



## **Soutenance de thèse – Luc Bonnet**

Robust certification of aerodynamic design by concentration-of-measure inequalities

Certification robuste d'un dimensionnement aérodynamique par des inégalités de concentration de mesure

**Lundi 13 décembre 2021 à 14h 00**

Amphi I à CentraleSupélec  
(3 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, bâtiment Eiffel) à 14h

**Le format est hybride présentiel/distanciel.**

Le lien de la visio sera communiqué par E. Savin sur demande.

**Devant le jury composé de :**

**Examineurs :**

Didier Clouteau, Professeur CentraleSupélec,

Olivier Le Maître, Directeur de recherche CNRS Ecole Polytechnique,

**Rapporteurs :**

Paola Cinnella, Professeur Sorbonne Université,

Clémentine Prieur, Professeur Université Grenoble Alpes,

**Directeur de thèse :**

Eric Savin, Ingénieur de recherche ONERA, Professeur CentraleSupélec,

## Résumé :

The expected performance of engineering systems can significantly differ from their operational performance due to the variability of some parameters they depend on. Usually, the design stage of these systems is divided into two different phases. The first phase consists in determining the pre-optimal design. Through the use of numerical simulations for example, the best possible design is chosen. The issue is to take into account the ideal performances to be attained by formulating hypotheses-which can be subjective-characterizing the variability of different parameters. The second phase consists in certifying through full-scale experiments that the design achieved in the first phase is valid. In this way, the post-optimal design is specified. This second phase is the most expensive one. Optimal Uncertainty Quantification (OUQ) is a powerful mathematical tool that can be used to rigorously bound the probability of exceeding a given performance threshold for uncertain operational conditions or system characteristics. This approach leads to the solution of an optimization problem on a set of admissible probability measures. The optimization setting is a space of infinite dimension but it can be reduced to an equivalent finite dimensional optimization problem. This thesis work focuses, in a first step, on the application of the OUQ tool concerning, in particular, cases from the aeronautical domain, in order to rigorously bound the variations of performance functions classically studied in aerodynamics, such as the lift or the drag. Nevertheless this approach remains complex even after reduction of the optimization problem, and the accuracy of the obtained results is thus impacted. In order to overcome this difficulty, an algorithm has been formulated that allows to ensure the accuracy of these numerical results. It has been validated on simple validation test cases as well as on a more complex aerodynamic case. Still the application of the OUQ framework requires to evaluate the performance function of the system several tens of thousands of times. Therefore the use of a time-consuming model is not feasible and a computationally cheap model is required. With this in mind, several methods are subsequently presented for the construction of surrogate models that are simple to evaluate. A first approach based on the Kernel Flow algorithm initially applied to a classification problem, is extended to a regression problem for the determination of the kernel (covariance) function in Gaussian process regression. Then two new algorithms are presented. These algorithms use the equivalence between the Gaussian process regression approach and the Reproducing Kernel Hilbert Space (RKHS) approach to determine the appropriate kernel function. These different constructions of surrogate models are applied to validation test cases and more complex objective functions pertaining to aerodynamic applications.

Mots clés : Concentration-of-measure inequalities, probability theory, certification, fluid mechanics, aerodynamics

La performance attendue d'un système peut généralement différer de sa performance opérationnelle en raison de la variabilité de certains paramètres. Habituellement, la phase de conception est divisée en deux phases différentes. La première phase consiste à déterminer la conception pré-optimale. Grâce à l'utilisation de logiciels numériques, la meilleure conception possible est choisie. Il s'agit de tenir compte de certaines performances idéales à atteindre en formulant des hypothèses - qui peuvent être subjectives - traduisant la variabilité de certains paramètres. La deuxième phase consiste, quant à elle, à certifier par des expériences à taille réelle que la conception déterminée précédemment est valide. La conception post-optimale est ainsi spécifiée. Cette deuxième phase est la plus coûteuse. L'Optimal Uncertainty Quantification (OUQ) est un outil mathématique puissant qui peut être utilisé pour borner rigoureusement la probabilité de dépasser un seuil de performance donné pour des conditions opérationnelles ou des caractéristiques de système incertaines. Cet outil conduit à la résolution d'un problème d'optimisation sur l'ensemble des mesures de probabilités admissibles. Celui-ci est a priori formulé dans un espace de dimension infinie mais il peut être réduit à un problème d'optimisation équivalent en dimension finie. Ce travail de thèse porte, dans un premier temps, sur l'application de l'outil OUQ concernant notamment des cas issus du domaine de l'aéronautique permettant de borner rigoureusement la variation de fonctions de performance classiquement étudiées en aérodynamique, telles que la portance ou la traînée. Néanmoins, même après réduction du problème d'optimisation, cette approche demeure complexe et la précision des résultats obtenus en est ainsi impactée. Afin de pallier cette difficulté, un algorithme permettant d'assurer la validité de ces résultats numériques a été par la suite formulé. L'algorithme a été validé sur des cas tests numériques ainsi que sur un cas aérodynamique. Quoi qu'il en soit, l'application de la méthode OUQ nécessite d'évaluer la fonction de performance du système plusieurs dizaines de milliers de fois. L'usage d'un modèle peu coûteux en termes de temps est donc requis. Dans cette optique, plusieurs méthodes qui permettent de construire des modèles de substitution rapides à évaluer sont finalement présentées. Une première méthode fondée sur l'algorithme Kernel Flow, initialement appliquée à un problème de classification, est étendue à un problème de régression permettant la détermination du noyau d'un modèle de substitution de type processus gaussien.

Puis deux nouveaux algorithmes sont présentés. Ces algorithmes utilisent l'équivalence qui existe entre l'approche processus gaussien et l'approche par espace de Hilbert à noyau reproduisant (Reproducing Kernel Hilbert Space, RKHS) afin de déterminer le noyau adéquat. Ces différentes méthodes de construction de modèles de substitution sont appliquées au travers de plusieurs cas tests dont des cas du domaine aérodynamique.

Mots clés : Inégalités de concentration de la mesure, théorie des probabilités, certification, mécanique des fluides, aérodynamique