

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

### Intitulé : Analyse de sensibilité pour systèmes multidisciplinaires

Référence : **SNA-DTIS-2023-09**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse** : Octobre 2023

**Date limite de candidature** : Juin 2023

**Mots clés** Analyse de sensibilité, système multidisciplinaire, conception de systèmes complexes, quantification d'incertitudes, systèmes multiphysiques

#### Profil et compétences recherchées

Ecole d'Ingénieur ou Master 2, orientation/spécialisation en mathématiques appliquées (optimisation, probabilités / statistiques)

#### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Le contexte de cette thèse est l'élaboration de méthodes d'analyse de sensibilité pour systèmes multidisciplinaires / multiphysiques sur deux aspects : l'optimisation de systèmes complexes ou l'évaluation de leurs performances en présence d'incertitudes.

L'optimisation et la prise en compte des incertitudes dans les études de conception de systèmes complexes comme les véhicules aérospatiaux, les systèmes éoliens ou les machines électriques soulèvent de nombreuses difficultés méthodologiques. En effet, la conception de ce type de systèmes est couramment effectuée au moyen de processus multidisciplinaires qui couplent un certain nombre de codes de calculs modélisant différentes disciplines/physiques (par exemple dans le domaine spatial : propulsion, aérodynamique, structure, trajectoire, etc.). La gestion de ces couplages interdisciplinaires fait appel à des méthodes numériques itératives garantissant la validité des échanges entre les modèles disciplinaires au sein du processus de conception. Les techniques d'optimisation et les méthodologies de propagation d'incertitudes pour systèmes multidisciplinaires / multiphysiques sont souvent très gourmandes en temps de calculs car elles superposent la gestion des couplages interdisciplinaires, l'optimisation et / ou la propagation d'incertitudes [1, 2]. Ainsi, un axe de recherche actif consiste à développer des approches d'optimisation multiphysique et de quantification d'incertitudes efficaces pour ce type de systèmes tout en maîtrisant le coût de calculs associé.

Dans le cadre de systèmes complexes, la grande dimensionnalité du problème en termes de variables de conception et / ou de variables incertaines est une problématique majeure venant s'associer à celle du temps de calculs. Une stratégie pour contrôler le coût calculatoire d'une telle approche consiste à faire appel à des méthodes d'analyse de sensibilité pour un système couplé. Celles-ci permettent ainsi de classer l'influence des variables d'optimisation ou des paramètres incertains (suivant les études à mener) sur les performances du système multi-physique.

- D'une part, dans un contexte d'optimisation [7], l'analyse de sensibilité va ainsi permettre d'identifier les variables de conception ayant le plus d'influence sur les fonctions objectifs et contraintes dans la région de l'optimum global. Il est alors possible de réduire l'espace de recherche en ne considérant que les variables d'optimisation les plus influentes et ainsi réduire le coût de calcul de la résolution du problème d'optimisation.
- D'autre part, dans le contexte de la propagation d'incertitudes [9], les paramètres incertains proviennent de méconnaissances de modélisation impliquées dans les différentes disciplines (e.g., incertitudes portant sur la masse des structures, sur les performances propulsives, sur les caractéristiques aérodynamiques). Cette analyse permet d'identifier les incertitudes les plus critiques qui pourraient nécessiter une meilleure caractérisation. Par ailleurs, elle permet de figer les incertitudes peu influentes et ainsi réduire la dimension du problème étudié.

Classiquement, les analyses de sensibilité reposent sur différents indices de sensibilité (e.g., Sobol',

Shapley, HSIC) [2,3,4,5,10] et nécessitent en général le calcul d'intégrales multidimensionnelles complexes à estimer. La difficulté ici repose sur l'aspect multidisciplinaire et les couplages entre les différentes disciplines. En effet, l'analyse de sensibilité doit être ici traitée au regard des performances globales du système couplé étant donné qu'une variable peut-être très influente sur une discipline prise isolément mais n'avoir que peu d'influence sur le système couplé (et réciproquement). Par conséquent, les méthodes développées devront prendre en compte cette problématique. Malheureusement, la plupart des approches existantes [1] ne tiennent pas compte de la spécificité des processus multidisciplinaires/multiphysiques et de la présence de couplages entre différents codes de calculs dans l'analyse de sensibilité.

Dans le cadre de cette thèse, on s'intéressera plus particulièrement à des approches dites "hybrides - découplées" [1,2,9] afin de définir la sensibilité des performances globales du système à partir des sensibilités de chacune des disciplines prises séparément dans le but de limiter les appels aux méthodes permettant de résoudre le système multidisciplinaire couplé (qui engendrent des coûts de calculs très importants). Par ailleurs, on tâchera de maîtriser l'erreur d'estimation des indices de sensibilité associée à la non résolution systématique du système couplé. Différents types de satisfaction des couplages interdisciplinaires (e.g., convergence en loi, convergence pour chaque réalisation des distributions caractérisant les incertitudes) et divers indices de sensibilité (e.g., Sobol', Shapley, HSIC) [3,4,5,6,10] seront à étudier au regard par exemple de la présence de dépendances entre les variables d'entrée des disciplines et du contexte d'utilisation de l'analyse de sensibilité (optimisation, propagation d'incertitudes).

Pour ce faire, cette thèse se déroulera de la manière suivante :

- Etat de l'art sur les techniques d'analyse de sensibilité sur systèmes multiphysiques,
- Développement de stratégies d'analyse de sensibilité pour systèmes multidisciplinaires dans les contextes de l'optimisation et de la propagation d'incertitudes,
- Implémentation des approches élaborées sur des cas tests analytiques et physiques.

Références :

- [1] L. Brevault, M. Balesdent et J. Morio (2020) *Aerospace System Analysis and Optimization in Uncertainty*, Springer Nature Switzerland AG, ISBN : 978-3-030-39125-6
- [2] Balesdent, M., Brevault, L., Price, N. B., Defoort, S., Le Riche, R., Kim, N. H., ... & Bérend, N. (2016). Advanced space vehicle design taking into account multidisciplinary couplings and mixed epistemic/aleatory uncertainties. In *Space Engineering* (pp. 1-48). Springer, Cham.
- [3] Sobol, I. M., Kucherenko, S. . (2009), Derivative based global sensitivity measures and their link with global sensitivity indices. *Mathematics and Computers in Simulations*, 79 (10), 3009-3017
- [4] Sobol, Ilya M. "Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates." *Mathematics and computers in simulation* 55.1-3 (2001): 271-280.
- [5] Da Veiga, Sebastien. "Global sensitivity analysis with dependence measures." *Journal of Statistical Computation and Simulation* 85.7 (2015): 1283-1305.
- [6] Iooss, Bertrand, and Clémentine Prieur. "Shapley effects for sensitivity analysis with correlated inputs: comparisons with Sobol' indices, numerical estimation and applications." *International Journal for Uncertainty Quantification* 9.5 (2019).
- [7] Spagnol, Adrien, Rodolphe Le Riche, and Sébastien Da Veiga. "Global sensitivity analysis for optimization with variable selection." *SIAM/ASA Journal on uncertainty quantification* 7.2 (2019): 417-443.
- [8] Da Veiga, Sébastien. "Kernel-based ANOVA decomposition and Shapley effects--Application to global sensitivity analysis." *arXiv preprint arXiv:2101.05487* (2021)
- [9] Xu, C., Zhu, P., Liu, Z., & Tao, W. (2021). Mapping-based hierarchical sensitivity analysis for multilevel systems with multidimensional correlations. *Journal of Mechanical Design*, 143(1).
- [10] El Amri, M. R., & Marrel, A. (2022). Optimized HSIC-based tests for sensitivity analysis: Application to thermalhydraulic simulation of accidental scenario on nuclear reactor. *Quality and Reliability Engineering International*, 38(3), 1386-1403.

### Collaborations envisagées

Cette thèse est co-encadrée entre l'IFPEN et l'ONERA. Collaborations au sein du Groupe d'intérêt Scientifique LARTISSTE au sein du plateau de Saclay.

#### Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Département : Traitement de l'information et Systèmes

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

**Contact** : L. Brevault, M. Balesdent

Tél. 01.80.38.66.88, 01.80.38.66.08

Email : [loic.brevault@onera.fr](mailto:loic.brevault@onera.fr), [mathieu.balesdent@onera.fr](mailto:mathieu.balesdent@onera.fr)

#### Directeur de thèse

Nom : Sébastien Da Veiga

Laboratoire : (CREST - ENSAI)

Tél.

Email :

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>