

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Optimisation Bayésienne frugale pour la Conception d'Avions et de Drones HALE

Référence : **TIS-DTIS-2025-01**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2025

Date limite de candidature : 01/06/2025

Mots clés

Optimisation Bayésienne, Conception Aéronautique, aile fort allongement, Modèles de Processus Gaussiens, Réseaux Neuronaux Profonds, Optimisation Multi-Objectif, Méthode Multi-Fidélité, Impact Environnemental, Méthodes Stochastiques.

Profil et compétences recherchées

Bac+5 avec spécialisation dans l'un ou plusieurs des domaines suivants : Optimisation stochastique, Recherche opérationnelle, Statistiques, Mécanique des structures, Mécanique aérospatiale, Quantification d'incertitudes et Mathématiques appliquées

Présentation du projet doctoral, contexte et objectifs

Dans le cadre des projets de recherche collaboratifs entre l'ONERA et l'ISAE-SUPAERO (<https://w3.onera.fr/fonisen/fr>), cette thèse propose de développer une approche innovante d'optimisation bayésienne frugale (et donc plus verte), spécifiquement adaptée à la conception d'avions et de drones HALE (High-Altitude Long Endurance) [12,14]. L'objectif principal est de maximiser l'efficacité de la conception tout en minimisant l'empreinte carbone [16], en tenant compte non seulement des ressources de calcul, mais aussi de l'impact environnemental lié aux simulations et aux processus de développement.

L'approche proposée s'inspire des travaux en algorithmique verte [13] (<https://www.green-algorithms.org>) en intégrant des contraintes de budget carbone dans le processus d'optimisation. Cette méthode doit permettre de raisonner sur l'impact environnemental total de la conception, en intégrant des paramètres comme le type de clusters utilisés (nombre de CPU, GPU, etc.), la fidélité des simulations (LF, MF, HF) qui nécessitent des temps CPU plus ou moins élevés, le mix énergétique des pays impliqués dans le calcul, et le type d'analyses menées (mono- ou multidisciplinaire) [6,11]. En effet, l'optimisation Bayésienne au contraire de l'optimisation à base de gradient fonctionne à budget de calcul fixé (i.e. trouve un optimum en x calculs, chaque calcul étant couteux mais dépendant du type de cluster, et disponible avec plusieurs niveaux de fidélité).

La thèse s'articulera autour des axes suivants :

- 1) Développement de méthodes d'optimisation Bayésienne plus écologique : adapter les techniques d'optimisation Bayésienne pour tenir compte de l'impact carbone des simulations numériques. L'objectif est de concevoir des modèles qui optimisent l'impact environnemental global des aéronefs en utilisant des noyaux de processus gaussiens (GP) et des réseaux neuronaux profonds (DNN) efficaces. Les méthodes seront développées en tenant compte des directives établies sur les Green Algorithms [12].
- 2) Développement de noyaux de corrélation pour les processus gaussiens (GP) adaptés à des problèmes d'ingénierie et des données réelles (données périodiques, bruitées, grande dimension, multi-fidélité, ...). En s'appuyant sur des développements antérieurs dans le logiciel open-source Surrogate Modeling Toolbox (SMT) [5,8], l'objectif est de créer des modèles mathématiques capables d'extrapoler et de prédire des réponses périodiques [1-3], dont les différentes dérivées seront implémentées via différentiation automatique. Une

étude bibliographique des différents noyaux adaptés à chaque problème sera menée, visant pour un problème donné à utiliser les travaux de l'université de Cambridge (<https://astroautomata.com>) sur la régression symbolique pour identifier le meilleur noyau candidat.

- 3) Une extension naturelle sera de développer l'Optimisation multi-objectif avec budget fixe: définir et mettre en œuvre des stratégies d'optimisation qui maximisent les performances tout en respectant un budget prédéfini. Cela permettra d'optimiser la performance des aéronefs en même temps que leurs coûts, notamment environnementaux. On investiguera notamment l'utilisation d'algorithmes évolutifs et de techniques d'optimisation basées sur la différentiation automatique [9,10,15].
- 4) Application à la conception d'aéronefs et de drones HALE : tester les méthodes d'optimisation développées dans les points 1 à 3 sur des cas d'étude réels. En particulier, la conception de structures aérodynamiques et la simulation d'aéroélasticité pour des ailes à grand allongement devront être adressées dans ce travail. Des outils comme SHARPy [17] seront utilisés pour évaluer les performances des noyaux de corrélation en lien avec l'analyse de vibration et identification de la dynamique de l'aéronef. D'un point de vue bilan carbone, le drone HALE (drone solaire haute altitude, haute endurance de fonction satellite télécom) est intéressant car il ne brûle pas de fuel en opération ainsi le bilan ne sera pas dominé par la propulsion.
- 5) Collaboration interdisciplinaire et partage de modèles : cette thèse s'inscrit dans le cadre de projets collaboratifs européens tels que les projet Horizon Europe ou la Fédération de recherche ONERA/ISAE/ENAC thématique X-OAD. Une attention particulière sera portée à l'échange de modèles de substitution et à la conservation de l'expertise métier au sein des équipes de recherche ISAE-SUPAERO et ONERA. Une mobilité de 4 mois à polytechnique Montréal est envisagée au cours de la thèse.

Compétences requises :

- Calcul scientifique et programmation Python
- Connaissances en optimisation multidisciplinaire, apprentissage statistique, machine learning
- Intérêt pour l'ingénierie environnementale et aérospatiale

Méthodologie :

- Modélisation et Développement : utiliser la librairie Surrogate Modeling Toolbox (SMT) pour développer des modèles de noyaux adaptés à des scénarios de haute dimension et à des variables mixtes. L'accent sera mis sur l'efficacité des algorithmes et l'optimisation de leur impact environnemental.
- Optimisation et Évaluation : tester les méthodes sur des cas d'étude réels et des simulations pour évaluer la performance des modèles en terme de réduction des émissions de CO2 et d'amélioration de la performance des aéronefs.
- Intégration et Expérimentation : intégrer les développements dans SMT et expérimenter avec des configurations de calcul réelles pour évaluer leur efficacité et leur compatibilité avec les exigences environnementales.

Cette recherche vise à contribuer significativement à l'optimisation écologique dans le domaine de l'aérospatial, en introduisant de nouvelles méthodes qui tiennent compte de l'impact environnemental dès les phases de conception préliminaire. Les résultats pourront également être intégrés dans des outils open-source tels que SMT, offrant des perspectives pour de futures applications dans d'autres domaines de l'ingénierie.

Références

- [1] Wilson, A., & Adams, R. (2013). "Gaussian process kernels for pattern discovery and extrapolation." International Conference on Machine Learning, PMLR.
- [2] Hensman, J., Durrande, N., & Solin, A. (2018). "Variational Fourier features for Gaussian processes." Journal of Machine Learning Research, 18(151), 1-52.
- [3] Durrande, N., Hensman, J., Rattray, M., & Lawrence, N. (2016). "Detecting periodicities with Gaussian processes." PeerJ Computer Science, 2, 50.
- [4] Saves, P., Diouane, Y., Bartoli, N., Lefebvre, T., & Morlier, J. (2023). "A mixed-categorical correlation kernel for Gaussian process." Neurocomputing, 126472.
- [5] Roustant, O., Padonou, E., Deville, Y., Clément, A., Perrin, G., Giorla, J., & Wynn, H. (2020). "Group kernels for Gaussian process metamodels with categorical inputs." SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification, 8(2), 775-806.
- [6] Cheng, G. H., Younis, A., Hajikolaei, K. H., & Wang, G. G. (2015). "Trust region based mode pursuing sampling method for global optimization of high dimensional design problems." Journal of Mechanical Design, 137, 021407.
- [7] Michele, C., Morlier, J., & Bauerheim, M. (2023). "Prediction of Gust Aeroelastic performance of HALE using Graph Neural Networks." AIAA SCITECH 2023 Forum.
- [8] Saves, P., Lafage, R., Bartoli, N., Diouane, Y., Bussemaker, J., Lefebvre, T., Hwang, J. T., Morlier, J., & Martins, J. (2024). "SMT 2.0: A Surrogate Modeling Toolbox with a focus on hierarchical and mixed variables Gaussian processes." Advances in Engineering Software, 188, 103571.
- [9] Gamot, J., Balesdent, M., Tremolet, A., Wuilbercq, R., Melab, N., & Talbi, E. G. (2023). "Hidden-variables genetic algorithm for variable-size design space optimal layout problems with application to aerospace vehicles." Engineering Applications of Artificial Intelligence, 121, 105941.
- [10] Margossian, C. "A review of automatic differentiation and its efficient implementation." Wiley interdisciplinary reviews: data mining and knowledge discovery 9.4 (2019): e1305.
- [11] Hebbal, A., Brevault, L., Balesdent, M., Talbi, E. G., & Melab, N. (2019). "Multi-objective optimization using deep Gaussian processes: application to aerospace vehicle design." AIAA Scitech 2019 Forum.
- [12] Modares-Aval, A. H., Bakhtiari-Nejad, F., Dowell, E. H., Peters, D. A., & Shahverdi, H. (2019). "A comparative study of nonlinear aeroelastic models for high aspect ratio wings." Journal of Fluids and Structures, 85, 249-274.
- [13] Lannelongue, L., Grealey, J., & Inouye, M. (2021). "Green algorithms: quantifying the carbon footprint of computation." Advanced Science, 8(12), 2100707.
- [14] Yang, A., Li, J., & Liem, R. P. (2023). "Multi-fidelity Data-driven Aerodynamic Shape Optimization of Wings with Composite Neural Networks." AIAA AVIATION 2023 Forum, 3470.
- [15] Li, Z., Li, H., & Meng, L. (2023). "Model compression for deep neural networks: A survey." Computers, 12(3), 60.
- [16] Duriez, E., Guadaño Martín, V. M., & Morlier, J. (2023). CO2 footprint minimization of solar-powered HALE using MDO and eco-material selection. Scientific Reports, 13(1), 11994.
- [17] Del Carre, A., Muñoz-Simón, A., Goizueta, N., & Palacios, R. (2019). SHARPy: A dynamic aeroelastic simulation toolbox for very flexible aircraft and wind turbines. Journal of Open Source Software, 4(44), 1885.

Collaborations envisagées

Joseph Morlier (ISAE-SUPAERO)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : DTIS - Département Traitement de l'Information et des Systèmes

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

Contacts : Nathalie Bartoli, Paul Saves

Tél. : 05 62 25 26 44 / 05 62 25 23 04

Email : nathalie.bartoli@onera.fr, paul.saves@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Joseph Morlier

Laboratoire : ISAE-SUPAERO

Email : joseph.morlier@isae-supaeo.fr

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