

## Thèse en Aérodynamique / énergétique OptiMERMOZ

---

Département:	ISAE DAEP / LAPLACE
Niveau :	Master 2
Contrat :	36 mois à partir du 1 <sup>er</sup> septembre 2022

---

### 1. Titre ou intitulé de la thèse

**Optimisation d'un drone à hydrogène par une analyse exergetique**

### 2. Objet de la thèse

L'objet de cette thèse est l'analyse exergetique d'un drone électrique dont la source principale de puissance embarquée est la pile à hydrogène. L'usage de l'hydrogène à bord d'un drone permet de combiner longue élancement et vol électrique, décarboné et silencieux. L'optimisation exergetique d'un tel système permettra de hiérarchiser les sources de gains au niveau de l'aérothermique interne et de l'aérodynamique externe.

### 3. Descriptif de la thèse

Le vol décarboné des avions constitue un sujet majeur pour l'aéronautique du futur. Pour cela, le drone électrique constitue une excellente plateforme pour tester des solutions innovantes basée sur l'utilisation d'hydrogène à bord alimentant une pile à combustible. Les piles à combustibles embarquables dissipent une quantité importante de chaleur dans le processus de production de l'électricité, tout en étant confinées dans le fuselage. Cette quantité de chaleur nécessite un dispositif de refroidissement tel que l'admission d'air dans le compartiment contenant la pile. Mais cette admission d'air est synonyme de traînée et donc de perte de performance globale. L'approche exergetique s'avère particulièrement pertinente pour déterminer les sources potentielles de gains et d'optimiser le drone en un sens global, en tenant compte des aspects aéropulsifs comme des aspects énergétiques.

- Quels sont les problèmes qui se posent ?

Une pile à hydrogène dissipe typiquement une quantité de chaleur significative (de l'ordre du travail fourni par la pile), tout en demandant un contrôle thermique rigoureux, notamment dans le cas d'une pile à cathode ouverte. Sur un drone, où la pile est confinée dans un espace très restreint, se pose le problème de la captation d'air régulée, laquelle représente aussi une pénalité de traînée. Or ces différentes pertes énergétiques sont difficiles à confronter les unes aux autres.

- Quel est l'état de l'art ?

Jusqu'à présent, la plupart des projets de drones électriques basés sur des piles à hydrogène consistaient à remplacer un système existant de batterie par une pile à hydrogène et un réservoir. Très peu de drones ont été spécifiquement conçus dès le départ autour d'une solution hydrogène, ce qui est le cas du projet OptiMermoz.

L'utilisation des piles à hydrogène dans des drones à voilure fixe est encore émergente. Dans le domaine des piles de faible puissance (moins de 1kW), la technologie PEM à cathode ouverte reste la plus adaptée

- Quels sont les objectifs généraux et les perspectives au-delà de la thèse proprement dite ?

Au-delà du secteur des drones, ce sujet peut concerner la modélisation et l'optimisation d'aéronefs légers (avec passagers) embarquant des piles à hydrogène. Il a pour objectif d'ouvrir la voie à une nouvelle génération de drones et d'aéronefs légers ayant une capacité d'endurance en rupture avec l'état de l'art.

- Quelle est l'originalité du sujet (le cas échéant) ?

L'exergie, notion liée au second principe de la thermodynamique, permet de rendre compte du travail maximal récupérable suite à une transformation thermodynamique quelconque. Cette méthodologie est adaptée à l'optimisation énergétique des systèmes complexes. L'analyse par exergie a été largement employée dans le domaine de l'aérodynamique interne (turbomachines) depuis les années 70, mais elle n'a pas reçu l'attention qu'elle mérite dans le domaine de l'aérodynamique externe. L'analyse exergétique n'est donc pas nouvelle en thermodynamique, mais son utilisation en aérodynamique interne et externe est récente et totalelement originale en ce qui concerne les systèmes embarqués de pile à hydrogène. De plus, l'emport d'hydrogène liquide à bord constitue une originalité du sujet et une source de rupture technologique dans les possibilités d'élongation.

- Quelles sont les avancées escomptées ?

Le potentiel de cette application est grand, puisqu'il s'agira de quantifier et de prioriser les différentes sources d'améliorations possibles à apporter au système propulsif dans son ensemble (système allant du réservoir d'hydrogène jusqu'à l'hélice). L'outil d'analyse pourra ainsi permettre de guider le concepteur de drone dès le stade de l'avant-projet.

#### 4. Programme de la thèse

- Quelles sont les questions scientifiques traitées ;

Les questions scientifiques traitées sont :

- a. la modélisation électrique de la chaîne de puissance embarquée sur le drone comprenant la pile à hydrogène, le moteur *brushless* à cage tournante, le variateur (ESC),
- b. la modélisation thermodynamique du fuselage dans son ensemble, comprenant à la fois l'extérieur du fuselage (prises d'air, échangeurs de chaleur), et l'intérieur du fuselage (soute de la pile à hydrogène, événements, soute réservoir, bloc moteur),
- c. l'application et l'adaptation de l'analyse exergétique à l'ensemble du drone, en confrontant différentes hypothèses de maintien thermique de la pile (événements, échangeur de chaleur) et en tenant compte à la fois d'un réservoir d'hydrogène gazeux ou d'hydrogène liquide.
- d. La mise en perspective des différentes sources de pertes énergétiques et de gains potentiels à réaliser dans la chaîne de puissance d'un drone à hydrogène.

- Quelles sont les approches scientifiques proposées : point de départ des travaux, démarches envisagées, moyens mis en œuvre ou expérimentations prévues ;

Les approches proposées sont de type théorique, numérique et expérimental :

- Sur le plan théorique, l'objectif est de produire une modélisation sous forme d'un système d'équations différentielles ordinaires permettant d'intégrer simplement au cours du temps l'évolution de la température dans le fuselage et de calculer en temps réel les pertes énergétiques sur les différents postes. Un outil d'analyse et d'aide au diagnostic sera ainsi développé.
- Sur le plan numérique, la méthode utilisée sera de type volumes finis tridimensionnels pour permettre de mener une étude paramétrique des différents modules de la chaîne de puissance : pile à hydrogène, moteur électrique, variateur, réservoir d'hydrogène gazeux ou liquide, échangeur de chaleur, etc. Le code StarCCM+ (avec module thermique) permettra ainsi de calibrer la modélisation théorique.
- Sur le plan expérimental, il s'agira de mettre en œuvre une campagne de mesure au sol du fuselage d'un drone à hydrogène grâce aux moyens d'essais de la plateforme hydrogène du laboratoire LAPLACE. Cette campagne sera complémentaire d'une campagne d'essais en soufflerie réalisée dans la soufflerie drones de l'ISAE-SUPAERO.

La présence de systèmes divers tels que l'hydrogène, la pile à combustible, le moteur électrique, les batteries, les panneaux solaires, les prélèvements d'air, représentent une multitude complexes de transferts énergétiques, thermique et mécanique, dont la gestion des interactions représente la clé de l'optimisation énergétique. Alors que jusqu'à présent, les sous-systèmes sont optimisés séparément la méthode proposée ici permettra d'optimiser l'intégralité du système dès la phase de conception en identifiant et quantifiant clairement les phénomènes physiques responsables de destruction d'exergie.

Au niveau énergétique, l'activité de thèse peut donc se décliner en deux étapes :

Etape 1 : Etablir un modèle exergétique 1d des composants internes et de leurs interactions.

L'objectif est d'établir le rendement exergétique global des composants interagissant au sein du l'aéronef en fonction de paramètres clés. Une optimisation générale sera entreprise afin de minimiser le coût énergétique et la destruction d'exergie.

Etape 2 : Prendre en compte l'aérodynamique interne (refroidissement) et externe (trainée) en vue de l'optimisation des performances globales du système. Le logiciel « Epsilon » sera pour cela mis à contribution.

Il s'agira ici aussi de minimiser la destruction d'exergie mais en prenant en compte les avancées et les développements récents faits sur l'exergie des écoulements. Des propositions de récupération d'exergie pouvant amener à des modifications externes de l'aéronefs pourront ici être formulées.

## 5. Références

- M. Aguirre, M. and S. Duplaa, “Exergetic Drag Characteristic Curves,” (2019), *AIAA Journal*, Vol. 57 No.7, pp. 2746-2757.
- M. Aguirre, M., S. Duplaa, A. Turnbull, and X. Carbonneau, “A velocity decomposition method for exergy-based drag prediction,” (2020) *AIAA Journal*, 58:11, 4686-4701.
- N. Gavrilovic, M. Bronz, J-M. Moschetta, “Bioinspired Energy Harvesting from Atmospheric Phenomena for Small Unmanned Aerial Vehicles,” (2020) *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 43.3.
- Y. Leng, M. Bronz, T. Jardin, J-M.Moschetta « Slipstream Deformation of a Propeller-Wing Combination Applied for Convertible UAVs in Hover Condition » (2020), *Unmanned Systems*, Vol. 8, No. 4, p. 295–308.
- S. Rigal; C. Turpin; A. Jaafar; N. Chadourne; T. Hordé; J.-B. Jollys, “Steady-state modelling of a HT-PEMFC under various operating conditions”, (2019) *IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*.

## 6. Candidature

### Profil du candidat :

Le candidat ou la candidate devra être titulaire d'un Master 2 /diplôme d'ingénieur en mécanique des fluides. Des connaissances en thermodynamique et aérodynamique sont demandées. Une connaissance des piles à hydrogène serait un plus.

### Candidature :

Une lettre de motivation et un CV sont à envoyer à Jean-Marc Moschetta (jean-marc.moschetta@isae-superaero.fr)