

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Méthodologies orientées MDO appliquées à l'optimisation globale d'aéronefs hybrides électriques

Référence : **TIS-DTIS-2023-20**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/23

Date limite de candidature : 30/04/23

Mots clés

Multidisciplinary Design Analysis, (MDA), Multidisciplinary Design Optimisation (MDO), couplage énergie-propulsion-structure-aérodynamique, réduction de modèles, krigeage, programmation non linéaire, méta heuristiques, linéarisation de modèles, programmation linéaire, optimisation multi-fidélité / multi-niveaux.

Profil et compétences recherchées

Ecole d'ingénieur, spécialité mécanique ou électrotechnique. Connaissance en thermodynamique, machine électrique, aérodynamique et structure. Maîtrise de la programmation orienté objet. Une première expérience en conception des systèmes ou conception multidisciplinaire est un avantage. Maîtrise de LaTeX.

Intérêt pour la recherche en aéronautique et systèmes hybrides.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

1.1 CONTEXTE :

Les équipes de recherches du LAPLACE Groupe GENESYS et de l'ONERA souhaitent associer leurs efforts dans ce travail de thèse qui concerne le développement de Méthodologies orientées MDO (Multidisciplinary Design Optimization) appliquées à l'optimisation globale d'aéronefs hybrides électriques.

La notion de globalité doit être comprise ici dans la volonté de prendre en compte, à un même niveau de définition, les disciplines traditionnelles de la conception multidisciplinaire avion et celles relatives à la conception de l'architecture électrique de propulsion, de façon à mieux rendre compte des interactions fortes entre ces deux volets et ainsi améliorer la qualité et la confiance dans les résultats de conception d'ensemble. L'impact anticipé de cette volonté est un accroissement de la complexité de traitement dû à l'augmentation combinatoire des variables et contraintes de conception qui plus est de natures (continue ou discrète) mixte, occasionnant un accroissement réhibitoire du coût de calcul.

De son côté, le LAPLACE - Groupe GENESYS (<https://www.laplace.univ-tlse.fr/genesys/>) est spécialisé dans la conception intégrée (avec vision systémique) des systèmes de conversion d'énergie, l'application aux chaînes de propulsion électriques ou hybrides électriques constituant un domaine clé.

Ainsi, dans le projet Européen HASTECS [1] (<https://www.laplace.univ-tlse.fr/portfolio/hastecs/>) coordonné par le LAPLACE, a été proposée une approche de "co-optimisation" (optimisation du dimensionnement à gestion énergétique intégrée) de la chaîne de conversion (powertrain) [2] d'un avion régional avec une architecture hybride électrique série. Il s'agissait là d'une approche typiquement orientée MDO, mais dont le champ d'investigation était limité à la chaîne de conversion d'énergie, visant des objectifs de réduction de consommation via la minimisation des masses embarquées dans le powertrain et la maximisation de l'efficacité de ces éléments.

Les masses embarquées étant clairement liées à l'aérodynamique et à la structure aéronef, ce couplage fort a été simplifié par une approximation linéaire entre la poussée nécessaire à la mission et la masse au décollage (MTOW) : *la remise en cause de cette approximation et le couplage entre l'optimisation de la chaîne d'énergie, de la propulsion, de la structure et de l'aérodynamique de l'aéronef est un enjeu majeur de ce sujet de thèse.*

Dans ces travaux [2], un des apports clé vient de l'intégration de modèles technologiques représentant les principaux éléments de la chaîne d'énergie, des sources aux hélices : ces éléments concernent en particulier

les électroniques de puissance et les machines électriques avec une vision électrique ET thermique ainsi que l'intégration de l'environnement avec prise en compte des effets liés à la forte puissance / forte tension (décharges partielles). Signalons enfin que, alors que l'optimisation de la chaîne est circonscrite ici autour de la conversion d'énergie, le coût de calcul de la MDO avec les méthodes méta-heuristiques employées ici devient quasiment prohibitif (au-delà de 7 jours) : *à ces niveaux de granularité de modèles technologiques, le couplage à la propulsion et à l'aéro-structure constitue donc un verrou méthodologique.*

De son côté, l'ONERA - équipe Méthodes Multidisciplinaire et Conception Intégrée s'emploie à développer des méthodes de traitement et d'optimisation des problèmes multidisciplinaires appliquées à la conception aéronautique. L'équipe développe ses travaux selon un axe méthodologique tourné vers le développement de formulations d'optimisation globale reposant sur des processus gaussiens, un axe « outils » avec le développement du logiciel de conception avion intégrée FAST-OAD [4], et un axe applicatif qui nourrit ces outils avec de la connaissance métier et les met en œuvre pour permettre la conception et l'analyse de nouveaux concepts d'aéronef.

Des travaux internes récents ont montré un intérêt pour l'hybridation de la propulsion d'un avion de transport afin d'améliorer ses performances en rendant possible la mise en œuvre du principe de propulsion distribuée. L'approche classique utilisée pour analyser ce type d'avion est l'inclusion de modèles dits « basse fidélité » (c'est-à-dire basés essentiellement sur des règles analytiques et statistiques) des composants électriques au processus de conception avion, celui-ci intégrant déjà les disciplines classiques que sont l'aérodynamique, la structure, la propulsion ainsi que l'analyse de performances, en particulier en mission. Les processus de conception découlant de ce couplage multidisciplinaire peuvent être coûteux à évaluer selon la fidélité des modèles disciplinaires impliqués et difficiles à traiter par optimisation à cause de l'absence de calcul du gradient et de la présence de variables mixtes (continue, discrète et catégorielle), une spécificité renforcée par la combinatoire apportée par la distribution de la propulsion. Dans les faits, ce problème d'optimisation a été traité par optimisation Bayésienne [5], ce qui a permis de dégager une combinaison d'architecture de propulsion et de configuration avion optimale.

La montée en fidélité des modèles de composants électriques doit permettre de réduire l'incertitude présente en sortie du processus de conception. Cependant, la question du degré de complexité des modèles se pose aussi car l'augmentation de complexité peut fortement pénaliser la recherche de solutions optimales. Il est donc nécessaire d'opérer cette montée en fidélité à bon escient, ce qui conduit à se demander comment définir le niveau de complexité adéquats des différents modèles afin de réduire l'incertitude globale du processus. Pour cela une première approche peut consister à utiliser des méthodes de décomposition de la variance (Indice de Sobol) afin d'identifier les disciplines générant le plus d'incertitude dans le processus de conception et ainsi augmenter ponctuellement la complexité. Cette méthode reste à mettre en œuvre.

Cette capacité à mener des optimisations sur des problèmes coûteux, à variables mixtes, couplée à une montée en fidélité des modèles de représentation des composants propulsifs, aérodynamiques et structuraux, issues des expériences métiers du laboratoire Laplace et de l'ONERA, permettraient de renforcer le niveau de confiance que l'on peut attribuer à ces études et à l'emploi de la propulsion hybride.

1.2 OBJECTIFS DES TRAVAUX DE THESE :

Dans ce contexte, l'orientation des travaux de thèse est à visée méthodologique et consistera à définir l'architecture de modélisation et le processus MDO qui réaliseront le couplage entre, d'une part les modèles de génération/conversion de puissance et de propulsion et d'autre part les modèles de conception avion qui ont jusqu'à présent évolué dans des architectures MDO et des stratégies d'optimisation indépendantes. Découlant de ce premier objectif, la définition des niveaux de modèles et le cas échéant les réductions de modèle à apporter aux bases existantes pour mener à bien l'approche MDO à un niveau "global aéronef" sera également nécessaire.

Cette sélection devra être faite en lien avec les outils d'optimisation qui peuvent être mis en œuvre pour traiter des modèles métier ou technologiques très hétérogènes, impliquant divers types de non-linéarités et dont le coût de traitement pourrait être prohibitif. Dans cette optique, deux approches méthodologiques peuvent être explorées : une approche par optimisation Bayésienne faisant appel à un modèle de substitution et une voie alternative, ambitieuse, consistant à examiner la capacité à linéariser tout ou une partie du modèle à optimiser. Le modèle linéarisé ainsi obtenu permettrait, au moins au niveau local, l'usage de méthodes de programmation linéaire type MILP qui ont été éprouvées dans d'autres domaines et offrent des capacités de traitement (nombre de variables de décision et de contraintes) très élevées.

Selon la stratégie MDO retenue, ces approches pourront éventuellement être combinées soit pour différents niveaux d'optimisation (avion/composant), soit pour différents stades de recherche de l'optimum (recherche

globale initiale pour explorer l'espace de conception, recherche locale linéarisée pour raffiner la solution optimale).

Ces démarches méthodologiques pourront être évaluées, au moins qualitativement, sur une architecture aéronef hybride série dans la famille de l'aviation régionale. Ce cas d'étude repose sur une gamme de modèles avion de puissance embarquée proche des cas d'étude HASTECS (pour le LAPLACE et la conversion d'énergie) et pour laquelle l'ONERA dispose de bonnes références sur les questions de modélisation avion et d'architecture de propulsion distribuée. Cette gamme d'aéronefs constitue également une étape ambitieuse sur le chemin de l'aviation de transport décarbonée.

1.3 **CONTACTS :**

Pour le LAPLACE : Xavier Roboam (roboam@laplace.univ-tlse.fr), Bruno Sareni (sareni@laplace.univ-tlse.fr)

Pour l'ONERA : Eric Nguyen Van (eric.nguyen_van@onera.fr) , Sebastien Defoort (sebastien.defoort@onera.fr)

1.4 **REFERENCES**

[1] X. Roboam & Al, The HASTECS Book (Hastecs : Hybrid aircraft : research on thermal and electric components and systems), October 27th, 2021, Accessible on line @ <https://doi.org/10.5281/zenodo.5599137>, <https://hal-univ-tlse3.archives-ouvertes.fr/hal-03407214>

[2] Matthieu Pettes Duler, Xavier Roboam, Bruno Sareni, "Integrated Optimal Design of a hybrid electric aircraft powertrain of future aircrafts", MDPI Energies, 15, 6719, September 2022. <https://doi.org/10.3390/en15186719>, Accessible on line @ <https://ut3-toulouseinp.hal.science/hal-03777489>

[3] R. Rigo-Mariani, B. Sareni and X. Roboam, "Integrated Optimal Design of a Smart Microgrid With Storage", IEEE Trans on Smart Grids, Vol. 8, n°4, pp. 1-9, 2017. Accessible on line @ <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03519910v1>

[4] C. David, S. Delbecq, S. Defoort, P. Schmollgruber, E. Benard, and V. Pommier-Budinger, 'From FAST to FAST-OAD: An open source framework for rapid Overall Aircraft Design', *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1024, p. 012062, Jan. 2021, doi: [10.1088/1757-899X/1024/1/012062](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1024/1/012062).

[5] P. Saves *et al.*, 'Multidisciplinary design optimization with mixed categorical variables for aircraft design', presented at the AIAA SCITECH 2022 Forum, San Diego, CA & Virtual, Jan. 2022. doi: [10.2514/6.2022-0082](https://doi.org/10.2514/6.2022-0082).

Collaborations envisagées

Institut LAPLACE, groupe GENESYS : <https://www.laplace.univ-tlse.fr/genesys/>

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Traitement de l'Information et du Signal

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

Contact : Eric Nguyen Van, Sebastien Defoort

Tél. : 0562252830, 0562252623

Email : eric.nguyen_van@onera.fr,
sebastien.defoort@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Xavier Roboam

Laboratoire : LAPLACE

Tél. : 0534322422

Email : xavier.roboam@laplace.univ-tlse.fr

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