

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Analyse de sensibilité pour systèmes multi-physiques

Référence : **TIS-DTIS-2026-06**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 2026

Date limite de candidature :

Mots clés Analyse de sensibilité, systèmes multi-physiques / multidisciplinaires, conception de systèmes complexes, quantification d'incertitudes,

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

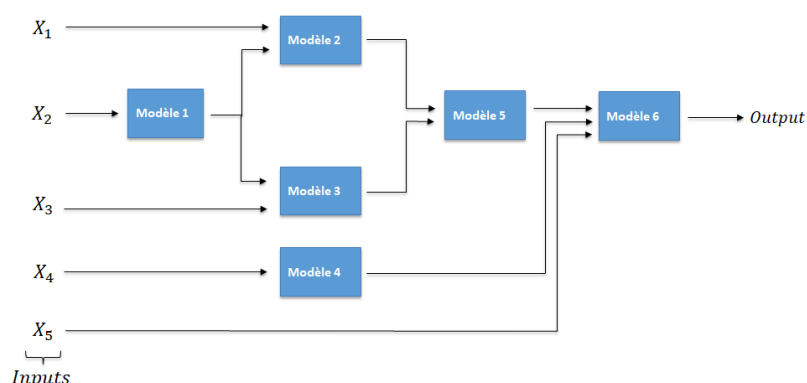
L'explicabilité est à l'heure actuelle un enjeu majeur pour comprendre les facteurs déterminants d'un modèle, qu'il soit issu de l'entraînement d'un modèle de machine learning sur des données ou des résultats d'une simulation physique. En particulier, mieux comprendre les paramètres influents permet de guider les ingénieurs dans la prise de décision et d'avoir une plus grande confiance dans les prédictions faites par de tels modèles. Parmi les méthodes modernes proposées pour l'explicabilité, l'analyse de sensibilité est particulièrement populaire pour les problèmes d'ingénierie. La conception de systèmes complexes rencontrés dans de nombreux domaines de l'ingénierie (systèmes énergétiques, centrales nucléaires, véhicules aérospatiaux) nécessitent l'emploi de solveurs numériques afin de modéliser les systèmes et d'en simuler leur comportement. Les codes de calcul destinés à modéliser ou à simuler le comportement de ces systèmes reposent en général sur de nombreuses variables d'entrée. Ces variables peuvent par exemple être des variables de décision dans un contexte d'optimisation ou des variables aléatoires dans un contexte de quantification d'incertitudes. L'analyse de sensibilité vise à étudier comment les incertitudes en entrée d'un code de calcul influencent la variabilité de la quantité d'intérêt en sortie. Elle poursuit deux buts complémentaires :

- Repérer quelles variables exercent une forte influence sur la sortie du code de calcul (screening) ;
- Hiérarchiser ces variables selon leur influence (ranking).

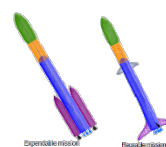
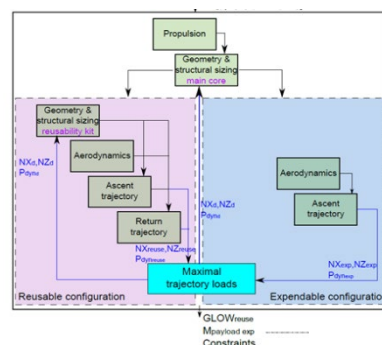
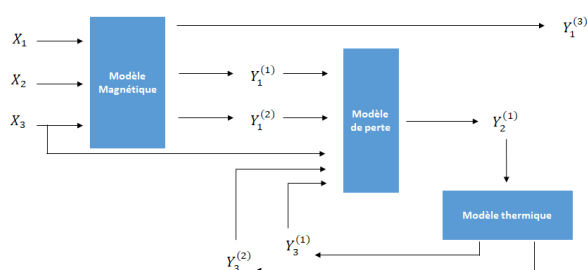
L'analyse de sensibilité autorise, entre autres, la simplification des modèles en ne retenant que les paramètres véritablement déterminants, améliorant ainsi l'explicabilité des codes de calcul. De nombreux cas concrets de codes de calcul se présentent dans des environnements multi-physiques, où plusieurs phénomènes physiques doivent être modélisés conjointement. La solution globale à ces problèmes repose souvent sur le couplage de modèles spécialisés, chacun étant dédié à un sous-système physique donné. C'est le cas, par exemple, dans la conception de lanceurs réutilisables dans laquelle l'aérodynamique est couplée avec la propulsion, la structure et la trajectoire ; ou la conception de machines électriques – cette dernière nécessitant la modélisation conjointe de l'électromagnétisme, de la thermique et des pertes électromagnétiques.

Ces modèles sont généralement développés indépendamment par des experts, puis intégrés dans ce que l'on appelle un système multidisciplinaire, c'est-à-dire un ensemble de modules interdépendants connectés par leurs entrées et sorties. Un système multidisciplinaire est dit feed-forward (orienté) lorsque l'information circule uniquement en aval (les sorties ne peuvent pas rétroagir vers les modèles en amont). Une représentation d'un tel système est donnée dans la

figure ci-dessous.



À l'inverse, dans un système multidisciplinaire fortement couplé, les échanges peuvent être bidirectionnels. La figure ci-dessous montre une représentation schématique du simulateur numérique pour la conception de machines électriques (gauche) et un processus multi-disciplinaire de lanceur réutilisable (droite).



Dans un tel contexte, l'analyse de sensibilité prend tout son sens : elle permet de cibler les entrées les plus influentes dans un environnement computationnel souvent coûteux, non linéaire et difficile à interpréter – rendant son rôle central dans l'interprétabilité des systèmes complexes. Toutefois, la propagation des incertitudes peut s'avérer particulièrement complexe : au-delà du coût de calcul propre à chaque modèle, l'exécution séquentielle des différents modèles engendre des difficultés supplémentaires liées au transfert des informations et des données d'un modèle à l'autre. De plus, dans le cadre des systèmes multidisciplinaires, une variable étant peu influente sur un des modèles peut se révéler fortement influente sur la quantité d'intérêt du système multidisciplinaire (et inverse). Ainsi, effectuer une analyse de sensibilité sur un système multidisciplinaire ne peut se résoudre à des analyses de sensibilité sur chacun des modèles le composant. Bien que de nombreuses méthodes d'analyses de sensibilité sont disponibles dans la littérature, ces dernières n'ont été appliquées qu'à un seul code de calcul. L'adaptation des approches d'analyse de sensibilité à des cas multidisciplinaires impliquant plusieurs codes de calculs représente la nouveauté de cette thèse.

Dans le cadre de cette thèse et dans un premier temps, nous étendrons les méthodes d'analyse de sensibilité aux systèmes multidisciplinaires de type feed-forward. Nous exploiterons la structure en cascade pour propager des sensibilités locales et agréger leurs contributions au niveau système.

Dans un second temps, on s'intéressera plus particulièrement à des approches dites "hybrides - découplées" [1,2] afin de définir la sensibilité des performances globales du système à partir des sensibilités de chacune des disciplines prises séparément, tout en limitant les appels aux méthodes permettant de résoudre le système multidisciplinaire couplé, particulièrement coûteux. Nous veillerons également à quantifier et maîtriser l'incertitude affectant les indices de sensibilité induite par la non-résolution systématique du couplage. Enfin, nous étudierons différentes notions de satisfaction des couplages en présence d'incertitudes (par exemple convergence en loi,

convergence pour chaque réalisation) ainsi que plusieurs indices de sensibilité (Sobol', Shapley, HSIC) [3–7], en tenant compte notamment de dépendances possibles entre variables d'entrée des disciplines.

Pour ce faire, la thèse se structurera de la manière suivante. Premièrement, un état de l'art portant à la fois sur les techniques d'analyse de sensibilité et sur les méthodes d'analyse multidisciplinaire sera mené. Il sera complété par une recherche bibliographique sur la métamodélisation ainsi que le traitement des dépendances statistiques. Après cet état de l'art, différents axes de recherche seront étudiés.

Le premier relève du développement de méthodologies utilisables dans le cas des systèmes feed-forward. Il s'agira ici de développer le cadre mathématique permettant de modéliser ces systèmes, d'étudier la décomposition des indices de sensibilité du système global en composition des indices de sensibilités de chacun des sous-systèmes, de proposer des estimateurs efficaces de ces indices ainsi que des stratégies numériques d'estimation.

Le second axe de la thèse consiste à étendre le formalisme mathématique développé pour les systèmes feed-forward aux systèmes fortement couplés, en prenant en compte les rétroactions des sous-systèmes. Dans ce contexte, de nouveaux indices de sensibilité seront proposés, permettant notamment de prendre en compte les dépendances statistiques entre les variables de couplage. On se focalisera également sur l'interprétabilité de ces indices de sensibilité.

Les différentes méthodologies d'estimation des indices de sensibilité seront d'abord appliquées à des cas test analytiques pour en valider leur fonctionnement, puis des cas d'usage représentatif de la complexité industrielle comme les processus multiphysiques de conception de lanceurs réutilisables (ONERA) ou pour la conception de machines électriques.

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, Sébastien. "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, l'ENSAI 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, mathieu.balesdent@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Sébastien Da Veiga

Laboratoire : Ecole Normale de la Statistique et de l'Analyse de l'Information (ENSAI)

Email : sebastien.da-veiga@ensai.fr

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