

# Méthodes de propagation d'incertitudes pour les problèmes multi-échelles – identification et propagation de champs aléatoires dans les calculs de microstructures

STAGE DE MASTER ET THESE DE DOCTORAT

## ORGANISMES D'ACCUEIL ET CONTEXTE

Phimeca est une société de haute technologie spécialisée dans les domaines de l'ingénierie systèmes (conception de structures et machines complexes, sûreté de fonctionnement, soutien logistique intégré, etc.) et de la simulation numérique avancée en mécanique. Ses compétences uniques dans le domaine du *traitement des incertitudes* dans la simulation, par des approches statistiques et probabilistes, en font un acteur reconnu par de grands groupes industriels (EDF, EADS, Renault, Lafarge, Valeo, etc.) et actif dans la recherche internationale dans ce domaine.

Jeune pousse du Laboratoire de Mécanique et Ingénieries (LaMI) de l'Institut Français de Mécanique avancée (IFMA, Clermont-Ferrand) créée en 2001, Phimeca compte aujourd'hui 25 collaborateurs, dont une vingtaine d'ingénieurs et docteurs, répartis sur ses trois sites : Cournon (Siège), Ollioules (Agence Sud-Est) et Paris (Agence Ile-de-France).

Phimeca a développé avec EDF R&D (Département MMC, Matériaux et Mécanique des Composants) et le LaMI (IFMA) un partenariat pérenne sur les méthodes probabilistes pour le traitement des incertitudes dans les domaines de la mécanique des structures, de la mécanique de la rupture, de la fatigue, etc. Les trois partenaires souhaitent orienter l'application de ces méthodes vers des problèmes de mécanique des matériaux à travers des modélisations multi-échelles.

Le stage de master et la thèse proposés s'inscrivent dans le cadre de ce partenariat : le stage est proposé par EDF R&D, la thèse est financée par Phimeca en convention CIFRE, en étroite relation avec le département MMC d'EDF R&D.

## DESCRIPTIF DU SUJET DE MASTER

La compréhension fine des mécanismes de rupture des matériaux métalliques nécessite une modélisation à l'échelle microscopique du grain. Pour représenter finement le matériau à cette échelle, il est nécessaire de modéliser la variabilité spatiale des propriétés mécaniques des grains (élastiques et élastoplastiques), leur taille, leur orientation, etc.

De nouveaux moyens expérimentaux tels que les nano-indenteurs ou les microscopes EBSD permettent aujourd'hui d'effectuer des mesures locales de tels champs de propriétés. L'objectif du stage est double. Il s'agit :

- de mettre au point une méthode d'*identification probabiliste de champs aléatoires* à partir d'une étude bibliographique approfondie et d'une comparaison des outils de calculs libres disponibles (sous Matlab et R). On étudiera en particulier les approches par krigeage et par chaos polynomial. On se limitera dans le stage aux champs aléatoires gaussiens.

- de faire ensuite un calcul de propagation d'incertitudes sur une structure simple représentative (e.g. plaque) représentée par éléments finis (Code\_Aster) dans lequel le(s) champ(s) aléatoire(s) de propriétés sera (seront) introduit(s).

## DESCRIPTIF DU SUJET DE THESE

La durée de vie des réacteurs à eau pressurisée des centrales nucléaires est liée à la tenue de la cuve de réacteur en cas de fonctionnel accidentel. Le refroidissement rapide par injection d'eau froide dans le circuit primaire en cas d'APRP (accident par perte de réfrigérant primaire) conduit à un choc thermique pressurisé sur la paroi interne de la cuve. La justification de la tenue de la cuve dans cette situation est liée à la connaissance fine de la ténacité du matériau, qui évolue dans le temps en fonction de l'irradiation reçue.

EDF R&D a développé depuis de nombreuses années des recherches autour des mécanismes de rupture fragile de l'acier de cuve et des méthodes de prévision de la tenue des structures à partir de la connaissance des hétérogénéités à l'échelle du matériau [1,2,3]. Ces recherches menées en partenariat avec le CEA et au travers de projets européens tels que PERFECT et PERFORM conduisent à des modèles micromécaniques de rupture, qui s'appuient notamment sur des calculs d'agrégats polycristallins. Ces modèles supposent la rupture par propagation instable du clivage à partir d'un micro-défaut.

Des études préliminaires ont montré que les méthodes de *mécanique probabiliste* développées pour prévoir le comportement de structures macroscopiques en présence d'incertitudes (méthodes de simulation, méthodes spectrales de type chaos polynomial [4,5]) pouvaient être utilisées dans le cadre de la modélisation multi-échelles des matériaux. L'objectif du travail de thèse est de faire le lien entre ces différentes disciplines, autour des thèmes de l'identification de la variabilité spatiale des hétérogénéités à l'échelle microscopique et de l'étude de leur impact sur la tenue à la rupture des structures.

Dans cette optique, le travail de thèse se divise en trois parties principales :

- étendre l'identification de champs aléatoires (voir sujet de stage) au cas non gaussien, et appliquer les méthodes retenues à l'identification de propriétés matériaux nécessaires au calcul d'agrégats polycristallins. On envisagera également l'application de la méthode à la représentation stochastique des champs de contrainte et de déformation calculés.
- effectuer des calculs d'agrégats en prenant en compte les incertitudes modélisées à partir des mesures de champs ;
- intégrer les résultats dans une modélisation de type « approche locale de la mécanique de la rupture », de façon à établir la probabilité de rupture au niveau microscopique et faire le lien avec la tenue macroscopique de la structure.

## Références

- [1] Tanguy, B. (2001) *Modélisation de l'essai Charpy par l'approche locale de la rupture. Application au cas de l'acier 16MND5 dans le domaine de la transition*. Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- [2] Mathieu, J.-P. (2006) *Analyse et modélisation micromécanique du comportement et de la rupture fragile de l'acier 16MND5 : prise en compte des hétérogénéités microstructurales*. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, CER de Metz.
- [3] Libert, M. (2007) *Etudes expérimentale et numérique de l'effet des mécanismes de plasticité sur la rupture fragile par clivage dans les aciers faiblement alliés*. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris.

- [4] Berveiller, M. (2005) *Eléments finis stochastiques : approches intrusive et non intrusive pour des analyses de fiabilité*, Thèse de Doctorat de l'Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand).
- [5] Sudret, B. (2007). *Uncertainty propagation and sensitivity analysis in mechanical models - Contributions to structural reliability and stochastic spectral methods*. Habilitation à diriger des recherches, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

## FORMATION ET PROFIL DU CANDIDAT

Titulaire d'un diplôme d'ingénieur ou de master à dominante mécanique et mathématiques appliquées, le candidat dispose de solides connaissances dans les domaines suivants : mécanique des milieux continus, calcul aux éléments finis (linéaire/non linéaire), probabilités et statistiques. Il maîtrise un langage de programmation scientifique de type Matlab, Scilab.

Motivé par un environnement de travail ouvert sur plusieurs partenaires (Phimeca, EDF R&D, LaMI/IFMA, Projet européen PERFORM), le candidat souhaite aborder une problématique d'actualité (incertitudes et problèmes multi-échelles) en la développant des aspects théoriques à la mise en œuvre dans un contexte industriel.

## INFORMATIONS GENERALES

Le stage de master débute au printemps 2009, pour une durée de 5 à 6 mois. Le lieu habituel de travail est le site des Renardières d'EDF R&D (Moret-sur-Loing, 77).

La thèse débute au 1<sup>er</sup> octobre 2009. Le candidat est inscrit à l'Ecole Doctorale « Sciences pour l'ingénieur » de l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand et rattaché au Laboratoire de Mécanique et Ingénierie (LaMI) commun à l'IFMA et l'Université. La thèse est financée par Phimeca en convention CIFRE.

Le lieu habituel de travail pour la thèse est l'Agence Ile-de-France de Phimeca situé à Paris (12<sup>ème</sup> Arrdt). Des déplacements réguliers sont à prévoir sur le site d'EDF R&D des Renardières (Moret-sur-Loing, 77).

## DEPOT DE CANDIDATURE

Le dossier de candidature est à envoyer par courriel à Bruno Sudret (sudret@phimeca.com). Il comprend :

- une lettre de motivation ;
- un CV détaillé ;
- un relevé des notes des deux dernières années scolaires ;
- une lettre de recommandation.

## CONTACTS

<p><b>Bruno SUDRET</b> Directeur de la Recherche et de la Stratégie</p> <p>PHIMECA Engineering S.A. 5 Rue Legraverend 75012 Paris Tél : +33 1 53 02 90 03 <a href="http://www.phimeca.com">http://www.phimeca.com</a></p>	<p><b>Marc BERVEILLER</b> Ingénieur-chercheur</p> <p>EDF R&amp;D Site des Renardières 77818 Moret-sur-Loing Cedex Tél : +33 1 60 73 73 66</p>
---	---