

Stratégie fréquentielle adaptative pour une alimentation hybride à base de pile à combustible, supercondensateurs et batteries pour un drone de grande endurance.

T. Pavot^{1*}, R. Kiefer¹, T. Mesbahi¹, E. Laroche²

¹INSA Strasbourg, laboratoire ICube UMR7357, 24 Boulevard de la Victoire, Strasbourg, France

² Université de Strasbourg, laboratoire ICube UMR7357, 3-5 rue de l'université, Strasbourg, France

5 au 7 juillet 2023

RESUME – L'hybridation multisource électrique est une solution de plus en plus envisagée pour les drones de grande endurance, car elle offre une alternative crédible aux modèles traditionnels propulsés par un moteur thermique. En utilisant une combinaison de différentes sources d'énergie, tels que des piles à combustible, des supercondensateurs, des batteries et un algorithme de gestion d'énergie, l'hybridation permet d'optimiser la durée de vie des sources d'énergie du drone tout en réduisant l'impact environnemental.

Cet article propose une innovation en matière de stratégie fréquentielle de gestion de l'énergie pour les drones à propulsion hybride en adaptant la fréquence de coupure en fonction de l'état de charge des supercondensateurs afin de protéger la pile à combustible et la batterie des variations de courant causées par le vol. Cet article montre les avantages de la stratégie fréquentielle adaptative par rapport à la stratégie fréquentielle classique de la littérature.

Mots-clés – EMS, Pile à Combustible, Batterie, Supercondensateur, Drone

1. INTRODUCTION

Il paraît actuellement primordial de travailler sur des stratégies de propulsions décarbonées pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Dans le domaine de l'aéronautique, l'objectif est de créer des systèmes de propulsion plus performants et moins polluants. Les drones de longue endurance sont un terrain d'expérimentation et de démonstration pour développer des solutions novatrices.

Les systèmes hybrides utilisant des piles à combustible et des batteries offrent des alternatives électriques aux technologies thermiques en terme d'endurance. Depuis une dizaine d'années, le développement de solutions utilisant l'hydrogène a pris de l'ampleur en tant qu'alternative crédible aux énergies fossiles en matière d'autonomie de vol. En 2009, la marine américaine a introduit l'un des premiers drones à propulsions hybrides, l'Ion Tiger [1], équipé d'une pile à combustible (PàC) et d'une batterie, capable de voler pendant 26 heures avec de l'hydrogène gazeux et 48 heures avec de l'hydrogène liquide. Plus récemment, en 2018, Andrew Gong a réalisé le premier vol avec une triple hybridation passive, utilisant une PàC, un SC et une batterie [2]. Ces avancées témoignent de l'intérêt croissant pour l'hybridation dans ce secteur. Toutefois, la durée de vie des piles à combustible et des batteries reste un défi majeur pour des applications embarquées.

L'objectif de l'hybridation active avec des supercondensateurs (SCs) est d'optimiser l'utilisation de chaque source d'énergie afin de réduire leur usure, en particulier en contrôlant la dynamique des courants demandés. Cela nécessite le

développement d'algorithmes de gestion de l'énergie (EMS) performants[3].

La stratégie fréquentielle est un type d'EMS très développé dans la littérature [4, 5]. L'innovation proposée dans cette article rend la fréquence de coupure variable en fonction de l'état de charge (SoC) du SC. Pour évaluer ces stratégies, des indicateurs de performances seront proposés.

Le drone Stork (Fig.1), utilisé dans cette étude, a été conçu par l'équipe de l'INSA Strasbourg dans le cadre du projet européen INTERREG ELCOD (2017-2020, www.elcod.eu). Il a été spécialement conçu pour réaliser des vols longue durée pour diverses missions, notamment la surveillance des polluants atmosphériques. Le drone a une masse maximale au décollage de 25 kg et une envergure de 5 m.



FIG. 1. Drone Stork

La première partie de l'article décrira l'architecture d'hybridation électrique choisie. La deuxième partie développera le choix des indicateurs de performance afin d'évaluer une stratégie par rapport à une autre. La troisième partie dressera un comparatif entre une stratégie de gestion d'énergie classique à fréquence fixe et une stratégie à fréquence adaptative. Enfin, nous ferons un bilan comparatif de ces deux stratégies.

2. ARCHITECTURE D'HYBRIDATION ÉLECTRIQUE

Il existe différentes architectures pour la combinaison de ces sources d'énergie. La solution choisie est l'architecture semi-active [6], qui utilise seulement deux convertisseurs (Fig.2). Elle intègre trois sources d'énergie pour la propulsion (PàC, SC et batteries). Ces sources doivent être capables de fournir 500 W en vol de croisière à une vitesse de 90 km/h et 2000 W en pointe, notamment pendant la phase de décollage. L'objectif

*Email address(es): thomas.pavot@insa-strasbourg.fr

est de combiner ces sources avec une électronique de puissance performante afin de créer une propulsion hybride capable de répondre aux pics de puissance tout en maximisant la durée de vie des sources d'énergies utilisées.

En contrôlant ces convertisseurs en courant, il est possible de réguler l'énergie fournie par chacune des sources. La batterie quant à elle, est directement connectée au bus de tension continue pour alimenter le drone au démarrage et fournir une puissance supplémentaire lors du décollage. Cette approche stabilise la tension du bus continu autour de celle de la batterie et apporte une sécurité en cas de défaillance des convertisseurs DC-DC. Les convertisseurs utilisés sont limités ici à 500 W pour répondre aux besoins du vol de croisière et pour des questions d'encombrement dans le drone.

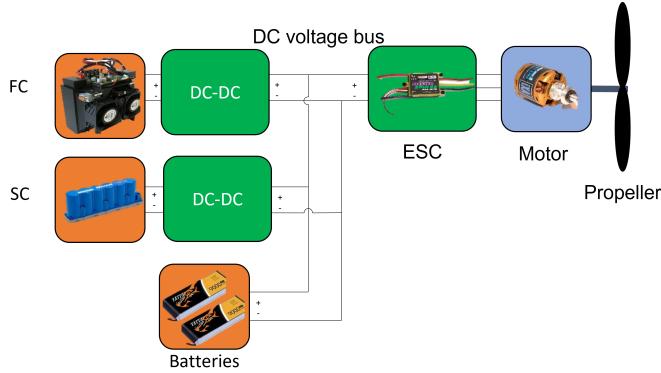


FIG. 2. Architecture semi active du drone Stork

3. INDICATEURS DE PERFORMANCE

Pour actionner efficacement ces convertisseurs, l'EMS (Energy Management Strategy) se charge de fournir la consigne de courant des convertisseurs afin d'assurer à chaque instant le mix énergétique permettant de répondre au besoin du système.

Dans le cas des drones, différents type d'EMS sont disponibles [7]. Ces stratégies sont établies afin de minimiser ou maximiser un ou plusieurs critères. Le choix des critères est primordial pour évaluer les différents EMS.

3.1. Indicateurs de performance classiquement utilisés

Pour les systèmes hybrides utilisant les piles à combustible, la consommation d'hydrogène et la durée de vie sont souvent les critères clés pour mettre en concurrence les différents EMS.

La littérature utilise souvent le critère de consommation d'hydrogène pour évaluer les EMS. Cependant, les systèmes hybrides associent des batteries et des supercondensateurs à la pile à combustible. Or, ces deux sources sont capables de stocker de l'énergie. Il faut donc s'assurer que l'économie d'hydrogène consommée ne vienne pas de la décharge de ces sources. Ce critère ne sera pas utilisé ici puisque le modèle utilisé est trop simpliste et ne permet pas de distinguer selon les cycles de courant une réel différence de consommation.

Le second critère souvent utilisé est le vieillissement. De même que pour la consommation d'hydrogène, il est nécessaire d'avoir un modèle précis afin d'être capable d'apporter une prédition fiable sur la durée de vie des piles à combustible.

Des publications récentes font état du vieillissement des piles à combustible en fonction du cycle de charge. Il apparaît que les cycles routiers usent plus rapidement que les cycles à courant constant. Des essais ont été effectué afin de voir l'impact entre deux cycles dont les dynamiques diffèrent [8]. La conclusion est que le cycle moins dynamique entraîne un vieillissement plus lent que l'autre. De même, la thèse de M.Tognan [9] qui étudie le vieillissement de quatre monocellules d'une PàC dont deux qui sont directement mises en parallèle avec un SC. L'effet du SC permet de lisser les appelles de courant. Les résultats sur

le vieillissement sont flagrants. Les deux monocellules hybrides s'usent moins que les deux autres (taux de dégradation environ 2 fois inférieur). Ces résultats montrent que la diminution de la dynamique des cycles de courant sur les PàC ont un impact direct sur le vieillissement.

Cependant, il est difficile d'avoir une évaluation précise de ces paramètres en simulation. L'indicateur de performance que nous allons utiliser correspond à la diminution des variations de courant demandée à la pile à combustible.

3.2. Indicateurs de performance choisis

Trois indicateurs seront utilisés dans notre étude.

Le premier indicateur consiste à comparer la moyenne quadratique des variations de courant demandées à la PàC sur l'ensemble du cycle de courant. Il s'agit de l'indicateur qui permet de quantifier le vieillissement de la PàC [8, 9].

Le deuxième indicateur permettra de mesurer l'amplitude maximale d'utilisation du SC. Pour minimiser les pics de courant dans la PàC et la batterie, les SCs doivent être utilisés sur la plage entière de leurs capacités. Pour respecter la plage de fonctionnement optimale, il est essentiel de ne pas descendre en dessous de 25% du SoC du SC [10]. Ce choix est arbitraire, mais cela permet à la tension du SC de ne pas descendre trop bas (moitié de la tension) pour limiter les pertes par effet joule dans les convertisseurs. Cela signifie que la plage maximale du SoC utilisable est de 75%. Cet indicateur constitue une limite importante pour valider l'efficacité de la stratégie.

Le troisième indicateur concerne la quantité d'énergie transvant à travers le SC. Il s'agit de la somme de l'énergie absorbée et de l'énergie fournie par le SC. Cet indicateur sert de témoin afin d'évaluer l'impact de l'utilisation du SC sur l'ensemble du cycle de vol.

Ces trois indicateurs vont nous permettre de comparer les stratégies.

3.3. Cycle de référence

De manière à pouvoir comparer les stratégies utilisées, un cycle de courant de référence a été défini lors d'un vol comportant plusieurs paliers d'altitudes (100m, 150m et 200m) (Fig.3). Le drone avait une masse de 16 kg et a volé 24 min en étant équipé uniquement d'une batterie. Pour simuler la masse de la PàC et de son réservoir, le drone avait été lesté de 4 kg et avait emporté une charge utile d'environ 2 kg. Ce vol a permis d'obtenir des données sur la consommation électrique du drone. On a constaté que le courant pouvait atteindre jusqu'à 80 A lors des phases d'ascension, alors qu'en croisière, la consommation moyenne était de 16 A soit environ 500W (Fig.4). Sur cette figure, on retrouve les pics de courant liés aux changements d'altitudes.

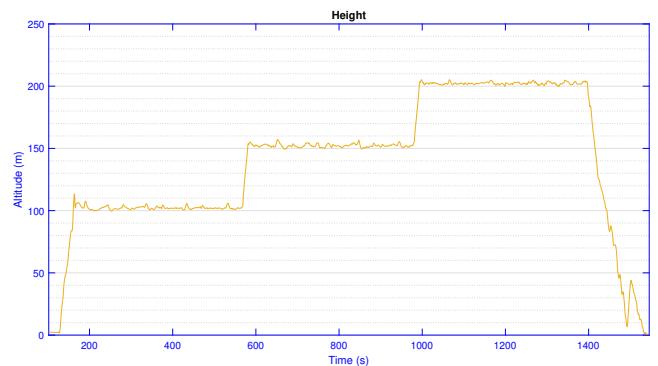


FIG. 3. Changement d'altitude lors du vol de référence

Ce cycle de référence en courant sera intégré dans nos modèles de simulation afin de comparer nos différents algorithmes.

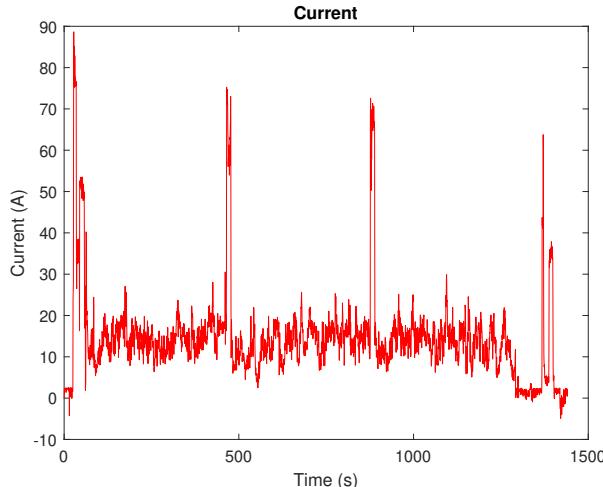


FIG. 4. Courant consommé durant le vol

4. STRATÉGIE DE GESTION D'ÉNERGIE EMS

Les stratégies retenues ici reposent sur la stratégie fréquentielle [4, 5]. Ce type de stratégie permet de diminuer les variations de courant d'une source par rapport à une autre. Sur notre système, ce type d'EMS diminue le facteur d'usure de la PàC.

4.1. Stratégie fréquentielle fixe

La stratégie fréquentielle consiste à utiliser un filtre passe-bas pour diviser le courant consommé par la charge en deux courants de consigne pour les convertisseurs DC-DC de la PàC et du SC. Le courant pour la PàC comporte les basses fréquences tandis que le courant pour le SC comporte les hautes fréquences. Cette approche économise la batterie et la PàC pendant le vol de croisière en utilisant le SC pour fournir les variations de courant. Il est nécessaire de déterminer une fréquence de coupure adaptée qui limitera les variations de courant de la PàC tout en respectant les limites du SC. Cependant, le réglage idéal dépendra du cycle de vol. Ce réglage doit éviter de décharger ou de surcharger excessivement le SC tout en maintenant un temps de réponse suffisamment lent pour minimiser le vieillissement de la PàC.

Par la suite, nous utiliserons une fréquence de coupure fixe dite idéale comme valeur de référence. Cette fréquence idéale est obtenue en appliquant l'échelon de courant maximal que les convertisseurs peuvent supporter. La fréquence idéale permet de limiter la baisse de l'état de charge (SoC) du SC à 25% à partir d'une valeur initiale de 50%. C'est donc la fréquence de coupure fixe la plus dynamique lors de ces échelons qui permet au SC de rester dans sa plage de fonctionnement optimale. Dans le cas de notre application, un échelon de courant de 16 A est appliqué. La fréquence de coupure fixe idéale obtenue est $PC = 0.2 \text{ rad/s}$.

Cette fréquence fixe est la plus basse possible pour limiter au maximum la dynamique du courant demandé à la PàC.

4.2. Stratégie fréquentielle adaptative en fonction de l'état de charge (SoC) du SC

L'innovation proposée ici consiste à ajuster la fréquence de coupure en fonction du SoC du SC. L'idée générale est de tirer parti de l'amplitude de variation du SoC du SC afin de maintenir une dynamique élevée limitant ainsi les variations de courant sur la PàC.

Selon le mode de fonctionnement du SC (charge ou décharge) la loi fréquentielle est différente. Lorsque le SC se décharge, le système doit être moins sensible si le SoC est faible et plus sensible si son SoC est élevé. Ce sera l'inverse lors de la charge. Pour répondre à cette problématique, nous avons choisi une équation de la fréquence de coupure qui suit une loi exponentielle.

La stratégie de fréquence variable repose sur l'utilisation de deux équations symétriques qui lient le SoC du SC à la fréquence de coupure. Les deux équations (Eq 1 et 2) utilisées pour relier le SoC à la fréquence de coupure (f_c) sont des fonctions exponentielles symétriques centrées sur un SoC de 0.5. Ces équations sont définies sur l'intervalle $[0;1]$. La première équation est utilisée pour la décharge du SC, tandis que la seconde équation est utilisée pour sa charge. La fréquence de coupure choisie dépend du sens de variation du courant de la charge afin de sélectionner l'équation.

$$f_c(\text{SoC})_{\text{dcharge}} = (F_{cHlim} - F_{cLlim}) \cdot e^{-G \cdot (SoC)} + F_{cLlim} \quad (1)$$

$$f_c(\text{SoC})_{\text{charge}} = (F_{cHlim} - F_{cLlim}) \cdot e^{-G \cdot (1-SoC)} + F_{cLlim} \quad (2)$$

L'équation comprend trois paramètres : F_{cHlim} , F_{cLlim} et G (Tab. 1). Les deux premiers paramètres sont choisis pour définir la plage de fréquence de l'équation. L'objectif est de rester dans la gamme de dynamique de la source la plus lente, en l'occurrence la PàC, et d'atteindre une gamme de dynamique très élevée pour le SC. Le paramètre G est également crucial (Fig 5), car il détermine la raideur de l'équation exponentielle. Une fois que les limites sont définies, ce paramètre ajuste la sensibilité de l'équation.

TABLEAU 1. Tattu LiPo Batteries

Paramètres	Valeur
F_{cHlim}	1 rad/s
F_{cLlim}	0.01 rad/s
G	3, 5 et 10

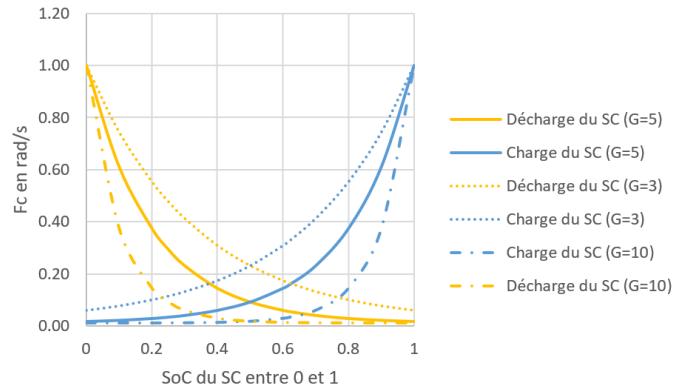


FIG. 5. Représentation de la fréquence de coupure en fonction du SoC et du paramètre G

5. SIMULATION ET RÉSULTAT

La modélisation et les simulations sont effectuées à l'aide du logiciel Matlab Simulink en appliquant le cycle de courant provenant du vol réel du drone. La pertinence du modèle de simulation des différents éléments de l'EMS a été validé en comparant les résultats avec ceux d'un banc d'essais permettant d'émuler le vol du drone en laboratoire grâce au cycle défini précédemment.

5.1. Résultat de simulations

Les résultats obtenus (Fig 6) mettent en évidence les différences entre la stratégie à fréquence fixe idéale de 0.2 rad/s et trois stratégies à fréquences de coupure adaptatives, avec des valeurs de paramètre G différentes (3, 5 et 10). En modifiant le

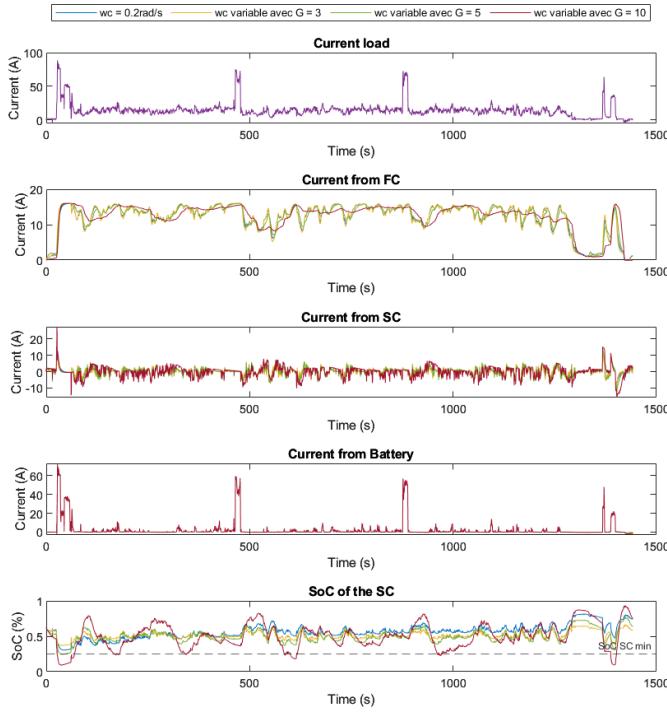


FIG. 6. Résultats des courants et du SoC du SC durant le cycle de courant du vol complet

paramètre G, la sensibilité de la fréquence de coupure en fonction du SoC du SC change.

La première courbe représente le courant consommé par la charge, qui doit être réparti entre les trois sources. Les deux courbes suivantes correspondent aux courants provenant de la PàC et du SC en sortie des convertisseurs, tandis que la dernière courbe représente le courant de la batterie. Chacune de ces stratégies permet de lisser le courant demandé à la PàC en laissant les variations de courant au SC. La batterie subit des appels de courant lors des phases d'ascension, car la puissance demandée par le moteur dépasse 500 W, alors que pendant les phases de vol de croisière, le courant est nul. Cela est dû à la limitation de la puissance des convertisseurs à 500 W.

La dernière courbe illustre l'évolution du SoC du SC tout au long du cycle. Il est intéressant de constater l'effet du paramètre G, qui augmente l'amplitude de charge et de décharge du SC à mesure que sa valeur augmente.

Le choix des trois valeurs de G permet de démontrer l'impact de la sensibilité sur les résultats de simulation. La valeur 5 est sélectionnée pour illustrer le résultat optimal, qui maintient le SoC du SC supérieur à 25% tout au long du cycle. Les deux autres valeurs permettent d'observer la tendance d'évolution du paramètre G autour de cette valeur optimale.

Les indicateurs de performance (Fig 7) nous permettent d'évaluer les différentes stratégies. La stratégie avec G=10 de couleur jaune est la moins performante selon les trois indicateurs. La stratégie avec G=3 de couleur rouge semble être la meilleure, mais elle entraîne une décharge du SC en dessous de 25%, dépassant ainsi la limite fixée. Les deux autres courbes bleue (fréquence fixe) et verte (fréquence variable avec G = 5) correspondent, selon notre protocole de dimensionnement, aux stratégies idéales pour une fréquence de coupure fixe et adaptative, car elles se rapprochent de la limite de 25% sans la dépasser.

Il est clairement observé que sur l'ensemble du vol, la stratégie fréquentielle adaptative en vert (G = 5) permet d'améliorer deux indicateurs et d'égaliser le troisième par rapport à la stratégie à fréquence fixe en bleu. La diminution la plus notable concerne la variation de courant pour la PàC, avec une baisse de 31%. L'énergie transitant dans le SC augmente également d'en-

viron 16%. Quant à l'amplitude du SoC, elle reste pratiquement la même pour les deux stratégies.

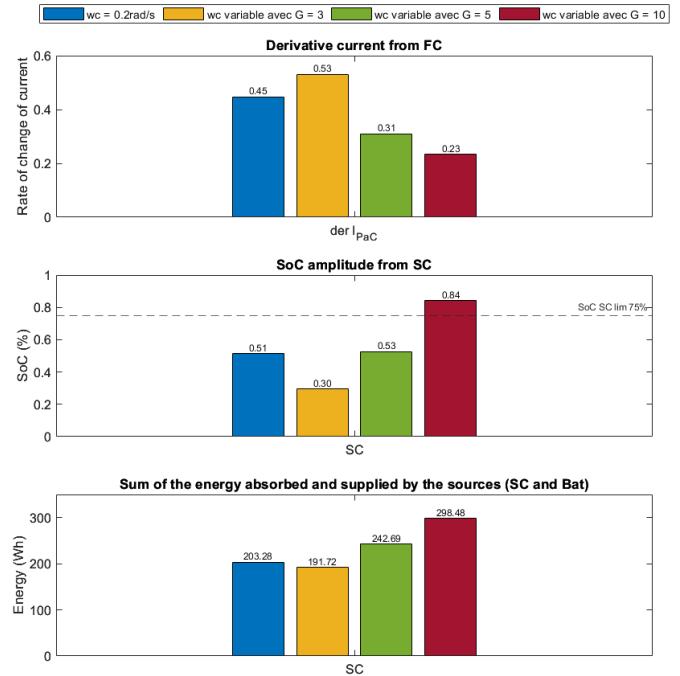


FIG. 7. Indicateurs de performance selon les stratégies

6. DISCUSSION

L'utilisation d'une fréquence adaptative conduit à une amélioration des indicateurs présentés précédemment par rapport à la stratégie à fréquence fixe. Cependant, le meilleur indicateur devrait être le gain de durée de vie d'une stratégie par rapport à une autre, ce qui nécessite une modélisation plus détaillée de la PàC, un aspect encore peu exploré dans la littérature. Une hypothèse importante faite ici est que la réduction des variations de courant prolonge la durée de vie des piles à combustible. C'est dans cette optique que cette nouvelle stratégie a été développée. L'utilisation de l'amplitude du SoC du SC, qui reste autour de 50%, n'a pas été maximisée. Une utilisation allant jusqu'à 75% pourrait améliorer les autres indicateurs. Pour appliquer cette nouvelle stratégie à n'importe quel système hybride avec la même architecture, il est nécessaire de développer un protocole de dimensionnement afin de déterminer les trois paramètres de l'équation. L'approche actuelle, qui utilise l'échelon de courant maximal que le système peut supporter, est une première méthode, mais elle n'est peut-être pas optimale, surtout pour des systèmes surdimensionnés. Un dernier point plus général concerne l'impact de l'hybridation sur la durée de vie par rapport à l'autonomie d'une solution mono-source. Dans le cas des drones, l'endurance de vol est un facteur essentiel. L'ajout de cette hybridation entraîne une augmentation de la masse avec l'ajout des deux convertisseurs et des SC, ce qui réduit l'autonomie. De plus, la stratégie à fréquence adaptative incite à maximiser l'utilisation du SC, ce qui signifie qu'une quantité maximale d'énergie passe par les convertisseurs, entraînant des pertes supplémentaires et une diminution de l'efficacité globale.

Dans le contexte des applications actuelles, les drones ont tendance à avoir une durée de vie relativement courte par rapport à celle des sources d'énergie qui les alimentent. Cela peut s'expliquer par la rapidité des progrès technologiques et les cycles de remplacement fréquents dans l'industrie des drones, où de nouveaux modèles plus avancés sont régulièrement introduits sur le marché.

Cependant, lorsqu'on envisage des perspectives à plus long terme dans le domaine de l'aéronautique, il devient intéressant

de chercher à développer des avions qui ont une durée de vie plus longue. Cela permettrait d'optimiser les investissements réalisés dans la conception, la fabrication et la maintenance des aéronefs, en maximisant leur utilisation sur une période prolongée.

7. CONCLUSION

Cet article met en évidence une stratégie fréquentielle adaptative qui présente un potentiel prometteur pour optimiser l'utilisation du SC dans un système hybride destiné à un drone de grande endurance. Les résultats des simulations démontrent que cette stratégie permet de réduire de manière significative les variations de courant aux bornes de la PàC et de la batterie, et devraient donc améliorer sa durée de vie.

Des recherches supplémentaires et des essais expérimentaux seront nécessaires pour confirmer cette approche sur banc de test et en vols réels.

En définitive, cette étude ouvre la voie à de nouvelles possibilités pour l'amélioration des performances et de l'efficacité énergétique des drones de grande endurance. L'optimisation de l'utilisation du SC grâce à la stratégie fréquentielle adaptative offre des perspectives intéressantes pour les applications aéronautiques, en permettant une meilleure gestion des variations de courant et une utilisation plus efficace des sources d'énergie.

8. RÉFÉRENCES

- [1] K Swider-Lyons, J Mackrell, J Rodgers, G Page, M Schuette, and R Stroman. Hydrogen fuel cell propulsion for long endurance small UAVs. *AIAA Centennial of Naval Aviation Forum "100 Years of Achievement and Progress"*, (September), 2011.
- [2] A Gong and D Verstraete. Flight Test of a Fuel-Cell / Battery / Supercapacitor Triple Hybrid. *31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, (September) :1–10, 2018.
- [3] T Lei, Z Yang, Z Lin, and X Zhang. State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(6) :1488–1503, 2019.
- [4] H Marzougui, A Kadri, M Amari, and F Bacha. Energy management of fuel cell vehicle with hybrid storage system : A frequency based distribution. pages 1853–1858, 2019.
- [5] A Tani, M Camara, and B Dakyo. Energy management based on frequency approach for hybrid electric vehicle applications : Fuel-cell/lithium-battery and ultracapacitors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(8) :3375–3386, 2012.
- [6] B Wang, D Zhao, W Li, Z Wang, Y Huang, Y You, and S Becker. Current technologies and challenges of applying fuel cell hybrid propulsion systems in unmanned aerial vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 116 :100620, 2020.
- [7] M Boukoberine, M Zia, M Benbouzid, Z Zhou, and T Donateo. Hybrid fuel cell powered drones energy management strategy improvement and hydrogen saving using real flight test data. *Energy Conversion and Management*, 236 :113987, 2021.
- [8] E Pahon, S Jemei, N Steiner, and D Hissel. Effect of load cycling on the performance of fuel cell stacks. *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 - Proceedings*, 2019.
- [9] M Tognan. Etude de dégradations des performances de Piles à Combustible PEM BT alimentées en H₂/O₂ lors de campagnes d'endurance : du suivi de l'état de santé en opération à la modélisation du vieillissement. pages 1–190, 2018.
- [10] L Mamouri, T Mesbahi, P Bartholomeus, and T Paul. Design of a DC/DC power converter for li-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles. *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2020 - Proceedings*, (1), 2020.