



Photo : Licence Pixabay

Pré-dimensionnement d'un moteur électrique de très forte puissance spécifique pour avion hybride

Sarah Touhami

Doctorante, Toulouse-INP

Encadrement :

Yvan Lefevre, Jean-François Llibre,
LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS,
INPT, UPS

Quelle puissance spécifique pouvons-nous atteindre en fonction des technologies actuelles et futures des machines électriques pour la propulsion hybride ? Quelles sont les verrous technologiques qu'il faut soulever pour dépasser cette puissance spécifique ?

Introduction

Plusieurs projets et programmes de recherche [1][2] étudient la propulsion hybride des avions dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les nuisances sonores et d'améliorer le rendement énergétique. En outre, ces programmes de recherche visent à dimensionner des moteurs électriques à haute puissance spécifique et à haut rendement pour des puissances de propulsion de l'ordre de mégawatt comme c'est le cas du projet *Hy-*

brid Aircraft : Academic reSearch on Thermal and Electrical Components and Systems (HASTECS) [2]. Ce dernier fait partie du programme de recherche aéronautique européen «Clean Sky 2». HASTECS vise à atteindre des puissances spécifiques pour les moteurs électriques et les convertisseurs statiques incluant leurs systèmes de refroidissement de l'ordre de 5kW/kg et 15kW/kg respectivement pour un objectif à moyen terme en 2025 et de l'ordre de 10kW/kg et 25kW/kg respectivement pour un objectif à long terme en 2035 [2]. Pour

atteindre ces objectifs, il faut impérativement identifier à l'aide de modèles et d'outils les technologies les plus prometteuses d'une part et les ruptures technologiques qu'il faut anticiper d'autre part. Pour l'objectif de 2025, le dimensionnement d'un moteur électrique avec son système de refroidissement a été présenté dans [3]. Ce dernier a été effectué en utilisant des modèles et des outils électrothermiques développés dans [4-7]. Ils sont basés sur le principe des charges électriques, magnétiques et mécaniques [8].

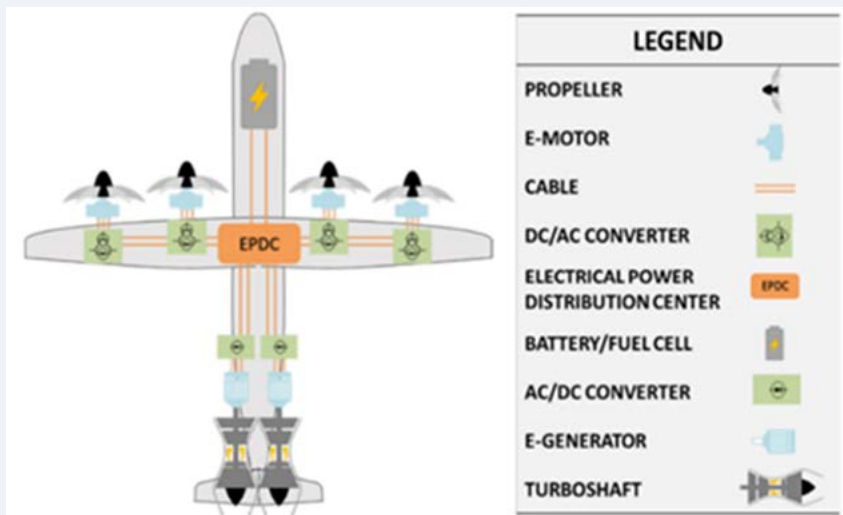


Figure 1 : Architecture série de l'avion hybride [2].

Dans cet article nous présentons le pré-dimensionnement d'un moteur électrique avec une puissance spécifique supérieure à 10 kW/kg pour la propulsion hybride série d'un avion (figure 1). Cet objectif de puissance spécifique correspond à l'objectif souhaité pour 2035 et utilisera nécessairement des technologies plus avancées que celles utilisées dans le dimensionnement du moteur électrique pour l'objectif à 2025 [3]. Dans ce contexte, les problématiques liées à l'augmentation de la puissance spécifique du moteur électrique sont d'abord rappelées. Ensuite, on précise la stratégie qui permet d'atteindre l'objectif visé à partir du dimensionnement préalablement effectué pour l'objectif 2025.

Par conséquent, d'autres niveaux technologiques sont proposés. Le pré-dimensionnement débute par une introduction du cahier des charges et une discussion sur le choix du point de fonctionnement dans le plan couple-vitesse. Par la suite, la procédure de pré-dimensionnement est proposée. Dans cette procédure, les technologies sont évaluées dans un premiers temps, par l'outil *Target Setting Tool* (TST) afin de fixer les niveaux de technologies nécessaires pour atteindre la cible en terme de puissance, de couple et donc de vitesse moteur. Dans un second temps, le pré-dimensionnement est réalisé en utilisant l'outil SM-PMSM. Pour finir, les performances du pré-dimensionnement seront validées à l'aide d'un logiciel de calcul de champs magnétiques par éléments finis.

Enjeux et limitations de l'augmentation de la puissance spécifique

Généralement, pour augmenter la puissance spécifique des machines électriques, les charges électriques, magnétiques et

mécaniques doivent être augmentées. Cependant, l'augmentation de ces charges entraîne une augmentation des pertes et donc une diminution du rendement. Les pertes entraînent à leur tour une augmentation de la température qui peut conduire à détériorer certaines parties de la machine électrique, en particulier les isolants et les aimants permanents. De plus, l'augmentation de la charge mécanique telle que la vitesse de rotation entraîne des instabilités mécaniques qui peuvent conduire à des dysfonctionnements.

Au regard du niveau de puissance spécifique recherchée, le choix de ces charges revêt une importance primordiale. En partant des choix technologiques effectués pour dimensionner le moteur électrique avec son système de refroidissement de 2025, on peut trouver les charges et les technologies qui permettent de satisfaire l'objectif à long terme de 2035. Les choix technologiques de l'objectif 2025 sont résumés dans le tableau 1. Ces valeurs de charges ont été

Charges, vitesse, nombre de paires de pôles, caractéristiques	Solutions technologiques
Pression tangentielle : $\sigma_t = 50000 \text{ Pa}$	<ul style="list-style-type: none"> - Conducteurs divisés et torsadés - Tôles magnétiques (alliage en Fer-Cobalt): Vacoflux 48 avec épaisseur de 0,35 mm - Aimants permanents en Halbach avec des segmentations radiales et axiales pour garantir un flux sinusoïdal d'une part et pour réduire les pertes par courant de Foucault d'autre part - Frette en fibre de carbone (vitesse périphérique supérieure à 100 m/s) - Classe thermique des isolants : 220 °C - Refroidissement liquide dans la carcasse pour l'extraction et l'évacuation des pertes statoriques - Refroidissement liquide dans l'arbre pour refroidir le rotor.
Densité de courant : $j_{rms} = 8,1 \text{ A.mm}^{-2}$	
Densité de courant linéique : $A_{rms} = 81,4 \text{ A.mm}^{-1}$	
Produit de densité de courant : $A_{rms} \times j_{rms} = 6,59 \times 10^{11} \text{ A}^2.\text{m}^{-3}$	
Induction max d'entrefer : $B_g = 0,9 \text{ T}$	
Induction culasse stator : $B_v = 1,2 \text{ T}$	
Induction dans les dents : $B_d = 1,3 \text{ T}$	
Vitesse de rotation : $\Omega = 15970 \text{ tr/min}$	
Nombre de paires de pôles : $p = 2$	
Coefficient de remplissage : 0,5	
Limite thermique exprimée par le produit équivalent de la densité de courant : $A_{j_{eq}} = 2 \times 10^{12} \text{ A}^2.\text{m}^{-3}$	
Limite mécanique exprimée par : <ul style="list-style-type: none"> • la vitesse périphérique : $V_{pmax} \leq 150 \text{ m/s}$ • le facteur de forme $\lambda = 0,5$ 	

Tableau 1 : Choix technologiques effectués pour l'objectif à moyen terme 2025 [3].

Charges	Refroidissement liquide interne
Induction max d'entrefer B_g [T]	0,8-1,05
Induction culasse stator B_v [T]	1,2-2,35
Induction dans les dents B_t [T]	1,2-2,35
Densité de courant j_{rms} [$A \cdot mm^{-2}$]	8-25
Densité de courant linéique A_{rms} [$A \cdot mm^{-1}$]	80-200
Produit de densité de courant $A_{rms} \times j_{rms}$ [$A^2 \cdot m^{-3}$]	$0,6 \times 10^{12}$ - 5×10^{12}

Tableau 2 : Charges électromagnétiques autorisées et utilisées pour dimensionner le moteur électrique de 2035.

●●● établies à partir de valeurs typiques élaborées par des constructeurs de machines en fonction des technologies de refroidissement utilisées (cf. annexe : tableau 7).

Pour atteindre une puissance spécifique supérieure à 10 kW/kg, les charges, la vitesse, le nombre de paires de pôles, le coefficient de remplissage en cuivre, la classe thermique devraient être encore augmentés. Compte tenu des limitations thermiques, une nouvelle méthode de refroidissement constitue une solution clé pour dépasser les charges choisies pour atteindre l'objectif 2025. Cette nouvelle méthode de refroidissement impliquera donc une nouvelle limite thermique supérieure à celle de l'objectif à moyen terme. Par conséquent, on devra choisir de nouvelles valeurs typiques de charges parmi les intervalles de valeurs proposés dans le tableau 2.

En fonction de ces valeurs des charges, certains choix technologiques sont identiques à ceux utilisés pour le moteur de 2025 à savoir :

- refroidissement liquide dans la carcasse et dans l'arbre ;
- choix identiques pour les tôles magnétiques en Vacoflux 48, les aimants permanents en Halbach et la frette en fibre de carbone ($V_{pmax} \leq 150$ m/s).

En revanche, certaines solutions technologiques sont ajoutées à savoir :

- méthode de refroidissement interne direct pour le refroidissement du bobinage du stator (figure 2) ;
- matériaux d'isolation inorganiques de classe thermique 240 °C, ce qui permet l'augmentation de la densité de courant et des niveaux de fréquence ;
- fils de Litz pour réduire les pertes par effet Joule à très haute fréquence (>1 kHz).

Pré-dimensionnement du moteur électrique pour l'objectif à long terme

Spécifications et choix de point de pré-dimensionnement

La mission de vol que doit satisfaire le moteur électrique à haute puissance spécifique est donné en figure 3. Il doit être pré-dimensionné pour fournir une puissance allant de 0,018 PU à 1 PU¹ avec un rapport de vitesse de rotation allant de 30 % à 100 %. Il est important de définir le point de dimensionnement du moteur électrique dans le plan couple-vitesse. Pour cette mission de vol, le décollage, la montée et la croisière sont les trois phases du vol où la puissance mécanique requise est élevée. Ces trois phases peuvent être envisagées pour définir le point de dimensionnement. La phase de vol au décollage est la phase la plus critique des trois sur le plan thermique. Par conséquent, le point de dimensionnement est choisi pour cette phase de vol au décollage.

¹ Pour des raisons de confidentialités, le profil de la puissance mécanique est exprimé en Per Unit (PU).

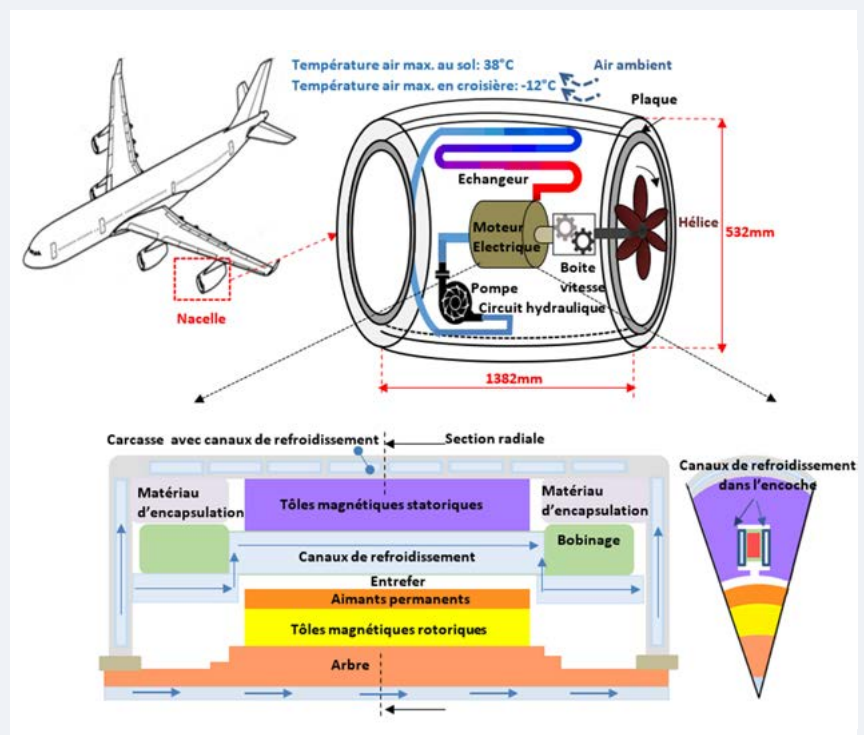


Figure 2 : Architecture de la nacelle : moteur électrique avec son système de refroidissement pour la cible 2035.

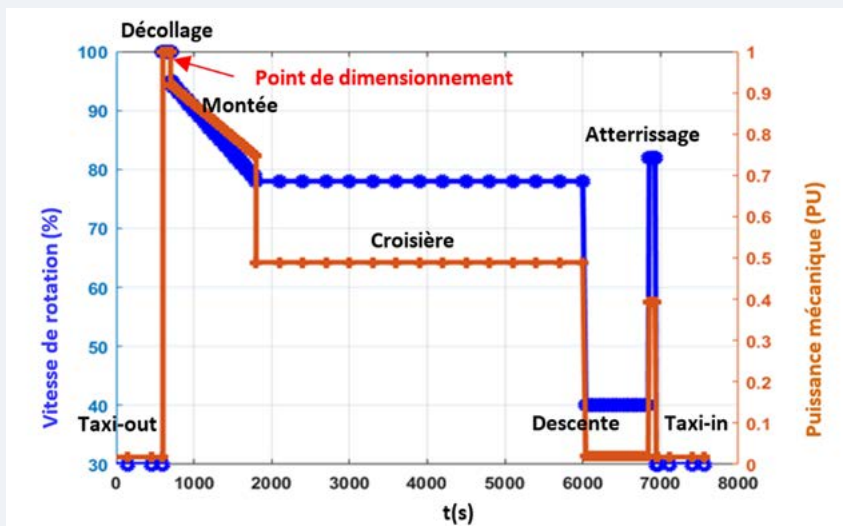


Figure 3 : Puissance mécanique vs vitesse de rotation : profil de mission d'un moteur de propulsion.

“L’outil d’évaluation des technologies “TST” est un outil qui utilise le concept des charges électriques, magnétiques et mécaniques et qui s’appuie sur le modèle analytique d’un moteur synchrone idéal à ondes sinusoïdales.”

Procédure de pré-dimensionnement

Pour atteindre une puissance spécifique supérieure à 10 kW/kg, la procédure de pré-dimensionnement du moteur électrique comprend deux étapes :

- la première étape consiste à évaluer les technologies des moteurs électriques nécessaires pour atteindre notre objectif en utilisant l’outil *Target Setting Tool* ;
- la seconde étape consiste à dimensionner un moteur synchrone à aimants permanents montés en surface en utilisant l’outil SM-PMSM.

triques sans spécifier leurs structures et ce à partir des charges choisies.

Pour effectuer ces compromis, nous appliquons au début les valeurs maximales des charges (cf. tableau 2), une vitesse de rotation élevée ($\Omega > 16\ 000$ tr/mn), un nombre élevé de paires de pôles ($p > 2$) et un coefficient de remplissage en cuivre élevé afin d’évaluer la puissance spécifique maximale atteignable, indépendamment des pertes qui en résultent. Si la puissance spécifique atteinte n’est pas suffisante par rapport à l’objectif, on augmente à nouveau la vitesse et le nombre de

paires de pôles jusqu’à dépasser 10 kW/kg. Une fois que ceci est effectué, nous ajustons les charges, la vitesse, le nombre de paires de pôles et le coefficient de remplissage en cuivre afin de diminuer les pertes tout en contrôlant la puissance spécifique. Le tableau 3 montre les charges ajustées, la vitesse de rotation, le nombre de paires de pôles, le coefficient de remplissage en cuivre et d’autres paramètres ajustés qui permettent d’atteindre l’objectif de 2035. Les dimensions principales, le poids du moteur électrique et les autres paramètres intrinsèques sont résumés dans le tableau 4.



Evaluation des technologies des moteurs électriques : l’outil «Target Setting Tool»

L’outil d’évaluation des technologies «TST» est un outil qui utilise le concept des charges électriques, magnétiques et mécaniques et qui s’appuie sur le modèle analytique d’un moteur synchrone idéal à ondes sinusoïdales [3-7]. A partir de très peu de données, TST permet d’identifier les niveaux technologiques les plus prometteurs. Il permet aussi de faire des compromis rapides sur les charges pour atteindre une puissance spécifique souhaitée comme le montre la figure 4. Il évalue ainsi la puissance spécifique des moteurs élec-

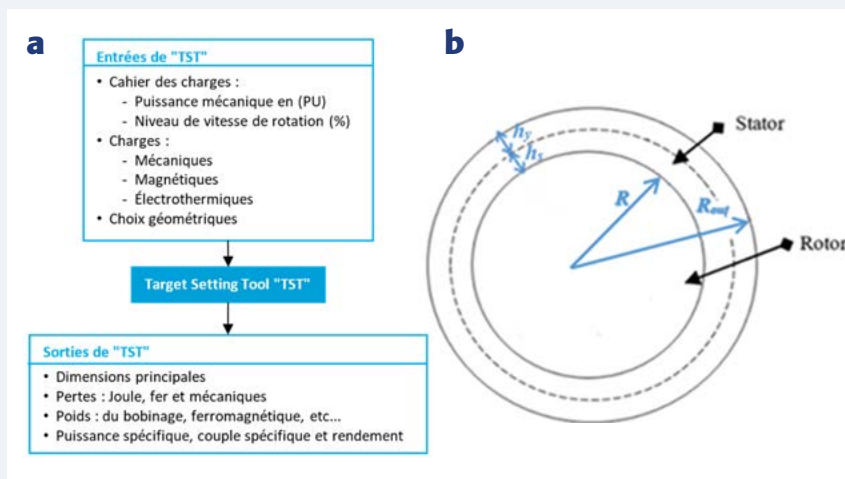


Figure 4 : (a) Entrées/Sorties de l’outil d’évaluation «Target Setting Tool (TST)», (b) Structure de la machine évaluée par TST.

	Unité	Valeur
Spécification : puissance mécanique	PU	1
Charges nécessaires pour atteindre 10kW/kg		
Vitesse de rotation	[tr/min]	20 000
Induction max dans l'entrefer " B_m "	[T]	0,9
Induction dans la culasse statorique " B_y "	[T]	1,25
Induction dans les dents statoriques " B_t "	[T]	1,25
Densité de courant " j_{rms} "	[A.mm ⁻²]	20
Densité de courant de surface linéaire " A_{rms} "	[kA.m ⁻¹]	110
Pression tangentielle " σ_t "	[Pa]	70 000
Produit de densité de courant " $A_{rms} \times j_{rms}$ "	[A ² .m ⁻³]	2.2x10 ¹²
Matériaux et choix géométriques nécessaires pour atteindre 10kW/kg		
Tôles statoriques	Vacoflux 48-0.35mm	
Nombre de paires de poles " p "	-	4
Coefficient de remplissage " k_{fill} "	-	0,5
Coefficient des têtes de bobines " k_{tb} "	-	1,4
Facteur de forme " λ "	-	0,5

Tableau 3 : Charges, matériaux et choix géométriques évalués par TST pour atteindre l'objectif 2035.

●●● **Dimensionnement moteur synchrone à aimants permanents montés en surface : l'outil «SM-PMSM Tool»**

L'outil SM-PMSM (moteur synchrone à aimants permanents montés en surface) est un outil de pré-dimensionnement pour les machines électriques basé sur les hypothèses de TST. En effet, il permet de donner plus de détails sur le moteur électrique conçu en choisissant la configuration des bobinages et la structure du rotor comme le montre la figure 5.

Après avoir déterminé les principales dimensions du moteur électrique lors de la première étape de la procédure de dimensionnement, la structure du moteur électrique est définie en choisissant les configurations des bobinages et du rotor. Bien qu'il soit difficile de réaliser un bobinage sinusoïdal pour satisfaire les hypothèses de TST, nous choisissons un bobinage triphasé conventionnel ayant un pas diamétral, à une seule couche, deux encoches par

pôle et par phase, comme le résume le tableau 5. Cela correspond à un stator à 24 encoches. Pour le rotor, nous choisissons le samarium-cobalt

Dimensions principales	Unité	Valeur
Hauteur de la culasse statorique " h_s "	[mm]	14,1
Hauteur d'encoche/dent " h_t "	[mm]	25
Rayon interne stator " R "	[mm]	72,9
Epaisseur d'entrefer " e_g "	[mm]	3,06
Longueur active " L_m "	[mm]	292
Densité de courant " j_{rms} "	[A.mm ⁻²]	20
Densité de courant de surface linéaire " A_{rms} "	[kA.m ⁻¹]	110
Pression tangentielle " σ_t "	[Pa]	70 000
Masse évaluée du moteur électrique	[kg]	94.35
Pertes évaluées		
Pertes par effet Joule	[kW]	13,29
Pertes fer	[kW]	6,46
Pertes mécaniques	[kW]	1,08
Puissance spécifique du moteur électrique	[kW/kg]	15,12
Produit de densité de courant équivalent	[A ² /m ³]	3,97 x 10 ¹²

Tableau 4 : Dimensions principales, masse, pertes et puissance spécifique données par TST.

“ L'outil SM-PMSM (moteur synchrone à aimants permanents montés en surface) est un outil de pré-dimensionnement pour les machines électriques basé sur les hypothèses de TST. ”

«Sm-Co» pour les aimants permanents en raison de sa faible sensibilité à la température et des tôles magnétiques en fer-cobalt «Vacoflux 48» pour la culasse rotorique. Le niveau d'induction de la culasse rotorique ainsi que la polarisation des aimants permanents sont indiqués dans le tableau 5. Les sorties telles que les dimensions complémentaires, le poids recalculé et les pertes recalculées sont résumées dans le tableau 6.

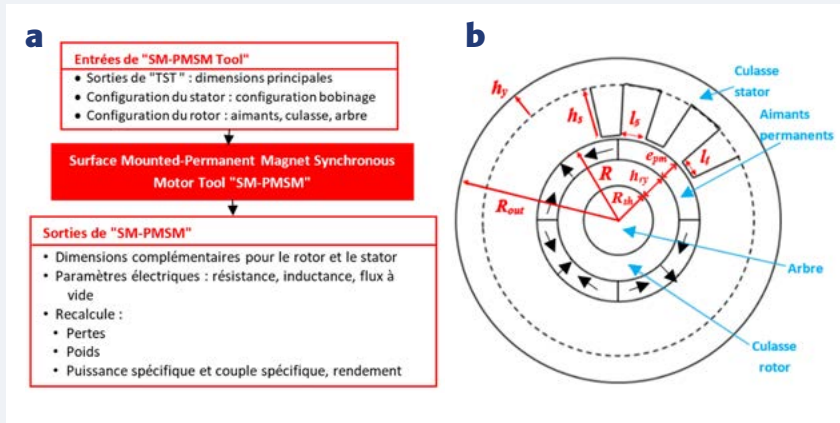


Figure 5 : (a) Entrées/Sorties de l'outil de dimensionnement «SM-PMSM» Tool, (b) Structure de la machine dimensionnée par l'outil «SM-PMSM».



Configuration de bobinage		
Nombre de phases "q"	-	3
Nombre d'encoche "N _s "	-	24
Configuration rotorique		
Polarisation des aimants permanents	[T]	1,16
Induction culasse rotorique "B _{yr} "	[T]	1,4

Tableau 5 : Configuration du bobinage et du rotor choisies dans l'outil SM-PMSM.

Dimensions complémentaires	Unité	Valeur
Largeur dent "l _t "	[mm]	9,38
Largeur d'encoche "l _s "	[mm]	9,71
Épaisseur d'aimants permanents "e _{pm} "	[mm]	7,84
Hauteur culasse rotor "h _r "	[mm]	16,66
Rayon de l'arbre "R _{sh} "	[mm]	45,36
Coefficient des têtes de bobines "k _{tb} "	-	1,4
Masse évaluée du moteur électrique	[kg]	109,3
Pertes		
Pertes par effet Joule "P _j "	[kW]	13,312
Pertes fer "P _i "	[kW]	6,468
Pertes mécaniques "P _w "	[kW]	1,557
Puissance spécifique du moteur électrique	[kW.kg ⁻¹]	13
Produit de densité de courant équivalent	[A ² .m ⁻³]	4,06×10 ¹²

Tableau 6 : Dimensions, masse et pertes obtenus par l'outil SM-PMSM.

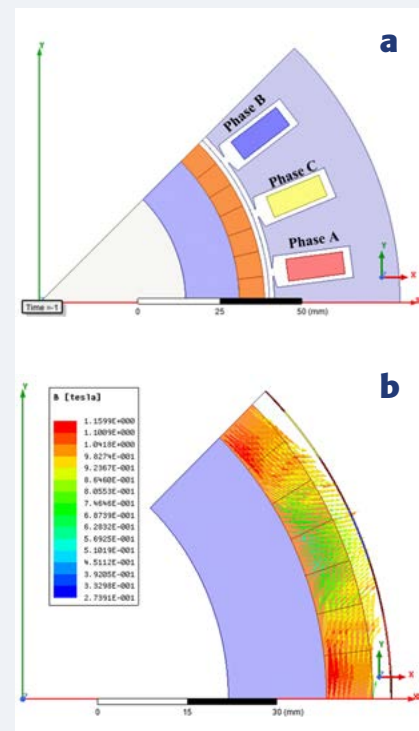


Figure 6 : (a) Structure du moteur électrique pré-dimensionné pour la cible 2035, (b) Structure Halbach sept segments.

Validation par éléments finis

Compte tenu de plusieurs fortes hypothèses prises dans TST et SM-PMSM, la validation des performances du moteur électrique pré-dimensionné est

essentielle. Pour cela, nous effectuons une analyse à l'aide d'un logiciel de calcul de champs par éléments finis. En raison des symétries, l'étude est effectuée sur un seul pôle comme le

montre la figure 6. La validation des performances telles que le couple électromagnétique ainsi que la force électromotrice est illustrée dans la figure 7.



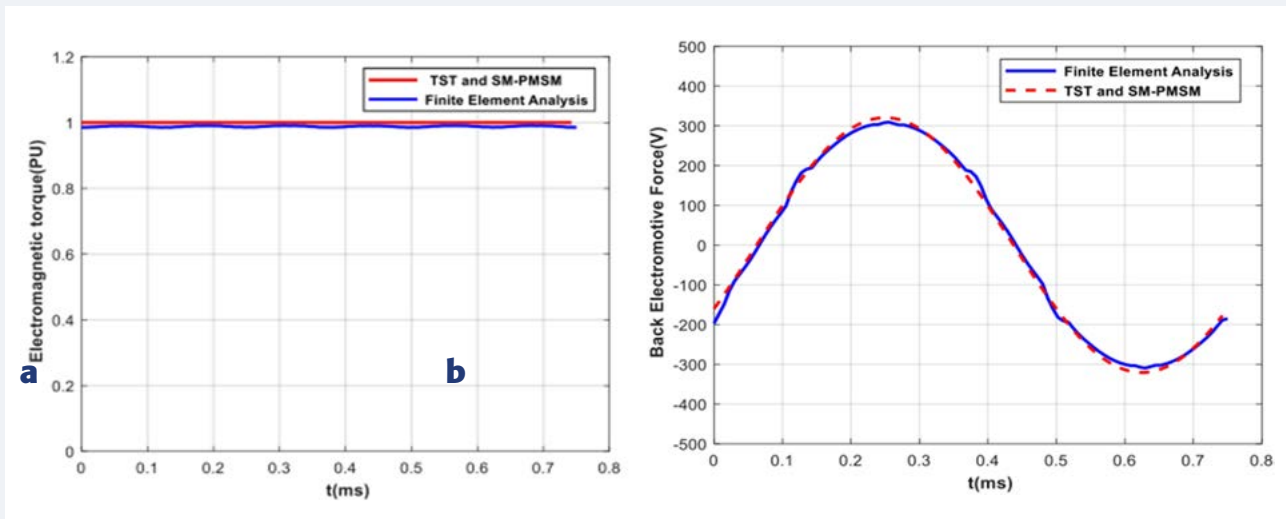


Figure 7 : Validation avec l'analyse par éléments finis : (a) couple électromagnétique, (b) force électromagnétique.

Conclusion

Un pré-dimensionnement du moteur électrique à haute puissance spécifique pour l'objectif HASTECS à long terme de 2035 est présenté dans cet article. Ce pré-dimensionnement est effectué en utilisant deux outils numériques «TST» et «SM-PMSM». Le premier outil «TST» utilise les expressions analytiques d'un moteur synchrone à ondes sinusoïdales. A partir d'une spécification de puissance massique à atteindre, de choix de charges électriques, magnétiques et mécaniques et de choix technologiques sur les

matériaux compatibles avec ces charges, l'outil donne les caractéristiques dimensionnelles principales du moteur électrique. Ainsi ce premier outil permet de rapidement évaluer les choix technologiques à faire et les charges nécessaires pour répondre au cahier des charges. Le second outil «SM-PMSM» qui s'appuie sur les expressions analytiques d'un moteur synchrone à aimants permanents montés en surface permet de définir plus précisément les caractéristiques dimensionnelles et électriques du moteur. Il permet aussi de quantifier plus précisément les pertes, les masses et donc les performances

attendues du moteur. Pour finir, les performances du moteur pré-dimensionné à l'aide de ces deux premiers outils sont validées par une analyse par éléments finis.

Remerciements

This project has received funding from the Clean Sky 2 Joint Undertaking under the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 715483.



Résumé

Cet article présente un pré-dimensionnement d'un moteur électrique de forte puissance spécifique pour un avion hybride. Dans ce contexte, une puissance spécifique très élevée est recherchée pour la cible à long terme 2035. Ce moteur électrique est pré-dimensionné à l'aide des outils basés sur le concept de charges. Ces outils utilisent des modèles analytiques de moteur synchrone idéal. Ces outils à savoir le Target Setting Tool (TST) et le *Surface Mounted-Permanent Magnet Synchronous Motor Tool* (SM-PMSM) peuvent être utilisés dans des boucles de pré-dimensionnement et d'optimisation plus globales de la chaîne de propulsion hybride. En outre, il est possible d'évaluer les niveaux technologiques nécessaires pour atteindre la cible. Par conséquent, ils permettent d'identifier les ruptures technologiques qui doivent être surmontées pour dépasser les cibles. Les performances du moteur électrique pré-dimensionné sont validées par l'analyse par éléments finis. ■

Abstract

This paper presents a sizing of a high specific power electric motor for Hybrid Aircraft Propulsion. In this context, a very high specific power is sought for long term target 2035. This electric motor is sized using tools based on the loadability concepts. These tools use analytical models of ideal sinewave synchronous motor. Target Setting Tool (TST) and Surface Mounted- Permanent Magnet Synchronous Motor Tool (SM-PMSM) can be used in more global sizing and optimization loops of the hybrid propulsion chain. Furthermore, it is possible to assess the technological levels required for reaching targeted specific power. Thus, these tools allow to identify the technological breakdowns that should be overcome for exceeding targets. The performance of the sized electric motor is validated by Finite Element Analysis. ■

Références

- [1] R. H. Jansen, C. Bowman, A. Jankovsky, R. Dyson, J. Felder, 'Overview of NASA electrified aircraft propulsion research for large subsonic transports', AIAA Propulsion and energy 2017 forum, Atlanta United States, [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20170006235>.
- [2] Power Trip: HASTECS energizes the path to hybrid-powered flight, <https://www.cleanksky.eu/power-trip-hastecs-energizes-the-path-to-hybrid-powered-flight-0>.
- [3] S. Touhami, A. Zeaiter, M. Fenot, Y. Lefèvre, J. F. Llibre, E. Videcoq, 'Electro-thermal Models and Design Approach for High Specific Power Electric Motor for Hybrid Aircraft', 1st Aerospace Europe Conference- AEC 2020, 25-28 Feb., Nancy, France.
- [4] Y. Lefevre, S. El-Aabid, J.F. Llibre, C. Henaux, S. Touhami, 'Performance assessment tool based on loadability concepts', International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 59, no. 2, pp. 687-694, 2019.
- [5] S. Touhami, Y. Lefèvre, J. F. Llibre, 'Original optimization Procedures of Halbach Permanent Magnet Segmented Array', IEEE 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF), DOI. 10.1109/ISEF45929.2019.9096993, Nancy, France.
- [6] S. Touhami, Y. Lefevre, J.F. Llibre, 'Joint design of Halbach Segmented Array and Distributed Stator Winding', IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM), 3-6 Sept. 2018, Greece.
- [7] A. Zeaiter, M. Fenot, 'Thermal Sensitivity Analysis of a High Power Density Electric Motor for Aeronautical Application', IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), 7-9 Nov.2018, UK.
- [8] J. Pyrhönen, T. Jokinen, V. Hrbovcová, 'Design of rotating electrical machines', Edition John Wiley 2008.

Annexe

Charges	Refroidissement indirect à air	Refroidissement indirect à Hydrogène	Refroidissement externe direct à eau
Induction max d'entrefer B_g [T]	0,8-1,05		
Induction culasse stator B_y [T]	1,1-1,5		
Induction dans les dents B_t [T]	1,5-2,0		
Densité de courant j_{rms} [$A \cdot mm^{-2}$]	3-5	4-6	7-10
Densité de courant linéique A_{rms} [$A \cdot mm^{-1}$]	30-80	90-110	150-200
Pression tangentielle σ_t [Pa]	17 000-59 500	50 000-81 500	85 000-148 500
Produit de densité de courant $A_{rms} \times j_{rms}$ [$A^2 \cdot m^{-3}$]	9×10^{10} - 40×10^{10}	36×10^{10} - 66×10^{10}	1.05×10^{12} - 2×10^{12}

Tableau 7 : Valeurs autorisées des charges électromagnétiques et utilisées pour dimensionner le moteur électrique de l'objectif moyen terme 2025 [3][8].