aléatoires.

2.2 Définition des espaces d'approximation

Pour la définition des espaces d'approximation, on utilise une approximation éléments finis au niveau spatial et une approximation sur le chaos polynomial généralisé au niveau stochastique [6]. On propose également une approximation enrichie. En effet, dans le cas d'un problème d'interface matérielle, le champ solution présente des dérivées discontinues au passage de l'interface. Ces discontinuités ne sont pas contenues dans l'espace d'approximation éléments finis dans le cas où le maillage n'est pas conforme à la géométrie de l'interface. En

utilisant la méthode de la partition de l'unité [2], il est possible d'enrichir l'espace d'approximation afin de rajouter des modes à dérivées discontinues au passage de l'interface.

2.3 Construction de l'approximation

Pour la construction de l'approximation, on propose deux méthodes de projection : une projection de Galerkin qui consiste à injecter l'espace d'approximation dans la formulation variationnelle du problème et une projection au sens de L^2 de la solution du problème semi-discrétisé en espace.

3 Conclusion et résultats pour un problème d'inclusion circulaire aléatoire

L'exemple présenté dans ce papier est un problème d'inclusion circulaire aléatoire dont l'interface entre les deux sous-domaines est modélisée par une variable aléatoire $a(\theta)$ (voir figure 1). Des études de convergence sont menées à partir d'un indicateur d'erreur basé sur la solution exacte en déplacement. Ces études permettent de montrer l'intérêt de l'enrichissement de l'espace d'approximation (figure 2). De plus, elles permettent de montrer que, pour cet exemple particulier, les deux solutions obtenues sont de qualité équivalente. Cependant, ces deux approches de projection nécessitent un soin particulier pour l'intégration stochastique. Les travaux futurs porteront sur une comparaison plus poussée des deux approches : stabilité de l'approximation vis-à-vis des erreurs d'intégration stochastique, comportement dans le cas d'une grande variabilité de la géométrie.

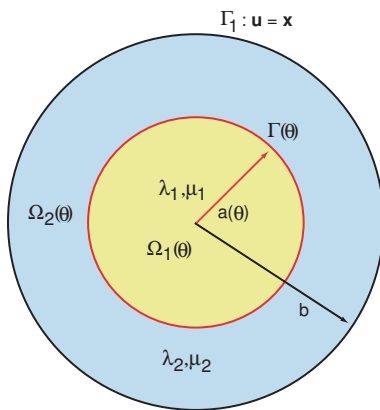


Fig. 1 – Problème d'inclusion aléatoire.

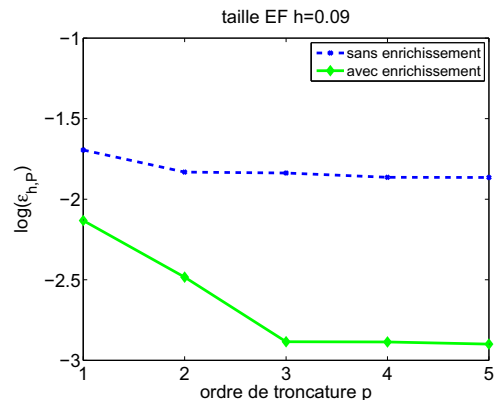


Fig. 2 – Convergence de l'erreur $\epsilon_{h,p}$ pour X-SFEM (Galerkin) sans et avec enrichissement en fonction de l'ordre p .

Références

- [1] R. Ghanem and P. Spanos. *Stochastic finite elements : a spectral approach*. Springer, Berlin, 1991.
- [2] J. M. Melenk and I. Babuška. The partition of unity method : basic theory and applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 39 :289–314, 1996.
- [3] N. Moes, J. Dolbow, and T. Belytschko. A finite element method for crack growth without remeshing. *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 46 :131–150, 1999.
- [4] A. Nouy, F. Schoefs, and N. Moës. X-SFEM, a computational technique based on X-FEM to deal with random shapes. *European Journal of Computational Mechanics*, 16(2) :277–293, 2007.
- [5] J.A. Sethian. *Level Set Methods and Fast Marching Methods : Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999.
- [6] D. B. Xiu and G. E. Karniadakis. The Wiener-Askey polynomial chaos for stochastic differential equations. *SIAM J. Sci. Comput.*, 24(2) :619–644, 2002.

Session TS2-B

Jeudi 27 mars

14 : 30 - 15 : 45

F. Duprat, A. Sellier, X.S. Nguyen.

L'algorithme du gradient projeté avec contrôle d'erreur pour la fiabilité structurale.

F. Deby, M. Carcasses, A. Sellier.

Dimensionnement probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin.

F. Deheeger, M. Lemaire, T. Yalamas.

²SMART : SVM et Subset pour la fiabilité.

A. Yaméogo.

Propagation d'incertitude : Analyse de la variation paramétrique d'une surface de réponse polynomiale.

A. Alzina, F. Dau, L. Guillaumat.

Approche multi-échelle du transport d'incertitude pour les matériaux composites.

L'algorithme du gradient projeté avec contrôle d'erreur pour la fiabilité structurale

Frédéric DUPRAT¹, Alain SELLIER¹, Xuan Son NGUYEN¹

¹ Université de Toulouse ; UPS, INSA ; Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions ; 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex

Mots clés: Fiabilité des structures ; Gradient projeté ; Erreur numérique.

1 Introduction

L'indice de fiabilité de Hasofer-Lind est une mesure de fiabilité devenue très classique. Les codes de conception et de dimensionnement, tels que les Eurocodes, font explicitement référence à cet indice. Le calcul de ce dernier est un problème d'optimisation sous contrainte dont un algorithme itératif simple, basé sur la méthode du gradient projeté, a été proposé par Rackwitz et Fiessler [1]. Cet algorithme n'est pas systématiquement convergent. Les principales sources de non convergence sont la présence de plusieurs minima locaux, les singularités ou discontinuités de la surface de défaillance, et l'approximation dans l'estimation des gradients de la fonction d'état limite. Dans le cas d'un état limite unique, on peut dire que cette dernière source est prépondérante, en particulier lorsque la fonction d'état limite résulte d'une modélisation aux éléments finis. Dans ce cas en effet l'évaluation pratique du gradient de la fonction d'état limite est le plus souvent réalisée par différences finies, même si d'autres techniques plus avancées existent. Si l'incrément choisi pour ce calcul donne une variation de la réponse inférieure à la précision du résultat sur la fonction d'état limite, l'algorithme peut donner des résultats erronés, voire ne pas converger. Il est à noter que cet inconvénient existe aussi pour les algorithmes dérivant de celui de Rackwitz-Fiessler destinés à accélérer la convergence, tels que celui d'Abdo-Rackwitz [2]. Pour pallier cet inconvénient nous proposons, dans cette étude, un algorithme simple dit «GRadient projeté Avec Contrôle d'Erreur» (GRACE) en introduisant dans l'algorithme de Rackwitz-Fiessler une procédure de choix de l'incrément qui tient compte de la précision numérique du résultat sur la fonction d'état limite.

2 Développements/Résultats

Le calcul du vecteur gradient de la fonction d'état limite, et plus généralement le calcul des dérivées partielles ou des sensibilités de la réponse d'un calcul aux éléments finis par rapport aux variables de dimensionnement, ont fait l'objet de travaux avancés [3]. Ceux-ci ont porté sur les développements analytiques des dérivées partielles des matrices de rigidité et/ou d'élasticité élémentaires par rapport aux variables de dimensionnement. Il s'agit de développements spécifiques aux types d'éléments finis utilisés (solides 2D, 3D, poutres, plaques, etc.) et aux types d'analyses réalisées (matériellement et/ou géométriquement linéaires ou non linéaires). Ces développements constituent un travail remarquable, dont la portée n'est toutefois pas générale étant donné le nombre quasi-infini de combinaisons possibles des types d'analyses et d'éléments finis possibles dans une seule et même modélisation. Des cas particuliers, quoique de large portée, ont ainsi été traités.

Le calcul des gradients par différences finies reste donc intéressant, du fait de sa généralité et de sa simplicité de mise en œuvre (aucun développement interne au code éléments finis n'est nécessaire). La principale difficulté reste ici de proposer une valeur convenable des incréments sur les variables, permettant de réduire l'erreur de troncature sur la dérivée, résultant de la formulation par différences finies, par exemple en affinant l'incrément, tout en lui conservant une valeur suffisamment grande pour éviter que les erreurs numériques cumulées d'arrondi et de précision du résultat sur la fonction d'état limite (liée au schéma itératif d'obtention ce de résultat), ne deviennent significatives par rapport à la variation de ce résultat.

Le point itéré $u_{(k+1)}$ de l'algorithme de Rackwitz-Fiessler est donné par :

$$u_{(k+1)} = \left(u_{(k)}^T \alpha_{(k)} + \frac{G(u_{(k)})}{\|\nabla G(u_{(k)})\|} \right) \alpha_{(k)} \quad (1)$$

Les composantes du vecteur gradient dans l'espace standardisé s'expriment par :

$$\nabla G(u)_i = \nabla G(x) \frac{\partial x}{\partial u_i} = \nabla G(x) \frac{\partial T^{-1}(u)}{\partial u_i} \quad (2)$$

où $T()$ est la transformation iso-probabiliste de l'espace x vers l'espace u . Les composantes du vecteur gradient dans l'espace physique sont estimée par :

$$\nabla G(x)_i \approx \frac{G(x + \Delta x_i e_i) - G(x)}{\Delta x_i} \quad (3)$$

Δx_i est déterminé pour le nouvel itéré à partir de l'estimation précédente du gradient :

$$(\Delta x_i)_{(k+1)} = \left| c \frac{(\varepsilon_R R + \varepsilon_S S)_{(k)}}{(\nabla G(x)_i)_{(k)}} \right| \quad (4)$$

où $(\varepsilon_R R + \varepsilon_S S)$ représente l'imprécision numérique maximale sur le résultat de la fonction d'état limite, et c est un coefficient ($c=10$ en pratique). Une seconde condition relative au calcul effectif de la composante du gradient, impose une variation minimale de la coordonnée du point courant à l'itération m , depuis la dernière évaluation du gradient à l'itération m_0 :

$$\left| \sum_{k=m_0}^m ((x_i)_{(k)} - (x_i)_{(k-1)}) \right| > (\Delta x_i)_{(m_0)} \quad (5)$$

Cette condition permet également d'économiser des calculs « inutiles » de la fonction d'état limite, pour les axes pour lequel l'optimum est déjà atteint.

Un exemple est donné ci-après dans le Tab. 1, traitant de la fiabilité d'une section de béton armé. On constate l'efficacité de la technique proposée en coût de calcul (N_c), comparée à l'algorithme original RF [1] et à l'algorithme RFLS [2].

Technique	β	$ G(u^*) / G(u_0)$	N_c
RF	3,4117	$6,903 \times 10^{-6}$	40
RFLS	3,4132	$2,376 \times 10^{-7}$	32
GRACE	3,4134	$6,129 \times 10^{-8}$	26

Tab. 1- Résultats – Exemple 1

3 Conclusion/Bilan

Une technique simple et efficace a été proposée ici pour permettre l'utilisation de l'algorithme de Rackwitz-Fiessler dans le cas où le modèle associé à la fonction de défaillance ne peut être défini qu'avec une certaine précision, ce qui est par exemple le cas pour les modèles aux éléments finis. La procédure tient compte de la précision numérique du modèle physique pour le choix de l'incrément de calcul utilisé lors de l'estimation des dérivées partielles de la fonction de défaillance par différences finies. Elle permet d'une part d'estimer correctement les vecteurs gradients utilisés et d'autre part d'économiser des calculs de la fonction de défaillance (en ne réévaluant pas systématiquement les dérivées partielles pour les variables aléatoires auxquelles le modèle est peu sensible). Les résultats obtenus montrent que la convergence reste rapide, le point de défaillance reste très proche de la surface d'état limite lorsque la fonction d'état limite présente un comportement fortement non linéaire et/ou un grand nombre de variable aléatoires.

Références

- [1] Rackwitz R., Fiessler B., Structural reliability under combined load sequences, Computers and Structures, 9, 1978, 489-494.
- [2] Abdo T., Rackwitz R., A new b-point algorithm for large time invariant and time-variant reliability problems, in Reliability and Optimization of Structures, Proceeding of 3rd WG 7.5 IFIP Conference, Berkeley.
- [3] [Hauk05] Haukass T., Der Kiureghian A., Parameter sensitivity and importance measures in nonlinear finite element reliability analysis, Journal of Engineering Mechanics, 131, 2005, 1013-1026

Dimensionnement probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin

Fabrice DEBY¹, Myriam CARCASSES², Alain SELLIER³

¹ Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), 135, avenue de Rangueil, F-31 077 Toulouse Cedex 04, fabrice.deby@insa-toulouse.fr

² LMDC, myriam.carcasses@insa-toulouse.fr ³ LMDC, alain.sellier@insa-toulouse.fr

Mots clés: Béton, Corrosion, Chlorures, Approche Probabiliste, Indice de Fiabilité.

1 Introduction

La corrosion constitue la principale cause de dégradation des ouvrages de génie civil en béton armé. Ce processus de dégradation est la conséquence de la pénétration d'agents agressifs dans le béton qui peuvent conduire à l'amorçage et au développement de la corrosion des armatures. Des règles de l'art, des recommandations et des normes permettent d'assurer la qualité du béton et contribuent à sa durabilité. Cependant, on observe également une fluctuation des indicateurs de durabilité due à la variabilité de fabrication du béton, des matériaux qui le constituent ou encore des méthodes de mesure. Le dimensionnement actuel du béton d'enrobage, dédié à protéger les premiers aciers, est empirique et ne prend pas en compte explicitement cette variabilité. Le but de ce travail est de proposer une approche intégrant la composition du béton et la variabilité des paramètres physiques associés à la diffusion des chlorures pour proposer une prédiction objective et probabiliste de la durabilité.

2 Développements/Résultats

Tout d'abord, le modèle de diffusion est exposé. Comme cette étude est limitée au béton immergé dans l'eau de mer, nous travaillons avec un modèle non-linéaire de diffusion des chlorures en milieu poreux saturé basé sur la première loi de Fick. Cette description est un bon compromis entre les modèles empiriques et multi-espèces tant sur le plan de la description des phénomènes que sur la durée des calculs. L'équation de conservation des chlorures libres, en introduisant le coefficient de diffusion apparent D_{app} , s'écrit alors :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{app} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{où} \quad D_{app} = \frac{D_e}{p + (1-p)\rho_s \frac{\partial C_b}{\partial c}} \quad (1)$$

Dans notre démarche, et pour une simplicité d'application, seules la composition du béton, les caractéristiques chimiques du ciment et la mesure de la porosité sont nécessaires. Deux modèles élémentaires permettent de calculer le coefficient de diffusion D_e et l'isotherme de fixation $C_b(c)$ pour un béton de CEM I avec ou sans fumées de silice. Les erreurs associées, considérées comme des variables aléatoires, sont exposées et leurs lois de distribution déterminées par des résultats d'essais (la figure 1 présente l'exemple de l'erreur du modèle sur le coefficient de diffusion pour un béton de CEM I Err_D , et CEM I avec fumées de silice Err_{Dsf}).

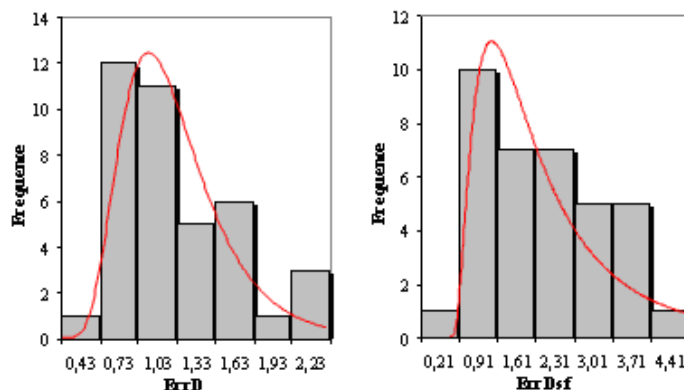


Fig. 1- Histogrammes de l'erreur de modèle sur le coefficient de diffusion

Finalement, quatre variables aléatoires subsistent : la porosité p , les erreurs sur les coefficients de diffusion Err_D et $Err_{D_{sf}}$, les erreurs sur les chlorures fixés Err_C et $Err_{C_{sf}}$, et l'épaisseur du béton d'enrobage e .

Puis la méthode probabiliste est proposée pour évaluer la probabilité d'amorçage de la corrosion avec un temps d'exposition donné. C'est la probabilité que la quantité de chlorures au niveau du premier lit d'armatures atteigne une concentration critique. Le calcul de la probabilité nécessite de définir une fonction performance $G(X)$. En fonction des réalisations des variables aléatoires (représentées par le vecteur X), l'état d'une structure peut appartenir à deux domaines : un *domaine de défaillance* ($G(X) \leq 0$), pour lequel l'amorçage de la corrosion est possible, ou un *domaine de sûreté* ($G(X) > 0$), pour lequel les aciers sont passivés. La frontière d'équation $G(X) = 0$ est appelée *surface d'état limite* ou de défaillance (figure 2). Dans cette approche, la probabilité de défaillance est estimée par l'indice de fiabilité d'Hasofer-Lind (figure 2). Il est déterminé ici par la méthode du gradient projeté pour lequel le point de défaillance P^* le plus probable est obtenu par itérations successives.

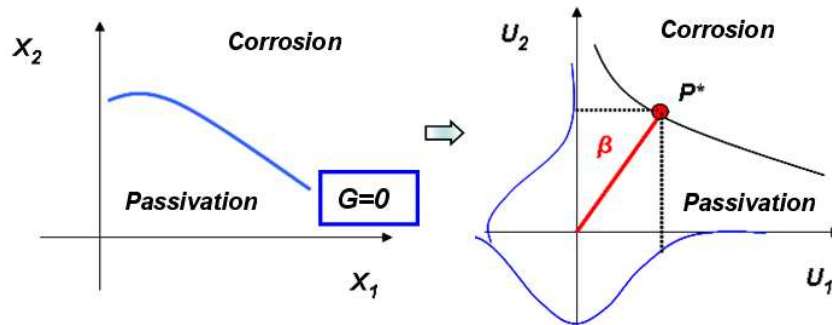


Fig. 2- Définition de la surface d'état limite et de l'indice de fiabilité

Nous illustrons cette méthodologie par l'exemple d'un béton immergé dans l'eau de mer. La variation dans le temps de l'indice de fiabilité est représentée sur la figure 3 pour deux bétons, un de CEM I et l'autre de CEM I avec fumées de silice. La diminution de cet indice illustre l'augmentation de la probabilité de défaillance du matériau au cours du temps. Pour le béton de CEM I par exemple, on passe d'un indice de fiabilité β de 7,2 au bout d'un an d'exposition à 0,5 au bout de 50 ans d'exposition, ce qui correspond pour cette dernière date à une probabilité d'amorçage de la corrosion de 30%.

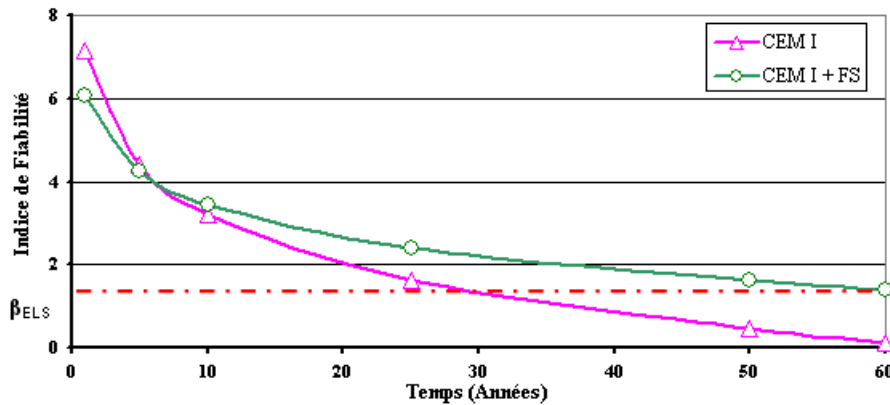


Fig. 3- Variation de l'indice de fiabilité au cours du temps

3 Conclusion/Bilan

Nous présentons dans ce travail une méthodologie de dimensionnement de la durabilité d'un béton immergé dans l'eau de mer. La durée de vie de l'ouvrage est ainsi quantifiée objectivement au travers de l'indice de fiabilité β en prenant en compte toutes les incertitudes liées à la mise en œuvre, au matériau lui-même ou encore aux mesures : l'Eurocode 0 propose en effet des valeurs cibles de l'indice de fiabilité suivant l'ouvrage et la durée de référence. Le recours à des modèles élémentaires et à des données bibliographiques permet d'appliquer la démarche en limitant le nombre d'essais. On retiendra alors le caractère général et transposable de cette méthodologie. Elle offre aux ingénieurs des outils d'aide à la décision en matière de durabilité en prenant en compte les caractères aléatoires des phénomènes.

²SMART : SVM et Subset pour la fiabilité

François DEHEEGER¹, Jean-Marc BOURINET², Maurice LEMAIRE² et Thierry YALAMAS¹

¹ PHIMECA Engineering S.A., 34 rue de Sarliève 63800 Cournon d'Auvergne, nom@phimeca.com

² LaMI, IFMA - Campus des Cézeaux 63175 Aubière, nom@ifma.fr

Mots-clés : Support Vector Machine, Subset simulation, Classification, Probabilité de défaillance.

1 Contexte

La réalité de la mécanique est plongée dans l'incertain dont la prise en compte dans la conception est indispensable pour un dimensionnement fiable, robuste et optimal des structures. Les méthodes développées actuellement [4] s'appuient sur un modèle stochastique des variables de conception notées dans un vecteur X et sur une ou plusieurs fonction(s) de performance notée(s) $G(X)$. La fiabilité est alors mesurée par la probabilité P_f de l'événement $G(X) \leq 0$ associé à la défaillance et la robustesse par la sensibilité de la cette fonction $G(X)$ par rapport aux variables de conception. Les méthodes dérivées de celles de Monte-Carlo ou les méthodes d'approximations exigent un grand nombre de répétitions du calcul mécanique pour des réalisations des variables aléatoires judicieusement choisies. Les modèles du comportement mécanique sont souvent complexes (comportement non-linéaire, dynamique, fatigue, mécanique de la rupture, etc). L'enjeu est de minimiser le nombre des calculs mécaniques, principal consommateur des ressources en calcul. Ce papier propose une approche innovante couplant les Support Vector Machines (SVM) et les Subsets Simulations. L'objectif est la mise en œuvre d'une approche probabiliste pour des problèmes caractérisés par :

- un modèle numérique caractérisé par un temps de calcul important, simulant la mécanique ou la physique d'un problème représentatif d'une application industrielle ;
- un état-limite $G(X) = 0$ de forme complexe ;
- un modèle stochastique de dimension significative ;
- l'utilisation d'un code propriétaire de manière externe (approche non-intrusive) ; une application de problèmes industriels.

La pertinence de l'approche proposée est illustrée sur une application industrielle issue du projet PROSIR. Il s'agit d'une étude de la fiabilité thermo-mécanique d'une cuve, composant d'une installation nucléaire. Ce projet a mis en commun les travaux de différentes entreprises françaises liées au nucléaire dont EDF, CEA et AREVA.

2 Méthodes : SVM, classification et simulations

L'approche proposée consiste à utiliser une méthode d'apprentissage afin de construire un substitut de la surface d'état-limite $G(X) = 0$ de manière séquentielle et itérative, afin de garantir une précision importante sur ce substitut. Les propriétés des SVM, Support Vector Machines, en font un outil bien adapté à la classification de données y compris pour des applications en mécanique [3] mais il faut tenir compte ici d'une application à un jeu de données constitué d'expériences numériques dont il faut minimiser le nombre. Le principe de la classification SVM est de créer un hyperplan qui sépare les données en deux classes (classification binaire), en utilisant le principe de marge maximale. Appliqué à la fonction de performance $G(X)$, l'hyperplan maximisant la marge sépare les deux classes des points d'apprentissage selon le signe de G pour quelques réalisations de X . Cette méthode est généralisée à la classification non linéaire par l'introduction de noyaux, fonctions de projection qui permettent de réaliser la classification dans un espace support de dimension supérieure et dans lequel le séparateur devient linéaire.

L'approche en classification est utilisée pour créer une formulation analytique de la frontière entre les domaines de sûreté ($G(X) > 0$) et de défaillance ($G(X) \leq 0$). Après un premier plan d'expériences de taille réduite, la connaissance de la marge permet la sélection optimale de nouveaux points de calcul jusqu'à l'obtention d'un séparateur suffisamment précis. Les simulations de Monte-Carlo sont appliquées ensuite au modèle analytique. La méthode de Monte-Carlo présentant des limites pour le calcul de probabilités faibles (inaptitude

à explorer les zones proches de l'état-limite avec un nombre raisonnable de simulations), il a été décidé de procéder à un apprentissage de manière adaptative. Le principe de la classification est appliqué sur des sous-espaces emboîtés (subsets simulations [1]). La probabilité de défaillance est exprimée par le produit de m probabilités conditionnelles $P_i, i = 1 \dots m$ sur des seuils successifs décroissants de la fonction de performance. Ainsi, même si P_f est très faible, en choisissant judicieusement la valeur des seuils intermédiaires, les probabilités cherchées P_i sont suffisamment grandes pour être évaluées de manière efficace par simulations. La méthode proposée est dénommée ²SMART (Subsets simulations by Support vector Margin Algorithm for Reliability esTimation) [2].

3 Résultats

Le problème PROSIR [5] est traité par l'approche proposée. Il concerne l'étude thermo-mécanique de la résistance d'une cuve face à un choc thermique pressurisé suite à une injection brutale d'eau de refroidissement. Il s'agit de déterminer la nocivité d'un défaut (elliptique, circonférentiel ou longitudinal) présent sous le revêtement, en tenant compte de l'irradiation sur les propriétés à rupture des matériaux. Deux modélisations stochastiques sont prises en compte. Dans la première modélisation ce sont l'aléa sur le chargement ainsi que sur les propriétés matériaux qui sont pris en compte. Dans la seconde on ajoute l'aléa sur la forme et la position du défaut. L'introduction de l'aléa sur le défaut perturbe les méthodes d'approximation FORM/SORM. Seules les simulations directionnelles ou subset simulations permettent d'obtenir un résultat de manière robuste. L'utilisation de la méthode ²SMART permet de diminuer les coûts de calcul par 5 en conservant une précision similaire.

4 Conclusion

La classification est particulièrement bien adaptée à l'évaluation de la probabilité de défaillance. L'approche couplée apprentissage SVM et subsets par la méthode ²SMART permet l'évaluation de faibles probabilités de défaillance sur des problèmes de dimension stochastique relativement importante. De plus, la flexibilité de l'approximation par les fonctions noyaux permet de traiter des problèmes complexes en terme d'état-limite.

Références

- [1] S.K. Au and J.L. Beck. Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 16, 2001.
- [2] F. Deheeger. *Couplage mécano-fiabiliste : ²SMART méthodologie d'apprentissage stochastique en fiabilité*. PhD thesis, LaMI-IFMA/UBP, 2008.
- [3] J.E. Hurtado. An examination of methods for approximating implicit limit state functions from the viewpoint of statistical learning theory. *Structural Safety*, 26 :271–293, 2004.
- [4] M. Lemaire. *Structural Reliability*. ISTE - to appear, 2008.
- [5] PROSIR. Probabilistic structural integrity of a PWR reactor pressure vessel. In *Round Robins on Probabilistic Approach for Structural Integrity of Reactor Pressure Vessel, OECD - NEA PROSIR Workshop, Lyon, France*, 2006.

Modèle physico-probabiliste : analyse paramétrique via un métamodèle polynomial

Arsène Yaméogo

Electricité de France R&D, arsene.yameogo@edf.fr

Mots clés: chaos polynomial, étude paramétrique, crayon combustible

1 Problématique et enjeu industriels

Dans la technologie des réacteurs à eau pressurisée, trois barrières structurales sont présentes pour le confinement des produits nocifs. La gaine du crayon combustible représente la première barrière. Son intégrité doit être assurée en situation incidentelle d'exploitation.

Le but de l'étude est d'optimiser des paramètres de fabrication en fonction de l'aléa affectant les propriétés en fluage du matériau de gainage, en vue d'obtenir la marge à la rupture la plus confortable.

2 Stratégie de résolution

Le modèle physico-probabiliste est approximé par un métamodèle. Le vecteur aléatoire comprend les variables proprement aléatoires et les paramètres à ajuster. Il est ainsi possible de mener une étude paramétrique de la variable aléatoire d'intérêt en vue de l'optimisation.

On obtient par exemple *in fine* une cartographie des premiers moments de la marge à la rupture du crayon, dans le plan des paramètres de fabrication (*pression crayon ; diamètre pastille*) :

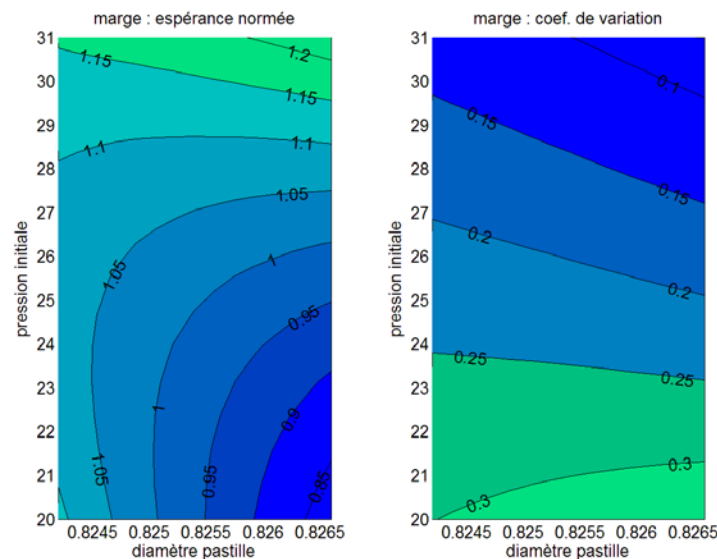


Fig. 1- Cartographie de l'espérance normée et du coefficient de variation de la marge

Les pressions de remplissage et les diamètres de pastilles élevés sont favorables.

3 Conclusion/Bilan

Cette étude illustre le principe de l'étude paramétrique d'un modèle physico-probabiliste.

Approche multi-échelle du transport d'incertitude pour les matériaux composites

A. ALZINA¹, F. DAU¹, L. GUILLAUMAT¹

¹ LAMEFIP-ENSAM, Esplanade des Arts et Métiers 33405 Talence cedex, arnaud.alzina@lamef.bordeaux.ensma.fr

Mots clés: multiéchelle, matériaux composites, transport d'incertitudes, modélisation.

1 Introduction

Les matériaux composites présentent à différentes échelles des propriétés mécaniques et morphologiques assez dispersées. Cependant, l'ampleur des variations des grandeurs observées est très dépendante de l'échelle. Ainsi, dans les matériaux composites, trois échelles principales sont considérées :

- 1) micro : elle se place au niveau de l'agencement des constituants élémentaires fibres et matrice. Cette échelle est souvent modélisée par un volume élémentaire représentatif (VER). Cela pose le problème du choix de ce VER compte tenu de la morphologie hétérogène du matériau composite. C'est pourquoi, dans ce travail, les auteurs considèrent plutôt la notion de cellules.
- 2) méso : cette échelle concerne le pli ou couche unique.
- 3) macro : les différents plis sont superposés pour constituer le matériau stratifié.

2 Objectif

L'objectif de ce travail est de montrer que la forte dispersion des propriétés des constituants élémentaires, notamment des fibres est nettement réduite par les changements d'échelle.

3 Démarche

À l'échelle micro, plusieurs cellules élémentaires ont été définies sur la base d'observations morphologiques afin de représenter le mieux possible les différentes possibilités d'agencement des fibres dans la matrice. Ces cellules sont modélisées avec le logiciel de calcul par éléments finis ANSYS en prenant comme variables aléatoires le diamètre des fibres, le nombre de fibres, les propriétés matérielles et la répartition spatiale des fibres, figure 1. Lors de la construction de la géométrie, l'algorithme *Random Sequential Adsorption* (RSA) [1] est utilisé afin d'éviter que les fibres se superposent. Une fois le maillage de ces différents VER effectués, leur tenseur de rigidité effectif est estimé à l'aide d'une méthode d'homogénéisation basée sur le lemme de Hill [2]. Cette méthode nécessite d'effectuer 21 cas de chargement homogène sur les bords des cellules de manière à pouvoir identifier tous les termes de la matrice de rigidité.

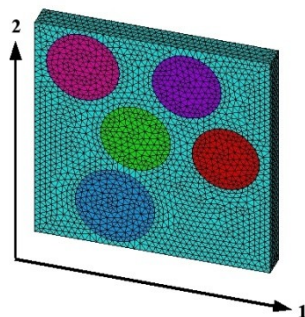


Fig. 1- Place Royale, photo Nocturne (Nantes)

À l'échelle méso, le pli est modélisé numériquement à l'aide d'éléments finis 3D. Aucune hypothèse d'orthotropie ou d'anisotropie transverse n'est faite à ce niveau. L'intérêt d'une modélisation 3D à priori permettra justement d'avoir un avis critique vis à vis de ces hypothèses. Chaque élément du maillage est constitué par une cellule, tirée aléatoirement parmi celles élaborées à l'échelle micro. Les propriétés élastiques équivalentes du pli sont alors estimées par la technique d'homogénéisation [2] et comparées à celles obtenues avec une technique d'homogénéisation basée sur des modélisations d'essais conventionnels.

À l'échelle macro, les différents plis sont maintenant superposés pour constituer un composite stratifié. L'étape précédente a permis d'obtenir la loi de comportement d'un pli dans un repère donné. L'objectif à cette échelle est de montrer qu'une variation angulaire lors de la dépose des couches peut influencer les propriétés mécaniques du matériau mais que cette variation va être fortement dépendante du nombre de couches et de l'amplitude du désalignement.

4 Bibliographie

- [1] Kari S., Berger H., Gabbert U., "Numerical evaluation of effective material properties of randomly distributed short cylindrical fibre composites", vol 39, pp 198-204, 2007.
- [2] Bornert, M., Bretheau, T. and Gilormini, P., "Homogenization in mechanical materials", Hermes, Paris, 2001.

Session TS3
Jeudi 27 mars
18 : 30 - 19 : 15

M. Cazuguel, M. Mejri, J.Y. Cognard.

Une approche fiabiliste fonction du temps appliquée au vieillissement des structures navales à comportement non-linéaire.

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

Optimisation de l'inspection de structures protégées à dégradation multiphasique.

Une approche fiabiliste fonction du temps appliquée au vieillissement des structures navales à comportement non-linéaire

Mikaël Cazuguel^{1,2}, Mohamed Mejri², Jean-Yves Cognard²

¹ Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes, EA - ENSIETA / Université de Brest / ENIB
ENSIETA, 2 rue François Verny, 29806 BREST Cedex 9
mejrimo@ensieta.fr, jean-yves.cognard@ensieta.fr

² DCNS Ingénierie Navires Armés, Département Analyse des Structures
Rue Choiseul, 56311 LORIENT Cedex
mikael.cazuguel@dcnsgroup.com

Mots clés : fiabilité fonction du temps, modèles éléments finis, simulations non-linéaires, vieillissement des structures.

1 Introduction

Une évaluation fiabiliste pertinente du vieillissement d'une structure est cautionnée par la prise en compte du caractère aléatoire et dépendant du temps des données sur les matériaux, les conditions environnementales et les chargements. L'amélioration de la qualité de cette évaluation permet d'optimiser les plannings d'inspections et de maintenance, et, par voie de conséquence, améliore la sécurité durant la durée de vie de la structure, qui peut alors être étendue. En ce sens, le couplage des méthodes fiabilistes fonction du temps avec l'analyse des structures par éléments finis constitue une démarche prometteuse pour traiter certains problèmes industriels.

En ce qui concerne la conception des structures navales, la complexité des chargements que peut rencontrer la structure au cours de sa durée de vie nécessite la prise en compte des aspects non-linéaires du comportement des matériaux. De plus, le vieillissement de la structure ou sa corrosion peut induire des modifications de ses propriétés structurelles. Ceci se traduit souvent par des endommagements irréversibles dans les zones les plus sollicitées (fissures de fatigue...). La modélisation de ce type de problème implique généralement de résoudre des problèmes fortement non-linéaires et dépendant du temps, et par conséquent des temps de calculs importants.

En sus, le couplage des méthodes fiabilistes fonction du temps avec l'analyse de problèmes non-linéaires par la méthode des éléments finis requiert des modèles mécaniques suffisamment robustes pour garantir la précision des résultats [1]. L'étude présentée décrit une approche fiabiliste fonction du temps basée sur le couplage de la méthode PHI2, telle qu'introduite dans [2] et améliorée dans [3], avec une analyse non-linéaire par éléments finis. L'originalité de cette approche réside dans le fait que l'évaluation de la probabilité de défaillance cumulée ne nécessite que des outils fiabilistes indépendants du temps. De plus, afin de limiter le temps de calcul, des modèles mécaniques adaptés sont développés.

2 Développements/Résultats

Les possibilités ainsi que la validation de l'approche proposée sont démontrées à travers deux types de problèmes.

2.1 Exemple d'une plaque corrodée soumise à un chargement stochastique

D'une part, une analyse fiabiliste d'une plaque corrodée à comportement élasto-plastique soumise à un chargement stochastique est présentée. La démarche la plus généralement rencontrée pour traiter l'influence de l'évolution spatiale et temporelle de la corrosion d'une structure repose sur l'utilisation de méthodes de re-maillage pour prendre en compte les pertes d'épaisseurs généralisées ou localisées ; mais de telles stratégies peuvent fortement diminuer la vitesse de convergence de l'analyse fiabiliste du fait des biais numériques introduits par les transferts d'informations entre les maillages successifs. Par conséquent, l'approche mécanique 2D proposée, en représentant la perte d'épaisseur (modèle de propagation inspiré de [4]) de façon continue (variation d'épaisseur possible dans chaque élément, figures 1 et 2), permet d'éviter des re-maillages successifs, et donc de limiter les approximations.

L'influence de la modélisation du chargement, par variable aléatoire ou par processus stochastique, est analysée, en mettant en parallèle le gain d'information et le temps de calcul induits. Cet exemple met également en valeur la rapidité de convergence ainsi que la stabilité de la nouvelle méthode PHI2 (figure 3).

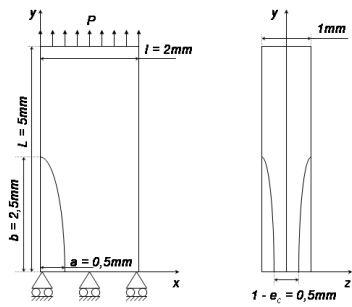


Fig. 1- Problème étudié

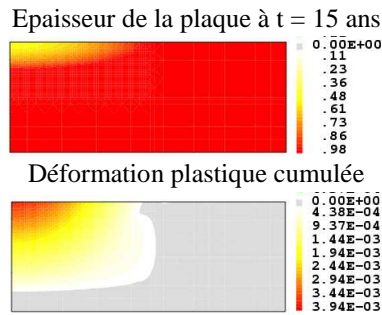


Fig. 2- Modélisation associée

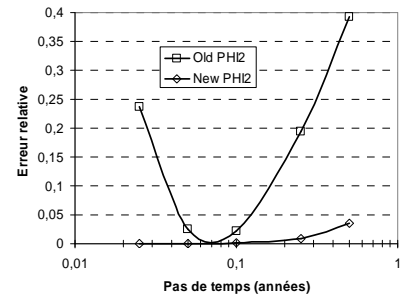


Fig. 3- Erreur relative par méthode

2.2 Exemple basé sur l'étude de structures collées

D'autre part, une approche fiabiliste appliquée aux assemblages collés telle qu'introduite en [5] est présentée. Des modèles de type zone cohésive (figure 4) prenant en compte les défauts initiaux et l'évolution de l'endommagement sont utilisés. Ces éléments d'interface présentent l'avantage de limiter fortement la dépendance au maillage et permettent de modéliser l'initiation et la propagation de fissures. Cette approche est bien adaptée pour la modélisation des assemblages collés du fait de la définition pertinente de la zone de dégradation possible. L'identification des paramètres matériaux implique des essais sur des films de colle minces et de propagation de fissure sur des éprouvettes TDCB. De plus, pour les applications navales, des essais sur des assemblages de matériaux composites ont également été effectués. Les problèmes traités (figure 5) montrent la faisabilité de l'approche proposée mais conduisent à des temps de calculs importants.

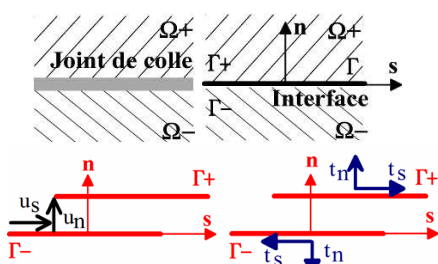


Fig. 4- Modélisation des joints

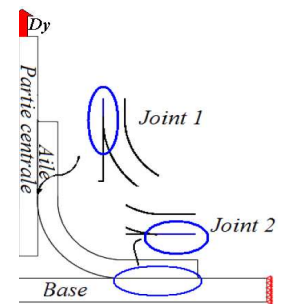


Fig. 5- Problème étudié

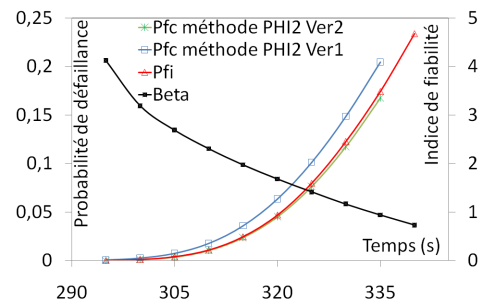


Fig. 6- Résultats de l'étude

3 Conclusion/Bilan

Les résultats numériques présentés montrent les possibilités de l'approche proposée et en particulier la faisabilité du couplage mécano-fiabiliste dépendant du temps pour des modèles éléments finis non-linéaires. Une comparaison des formulations PHI2 existantes est effectuée. Les efforts nécessaires à l'évaluation d'une probabilité de défaillance cumulée sont soulignés, en terme de précision des résultats à mettre en parallèle avec le temps de calcul induit.

Références

- [1] Cazuguel, M., Andrieu-Renaud, C. & Cognard, J.Y., Time-variant reliability of non-linear structures: Application to a representative part of a plate floor. *Quality and Reliability Engineering*, Vol. 22: pp. 101-118, 2005.
- [2] Andrieu-Renaud C., Sudret B., Lemaire, M., The PHI2 method: A way to compute time-variant reliability, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 84: pp. 75-86, 2004.
- [3] Sudret B., Analytical derivation of the outcrossing rate in time-variant reliability problems. Reliability and Optimization of Structural Systems, *12th WG 7.5 IFIP Conference*, Aalborg, Denmark, 2005.
- [4] Guedes Soares, C. & Garbatov, Y., Reliability of maintained, corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads. *Marine Structures*, Vol. 12: pp. 425-445, 1999.
- [5] Mejri M., Cognard J.Y., Développement d'une approche mécano-fiabiliste d'assemblages collés pour applications marines. *Matériaux et techniques*, Vol. 94 : pp. 409-417, 2006.

Optimisation de l'inspection de structures protégées à dégradation multi-phasique

D. Breysse¹, F. Schoefs², A. O'Connor³, E. Sheils³

¹ Université Bordeaux1, Ghymac, France

² GeM, Institut de Recherches en Génie Civil et Mécanique, UMR CNRS 6183, Université de Nantes

³ Trinity College, Dublin, Ireland

Mots clés: Inspection, maintenance, réparation, PoD, PFA, fiabilité, analyse de risque.

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 met en place le cadre d'une méthode générique et paramétrique qui intègre la plupart des sources d'aléas et d'incertitudes que l'on rencontre dans la pratique : le caractère aléatoire de l'évolution temporelle de la dégradation (qui dépend du matériau et des conditions d'exposition), le caractère incertain des résultats d'inspection (qui résulte de la qualité des techniques et de leur sensibilité aux biais environnementaux), le caractère aléatoire de 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. Modèles pour l'inspection et la propagation de défauts

Dans cet article, le défaut d en un point est supposé exister mais sa valeur exacte est inconnue. L'inspection en fournit une estimation bruitée. Afin de simplifier les illustrations et de limiter le nombre de paramètres le bruit 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...). Cette hypothèse a été validée à partir d'une campagne de mesures dans le secteur portuaire. On utilise alors les probabilités de détection et de fausse alarme dans le schéma d'aide à la décision.

Le modèle d'évolution temporelle de l'intensité du défaut est un modèle stochastique (1). On n'introduit pas à cette étape de première phase correspondant à une protection. En effet, elle peut être reflétée par la taille de défaut d_i à partir de laquelle la probabilité de défaillance augmente (2). La croissance de l'intensité au cours d'un pas de temps Δt se fait par des sauts aléatoires plus ou moins intenses. On définit alors une mesure de probabilité associée à la croissance de l'intensité du défaut (la taille du défaut demeure constante avec une probabilité complémentaire). Une telle formulation permet de décrire, via la valeur d'un coefficient g , des lois d'évolutions plutôt régulières ou plutôt brutales.

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

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 décrivant la cinétique de dégradation. En modifiant la valeur de g , l'évolution du défaut est graduelle ou plus abrupte.

3. Calcul de la probabilité de défaillance

Pour une taille de défaut donnée, la défaillance est elle-même un événement aléatoire (dont l'occurrence dépend par exemple de l'intensité des actions exercées dans l'intervalle de temps considéré). La probabilité annuelle de défaillance p_F est calculée à partir d'une fonction de répartition de Weibull (2) d'exposant m , décrivant l'expression de p_F en fonction de d .

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

La taille de défaut limite d_l (4) correspond à une borne inférieure en deçà de laquelle on considère que la probabilité de défaillance est nulle.

On présente dans l'article le calcul de l'espérance des coûts. On obtient alors différents types de résultats post-traités comme la variation de l'espérance des coûts en fonction de l'intervalle entre deux inspections.

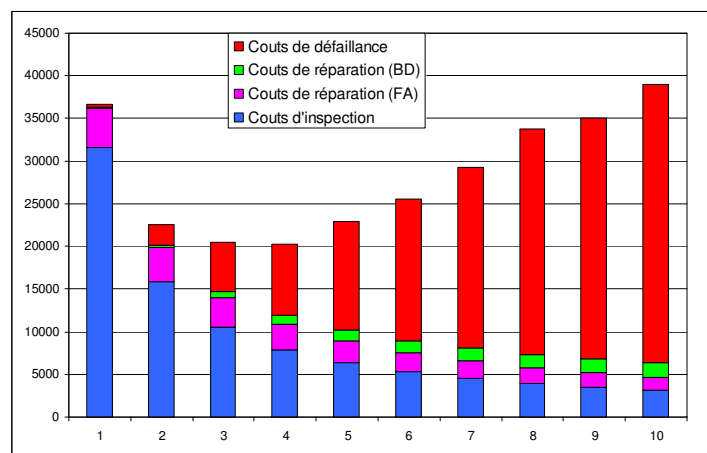


Fig. 1 Variation de l'espérance des coûts en fonction de l'intervalle entre deux inspections.

4. Conclusion

L'article présente les premiers résultats d'une approche globale de l'optimisation d'une politique d'Inspection-Maintenance-Réparation dans un contexte où les incertitudes portent à la fois sur la croissance des défauts, sur les résultats de l'inspection et sur les possibilités de défaillance. Le formalisme général est adapté au contexte de gestion vis-à-vis d'états-limites de service aussi bien que d'états-limites ultimes. Il peut aussi s'appliquer à des phénomènes de dégradation très divers, même s'il a été originellement développé dans l'optique de la maintenance d'ouvrages corrodés. Les simulations permettent de comparer différentes options stratégiques, par exemple en comparant l'efficacité de différentes techniques d'inspection, ou de différentes fréquences d'inspection.

Les résultats doivent être considérés aujourd'hui comme illustratifs, dans la mesure où ils dépendent largement des hypothèses faites à chaque étape du processus de modélisation, en particulier sur les composantes économiques. Il apparaît donc essentiel d'alimenter les modèles, aussi bien en ce qui concerne les capacités des techniques que de données sur les coûts. Le Projet SENSO, financé par l'ANR, qui a pour objectif d'établir une base de données sur la qualité des techniques de CND (intensité des bruits, sensibilité des techniques...), contribuera ainsi, par exemple à alimenter la modélisation. De même les modèles de réparation doivent être affinés : c'est l'objet du projet MAREO financé par la Direction Générale des Entreprises et la Région Pays de La Loire dans le cadre du Pôle de Compétitivité Génie Civil Ouest (PGCO).

Une autre perspective est de développer des modèles décomposant la stratégie d'acquisition d'information sur l'ouvrage en distinguant la phase de détection des défauts de la phase de qualification des défauts.

Session TS4-A
Vendredi 28 mars
8 : 30 - 9 : 45

I. Zentner, A. Nadjarian, N. Humbert, E. Viallet.

Estimation of fragility curves for seismic probabilistic risk assessment by means of numerical experiments.

L. Rouaski, S. Belkacemi.

Analyse probabiliste du tassement de consolidation primaire d'une fondation superficielle.

S. Yotte, SM Elachachi.

Etude d'une cabane d'ostréiculteur..

D. Siegert, B. Jacob.

Extrapolation des effets extrêmes du trafic sur un pont autoroutier.

Estimation of fragility curves for seismic risk assessment by means of numerical experiments

I. ZENTNER¹, A. NADJARIAN², N. HUMBERT², E. VIALLET²

¹ EDF R&D Clamart, Département Analyses Mécaniques et Acoustiques, 1, avenue du Général de Gaulle, 92141 CLAMART, France, irmela.zentner@edf.fr

²EDF SEPTEN, 12-14 Avenue Dutriévoz, 69628 VILLEURBANNE Cedex, France

Mots clés : fragility curve, Monte Carlo, maximum likelihood, seismic risk, capacity, failure probability

The seismic Probabilistic Risk Assessment (PRA) methodology, see for example [1], has proven to be a preferred approach for the evaluation of seismic risk. In this framework, fragility curves express the conditional probability of failure of a structure or component for a given seismic input motion parameter A , such as peak ground acceleration (PGA) or peak ground velocity (PGV). The failure probability due to a seismic event is obtained by convolution of fragility curves with seismic hazard curves. The probability of failure of a nuclear power plant is then determined by means of fault trees using simple logical structures of AND and OR in order to combine different events likely to result in global failure.

The capacity of the structure or component, also denoted by A , is generally supposed to be log-normally distributed. In engineering practice, capacity is often expressed by means of safety factors (and safe shutdown earthquake), using the scaling method. This approach allows for determining fragility curves in a very convenient way but is largely based on expert judgment.

This is why it can be interesting to determine fragility curves by means of numerical simulation. We have performed non-linear dynamic response analyses using artificially generated strong motion time histories generated by PowerSpec software (based on Preumont [2]). The time histories have been generated for a specific site but taking into account uncertainty on the free field design response spectrum. Soil-structure interaction is considered by means of a simplified spring model. The numerous uncertainties, other than those due to seismic loads, such as mechanical parameters, mass, stiffness and damping are also taken into account and propagated using Monte Carlo simulation. All of the numerical simulations are realized with open source finite element code *Code_Aster* [6].

In the paper, we will present a statistical analysis of the results obtained by simulation and estimate parameters of fragility curves. Generally, in literature, only composite curves are determined (see for example [5]). We will determine a family of curves by different methods, thus accounting for uncertainty on the mean curve. Finally, we provide a critical appraisal of the methods applied.

Références

- [1] EPRI, Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide, Final Report 1002989, 2003.
- [2] A. Preumont : The generation of non-separable artificial earthquake accelerograms for the design of nuclear power plants. Nuclear Engineering and Design 88, 185
- [3] G. Devesa, V. Guyonvarh, D. Clouteau: Use of coupling and regulatory methods in soil structure interaction for nuclear power plants. Proceedings of Eurodyn, Vol. 2, Millpress, 2005.
- [4]] D. Straub et A. Der Kiureghian, Improved seismic fragility modelling from empirical data. Structural Safety, in press, 2007.
- [5] M. Shinozuka, Q. Feng, J. Lee et T. Naganuma, Statistical analysis of fragility curves. J. Eng. Mech. ASCE (126) 12, 2000, p.1224-1231.
- [6] Code_Aster, general public licensed structural mechanics finite element software, <http://www.code-aster.org>

ANALYSE PROBABILISTE DU TASSEMENT DE CONSOLIDATION PRIMAIRE D'UNE FONDATION SUPERFICIELLE

L. ROUASKI, *lrouaski@yahoo.fr*

S. BELKACEMI, *smainbelkacemi@yahoo.com*

Laboratoire construction et environnement, Département de Génie Civil
Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, BP. 182, El Harrach, 16200 Alger, Algérie
Tél. +213.21.52.53.01
Fax. +213.21.52.29.73

La conception d'une fondation vise pour objectif principal un comportement satisfaisant sous des conditions de chargement réglementaires, tout en gardant à l'esprit la nécessité de satisfaire un double impératif de sécurité et d'économie. Il est bien évident qu'un comportement dommageable reste possible sous des conditions particulières.

Confronté aux critères potentiellement contradictoires de comportement défavorable et des contraintes économiques, l'ingénieur établit un niveau raisonnable de sécurité à travers des résultats empiriques et son expérience personnelle. La question qui vient systématiquement à l'esprit est comment évaluer le niveau de sécurité qui peut être considérée comme acceptable ? Un concepteur expérimenté peut intuitivement apprécier l'effet, sur les performances de fondation, des facteurs tels que les variations des charges, les variations des résistances, les erreurs de modèles, les erreurs d'exécution ou des travaux mal dirigés, et les conditions de site imprévues. Dans la pratique traditionnelle de conception, une appréciation globale de ces divers facteurs est généralement faite par l'utilisation du facteur de sécurité. Le facteur de sécurité est essentiellement fondé sur l'expérience acquise sur des projets similaires. Une telle appréciation du niveau de sécurité dépend fortement du cadre de l'analyse, et ne fait aucune distinction entre les incertitudes de modèle et les incertitudes de paramètres. La variation du niveau de sécurité résultant de nouvelles conditions ou progrès dans l'état de l'art ne peut pas être justifiée par la pratique traditionnelle.

Une méthode alternative consiste à calculer un indice de fiabilité qui dépend non seulement des valeurs moyennes des paramètres mais également de leurs incertitudes associées. Cet article présente une analyse du tassement de consolidation primaire par

une approche probabiliste d'une fondation superficielle. Les variables aléatoires considérées dans cette étude sont la charge verticale, la contrainte de préconsolidation, la contrainte effective après chargement, l'indice de compression, l'indice des vides, et l'indice de recompression. Les méthodes d'approximations de l'indice de fiabilité adoptés sont les suivantes: First Order Second Moment (FOSM), First Order Reliability Method (FORM), Second Order Reliability Method (SORM), la simulation de Monte Carlo (SMC), et la simulation Hyper-Cube Latin (SHCL). Dans cette étude, deux types de distributions des variables aléatoires, normale et lognormale, sont considérées. Cette étude a permis de mieux apprécier les effets des incertitudes de paramètres et de cerner un ensemble de paramètres à forte incidence. Une comparaison entre les différents indices de fiabilité est présentée et discutée.

Etude d'une cabane d'ostréiculteur

S. YOTTE¹, SM ELACHACHI¹

¹ GHYMAC, Université Bordeaux 1

Une cabane ostréicole en bois en ruine fait l'objet de cette étude. Elle a été déconstruite en vue de réaliser des essais sur ses différents éléments. D'autre part sa structure a été modélisée afin de tester différentes solutions en vue de la sauvegarde des autres cabanes du secteur. En effet le Conseil Général de Gironde est responsable de ces cabanes et un cabane en tres mauvais état comme celle que nous avons étudié ici n'est pas acceptable pour les responsables du domaine maritime car elle représente un risque pour la population. La direction du tourisme de son coté souhaiterait le maintien de ces cabanes sur le domaine pour l'attrait qu'elles représentent. Le Conseil Général souhaite disposer :

- de méthode de surveillance de ces ouvrages
- et de critères de décision.

Dans ce papier nous allons donc décrire la modélisation du matériau et de son vieillissement. Seul le vieillissement lié aux attaques de vers sera prise en compte. De même on prendra en compte l'évolution des assemblages dans le temps. L'action de la pesanteur et du vent seront modélisées. Le risque le plus élevé provient du vent.

A l'aide d'une simulation de type Monté Carlo, le comportement de la structure dans le temps sera évalué avec et sans réparation.

Effets extrêmes du trafic sur un pont autoroutier

D. SIEGERT, B. JACOB

¹ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 58 boulevard Lefebvre, siegert@lcpc.fr, jacob@lcpc.fr

Mots-clés : Valeurs extrêmes ; Effets du trafic ; Période de retour ; Extrapolation ; Gumbel ; Ponts routiers.

1 Le problème et la méthode

L'évaluation des effets extrêmes du trafic sur les ponts routiers est nécessaire pour concevoir, caler et vérifier les modèles de charges des codes de calcul comme l'Eurocode "Action du trafic sur les ponts routiers" [1]. La théorie des valeurs extrêmes s'applique avec certaines précautions, et peu de cas ont été publiés. Ces extrapolations sont incontournables car les ouvrages sont dimensionnés pour des durées d'utilisation de 50, 100 ou 120 ans, alors que les distributions probabilistes des paramètres du trafic lourd (charges, distances) ou de leurs effets (solllicitations, contraintes ou déformations) sont calées sur des mesures de quelques jours à quelques mois.

Différentes techniques ont été proposées depuis une vingtaine d'années pour évaluer les actions ou sollicitations extrêmes produites par des configurations rares de charge, en général non observées pendant la période de mesure, voire d'exploitation de l'ouvrage. La difficulté de ces extrapolations, contrairement à celles de lois de probabilité théoriques, est qu'il existe des "troncatures cachées" ou des phénomènes asymptotiques externes au modèle probabiliste de base. En effet le nombre de poids lourds qu'il est possible de placer sur un pont est limité par leurs dimensions et la longueur de l'ouvrage, et même le poids individuel des camions est limité par leur volume et la densité maximale des produits transportés. La justification de la méthode d'extrapolation repose donc sur la vraisemblance des prévisions des extrêmes par rapport aux contraintes physiques.

La théorie des lois asymptotiques d'extrêmes, appliquées à des distributions de charges mesurées et de sollicitations calculées à partir de ces charges, a été utilisée pour extrapoler à l'aide de lois de Gumbel les charges sur les ponts routiers [3]. Des simulations numériques des effets du trafic sur des ponts de portées moyennes (30 à 40 m) ont montré l'intérêt de constituer des populations homogènes de configurations de trafic avant de procéder à l'identification des lois asymptotiques [4].

Dans cet article, les valeurs extrêmes des effets du trafic ont été évaluées par différentes méthodes d'estimation et les résultats comparés et évalués. Les paramètres d'une loi asymptotique d'extrême de Gumbel et leurs intervalles de confiance ont été estimés par la méthode du maximum de vraisemblance à partir des maxima journaliers et hebdomadaires au cours de deux périodes de 5 mois d'observation.

2 Cas d'application

L'exemple présenté est celui d'un pont autoroutier en béton précontraint supportant 3 voies de circulation et environ 10 000 poids lourds par jour. Le tablier, un VIPP (viaduc à travées indépendantes à poutres précontraintes) de 33 m de portée, est constitué de 5 poutres entretoisées avec hourdis intermédiaires.

Une travée de rive a été instrumentée par extensométrie pour mesurer les déformations en flexion des poutres à mi-portée sous trafic. Les valeurs maximales et minimales par séquences de 2 minutes ont été mesurées pendant 265 jours (de janvier à juin) pour les années 2004 et 2005. L'analyse des signaux enregistrés a montré que sur cet ouvrage les amplifications dynamiques au passage des poids lourds étaient négligeables. Un traitement des mesures a permis d'éliminer les effets thermiques et les dérives des déformations mesurées.

Les résultats de l'extrapolation à l'aide de la loi de Gumbel sont représentés sur les graphiques de la Figure 1. Le traitement des données a été réalisé à l'aide des fonctions relatives au traitement des valeurs extrêmes du logiciel R [5, 2]. On constate que l'identification automatique des paramètres de la loi des extrêmes généralisée serait une loi extrême de Fréchet pour les observations réalisées en 2004 et une loi de Weibull pour les données mesurées en 2005. Les mesures réalisées les samedis, dimanches et jours fériés étaient généralement inférieures à la valeur moyenne des effets mesurés et n'ont pas été prises en compte pour identifier les paramètres de la loi de Gumbel.

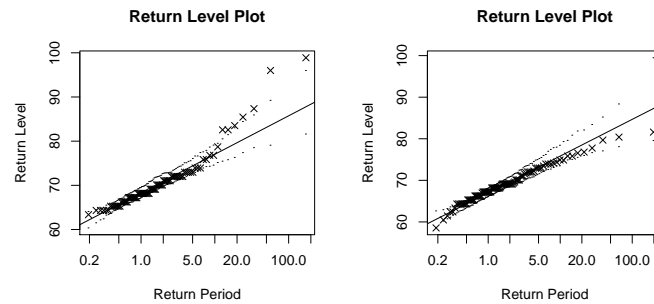


Fig. 1 – Extrapolations à l'aide de la loi de Gumbel à partir des observations des maxima journaliers pour les années 2004 et 2005.

Un calcul des effets statiques pour des configurations sous l'effet de camions en surcharge est montré sur le graphique de la Figure 2. Les cas de chargement sont représentés sur l'axe des abscisses par le poids total sur la travée. Les effets ont été calculés à partir des lignes d'influence expérimentales des déformations en flexion des poutres situées sous les voies de circulation. Les valeurs maximales de déformation mesurées correspondent aux effets produits par la présence simultanée de camions en surcharge sur deux voies de circulation.

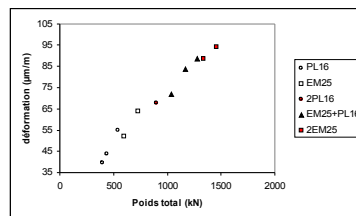


Fig. 2 – Calcul de la déformation sous différents cas de charge.

3 Conclusions

Le choix de décrire la distribution des maxima des effets du trafic par une loi de Gumbel a permis d'obtenir les mêmes résultats d'extrapolation pour les années 2004 et 2005. La valeur déterminée par la méthode du maximum de vraisemblance pour une période de retour de 1000 ans était égale à $115 \mu\text{m/m}$. Cette valeur est proche de l'extrapolation obtenue à partir de la fusion des maxima hebdomadaires mesurés en 2004 et 2005. L'effet calculé par application du cas de charge LM1 de l'Eurocode 1, de plus de 50 % plus élevé, est donc largement conservateur.

Références

- [1] Eurocode 1. *Partie 2, actions sur les ponts, dues au trafic*. NF EN 1991-2, 2004.
- [2] Stephenson A. *Functions for extreme value distributions*. evd package Version 2.2-3, 2008.
- [3] Jacob B., Maillard J.B., and Gorse J.F. Probabilistic traffic load models and extreme loads on a bridge. In *ICOSSAR 89 Proceedings*, pages 1973–1980, San Francisco, 1989.
- [4] Caprani C.C., O'Brien E.J., and Mac Lachlan G.J. Characteristic traffic load effects from a mixture of loading events on short to medium span bridges. *Structural Safety*, in press :doi :10.1016/j.structsafe.2006.11.006., 2007.
- [5] R development Core Team. *R : A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2005.

Session TS4-B
Vendredi 28 mars
10 : 00 - 11 : 00

N. Hyvert, A. Sellier, F. Duprat, P. Francisco.

Mieux appréhender la durabilité des bétons par l'approche probabiliste.

M. Pendola, T. Yalamas.

La fiabilité au service de la gestion d'un ouvrage.

O. Priou, F. Schoefs, A. Nouy, M. Birades, V. Quiniou.

Du parc de structures à la structure : avantages et inconvénients du i-form.

Mieux appréhender la durabilité des bétons par l'approche probabiliste

N. Hyvert^{1,2}, A. Sellier², F. Duprat², P. Rougeau¹, P. Francisco¹

¹ CERIB, Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton, BP 30059, 28231 Epernon Cedex, France, n.hyvert@cerib.com

² LMDC, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, 135 avenue de Ranguéil, 31077 Toulouse Cedex 4, France

Mots clés: *durabilité, approche probabiliste, base de données, modélisation, durée de service.*

La maîtrise et l'optimisation de la durabilité constituent un enjeu particulièrement important pour les ouvrages et les produits préfabriqués. Les risques provoqués par les conditions extérieures sont ordonnés en classes d'exposition. Celles relatives aux risques de corrosion des armatures correspondent aux classes liées à la carbonatation, à la présence de chlorures et aux environnements marins.

A ce jour, la plupart des modèles prédictifs de la durabilité sont de type déterministe.

Cependant, pour mieux appréhender le dimensionnement des structures en béton, les approches probabilistes commencent à être utilisées. Il est vraisemblable qu'à moyen terme, les textes normatifs s'appuieront encore davantage sur ces modèles probabilistes de la durabilité pour fixer des spécifications sur les obligations de moyens et de performances.

Cette étude vise à élaborer des modèles probabilistes de durabilité prenant en compte les spécificités des produits préfabriqués en béton. Ces modèles permettent de quantifier les risques liés à la dégradation du béton armé induits par la carbonatation et la pénétration des chlorures. La démarche est d'adapter un volet probabiliste à des modèles déterministes.

Dans un premier temps, une étude de sensibilité est réalisée afin d'analyser les facteurs influençant préférentiellement la phénoménologie des mécanismes de dégradation. Ils sont alors identifiés comme paramètres d'entrée requis pour la modélisation. Les modèles déterministes des dégradations concernées sont ensuite sélectionnés, au regard de leur pertinence et de leur aptitude à être utilisé dans un contexte industriel.

Pour faire évoluer ces modèles vers une approche probabiliste, il est nécessaire de disposer d'une base de données aussi complète que possible : résistances mécaniques, diffusivités, porosités, distributions de taille de pores, compositions minéralogiques... Les fonctions de densités, les valeurs moyennes et les écart-types de ces paramètres d'entrée permettent d'utiliser les modèles selon une approche probabiliste.

L'évolution de la probabilité de défaillance dans le temps peut être quantifiée et l'épaisseur d'enrobage des armatures recalculée en fonction des caractéristiques du produit et des sollicitations in-situ.

La fiabilité au service de la gestion d'un ouvrage

M. Pendola*, T. Yalamas*

*PHIMECA, Centre d'affaires du Zénith – 34 rue de Sarliève – 63800 Cournon

Lors de la construction d'un ouvrage les codes de construction et règlements relatifs aux différents types d'ouvrages guident très fortement le dimensionnement de celui-ci. Il n'en est plus de même au cours de la vie de l'ouvrage. En effet, si la réglementation est parfois précise en ce qui concerne les inspections indispensables en cours de vie de l'ouvrage (barrages, ponts), elle ne l'est presque jamais sur les opérations de maintenance et leur planification, laissant les gestionnaires d'ouvrages libres, mais responsables, de leurs choix.

Pour guider les maîtres d'ouvrages dans leur choix, une première approche consiste à établir des cartes de risques. Le risque est ici considéré comme la probabilité d'occurrence d'un événement multipliée par les conséquences de cet événement. Mais, pour être à même de faire ce travail correctement, encore faut-il réussir à déterminer, ou à estimer, correctement les probabilités d'occurrence.

En complément, ou en alternative, à cette approche, il est ici proposé une gestion des ouvrages basée sur une analyse fiabiliste de ces ouvrages.

Selon les cas et les informations disponibles on pourra :

- soit évaluer directement la fiabilité mécanique de l'ouvrage par les techniques mécano-probabilistes désormais classiques (même si elles restent peu utilisées en Génie Civil) : approximations FORM/SORM, simulations améliorées...
- soit s'intéresser à l'évolution de la marge excédentaire liée au dimensionnement de l'ouvrage.

Par ailleurs, on peut se contenter d'appliquer les méthodes mécano-fiabilistes pour la rupture d'un composant ou d'une partie de l'ouvrage, ou bien chercher à les mettre en œuvre de façon plus intégrée pour minimiser le coût d'entretien de l'ouvrage sous un critère de fiabilité donné.

La méthodologie proposée sera illustrée à travers l'étude de la poutraison interne d'un aéro-réfrigérant. Ce dispositif de supportage des corps d'échange des aéroréfrigérants est constitué de plusieurs centaines de poutres et poutrelles en béton armé. Le processus de vieillissement de ces structures internes présente un double aspect :

- d'une part, les efforts appliqués augmentent du fait de l'entartrage progressif des corps d'échange,
- d'autre part, ces structures sont exposées à un risque de dégradation dans le temps du fait des conditions de fonctionnement (humidité, température).

Il convient donc pour l'exploitant de disposer d'une méthodologie pour prévoir l'évolution de l'état de ces ouvrages afin d'estimer la durée durant laquelle l'exploitation peut être menée en toute sécurité ainsi que les moyens à mettre en œuvre (inspections, maintenance, réparation...) pour garantir et éventuellement prolonger leur durée de vie si nécessaire.

Du parc de structures à la structure : avantages et limites du IFORM

O. Priou¹, F. Schoefs¹, A. Nouy¹, M. Birades², V. Quiniou²

¹ GeM, Institut de Recherches en Génie Civil et Mécanique, UMR CNRS 6183, Université de Nantes

² TOTAL SA, Pau & Paris

Mots clés: IFORM, fiabilité, éléments fini stochastiques, plates-formes offshore, environnement marin.

1. Introduction

La gestion de parc d'ouvrages est un enjeu persistant. Qu'il s'agisse d'actifs industriels (quais, plate-formes offshore, centrales hydrau-électriques) ou d'aménagements collectifs (collèges, ponts, ...), le décideur doit faire face à une multitude de structures d'âges variés, de matériaux et procédés différents et dans des environnements multiples. Difficile dans ces conditions de fournir des outils d'aide à la décision. Les méthodes dites qualitatives fournissent actuellement la meilleure alternative à un calcul exhaustif de chaque structure.

Toutefois, une autre alternative existe lorsque le parc de structures est plus homogène. Ce peut être le cas de pylônes électriques de conceptions similaire ou de plates-formes offshore en acier, qui obéissent aussi à des méthodes de conceptions semblables. Cet article se servira des secondes comme point d'illustration.

On rappellera comment les approches par analyse de fiabilité FORM inverse (appelées i-form) peuvent fournir des points de conception pour des chargements environnementaux (Orsero et al., 2007). La méthode des contours environnementaux (ECM, Winterstein et al., 1993) permet alors à partir d'un état limite simple et indice de fiabilité visé, de déterminer la combinaison de chargements environnementaux maximisant l'effort sur la structure. Les conditions environnementales obtenues sont alors prises comme entrée des calculs déterministes. On appellera cette approche, méthode semi-probabiliste.

On se propose ici de comparer les résultats de cette approche semi-probabiliste aux résultats d'une approche complètement probabiliste. On utilise ici une méthode de projection sur le chaos polynomial (Puig et al., 2002) utilisant en boîte noire un code de calcul de structures adapté (ici NSO). L'application concerne des plates-formes pétrolières en acier de type Jacket.

2. Méthode IFORM

L'Inverse FORM ou IFORM est une méthode introduite par Winterstein en 1993 [1], dans le cadre de la modélisation de la probabilité jointe de sollicitations environnementales. On rappelle simplement ici que la méthode FORM (First Order Reliability Method) permet de déterminer l'indice de fiabilité par approximation de l'état limite par un hyperplan. L'idée générale est de recourir à une méthode inverse pour déterminer le point de fonctionnement et l'état limite à indice de fiabilité β visé.

L'ECM consiste à déterminer, à indice de fiabilité visé, les coordonnées, dans l'espace physique des variables x (vecteur des variables de base), du point conduisant à la combinaison de chargement la plus critique pour une catégorie de réponse structurale donnée $R(x)$. On ne calcule alors pas la réalisation de la fonction d'état limite d'une structure donnée à chaque étape de la recherche du minimum. Cela revient à résoudre, dans l'espace physique, le problème (1), où T désigne une transformation iso-probabiliste.

$$\mathbf{x}_{max} | \beta = \underset{x \in R^n, \|T(x)\|=\beta}{argmax} (R(x)) \quad (1)$$

Dans la pratique cet indice de fiabilité est lié à la probabilité de défaillance, calculée à partir de la période de retour T_r du niveau R_{max} . La période de retour T_r du niveau R_{max} d'un phénomène correspond au laps de temps (en années) où l'on s'attend, en moyenne, à voir dépasser R_{max} . D'un point de vue probabiliste, cette notion est rattachée à un modèle de distribution des valeurs extrêmes R . Si cette distribution a pour fonction de répartition F_R , la période de retour de l'évènement R_{max} est alors donnée par (2), où $F_R(R_{max})$ est, par définition, la probabilité de non dépassement de R_{max} . Dans la pratique, pour une période de retour de 100 ans, on a : $P_f = 3,42 \cdot 10^{-6}$ soit $\beta \approx 4,5$.

$$T_r = \frac{I}{1 - F_R(\mathbf{R}_{max})} \quad (2)$$

3. Calcul direct elements finis stochastiques et comparaison avec les valeurs obtenues

On cherche la solution du problème sous la forme d'une projection sur le chaos (3).

$$u(\xi) = \sum_{\alpha \in N^m, |\alpha| < p} u_\alpha \cdot h_\alpha(\xi) \quad (3)$$

On compare en figure 1 les résultats obtenus sur une plate-forme offshore à partir des valeurs nominales issues du IFORM et par le modèle stochastique (ratios critiques à la probabilité de dépassement de 10^{-3}). On simule alors la croissance de bio-salissures marines (accrétion végétale ou animale) en fonction du temps [2]. On observe que les effets et la hiérarchie sont fortement modifiés par les deux approches.

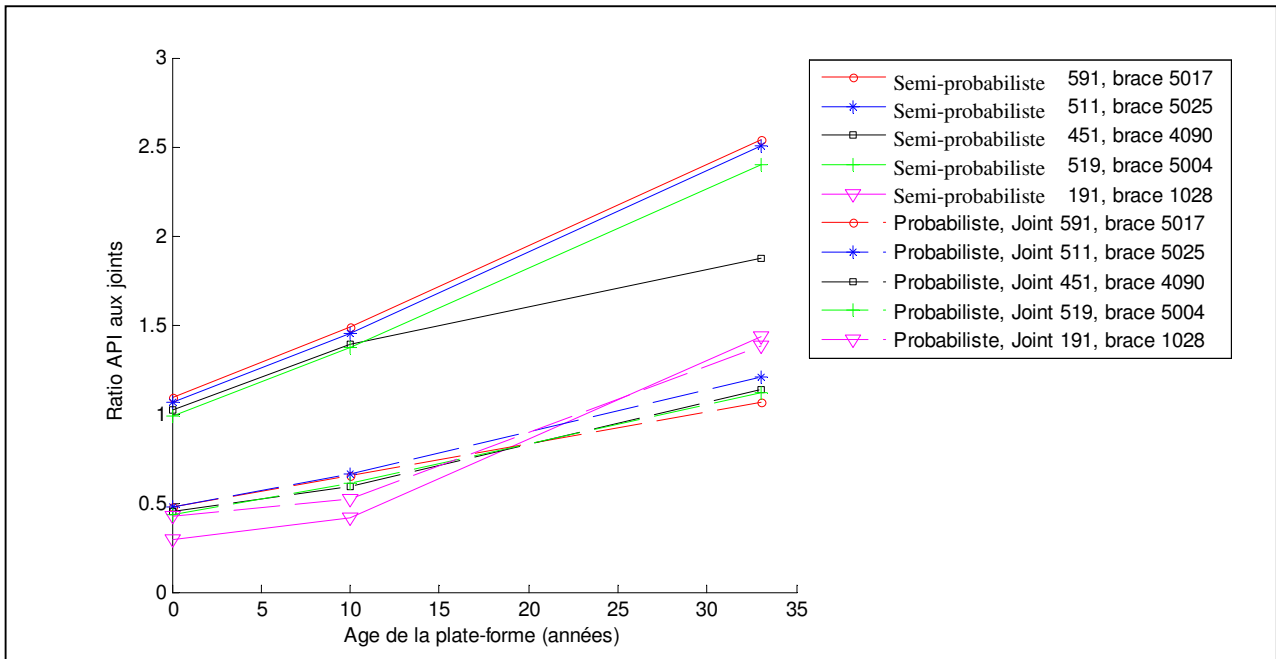


Fig. 1 Comparaison des approches probabilistes et semi-probabilistes

4. Conclusion

Cet article vise à comparer une approche simplifiée semi probabiliste basée sur le calcul des valeurs nominales à partir du IFORM avec un calcul éléments finis stochastiques direct. Après un rappel du IFORM, une discussion sur la convergence et l'analyse des résultats bruts, la comparaison avec l'approche semi-probabiliste révèle que pour la fiabilité composant, les chargements obtenus par l'approche semi-probabiliste peuvent conduire à des résultats très conservatifs.

L'article se conclut par une analyse de l'évolution de la fiabilité composant en fonction du temps lorsque l'épaisseur d'accrétions marines (dites bio-salissures) augmente sur la structure. On remarque que la hiérarchie des composants les plus critiques dépend fortement de la méthode de calcul utilisée.

[1] Winterstein, S. R., Ude, T. C., Cornell, C. A., Bjerager, P., Haver, S., «Environmental parameters for extreme response: Inverse FORM with omission factors», Proceedings ICOSSAR93, Innsbruck, Austria, 1993.

[2] Boukinda M., Schoefs F., Quiniou V., Birades M., «Marine Growth Colonisation Process in Guinea Gulf: data analysis», Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 129, Issue 2, pp. 97-106 (2007)

Plan de Nantes et Transports

PROGRAMME GENERAL

	26-mars Louis Pasteur	27-mars Louis Pasteur	28-mars Louis Pasteur
	Amphi		
08:30	Accueil	Accueil	
08:45			Session TS4-A
09:00	Ouverture	COURS 6	Discussion
09:15	COURS 1		Pause
09:30			
09:45			
10:00			
10:15		Discussion	
10:30	Discussion	Pause	Session TS4-B
10:45	Pause		
11:00		COURS 7	
11:15	COURS 2		Discussion
11:30			COURS 11
11:45		Discussion	
12:00	COURS 3		
12:15		Session TS2-A	
12:30	Discussion		Discussion
12:45	Déjeuner		Déjeuner
13:00		Discussion	
13:15		Déjeuner	
13:30			
13:45			
14:00			
14:15			
14:30	Session TS1-A		
14:45		Session TS2-B	
15:00			
15:15			
15:30	Discussion	Discussion	
15:45	COURS 4	COURS 8	
16:00			
16:15			
16:30	Discussion	Discussion	
16:45	Pause	Pause	
17:00	COURS 5	COURS 9	
17:15			
17:30			
17:45	Discussion	Discussion	
18:00		COURS 10	
18:15	Session TS1-B	Discussion	
18:30		Session TS3	
18:45	Discussion		
19:00		Discussion	
19:15			
19:30			
19:45		Dîner de Gala	
20:00			