

## PROPOSITION DE SUJET DE THÈSE

### **Planification adaptative d'expériences et krigeage non-stationnaire : application à la prise en compte des incertitudes dans les études mécaniques en sûreté nucléaire**

#### **Contexte et motivation :**

Ce sujet concerne la mise en oeuvre de méthodes statistiques pour l'optimisation du temps de calcul de codes complexes en présence d'incertitudes. Il s'inscrit dans le cadre du consortium ReDICE qui réunit partenaires industriels (EDF, Renault, IFP, CEA, IRSN) et académiques (Mines de St Etienne, Centrale Lyon, Université de Berne) autour de la question de l'exploration des gros codes de calculs. Cette thématique est particulièrement importante pour l'IRSN qui utilise, de façon intensive, dans sa mission d'expertise, des logiciels simulant les phénomènes physiques au sein d'un réacteur nucléaire. En pratique, les données d'entrée de ces codes ne sont pas connues précisément. On parle alors de grandeurs incertaines. L'impact de ces incertitudes sur les évaluations numériques doit donc être estimé. A cet effet, l'IRSN a développé au cours de ces 10 dernières années de nouvelles approches pour la modélisation et la propagation des incertitudes à travers des codes de calcul [1]. L'étape de propagation s'appuie le plus souvent sur des techniques de type Monte-Carlo. Elle peut devenir numériquement coûteuse, un très grand nombre de simulations étant requis pour explorer l'ensemble de variation des données d'entrée et décrire fidèlement le comportement des sorties d'intérêt. Afin de réduire le coût de calcul, des approches statistiques basées sur la théorie des plans d'expériences [2] sont utilisées. Il existe deux grandes stratégies pour construire un plan d'expériences : la première s'appuie sur des considérations géométriques dans l'espace des entrées et conduit à des plans qui fournissent une bonne couverture de l'espace de variation des données d'entrée incertaines. La seconde suppose que la relation entre la sortie et les entrées du code de calcul peut être approchée par un modèle simplifié et consiste à choisir les expériences numériques de façon à optimiser une fonction coût qui traduit la qualité d'approximation du modèle ([3], [4]). Cette dernière approche - quand l'approximation se base sur un modèle de krigeage [5] - a été appliquée avec succès au sein de l'IRSN et a conduit notamment à des résultats prometteurs dans les études de fissuration des gaines de combustible [6]. Son intérêt se situe dans la flexibilité du choix de la fonction coût qui permet de raffiner automatiquement les simulations dans des zones pertinentes pour l'analyse de risque (région où la sortie dépasse un seuil de sûreté par exemple). Cependant, l'approximation par krigeage que l'on fixe avant de faire la planification suppose le plus souvent que les données à approcher sont stationnaires, ce qui est rarement le cas en pratique (discontinuité, oscillations à différentes fréquences). Cela nécessite alors de définir plusieurs fonctions coûts ainsi qu'une règle pour les agréger.

**Afin d'éviter des choix arbitraires, cette thèse est donc dédiée au développement, à l'implémentation et à l'application de nouvelles techniques de planification pour capturer toutes les caractéristiques d'intérêt de données non stationnaires.** Plutôt que d'introduire une fonction de pondération qui favoriserait l'exploration de zones spécifiques, on s'appuiera ici sur une modélisation à l'aide de covariances non-stationnaires par zones et sur le couplage entre krigeage et algorithmes de segmentation de données. Pour la segmentation, on s'intéressera en particulier aux techniques à base d'ondelettes [8] très populaires dans le cadre du traitement d'images et qui ont récemment fourni des résultats prometteurs pour l'exploration des codes de calcul.

## Déroulement

Une première étape de la thèse consistera d'abord à réaliser une étude bibliographique sur les techniques géostatistiques de krigeage [5], de planification d'expériences ([2], [3], [4]) ainsi que de modélisation à l'aide de covariances non stationnaires ([9],[10],[11],[12]). Il s'agira ensuite de proposer une nouvelle approche de planification adaptative qui intégrera une étape de segmentation à base d'ondelettes par exemple en s'inspirant des travaux de [13]. Pour ce travail, le doctorant pourra bénéficier de l'appui de l'Ecole Centrale Marseille (Prof. Jacques Liandrat) et de l'Université de Berne (Dr. David Ginsbourger). Il aura également des interactions avec les membres du consortium ReDICE spécialistes de la question de l'exploration des codes de calcul complexes. Dans un deuxième temps, le doctorant appliquera la méthode construite et analysée dans la première étape à des cas synthétiques puis à plusieurs cas réels issus des activités en mécanique du laboratoire commun IRSN-CNRS-UM2 MIST. Le nouvel algorithme de planification pourra notamment être utilisé pour les études de fissuration des gaines de combustible à l'aide du logiciel Xper [14]. A l'échelle microscopique, la gaine est modélisée par un matériau bi-phasé composé d'une matrice en Zircaloy et d'inclusions sous forme de plaquettes d'hydrures. On pourra s'intéresser en particulier à l'influence sur l'énergie de rupture apparente du gainage hydruré : 1/ des longueurs d'inclusion et 2/ du rapport entre la cohésion matrice/inclusion et la ténacité des inclusions. De plus, compte tenu de la généralité des méthodes développées, une application à la thématique extension de la durée de vie d'exploitation des centrales nucléaires est également envisagée.

## Bibliographie

- [1] E. Chojnacki, J. Baccou et S. Destercke , *Numerical accuracy and efficiency in the treatment of epistemical and aleatory uncertainty*, International J. of General Systems, 39(7), 683-704, 2010.
- [2] G. Box et N. Draper, *Empirical model-building and response surfaces*, Wiley series in probability and mathematical statistics, 1987.
- [3] J. Sacks, W.J. Welch, T.J. Mitchell and P. Wynn, *Design and analysis of computer experiments*, Statistical Science, 4(4), 409-423, 1989.
- [4] V. Picheny, D. Ginsbourger, O. Roustant, R.T. Haftka, *Adaptive designs of experiments for accurate approximation of a target region*, J. Mech. Des., 132(7), 2010.
- [5] N. Cressie, *Statistics for spatial data*, Wiley series in probability and mathematical statistics, 1993.
- [6] T. Mokhtari, *Planification adaptative d'expériences numériques*, Rapport TFE, ENSMSE, 2012.
- [7] L. Buslig, J. Baccou et V. Picheny, *Construction and efficient implementation of adaptive objective-based DoEs*, soumis à Math. Geo., 2012.
- [8] I. Daubechies, *Ten lectures on wavelets*, SIAM, 1992
- [9] Y. Xiong, W. Chen, D. Apley et X. Ding, *A non-stationary covariance-based Kriging method for metamodelling in engineering design*, Int. J. for Num. Meth. in Engineering, 71, 733-756, 2007.
- [10] D.J.J. Toal and A.J. Keane, *Non-Stationary Kriging for Design Optimization*, Engineering Optimization, 44(6), 741-765, DOI: 10.1080/0305215X.2011.607816.
- [11] S. Ba and V. Roshan Joseph, *Composite Gaussian Process Models for Emulating Expensive Functions*, Annals of Applied Statistics, to appear, 2012.
- [12] *tgp: An R Package for Bayesian Nonstationary, Semiparametric Nonlinear Regression and Design by Treed Gaussian Process Models*, J. of Statistical Software, 19(9), 2007.
- [13] D. Castano et A. Kunoth, *Robust regression of scattered data with adaptive Spline-Wavelets*, IEEE Trans. Imag. Proc., 15 (6), 1621-1632, 2006.
- [14] F. Perales, F. Dubois, Y. Monerie, B. Piar, L. Stainier, *A NonSmooth Contact Dynamics-based multi-domain solver. Code coupling (Xper) and application to fracture*, Eur. J. Comp. Mech. 19, 389-417, 2010.