



Institut pour la **Maîtrise des Risques**
Sûreté de Fonctionnement - Management - Cindyniques



FIMA – Fiabilité et Maintenance
IMdR – Institut pour la Maîtrise des Risques

Etudes de fiabilité et maintenance Cadre de la mécanique et des ouvrages sous sollicitations sévères



Laboratoire 3SR, fédération VOR

J. Baroth

Univ. Grenoble Alpes, 3SR, F-38000 Grenoble, France
CNRS, 3SR, F-38000 Grenoble, France



1. VOR – Lab. 3SR, 2. Equipe RV, 3. Fiabilité et maintenance dans VOR



Plan de la présentation

Introduction

1. Structure fédérative VOR – Laboratoire 3SR

- VOR
- 3SR
- Equipe RV

2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

3. Fiabilité et maintenance au sein du réseau VOR

Conclusion



Séminaire FIMA – IMdR – VOR, 25-09-14



Institut pour la Maîtrise des Risques
Sûreté de Fonctionnement - Management - Cindyniques

1. VOR – Lab. 3SR, 2. Equipe RV, 3. Fiabilité et maintenance dans VOR

1. Structure fédérative VOR – Laboratoire Sols, Solides, Structures - Risques

VOR

12 laboratoires
9 établissements
partenaires
80 chercheurs
~ 30 thèses /an

Laboratoire 3SR
CNRS – UJF- G-INP
> 40 chercheurs

Equipe RV



Séminaire FIMA – IMdR – VOR, 25-09-14



Institut pour la Maîtrise des Risques
Sûreté de Fonctionnement - Management - Cindyniques

1. Structure fédérative VOR – Laboratoire 3SR



<http://vor.inpg.fr>

Direction :

Laurent BAILLET laurent.baillet@ujf-grenoble.fr (Isterre)

Yann MALECOT yann.malecot@3sr-grenoble.fr (3SR)

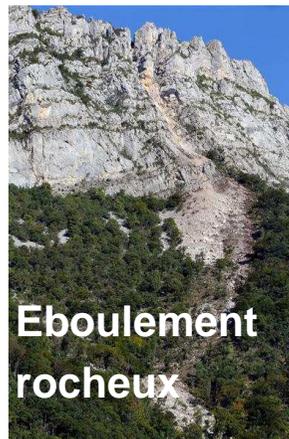
- **Objectifs scientifiques** : soutien aux recherches visant la prévention et la protection face aux risques naturels*
- **Particularités** : pluridisciplinarité des approches, mutualisation des moyens, groupement à l'échelle régionale



Séisme



Glissement de terrain



Eboulement rocheux



Avalanche

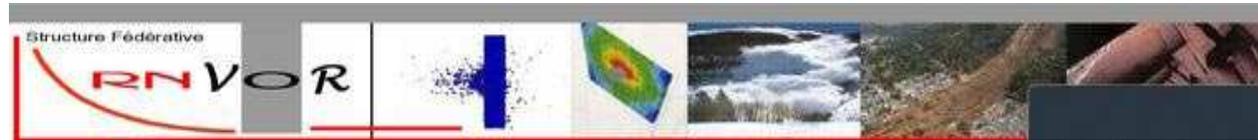


Erosion interne



1. VOR – Lab. 3SR, 2. Equipe RV, 3. Fiabilité et maintenance dans VOR

1. Structure fédérative



<http://vor.inpg.fr>



THEMES

T1. Durabilité des structures

T2. Influence du changement climatique sur les risques naturels

T3. Vulnérabilité et sûreté des grandes infrastructures

T4. Développement de techniques d'évaluation et de cartographie



Séminaire FIMA – IMdR – VOR, 25-09-14



Institut pour la **Maîtrise des Risques**
Sûreté de Fonctionnement - Management - Cindyniques

1. Structure fédérative VOR – Laboratoire 3SR

3SR

Objectifs :

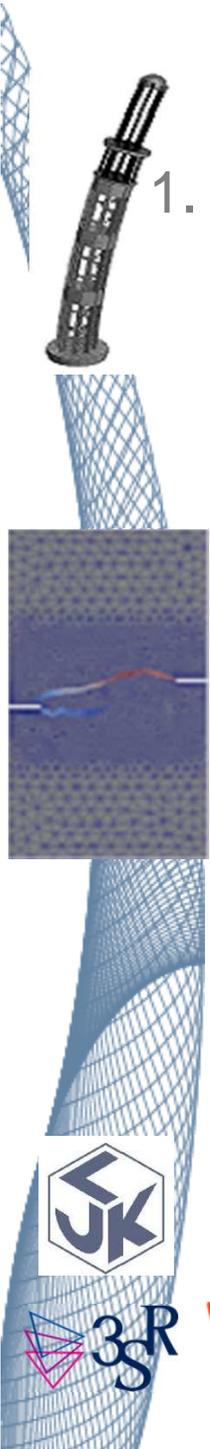
analyser et élaborer des outils pour l'optimisation du design, et la vulnérabilité des ouvrages et des systèmes dans les domaines

- des risques environnementaux et technologiques, pour les
 - stockages souterrains et de surface
 - **risques gravitaires et sismiques**
 - effondrements souterrains (interaction ouvrage-climat)
 - **vis-à-vis de la sûreté des ouvrages sensibles**

–**des comportements mécaniques et la tenue en service des structures** et des gé-ouvrages, des systèmes et milieux solides complexes

Couplage « expérimentation – modélisation »

Couplages « physico-mécaniques » et les analyses « multi-échelles »



1. VOR – Lab. 3SR, 2. Equipe RV, 3. Fiabilité et maintenance dans VOR

1. Structure fédérative VOR – Laboratoire 3SR



« Risques, Vulnérabilité des structures et comportement mécanique des matériaux »

Objectifs : analyser le comportement des matériaux et des structures sous chargements dynamiques, sous conditions extrêmes (durabilité des structures du génie civil)

Approches déterministes + probabilistes : prise en compte des incertitudes (solllicitations, matériaux)

- matériau – microstructure > ouvrage
- approches multi-échelles, expérimentales et numériques ;
- les risques et l'étude de la vulnérabilité des structures, (durabilité et de la sûreté des ouvrages en service)

Thème 1. Approches multi-échelles pour l'analyse des vulnérabilités : expérimentations et modélisations

Thème 2. Approches multi-physiques (THM) et effets différés pour l'analyse de la durabilité



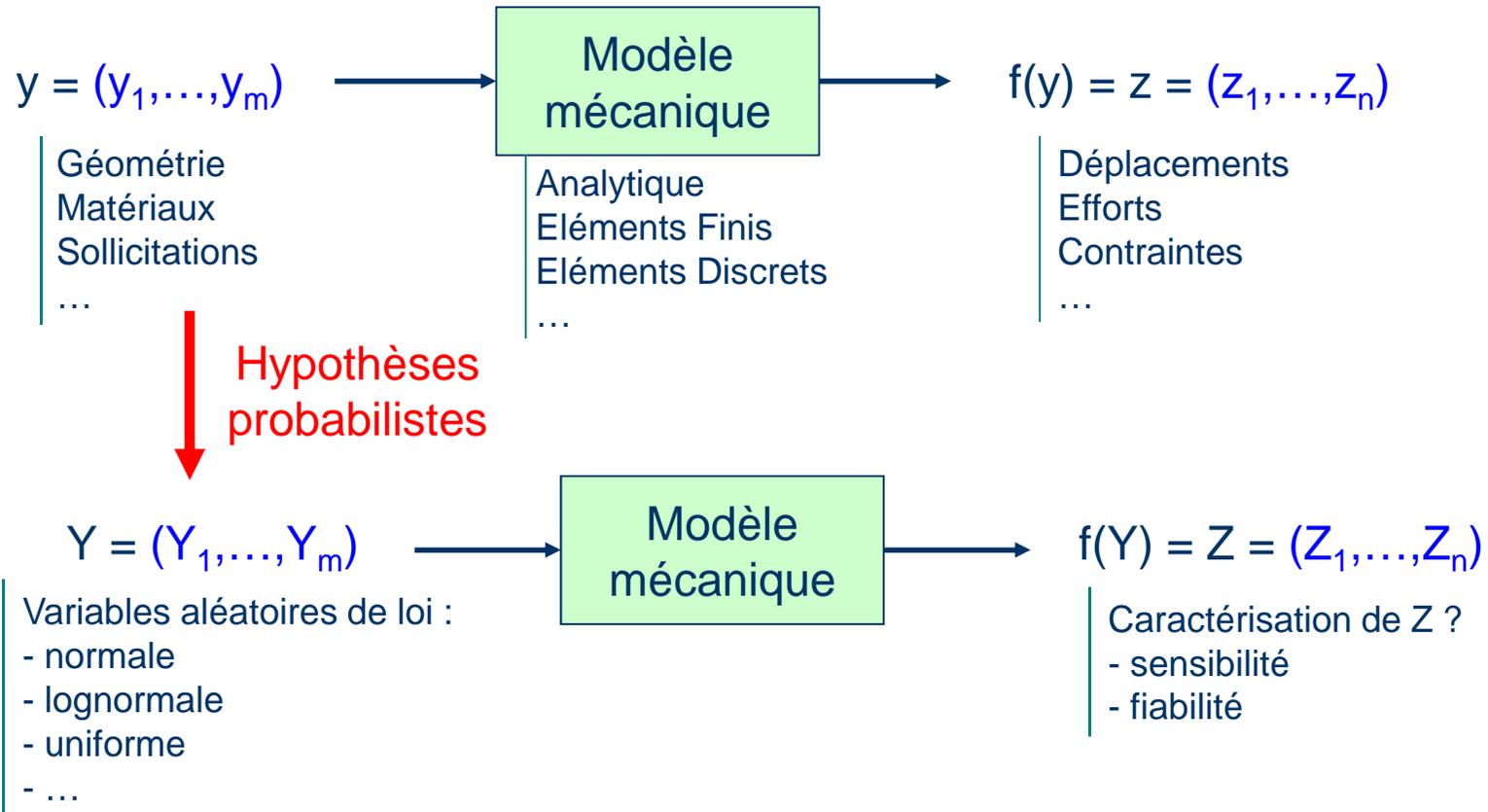
Séminaire FIMA – IMdR – VOR, 25-09-14



Institut pour la Maîtrise des Risques
Sûreté de Fonctionnement - Management - Cindyniques

2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

2.1. Contexte



2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

2.1. Contexte

$$X = T^{-1}(Y) \quad \boxed{T^{-1}} \quad Y \quad \boxed{\text{Modèle mécanique}} \quad Z = (Z_1, \dots, Z_n) = f(Y) = f \circ T(X) = G(X)$$

Ecriture du problème dans l'espace des v.a. Gaussiennes standard

-Manque de données et connaissance :

- Décomposition du problème, quelle fonction (de performance)G ? AMDEC ? caractérisation statistique de Y ?

-Modèles numériques f coûteux et +/- réalistes :

- quelques heures/jours ;
- différentes échelles; multi-physiques...

-Méthodes de fiabilité plus ou moins applicables :

- Monte-Carlo inapplicable si le coût de calcul est trop lourd
- FORM, SORM, Vector-machine... exigent un modèle robuste
- différentes échelles;
- multi-physiques...



2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

2.2 Problématique récurrente

Méthodes permettant de caractériser la loi de $G(X)$?

- en tenant compte de lois de probabilité différentes de Y ;
- en optimisant le nombre d'appels au modèle mécanique.

Méthodes différentes en fonction :

- de la dimension du vecteur aléatoire Y (discrétisation d'un champ ?) ;
- du nombre de degré de liberté du modèle mécanique;
- du degré de non linéarité du modèle
- Du type de programmation du modèle (code maison ? commercial ?)

Développement de méthodes... [Baroth et al. 2006], [Baroth et al. 2007],...
[Baroth et al. 2011],...



2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

2.3. Exemple de méthodes : (i) « quadrature » / point estimate methods

Par ex. [Abramowitz, 1970]

Estimation de moyennes et variances de G

$$\int_{-\infty}^{+\infty} G(x) \cdot p(x) \cdot dx = \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot G(x_i)$$

Fonction de densité
de probabilité de la loi
« d'entrée » $X=T^{-1}(Y)$

poids

points

Tables facilement accessibles pour diverses lois (Gauss-Hermite, Gauss-Legendre...)

Cas M-dimensionnels : N^M calculs : grille de points à optimiser (Smolyak...)

Pour une même dimension, prise en compte de plusieurs lois de probabilité à partir des mêmes points x_i .

2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

2.3. Exemple de méthodes : (ii) « méta-modèles »

(cas de 2 variables)

[Baroth et al. 2011]

$$G(\mathbf{X}) \simeq \tilde{G}(X_1, X_2) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N G_{i,j} L_i(X_1) L_j(X_2)$$

N^2 Nombre de calculs numériques

L_i Base de polynômes : canonique, Hermite ? (« chaos polynomial »), Lagrange...

Calcul des coefficients du développement ?

Calcul des moments statistiques ? de la loi de probabilité ?



2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

2.3. Exemple de méthodes : (iii) « collocation » [Baroth et al. 2007]

(cas de 2 variables)

[Bressolette et al. 2010]

$$G(\mathbf{X}) \simeq \tilde{G}(X_1, X_2) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N G_{i,j} L_i(X_1) L_j(X_2)$$

N^2 Nombre de calculs ED

$$L_i(X) = \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \frac{X - x_k}{x_i - x_k}$$

Polynôme de Lagrange

$$G_{i,j} = G(x_i, x_j)$$

Calcul ED aux réalisations de variables normales centrées réduites (x_i, x_j) (dépendent de N et de la loi)

$$y_i = T(x_i)$$

Point de collocation (valeur spécifique de V ou α , liée à x_i par T , fonction de normalisation gaussienne)

Fonctions de répartition ou de densité de probabilité engendrées à partir de \tilde{G}



2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

2.3. Exemples d'application : (i) Paravalanche

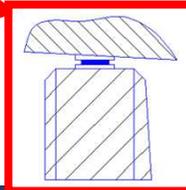
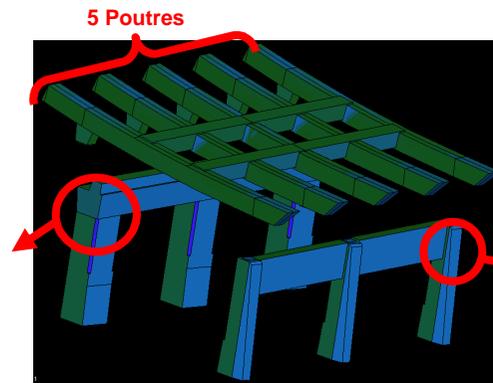
[Daudon et al. 2013]

[Daudon et al. 2010]

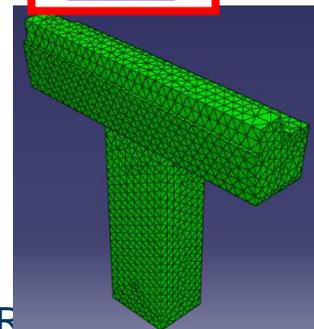
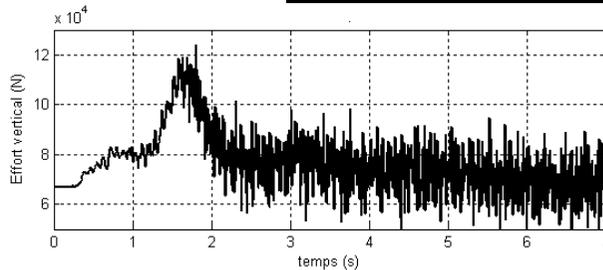
[Perrotin & Tonello, 2006]

Objectif : Prise en compte de la variabilité des efforts engendrés par les avalanches dans la réglementation

Collaborations passées/en cours : 3SR / Locie / LGGE – projet ANR Opale



- Mesure d'1avalanche réelle
- Ecoulements de billes
- Modèle éléments finis de paravalanche (~12h)
- Couplage mécano-probabiliste par quadrature



Variations des efforts et contraintes dans le béton armé ?



2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

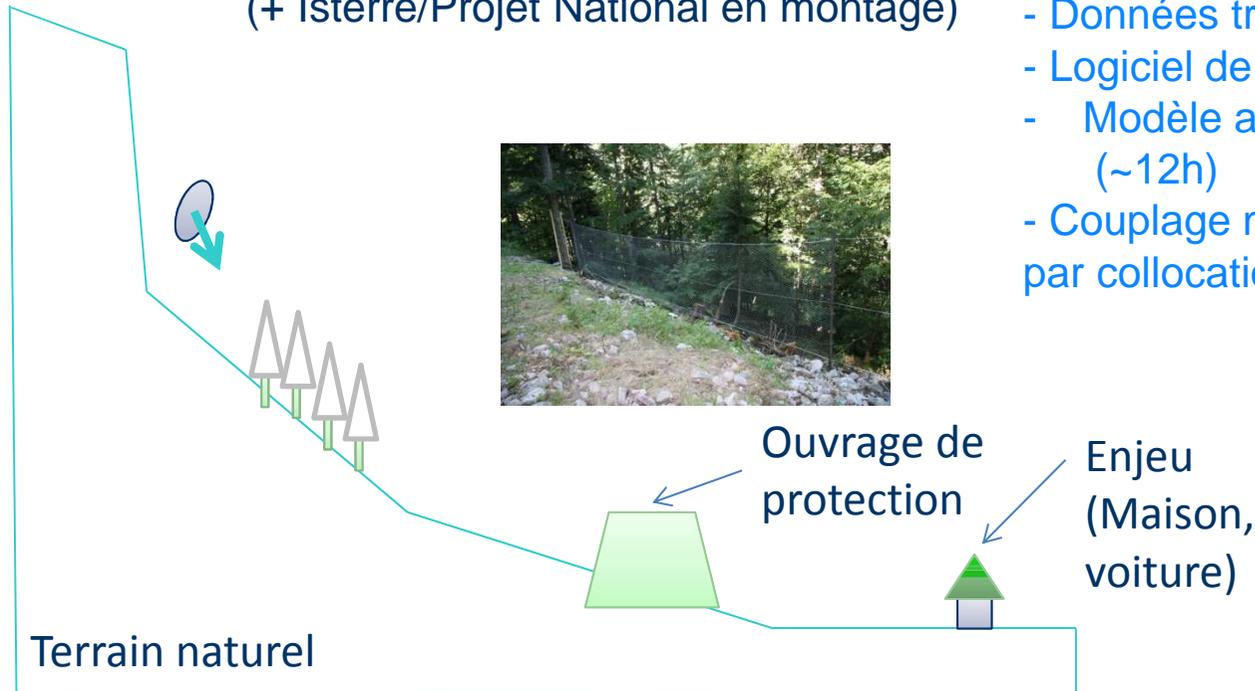
2.3. Exemples d'application : (ii) Pare-blocs [Bourrier et al. 2013]

Objectif : proposer un dimensionnement des ouvrages prenant en compte la variabilité des paramètres, à un coût de calcul raisonnable

Collaboration en cours : 3SR/Irstea

(+ Isterre/Projet National en montage)

- Données trajectographiques
- Logiciel de trajectographie
- Modèle aux éléments discrets (~12h)
- Couplage mécano-probabiliste par collocation



2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

2.3. Exemples d'application : *(iii) réservoirs sous impact/explosion*

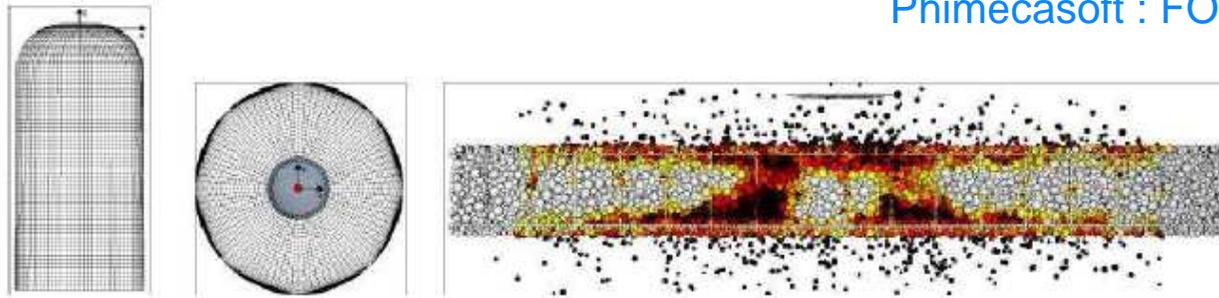
[Daudeville & Baroth, co-ed., 2012]

Objectif : améliorer le dimensionnement de réservoirs et ouvrages de protection sous impact et explosions

Collaboration : 12 partenaires / ANR Vulcain / IMdR



- Données trajectographiques
- Essais d'impact / explosion (~200 k€)
- Modèles empiriques de perforation
- Couplage mécano-fiabiliste par un code commercial (Logiciel Phimécasoft : FORM, SORM, MC...)



2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

2.4. Bibliographie (1/3)

Daudon D., Baroth J., Ma Y., Perrotin P., Mommessin M., Sensitivity of a reinforced concrete protective gallery under a snow avalanche load - Transient behaviour and stochastic finite element analysis, *Structural Safety*, vol: 41, pp: 47-56, 2013.

Bourrier F., Lambert S., Baroth J., A reliability-based approach for the design of rockfall protection fences, *Rock Mech. and Rock Engrg*, accepted (2013)

Mbarka S., Baroth J., Ltifi M., Hassis H., Darve F., Reliability analyses of slope stability: Homogeneous slope with circular failure”, *European JI of Env. & Civ. Egrg - VOL 14/10 - 2010 - pp.1227-1257- doi:10.3166/ejece.14.1227-1257*

Baroth J., Malécot Y., Probabilistic analysis of the inverse analysis of an excavation problem, *Computers and Geotechnics*, vol: 37, pp:391-398, 2010.

Humbert J., Baroth J., Daudeville L., Probabilistic analysis of a pull-out test, *Materials & structures*, vol: 43, pp: 345-355, 2010.

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.*, n° 196, pp. 4419-4429, 2007.

Baroth J., Bodé L., Bressolette P., Fogli M., SFE method using Hermite Polynomials: an approach for solving nonlinear problems with uncertain parameters. *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, n° 195, pp. 6479–6501, 2006.

...



2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

2.4. Bibliographie (2/3)

Fiabilité des ouvrages, Sécurité, sûreté, variabilité, maintenance

(Baroth, Schoefs, Breyse co-ed.), Hermès, 2011

Méthodes qualitatives d'évaluation de la sûreté des ouvrages de génie civil

Méthodes d'analyse système et d'analyse des défaillances

Méthodes pour la modélisation des scénarios de défaillance

Application à un aménagement hydraulique de génie civil

Hétérogénéité & variabilité des matériaux: conséquences sur la sécurité et la sûreté

Les données incertaines en géotechnique - Estimations de la variabilité de propriétés de matériaux - Fiabilité d'une semelle de fondation superficielle

Métamodèles pour la fiabilité des ouvrages

Surfaces de réponse physiques et polynomiales - par chaos polynomial

Méthodes pour la fiabilité des ouvrages dans le temps

Agrégation et unification de données - Approches probabilistes de fiabilité dans le temps - Méthodes MCMC - Actualisation de la fiabilité par REX

Optimisation de la maintenance par la fiabilité

Politiques de maintenance

Modèles de coûts de maintenance

Aspects pratiques : mise en œuvre industrielle et limites dans un contexte multicritère



2. Vulnérabilité des structures sous sollicitations sévères

2.4. Bibliographie (3/3)

Optimisation de la maintenance par la fiabilité

Travaux de Chateauneuf *et Riahi**:

- ** Exploitation de la méthode de collocation pour la maintenance
- *, ** Études de maintenance plus proches de la sûreté de fonctionnement...
- (invitation possible fin 2014 pour Riahi, voire 2015 pour Chateauneuf... ?)

** Riahi H., **Modélisation probabiliste de la propagation de fissures en mode mixte dans une structure et actualisation du temps d'inspection**. Sept. 2012 –PhD -ENIM–Tunisie

* Par ex., Faddoul R., Raphael W., Chateauneuf A., A generalised partially observable Markov decision process updated by decision trees for **maintenance optimisation**, Structure and Infrastructure Eng 7 (10), 783-796, 2011

Y Sahraoui, R Khelif, A Chateauneuf, **Maintenance planning** under imperfect inspections of corroded pipelines, Int Journal of Pressure Vessels and Piping 104, 76-82, 2013



3. **Fiabilité et maintenance au sein de VOR**

3.1. Rappel des objectifs de VOR

VOR : ~ 100 chercheurs, ~ 100 doctorants ou post-doctorants avec pour intérêts :

- comprendre les phénomènes naturels et leurs actions sur les ouvrages,
- outils pour **l'analyse de la vulnérabilité** des infrastructures,
- **contribuer à élaborer des outils de gestion du risque.**

Objectif : **favoriser les collaborations** entre les communautés, des Sciences pour l'Ingénieur / de la terre, **en lien avec des mathématiciens / numériques.**

Pour y parvenir, trois types de soutiens :

- production scientifiques à travers le financement de projets pluridisciplinaires,
- **à l'animation scientifique grâce à l'organisation d'ateliers,**
- à la formation doctorale via l'organisation d'écoles ou le cofinancement de colloques (gratuit pour les doctorants des labos de VOR).



3. **Fiabilité et maintenance au sein de VOR**

3.2. VOR, membre du GIS MRGenCi



Groupement d'intérêt scientifique **Maîtrise des Risques en Génie Civil**

Direction : F. Schoefs*, Pr, Univ. de Nantes <http://www.mrgenci.univ-nantes.fr>

Objectifs : coordonner et animer des actions puis diffuser les résultats concernant :

- groupes de travail et stratégies scientifiques pluridisciplinaires (physique et mécanique, matériaux, environnement, sciences de la décision...)
- évaluation des incidences des risques par les ingénieurs, justification des recommandations ou des règles élaborées dans un cadre réglementaire ;
- traduction et prise en compte : réglementations / pratiques professionnelles.

Formation : Cyberisk : déf. / site

ANRs : Evadéos : Evaluation non destructive pour la prévision de la dégradation des structures et l'optimisation de leur suivi

Projet nationaux : GEDI – Gestion des Infrastructures



Séminaire **FIMA** – IMdR – VOR, 25-09-14



Institut pour la **Maîtrise des Risques**
Sûreté de Fonctionnement - Management - Cindyniques

3. **Fiabilité et maintenance au sein de VOR**

3.2. VOR, membre du GIS MRGenCi



Papiers, par ex.

- Stochastic improvement of inspection and maintenance of corroding reinforced concrete structures placed in unsaturated environments, E Bastidas-Arteaga, F Schoefs Eng Struct, 2012
- D. Breysse, Maîtrise des risques en génie civil, Hermès-Lavoisier.

Conférences, par ex.

- Session au Congrès Français de Mécanique
- Sessions à Icosar, International Conf. on Structural Safety & Reliability
- Journées SHMonitoring (Instrumentation, suivi des structures)
- Journées Fiabilité des Matériaux et Structures (JFMS)

...



3. Fiabilité et maintenance au sein de VOR

3.3. Les journées Fiabilité des matériaux et structures (JFMS)

Thèmes scientifiques : basées sur les méthodes

8^{èmes} Journées

Fiabilité des
MATÉRIAUX & DES STRUCTURES

Aix-en-Provence,
9 et 10 avril 2014

- **Méthodes** qualitatives pour la sûreté de fonctionnement
- Modèles des données et des connaissances
- Modèles probabilistes de la dégradation
- **Méthodes** d'évaluation de la fiabilité
- Fiabilité système et optimisation sous incertitude
- Inspection, Maintenance et Réparation sous incertitude

Prochaine édition : Nancy, mars 2016... objectifs pour FIMA... ?

- Participation de membres (JFMS12=3, JFMS14=1, JFMS16= ?)
- Vers une communication commune (Baroth & ?) ?
- Comité scientifique de l'un des thèmes ?

irstea

RN VOR

MRGenCi
Maîtrise des Risques en Génie Civil



3SR

RN VOR

Séminaire FIMA – IMdR – VOR, 25-09-14



Institut pour la Maîtrise des Risques
Sûreté de Fonctionnement - Management - Cindyniques

Bilan - Perspectives

- FIMA répond à un besoin des chercheurs en mécanique / génie civil
- > Collaborer dans le groupe en vue de
 - + participer à des conférences complémentaires (par ex. JFMS),
ou inversement JB > conf. davantage « Sûreté de fonction »
 - + répondre à un appel à projets (VOR, IMdR, ANR,...) ?
- > Faire appel à des « nouveaux » acteurs dans / hors Grenoble ;
- Penser à la communauté grenobloise, directement concernée par la fiabilité et la maintenance, mais pas directement par la recherche
 - + STRMTG : Service Technique des Remontées Mécaniques, des Tramways et des systèmes Guidés
 - + Polytech'Grenoble : départements Géotechnique/Prévention des risques
 - + IUT-GCCD - Projet de création d'une licence professionnelle « Maintenance et réparation des ouvrages de travaux publics »
 - + etc.
- > Imaginer une autre journée (2015, 2016 ?) dans un format à imaginer ?



Annexe : laboratoires de VOR



Membres laboratoires universitaires

3SR.....Laboratoire Sols, Solides, Structures-Risques (<http://www.3sr-grenoble.fr>)

LAMALaboratoire de MATHématiques (www.lama.univ-savoie.fr)

LGGELaboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
(<http://lgge.osug.fr>)

IsterreInstitut des Sciences de la Terre (<http://isterre.fr/isterre>)

LOCIE ...Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement
(www.polytech.univ-savoie.fr/recherche/nos-laboratoires/laboratoire-locie.html)

LTDSLaboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (ltds.ec-lyon.fr/)

EDYTEM ...Laboratoire Environnements, DYnamiques et TERRitoires de la Montagne
(edytem.univ-savoie.fr)

Membres centres de recherches

CEN.....Centre d'étude de la neige (<http://www.cnrm-game.fr>)

CEREMA.....Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, Direction territoriale Centre Est (<http://www.cete-lyon.equipement.gouv.fr/>)

Unité ETNA/IRSTEA..Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, Érosion torrentielle, neige et avalanches (<http://www.irstea.fr/etgr>)

LGCIE...Laboratoire de génie civil et d'ingénierie environnementale (<http://lgcie.insa-lyon.fr>)

