



# Fiabilité des matériaux et des structures

*analyse de risques et fiabilité  
des systèmes dans leur environnement*

JFMS 2014

*sous la direction de*

**Corinne Curt, Laurent Peyras  
Julien Baroth, Alaa Chateauneuf**

**ISTE**  
editions

First published 2014 in Great Britain by ISTE Editions.

Apart from any fair dealing for the purposes of research or private study, or criticism or review, as permitted under the Copyright, Designs and Patents Act 1988, this publication may only be reproduced, stored or transmitted, in any form or by any means, with the prior permission in writing of the publishers, or in the case of reprographic reproduction in accordance with the terms and licenses issued by the CLA. Enquiries concerning reproduction outside these terms should be sent to the publishers at the undermentioned address:

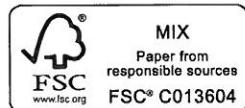
ISTE Editions  
27-37 St George's Road  
London SW19 4EU  
UK

© ISTE Editions 2014  
The rights of the authors of this work have been asserted by them in accordance with the  
Copyright, Designs and Patents Act 1988.

---

British Library Cataloguing-in-Publication Data  
A CIP record for this book is available from the British Library  
ISBN: 978-1-78405-027-6 (print)  
ISBN: 978-1-78406-027-5 (e-book)

---



Printed and bound in Great Britain by CPI Group (UK) Ltd., Croydon, Surrey CR0 4YY, July 2014



---

# **Fiabilité des matériaux et des structures**

---

*analyse de risques et fiabilité  
des systèmes dans leur environnement*

*sous la direction de*

Corinne Curt  
Laurent Peyras  
Julien Baroth  
Alaa Chateauneuf

**iste**  
ditions



Région



Provence-Alpes-Côte d'Azur

ECOSYSTEMES CONTINENTAUX  
**Ecorev**  
Et risques environnementaux



## AVANT-PROPOS

La fiabilité est l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée. Elle concerne les trois échelles du matériau, de la structure et de l'ouvrage. Or, quelle que soit l'échelle considérée, la fiabilité évolue au cours du temps du fait du vieillissement naturel. Celui-ci peut être accéléré par différentes causes internes (conception ou réalisation inadaptées, maintenance insuffisante) mais également externes (conditions climatiques, aléas naturels tels que crues, séismes, avalanches). Ces causes impliquent l'occurrence et le développement de phénomènes de dégradation qui contribuent à la diminution de la fiabilité et de la sécurité. Ces dégradations posent des problèmes de conservation du patrimoine mais peuvent également avoir de graves répercussions sur les biens et les personnes situés dans l'entourage des ouvrages.

La gestion de la fiabilité d'un système passe par la mise en place d'actions de maintenance, de réparation, de confortement ou d'urgence (évacuation de personnes, baisse du niveau d'eau dans une retenue). Afin d'améliorer la prise de décision et son efficience, il est important de développer des modèles d'évaluation des sollicitations liées aux aléas naturels et aux conditions opérationnelles, de description de la dégradation des matériaux, structures et ouvrages, d'évaluation de la fiabilité et d'optimisation des décisions. Or, les phénomènes de dégradation sont mal connus pour la plupart, complexes et en interaction les uns avec les autres ; les données et informations, entrées de ces modèles, sont nombreuses, peuvent être de formats différents (observations visuelles, données issues d'un capteur, résultat d'un modèle) et sont caractérisées par des imprécisions et des incertitudes épistémiques ou aléatoires, certaines d'entre elles pouvant être absentes ou conflictuelles. La résolution de ces difficultés ouvre un large champ de recherche : depuis 1994, les colloques JFMS (Journées de la Fiabilité des Matériaux et des Structures) visent à faire le bilan, tous les deux ans, des travaux réalisés en France principalement sur cette thématique. Ils privilégient les développements méthodologiques de traitement de l'incertain (probabilistes, possibilistes ou autres).

Les JFMS2014, organisées à Aix-en-Provence par Irstea les 9 et 10 avril 2014, ont reçu le soutien de différents organismes : Irstea, la Région PACA, la Fédération de Recherche Eccorev, la structure fédérative VOR (Vulnérabilité des Ouvrages face aux Risques), le GIS MRGenCi (Maîtrise des Risques en Génie Civil) et le projet Duratinet.

Cette édition a porté en particulier sur le thème de l'interaction systèmes-aléas, les systèmes considérés pouvant être des matériaux, des structures ou des ouvrages. En effet, très souvent, les incertitudes sur les sollicitations et sur l'environnement mécanique, naturel et anthropique conditionnent l'évaluation de la fiabilité des structures et des ouvrages. Plus spécifiquement, cette édition a mis l'accent sur :

- la modélisation de l'aléa naturel qui induit la sollicitation : crues, avalanches, hydrologie, chute de blocs, affaissement minier, séisme ;
- les démarches d'analyse en conditions réelles : géostatistique, analyse du risque, modélisation du chargement des ouvrages, analyse des observations in situ, ouvrages et sols ;
- les méthodes de traitement des imperfections rencontrées en situations réelles : modélisation des données rares, modèles statistiques adaptées, extrapolation stochastique ;
- l'exploitation des enregistrements historiques, la prise en compte du retour d'expérience ;
- l'adaptation des tâches d'inspection, maintenance, réparation au changement climatique.

Trente-six communications ont été acceptées dans le colloque. Deux conférences invitées ont également été présentées : l'une a porté sur l'aléa hydrologie et l'autre a fait une synthèse des résultats du projet européen Duratinet (Réseau pour Infrastructures Durables de Transport dans l'espace Atlantique). Cet ouvrage est le recueil de l'ensemble de ces communications. Il est organisé en 7 chapitres reprenant les thèmes de la conférence :

- méthodes qualitatives pour la sûreté de fonctionnement des structures et des ouvrages ;
- modèle des données et des connaissances ;
- évaluation des sollicitations liées aux aléas naturels et aux conditions opérationnelles ;
- modèles probabilistes de la dégradation des matériaux, structures et ouvrages ;
- méthodes d'évaluation de la fiabilité ;

- fiabilité système et optimisation sous incertitude appliquées aux structures et ouvrages ;
- inspection, maintenance et réparation sous incertitude.

Chacun de ces chapitres comprend une synthèse rédigée par les animateurs du thème concerné puis les communications présentées dans chacun des thèmes.

Comité de programme des JFMS2014  
CORINNE CURT, LAURENT PEYRAS (Irstea – Centre d’Aix-en-Provence)  
JULIEN BAROTH (Université de Grenoble)  
ALAA CHATEAUNEUF (Clermont Université / CNRS, UMR 6602)

## TABLE DES MATIÈRES

<b>Avant-propos . . . . .</b>	xiii
<b>Thème 1 : Méthodes qualitatives pour la sûreté de fonctionnement des structures et des ouvrages . . . . .</b>	1
Méthodes qualitatives pour la sûreté de fonctionnement des structures et des ouvrages – AURÉLIE TALON, DANIEL BOISSIER, LAURENT PEYRAS . . . . .	3
Auscultation des tunnels : Analyse des risques et notation NOURREDINE RHAYMA, AURÉLIE TALON, PIERRE BREUL, PASCAL GOIRAND . . . . .	19
Classement de tours aéroréfrigérantes en fonction du risque global de ruine : Développement et mise en œuvre d'un système d'aide à la décision FRANÇOIS BEAUDOUIN, CHRISTIAN MEUWISSE . . . . .	33
Analyse des dysfonctionnements des ouvrages de protection contre les crues torrentielles – NABGHA GHARIANI, CORINNE CURT, JEAN-MARC TACNET . . . . .	47
Vers une analyse intégrée de l'efficacité des ouvrages de protection contre les risques naturels en montagne : Évaluation économique en complément des volets structurels et fonctionnels – SIMON CARLADOUS, JEAN-MARC TACNET, NICOLAS ECKERT, CORINNE CURT, MIREILLE BATTON-HUBERT . . . . .	61
Le retour d'expérience des études de dangers de barrages en France SIMON DIEUDONNÉ, LAURENT PEYRAS, PAUL ROYET . . . . .	75
Recours à un modèle multi-agent (SMACC) pour la maîtrise des risques dans les projets de construction – FRANCK TAILLANDIER, PATRICK TAILLANDIER, DENYS BREYSSE . . . . .	89

<b>Thème 2 : Modèles des données et des connaissances .....</b>	<b>101</b>
Modèle des données et des connaissances – CORINNE CURT, VINCENT GARNIER, JEAN-MARC TACNET.....	103
Développement et formalisation de mesures pour évaluer la performance, vis-à-vis de l'érosion interne, des digues fluviales – GISÈLE BAMBARA, CORINNE CURT, PATRICE MÉRIAUX, MICHEL VENNETIER, PIERRE VANLOOT..	117
Optimisation de l'échantillonnage spatial des mesures non destructives CAROLINA GOMEZ-CARDENAS, ZOUBIR-MEHDI SBARTAÏ, JEAN-PAUL BALAYSSAC, VINCENT GARNIER, DENYS BREYSSE. ....	131
Prévision de la probabilité d'amorçage de la corrosion par réseau bayésien FRÉDÉRIC DUPRAT, THOMAS DE LARRARD.....	143
Application des probabilités subjectives pour la prise en compte des incertitudes issues de dires experts en analyse de risques MARC VUILLET, CLAUDIO CARVAJAL, LAURENT PEYRAS, YOUSSEF DIAB....	155
<b>Thème 3 : Évaluation des sollicitations liées aux aléas naturels et aux conditions opérationnelles .....</b>	<b>169</b>
Conférence invitée : Prise en compte de l'aléa hydrologique dans le dimensionnement et la gestion des ouvrages hydrauliques : Application à un barrage écrêteur de crues – PATRICK ARNAUD, YOANN AUBERT. ....	171
Évaluation des sollicitations liées aux aléas naturels et aux conditions opérationnelles – NICOLAS ECKERT, THIERRY VERDEL, OLIVIER BELLIER. ....	185
Effets de l'interaction sol-structure et de la variabilité du sol sur les structures en B.A dans le cadre d'une approche performante – MOHAMED MEKKI, SIDI MOHAMMED ELACHACHI, DENYS BREYSSE .....	191
Analyse fiabiliste d'un mur en béton armé soumis à une avalanche de neige et modélisé par éléments finis et modèle masse-ressort : Mise en place de courbes de fragilité structurelle – PHILOMÈNE FAVIER, DAVID BERTRAND, NICOLAS ECKERT, MOHAMED NAAÏM .....	205
Influence de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques du manteau neigeux sur la stabilité d'une pente : Modélisation couplée mécanique-statistique – JOHAN GAUME, JÜRG SCHWEIZER, ALEC VAN HERWIJNEN, GUILLAUME CHAMBON, NICOLAS ECKERT, MOHAMED NAAÏM .....	217

Modélisation probabiliste du rebond d'un bloc sur un sol dans le contexte de l'analyse de la trajectographie des chutes de blocs – FRANCK BOURRIER, NICOLAS ECKERT, FRÉDÉRIC BERGER, FRANÇOIS NICOT, FÉLIX DARVE . . . . .	227
Évaluation des aléas dans le cadre d'une étude de dangers prototype des digues de protection contre les crues torrentielles – DOMINIQUE LAIGLE, PATRICE MÉRIAUX, DIDIER RICHARD. . . . .	237
Évaluation probabiliste de la probabilité d'occurrence des affaissements miniers par la prise en compte de lois de vieillissement – OLIVIER DECK, YVES GUENIFFEY, HAFID BAROUDI, AHMED HOSNI. . . . .	249
<b>Thème 4 : Modèles probabilistes de la dégradation des matériaux, structures et ouvrages . . . . .</b>	<b>261</b>
Modèles probabilistes de la dégradation des matériaux, structures et ouvrages CLAUDIO CARVAJAL, FRÉDÉRIC DUPRAT, FABRICE GUÉRIN . . . . .	263
Méthodologie de construction d'un méta-modèle pour la maintenance de structures – BOUTROS EL HAJJ, BRUNO CASTANIER, FRANCK SCHOEFS, THOMAS YEUNG . . . . .	273
Sensibilités des modèles de carbonatation vis-à-vis de leur capacité à propager des incertitudes – NDRIANARY RAKOTOVAO RAVAHATRA, THOMAS DE LARRARD, FRÉDÉRIC DUPRAT, EMILIO BASTIDAS-ARTEAGA, FRANCK SCHOEFS . . . . .	287
Identification bayésienne des paramètres des modèles de chloration dans le béton armé – THANH-BINH TRAN, EMILIO BASTIDAS-ARTEAGA, STÉPHANIE BONNET, FRANCK SCHOEFS . . . . .	301
Effets de la variabilité spatiale de l'agressivité du sol sur la fiabilité des pipelines enterrés soumis à la corrosion – YACINE SAHRAOUI, ALAA CHATEAUNEUF, RABIA KHELIF . . . . .	313
Comportement mécanique des chevilles de fixation : Approche numérique et propagation d'incertitudes – EDGARDO CICCHINELLI, PHILIPPE BRESSOLETTE, ÉRIC FOURNELY. . . . .	327
Actualisation en fatigue temporelle : Actualisation bayésienne de paramètres de loi d'endommagement pour la fatigue temporelle – BENJAMIN ROCHER, MARC FRANÇOIS, FRANCK SCHOEFS, ARNAUD SALOU. . . . .	341
<b>Thème 5 : Méthodes d'évaluation de la fiabilité . . . . .</b>	<b>355</b>
Méthodes d'évaluation de la fiabilité – NICOLAS GAYTON, BRUNO SUDRET . .	357

x Fiabilité des matériaux et des structures

Fatigue en présence de géométrie aléatoire : Proposition de formulation semi-probabiliste du coefficient de concentration de contrainte à partir de calculs aux éléments finis stochastiques – OLIVIER PASQUALINI, FRANCK SCHOEFS, MATHILDE CHEVREUIL, MIKAËL CAZUGUEL . . . . .	359
Analyse probabiliste de structures en dimension stochastique élevée : Application aux toitures bois sous sollicitation sismique – HASSEN RIAHI, PHILIPPE BRESSOLETTE, ALAA CHATEAUNEUF . . . . .	371
Stabilité structurale des barrages-poids : Une approche de fiabilité pour l'évaluation des coefficients de sécurité au glissement PIERRE LÉGER, HARALD KREUZER, OLIVIER DEMORY . . . . .	385
UQLab : Une plate-forme pour la quantification des incertitudes sous Matlab BRUNO SUDRET, STEFANO MARELLI . . . . .	399
<b>Thème 6 : Fiabilité système et optimisation sous incertitude appliquées aux structures et ouvrages . . . . .</b>	<b>411</b>
Fiabilité système et optimisation sous incertitude appliquées aux structures et ouvrages – JULIEN BAROTH, SIDI MOHAMMED ELACHACHI, THIERRY YALAMAS . . . . .	413
Dépendances spatio-temporelles de la résistance des matériaux : Modélisation pour une prise en compte en contexte de calcul non linéaire ALAIN SELLIER, ALAIN MILLARD . . . . .	421
Étude fiabiliste d'une dent déflectrice en béton armé sollicitée par une avalanche de neige dense – ISABELLE OUSSET, DAVID BERTRAND, CLAUDIO CARVAJAL, ALI LIMAM, MOHAMED NAAIM . . . . .	433
Dimensionnement de filets pare-blocs : Une approche fiabiliste JULIEN BAROTH, FRANCK BOURRIER, STÉPHANE LAMBERT . . . . .	447
Calcul de probabilités de défaillance de mécanismes hyperstatistiques avec une méthode de fiabilité système – ANTOINE DUMAS, NICOLAS GAYTON, JEAN-YVES DANTAN . . . . .	459
Gestion patrimoniale d'un réseau d'assainissement : Incertitudes, robustesse et solution optimale – AMINE BENNABI, SIDI MOHAMMED ELACHACHI, FRANCK TAILLANDIER, AURÉLIE TALON, PIERRE BREUL . . . . .	473
Identification du plan de maintenance optimal pour une structure soumise à la fatigue – PIERRE BEAUREPAIRE . . . . .	487

Table des matières xi

<b>Thème 7 : Inspection, maintenance et réparation sous incertitude . . . . .</b>	<b>499</b>
Conférence invitée : DuratiNet : Un projet Interreg au service de la maintenance des infrastructures atlantiques : Présentation des résultats du projet et d'une enquête – FRANCK SCHOEFS . . . . .	501
Inspection, maintenance et réparation sous incertitude – ALAA CHATEAUNEUF, FRANCK SCHOEFS, DENYS BREYSSE . . . . .	511
Carbonatation sous température variable : Effet du réchauffement climatique sur la fiabilité des structures en béton armé – THOMAS DE LARRARD, FRÉDÉRIC DUPRAT, EMILIO BASTIDAS-ARTEAGA, FRANCK SCHOEFS . . . . .	525
Évaluation stochastique de la profondeur de carbonatation et actualisation des prédictions : Benchmark des modèles et méthodologie d'actualisation RODRIGUE DÉCATOIRE, THOMAS DE LARRARD, THIERRY YALAMAS, FRANCK SCHOEFS, SIDI-MOHAMMED ELACHACHI . . . . .	539
Analyse et quantification des incertitudes dans un système d'instrumentation de structures : Application à la détection de chlorures dans le béton par résistivité YANN LECIEUX, FRANCK SCHOEFS, STÉPHANIE BONNET, MICHEL ROCHE . . . . .	553
Influence des incertitudes sur l'épaisseur optimale d'isolation des bâtiments AMINA AÏSSANI, ALAA CHATEAUNEUF, JEAN-PIERRE FONTAINE, PHILIPPE AUDEBERT . . . . .	567
<b>Index d'auteurs . . . . .</b>	<b>581</b>