
Stratégie de Gestion de l'Energie de systèmes Multi-Stacks pour l'Optimisation de la Maintenance. Application au transport aérien.

Ecole doctorale : EEATS Grenoble

Laboratoire d'accueil : GIPSA- LAB, UMR CNRS 5216, Grenoble

Laboratoire GIPSA-Lab, Grenoble

Catherine CADET

catherine.cadet@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Christophe BERENGUER

christophe.berenguer@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Laboratoire LIS – Université Aix-Marseille

Zhongliang LI

zhongliang.li@lis-lab.fr

Rachid OUTBIB

rachid.outbib@lis-lab.fr

Profil recherché : candidat.e ayant des connaissances dans le domaine du diagnostic, pronostic ou de la maintenance et de la fiabilité. Des connaissances sur la technologie des piles à combustible seraient un plus.

Financement

Un dossier de demande d'allocation de recherche auprès de l'école doctorale EEATS sera établi avec le candidat ou la candidate.

Mots Clés Prognostics and Health Management (PHM), Remaining Useful Life (RUL), Maintenance prédictive, Piles à combustible, Multi-stack, EMS (Energy Management System).

Les candidat.e.s sont invité.e.s à envoyer CV, lettre de motivation et résultats académiques des 2 dernières années à catherine.cadet@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Contexte et objectif

La Commission européenne a fixé en juillet 2021 un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre liés aux transports, et donc au transport aérien, de 90% d'ici 2050. Parmi les sources d'énergie bas carbone, la technologie des piles à combustible (PàC) est une solution pertinente en raison de son efficacité élevée, de sa densité énergétique et de son impact limité sur les ressources environnementales. Son déploiement est cependant freiné par de nombreux obstacles comme son coût élevé ou sa durée de vie insuffisante. Pour les surmonter, l'utilisation d'un système connectant plusieurs piles à combustible en parallèle (systèmes multi-stack) est une solution récente et très prometteuse. En effet, les systèmes multi-stack offrent de nombreux avantages, notamment pour les applications aéronautiques : la redondance des piles améliore la fiabilité du système, et la durabilité des PàC peut être fortement améliorée en répartissant de manière optimale la demande de puissance entre les différentes PàC grâce à une stratégie de gestion de l'énergie (Energy Management Strategy ou EMS) performante. Le contexte du transport aérien rend de plus indispensable l'intégration additionnelle des aspects de fiabilité, de disponibilité et de maintenance. Or à ce jour, il n'existe pas dans la littérature de méthodes de gestion d'énergie incluant les aspects de maintenance bien que ces aspects soient susceptibles de modifier considérablement la stratégie de gestion de l'énergie.

L'objectif du projet est de **concevoir et de développer une approche permettant d'établir un outil de gestion de l'énergie d'un système multi-stack optimisant la durabilité des piles à combustible et tenant compte des contraintes de sécurité et de maintenance**. Ce projet est novateur sur plusieurs aspects :

- L'étude des systèmes multi-stack est à ses débuts. Leur dimensionnement, le lien entre vieillissement des piles à combustibles et demande de puissance sont des sujets de recherche à part entière,
- L'intégration des stratégies de maintenance dans un système de répartition d'énergie est un problème qui dépasse cette application et n'a pas été explorée. Le système de gestion doit garantir la fiabilité et la disponibilité du système multi-stack tout en d'espacer au maximum les opérations de maintenance.

Enfin ce type d'approche n'a jamais été tenté dans le domaine du transport aérien, ouvrant la voie au développement des technologies bas carbone dans le transport aérien.

Méthodologie

La question centrale qui sera abordée dans cette thèse concerne la décision de maintenance prédictive pour un système multi-stack. La maintenance prédictive consiste en une surveillance régulière de l'état de santé des éléments du système (Health Monitoring) [Rausand et al., 2020]. Il est alors possible de pronostiquer l'apparition d'une défaillance avant qu'elle n'arrive et de programmer des opérations de maintenance adéquates. Dans le domaine de l'aviation, cette approche est particulièrement étudiée [Meissner et al., 2021] [de Pater et al., 2021]. Le choix d'un créneau de maintenance doit alors tenir compte des contraintes générées par les acteurs intervenants dans l'exploitation aérienne : les compagnies aériennes, qui définissent les plans de vol, et les opérateurs de maintenance, qui déterminent les créneaux possibles pour la maintenance. L'objectif étant d'espacer au maximum les opérations de maintenance. Le principe de la décision est illustré figure 1.

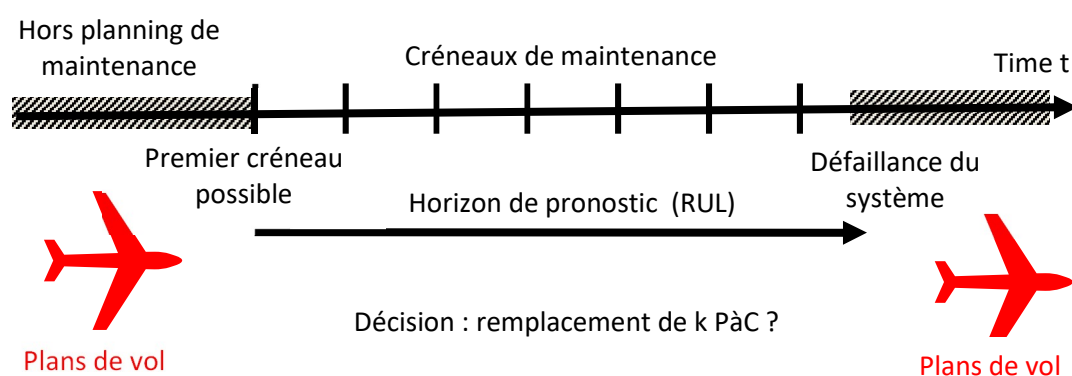


Figure 1 : Principe de la décision de maintenance prédictive pour le système multi-stack

Le doctorant ou la doctorante se limitera à l'étude et au développement d'une stratégie de gestion de l'énergie avant le vol. L'étude s'appuiera sur les travaux de thèse de Jian Zuo [Zuo et al., 2020], notamment pour l'établissement d'un modèle permettant de lier l'état de santé de la pile avec sa sollicitation en puissance.

La méthodologie proposée est de définir d'abord un problème simplifié, auquel des éléments seront ajoutés progressivement afin d'y intégrer de plus en plus de réalisme. Ceci garantit des résultats

pouvant être partagés avec la communauté scientifique dès la première année de thèse. Les outils à développer sont le Pronostic de la durée de vie résiduelle (RUL), le Système de gestion de l'énergie (EMS - Energy Management System) et la prise de décision de maintenance.

Pronostic de la durée de vie résiduelle (RUL)

Dans la mise en œuvre de solutions de « Prognostics and Health Management » (PHM), le processus de pronostic est aujourd'hui considéré comme l'un des principaux leviers d'action. L'outil principal utilisé est la RUL (Remaining Useful Life) ou durée de vie résiduelle, toujours associée à un niveau de confiance sur la prédiction. De nombreux travaux permettent d'établir une durée de vie résiduelle des piles à combustibles [Yue et al., 2021].

Système de gestion de l'énergie (EMS - Energy Management System)

Un système de gestion de l'Énergie (ou EMS - Energy Management System en anglais) est un algorithme répartissant l'énergie dans les différents éléments d'un système conduisant à l'amélioration des performances tant d'un point de vue énergétique que de la fiabilité des composants. De nombreuses approches ont été appliquées à des véhicules hybrides à Piles à combustibles (ou FCEV) [Sorlei et al., 2021]. Afin de tenir compte du vieillissement des PàC, des stratégies de gestion de l'énergie (EMS) prenant en compte la durée de vie résiduelle des PàC (RUL) ont été récemment développées. Elles sont également connues sous le nom de Aging EMS [Yue et al., 2021] [Zuo et al., 2021]. Cependant à ce jour, il n'existe pas dans la littérature de méthodes de gestion d'énergie incluant les aspects de maintenance bien que ces aspects sont susceptibles de modifier considérablement la stratégie de gestion de l'énergie. Ceci constituera un point clé de la thèse.

Prise de décision - maintenance conditionnelle

Un critère permettant la prise de décision, tenant compte conjointement de l'état de santé des piles, des créneaux de maintenance, de la planification des vols et des performances économiques sera développé. Une articulation avec le système de gestion de l'énergie sera également étudiée et différentes stratégies de maintenance seront testées.

Résultats attendus

De nouvelles méthodes seront développées afin de mieux gérer la durée de vie des PàC et d'établir un système de gestion de l'énergie (EMS) intégrant les aspects de maintenance. Concernant les systèmes multi-stacks, la fiabilité du système et la durée de vie de chaque PàC seront optimisés. D'autre part, la synergie entre le système de gestion de la répartition de l'énergie et la planification de la maintenance permettra de maîtriser les coûts de maintenance.

Energy Management Strategy for Multi-Stack Systems for Maintenance Optimisation. Application to Air Transport.

Doctoral school : EEATS Grenoble
Host laboratory : GIPSA- LAB, UMR CNRS 5216, Grenoble

Laboratoire GIPSA-Lab, Grenoble

Catherine CADET catherine.cadet@gipsa-lab.grenoble-inp.fr
Christophe BERENGUER christophe.berenguer@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Laboratoire LIS – Université Aix-Marseille

Zhongliang LI zhongliang.li@lis-lab.fr
Rachid OUTBIB rachid.outbib@lis-lab.fr

Profile: Candidate with knowledge in the field of diagnosis, prognosis or maintenance and reliability. Knowledge of fuel cell technology would be appreciated.

Funding

An application for a research allocation from the EEATS doctoral school will be made with the candidate.

Key words Prognostics and Health Management (PHM), Remaining Useful Life (RUL), Predictive maintenance, Fuel cells, Multi-stack, EMS (Energy Management System).

Candidates are invited to send their CV, covering letter and academic results for the last 2 years to catherine.cadet@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Context and objective

In July 2021, the European Commission set a target of reducing greenhouse gas emissions from transport, and therefore from air transport, by 90% by 2050. Among the low-carbon energy sources, fuel cell technology (FC) is a relevant solution because of its high efficiency, energy density and limited impact on environmental resources. However, its deployment is limited by numerous obstacles such as its high cost or insufficient lifetime. To overcome them, the use of a system connecting several fuel cells in parallel (multi-stack systems) is a recent and very promising solution. Indeed, multi-stack systems offer many advantages, especially for aeronautical applications: the redundancy of the cells improves the reliability of the system, and the durability of the FCs can be greatly improved by optimally distributing the power demand between the different FC thanks to an efficient energy management strategy (EMS). The context of air transport also requires the additional integration of reliability, availability and maintenance aspects. However, so far, there are no energy management methods in the literature that include maintenance aspects, although these aspects can considerably modify the energy management strategy.

The objective of the project is to **design and develop an approach to establish an energy management tool for a multi-stack system that optimises the durability of fuel cells and takes into account safety and maintenance constraints**. This project is innovative in several aspects:

- The study of multi-stack systems is in its initial stages. Their sizing, the link between fuel cell ageing and power demand are research topics in itself,
- The integration of maintenance strategies in a power distribution system is a problem that goes beyond this application and has not been explored so far. The management system must guarantee the reliability and availability of the multi-stack system while spacing out maintenance operations as much as possible.

Finally, this type of approach has never been attempted in air transport, opening the way for the development of low carbon technologies in air transport.

Methodology

The main question that will be addressed in this thesis concerns the predictive maintenance decision for a multi-stack system. Predictive maintenance consists of regular monitoring of the health status of system components (Health Monitoring) [Rausand et al., 2020]. It is then possible to predict the occurrence of a failure before it happens and to program adequate maintenance operations. In the aviation domain, this approach is particularly studied [Meissner et al., 2021] [de Pater et al., 2021]. The choice of a maintenance slot must then take into account the constraints generated by the actors involved in aviation operations: the airlines, who define the flight plans, and the maintenance operators, who determine the possible slots for maintenance. The objective is to space out maintenance operations as much as possible. The principle of the decision is illustrated in Figure 1.

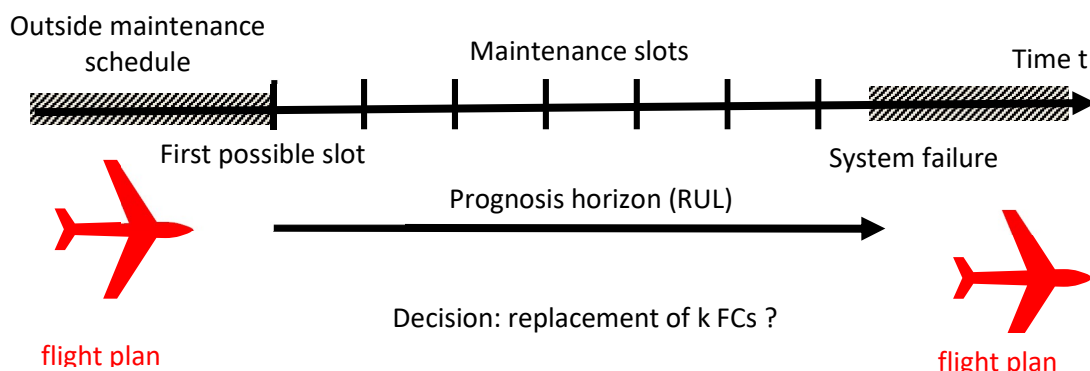


Figure 1: Predictive maintenance decision principle for the multi-stack system

The PhD student will limit his or her work to the study and development of a pre-flight energy management strategy. The study will be based on the thesis work of Jian Zuo [Zuo et al., 2020], in particular for the establishment of a model allowing to link the state of health of the battery with its power load.

The proposed methodology is to first define a simplified problem, to which elements will be added progressively in order to integrate more and more realism. This guarantees results that can be shared with the scientific community from the first year of the thesis. The tools to be developed are the Residual Lifetime Prognosis (RUL), the Energy Management System (EMS) and the maintenance decision making.

Residual Lifetime Prognosis (RUL)

In the implementation of Prognostics and Health Management (PHM) solutions, the prognostic process is nowadays considered as one of the key action means. The main tool used is the RUL (Remaining Useful Life), always associated with a level of confidence in the prediction. The PhD student's work will be based on the significant amount of work that has been done to establish a residual lifetime for fuel cells. [Yue et al., 2021].

Energy Management System (EMS)

An Energy Management System (EMS) is an algorithm that distributes energy to the different elements of a system, leading to improved performance from an energy point of view and increased reliability of the components. Many approaches have been applied to Fuel Cell Hybrid Vehicles (FCEV) [Sorlei et al., 2021]. In order to take into account the ageing of FCEVs, energy management strategies (EMS) taking into account the residual life of the FCEV (RUL) have been recently developed. They are also known as Aging EMS [Yue et al., 2021] [Zuo et al., 2021]. However, so far, there are no energy management methods in the literature that include maintenance aspects although these aspects have the potential to significantly change the energy management strategy. This will be a key point of the thesis.

Decision making - conditional maintenance

A decision making criterion, taking into account FC's health, maintenance slots, flight planning and economic performance, will be developed. An articulation with the energy management system will also be studied and different maintenance strategies will be tested.

Expected results

New approaches will be developed to better manage the lifetime of the FCs and to establish an energy management system (EMS) integrating maintenance aspects. For multi-stack systems, the reliability of the system and the lifetime of each FC will be optimised. On the other hand, the synergy between the EMS and the maintenance planning will allow to handle the maintenance costs.

References

- [Meissner et al., 2021] Meissner R., A.Rahn, K. Wicke, Developing prescriptive maintenance strategies in the aviation industry based on a discrete-event simulation framework for post-prognostics decision making, *Reliability Engineering and System Safety* 214 (2021) 107812. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107812>
- [de Pater et al., 2021] I. de Pater, M. Mitici, Predictive maintenance for multi-component systems of repairables with Remaining-Useful-Life prognostics and a limited stock of spare components, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 214, 2021, 107761, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107761>.
- [Rausand et al., 2020] M. Rausand, A. Barros, A. Høyland, *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*, 3rd Edition, Wiley Series in Probability and Statistics Series, ISBN: 978-1-119-37395-7 October 2020, 864 Pages
- [Sorlei et al., 2021] Sorlei, I.-S., Bizon, N., Thounthong, P., Varlam, M., Carcadea, E., Culcer, M., Iliescu, M., Raceanu, M. Fuel Cell Electric Vehicles—A Brief Review of Current Topologies and Energy Management Strategies. *Energies* 2021, 14, 252. <https://doi.org/10.3390/en14010252>
- [Yue et al., 2021] M. Yue, Z. Al Masry, S. Jemei, N. Zerhouni, An online prognostics-based health management strategy for fuel cell hybrid electric vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 24, 2021, Pages 13206-13218, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.095>.
- [Zuo et al., 2021] J. Zuo, C. Cadet, Z. Li, C. Bérenguer and R. Outbib, "Post-Prognostics Decision Making Strategy to Manage the Economic Lifetime of a Two-Stack PEMFC System," 2021 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/RAMS48097.2021.9605719. <https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/hal-03386042>
- [Zuo et al., 2020] J. Zuo, C. Cadet, Z. Li, C. Bérenguer, R. Outbib. Post-prognostics decision making for a two-stacks fuel cell system based on a load-dependent deterioration model. PHME 2020 - European Conference of the Prognostics and Health management (PHM) Society, Jul 2020, Turin, Italy. pp.9. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02946950>