

Moteur supraconducteur pour application aéronautique

Rémi DORGET^{1,2}, Walid DIRAHOUI¹, Thierry LUBIN¹, Julien LABBE², Jean LEVEQUE¹

¹GREEN, Université de Lorraine, ²SAFRAN TECH, Magny-les-Hameaux

RESUME -La volonté d'électrification des transports entraîne l'étude d'avions plus électriques. Ce développement nécessite des machines électriques plus compactes avec une forte densité de puissance. Dans cet article nous présentons la conception et les tests d'une machine supraconductrice à flux axial. Cette machine est partiellement supraconductrice, car seul l'inducteur est supraconducteur. Ce prototype constitue une première étape vers une conception de machines de plusieurs MW.

Mots-clés— *Machines supraconductrices, flux axial, essais.*

1. INTRODUCTION

Au sein des émissions totales de CO₂ dues à la consommation d'énergie, le secteur des transports est particulièrement émetteur avec une part de l'ordre de 25 % [1]. L'aviation est le second mode de transport en termes d'émissions mondiales, loin derrière le transport routier, mais équivalent au transport maritime, représentant 11 % du total des transports soit 920 Mt CO₂ en 2019. Enfin, en plus des émissions directes de gaz à effets de serre, il faut tenir compte des effets non-CO₂ qui s'ajoutent au forçage radiatif total dont l'aviation est responsable. On estime ainsi que les émissions de CO₂ ne représentent qu'un tiers du forçage total de l'aviation [2]. En effet, en plus du CO₂ l'aviation rejette notamment des oxydes d'azote NO_x responsables d'une augmentation à court terme de la concentration d'ozone générant de l'effet de serre. Par ailleurs, les avions sont responsables de la formation de traînées de condensation et de cirrus induits qui génèrent aussi un forçage radiatif supplémentaire.

À l'instar de l'automobile, l'électrification des fonctions propulsives des avions est un levier potentiel important de réduction de l'impact climatique de l'aviation. Dans le cadre de l'électrification du transport aérien, cet article présente la conception d'une machine électrique partiellement supraconductrice. Ce type de machines supraconductrices dites « à modulation de flux » sont des machines synchrones dont l'inducteur se divise en deux parties. Une partie qui génère un champ magnétique constant et une seconde partie vient dévier ce champ magnétique grâce à sa reluctance variable. Leur principal avantage est que la première partie de l'inducteur est située sur le stator, tandis que la seconde partie constitue le rotor. Les supraconducteurs sont présents exclusivement à l'inducteur. Un solénoïde supraconducteur crée un champ magnétique dans la direction axiale. Des pastilles supraconductrices, agissant comme des écrans magnétiques, permettent une modulation du champ magnétique. Deux induits sont placés de part et d'autre de l'inducteur. Ces éléments sont représentés sur la Fig. 1.

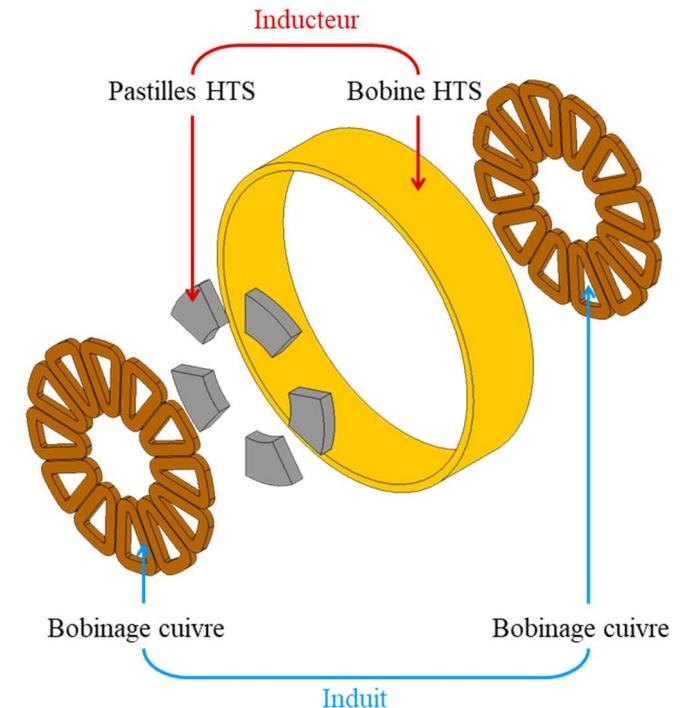


Fig. 1. Représentation éclatée des éléments actifs de l'inducteur et de l'induit d'une machine supraconductrice à modulation de flux.

Ce prototype vise à maturer la technologie des machines à modulation de flux en développant un démonstrateur 500 kW basé sur la topologie d'un prototype 50 kW issu d'un précédent projet [3]. L'objectif est de réaliser ce changement d'échelle sans augmentation significative de la masse et du volume de la machine pour atteindre 10 kW/kg.

2. CONCEPTION DE LA MACHINE SUPRACONDUCTRICE

La modulation de flux vue par les enroulements statoriques est obtenue à l'aide des pastilles supraconductrices. Le stator est classique, en cuivre, sans encoche ferromagnétique. Il dispose d'une culasse de retour de flux de faible épaisseur. Les éléments de la machine initiale sont les suivants :

- Une bobine HTS construite avec la première génération de ruban HTS (Sumitomo type H DI-BSSCO®). Dans cet élément circule un courant continu qui produit un champ magnétique axial.
- Cinq pastilles HTS sont utilisées pour moduler la densité de flux magnétique. Le comportement diamagnétique des

pastilles est utilisé pour dévier les lignes de flux obtenues avec la bobine HTS. Le matériau choisi pour les écrans est le YBCO. Le rayon des pastilles est de 40 mm pour une épaisseur de 10 mm.

- Pour l'armature, un enroulement concentrique à double couche est choisi. L'ensemble est constitué de deux induits de 12 bobines chacun, réalisé en fil de Litz, car le bobinage est directement dans l'entrefer et soumis aux variations du champ magnétique.

Pour obtenir les performances souhaitées, nous modifions les paramètres suivants :

- L'utilisation d'une bobine REBaCuO permettant de tripler le champ de l'inducteur pour des dimensions similaires à la bobine Bi-2223 grâce à l'augmentation de densité de courant entre les deux technologies.
- Le changement de forme des pastilles du rotor pour utiliser des secteurs d'anneau monocristallins désormais disponibles dans le commerce.
- L'incorporation d'un refroidissement liquide de l'induit dans le but d'atteindre une densité de courant de 30 A/mm².

Ces trois leviers doivent permettre a priori d'atteindre 500 kW sans augmenter la masse de la machine.

Les paramètres de conception du moteur supraconducteur sont résumés dans le tableau I. Le refroidissement est assuré par une circulation d'hélium sous une pression de 18 bars avec une température de fonctionnement de 30 K, la puissance extractible est de 80 W [4].

Tableau 1. Paramètres du moteur.

Type	Valeur
Puissance nominale	500 kW
Vitesse nominale	5000 tr/min
Nombre de paires de pôles	5
Tension nominale	400 V

3. ÉLEMENTS DU MOTEUR

Dans cette partie, on aborde la conception mécanique et cryogénique, ainsi que l'élaboration des différentes pièces de la machine. Toutefois, il est important de noter que la construction du démonstrateur n'est pas encore terminée au moment de la rédaction de cet article. Par conséquent, la présentation de chaque pièce, en termes de niveau de détail, dépendra de son état d'avancement. En effet, certaines pièces n'ont pas encore été fabriquées, et seuls les dessins et la conception théorique de ces dernières seront présentés. Cependant, d'autres pièces ont été entièrement construites, ce qui nous permettra de les aborder avec plus de détail.

3.1. Structure mécanique et cryogénique du rotor

Comme pour le prototype 50 kW, le rotor est composé de pastilles supraconductrices qui sont collées par paire de part et d'autre d'une plaque en aluminium connecté au système de refroidissement central (Fig. 1 (a)). Parmi les éléments constituant la partie tournante, une roue en G11 entoure les pastilles afin d'absorber le couple et un treillis en titane permet de le transmettre à l'arbre tout en garantissant le découplage thermique.

La partie assurant le refroidissement des pastilles par conduction, par le biais de la plaque en aluminium, est représentée sur la Fig. 2 (b). Le transfert de la chaleur du rotor vers l'hélium gazeux se fait à l'aide des plaques de thermalisation en aluminium qui sont connectées à un échangeur cryogénique rotatif en cuivre. Afin d'absorber les forces centrifuges, une frette en carbone a été intégrée au système.

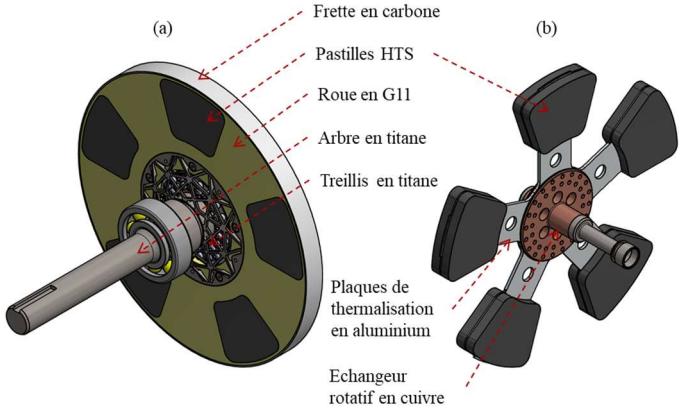


Fig. 2. Structure mécanique (a) et cryogénique (b) du rotor.

3.2. Caractérisation des pastilles HTS

La fabrication des 10 pastilles a été effectuée en usinant des secteurs d'anneaux, comme le montre le plan de la Fig. 3, à partir d'un disque monocristallin de 100 mm de diamètre en GdBaCuO (Gadolinium Barium Copper Oxide) dopé à l'argent. Ensuite, des congés ont été ajoutés aux angles des pastilles à l'aide d'une découpe laser pour réduire la concentration des contraintes.

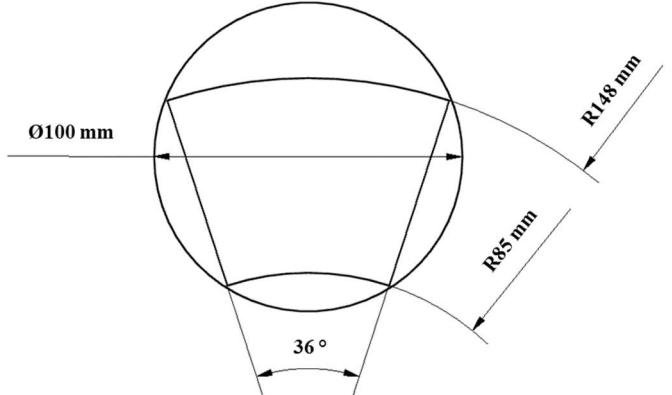


Fig. 3. Plan des pastilles HTS du rotor.

Dans le but de caractériser la capacité des dix pastilles à piéger et écraser le champ magnétique, nous avons effectué des mesures des cartes de champ magnétique piégé par field cooling pour chaque bulk. Pour rappel, le field cooling (refroidissement sous champ) consiste à plonger un supraconducteur dans un champ magnétique H_{app} pendant la phase de refroidissement jusqu'à ce que la température soit inférieure ou égale à sa température critique T_c . Par la suite, H_{app} est diminué graduellement jusqu'à atteindre zéro. Lors de cette phase, des courants vont apparaître dans la pastille afin de conserver H_{app} en s'opposant à sa variation et vont ainsi permettre de piéger un champ dans la direction du champ appliqué initialement.

La magnétisation des pastilles supraconductrices a été réalisée à 77 K sous 3 T à l'aide d'un aimant supraconducteur. Une fois le processus du field cooling terminé, l'échantillon testé est placé sous une table 3D de mesure de champ magnétique.

Les cartes du champ magnétique piégé dans chaque bulk, sont présentées dans la Fig. 4. Les zones en blanc indiquent les points de mesure où le champ magnétique est négatif, ce qui témoigne de l'absence de champ piégé. Cela permet de localiser les régions présentant de faibles performances pour chacune des pastilles. Ainsi, on peut constater que les pastilles S4, S6, S8, S9 et S10, sont pratiquement dépourvues de zones défectueuses contrairement aux échantillons S1, S2, S3, S5 et S7 qui présentent des cartes de champ inhomogènes. A priori, l'apparition de ces zones faiblement supraconductrices est probablement liée au processus de découpage laser des différentes pastilles. De plus, l'impact de ces régions est difficilement quantifiable, car les cartes de champ ont été effectuées à 77 K alors que le rotor de la machine est refroidi à 40 K (température des pastilles pour une température d'hélium de 30 K à l'entrée de l'échangeur) sachant que la densité de courant critique à cette température, est 10 fois plus importante qu'à 77 K.

Afin de limiter au maximum l'impact de ces régions, les pastilles seront appariées telle sorte à former un pôle composé d'une pastille avec et une pastille sans défaut. Une mesure de champ sera assurée dans l'entrefer par des sondes à effet Hall.

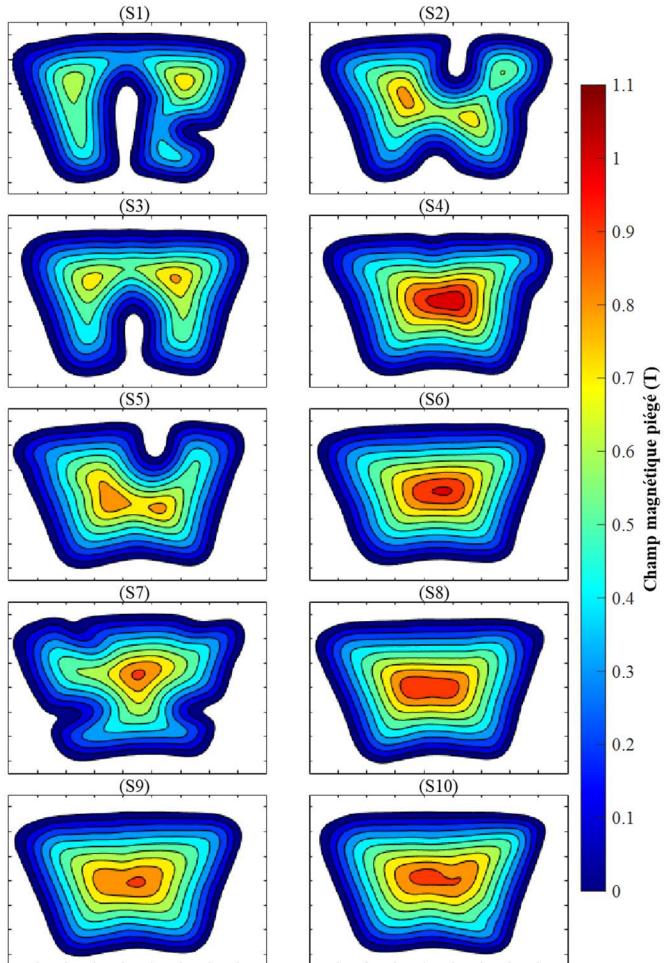


Fig. 4. Cartes du champ piégé dans les 10 pastilles HTS.

3.3. Cryostat du rotor

La structure du cryostat du rotor est donnée dans la Fig. 5. Il s'agit d'un cryostat fixe où l'enceinte à vide se compose des parois des carters de l'induit, de deux cloches et d'une entretoise assurant la fermeture de l'enceinte entre les deux carters. L'arrivée d'hélium est assurée par une canne connectée à

l'échangeur rotatif. Ainsi, toute l'enceinte à vide et la canne d'hélium sont fixes. Par conséquent, cette configuration exige une étanchéité rotative pour assurer le vide au niveau des cloches et maintenir l'étanchéité vis-à-vis de l'hélium cryogénique au niveau de l'échangeur du rotor. Ainsi, des joints à lèvre sont utilisés afin d'assurer l'étanchéité tournante.

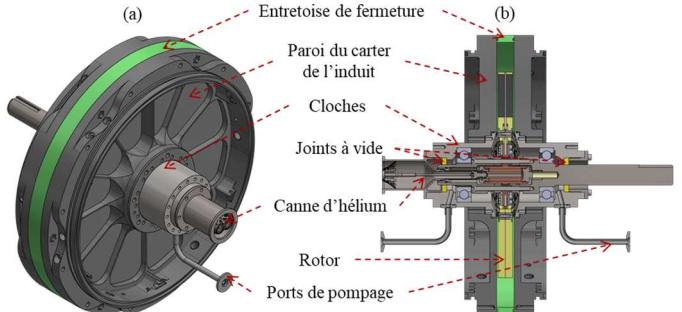


Fig. 5. Cryostat du rotor. (a) Vue 3D. (b) Vue en coupe.

3.4. Réalisation de l'induit

Les deux induits de la machine sont refroidis à l'aide de circulation d'huile sur leurs faces se trouvant à l'opposé de l'entrefer. Cette circulation est assurée par un carter en G11 qui est présenté sur la Fig. 6. Le carter est constitué de deux éléments principaux, le premier est le corps du carter, représenté par la Fig. 6 (a), qui fait office de conteneur pour les bobinages et sert également de paroi pour l'enceinte à vide du rotor. Le capot du carter, illustré dans la Fig. 6 (b), constitue la deuxième pièce du carter. Il est équipé de deux ouvertures permettant l'entrée et la sortie de l'huile de refroidissement.

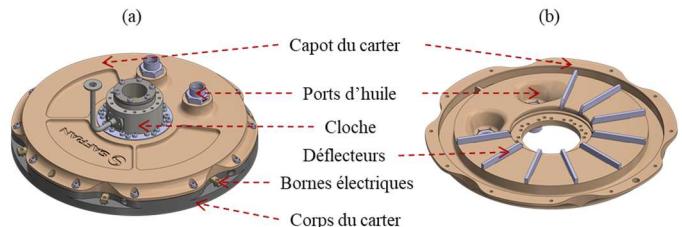


Fig. 6. Structure du carter de refroidissement de l'induit. (a) Montage du carter avec la cloche. (b) Capot du carter avec ses déflecteurs.

La Fig. 7 montre l'induit réalisé en fil de Litz pour réduire les pertes par courants de Foucault, il ne comporte aucune pièce ferromagnétique.



Fig. 7. Induit réalisé en fil de Litz.

3.5. Bobine supraconductrice

La bobine supraconductrice, représentée sur la Fig. 8, est constituée de 12 doubles galettes de fil REBaCuO bobinées séparément où chaque double galette est composée de 200 tours pour une longueur totale de 3504 m.

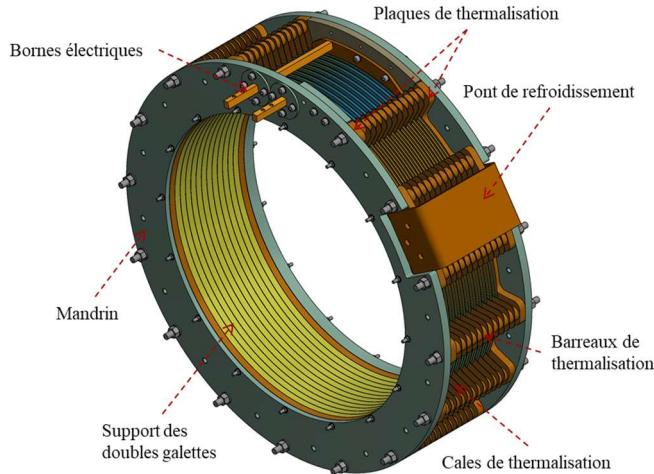


Fig. 8. Structure de la bobine supraconductrice.

Le courant critique I_c de chacune des 12 doubles galettes a été mesuré à 77 K par le fabricant de la bobine et les résultats sont fournis dans la Fig. 9. On note que le courant critique moyen est de 35,3 A.

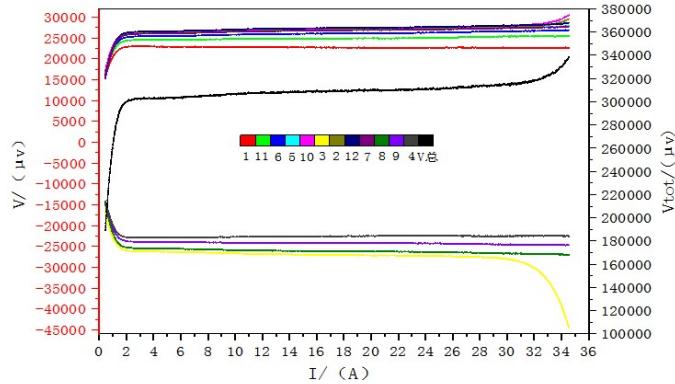


Fig. 9. Caractéristique U-I des 12 doubles galettes de la bobine supraconductrice à 77 K.

4. CONCLUSIONS

Un prototype de moteur supraconducteur de 500 kW pour l'aéronautique est en cours de réalisation. Dans la suite des travaux, il est prévu la réalisation puis les tests de la machine.

5. REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par la DGA, programme ASTRID Maturation.

6. REFERENCES

- [1] J Olivier and J. Peters, "Trends in Global CO₂ and Total Greenhouse Gas Eissions; 2020 Report," PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Dec. 2020. [Online].
- [2] L. Felder, « Turboelectric Distributed Propulsion in a Hybrid Wing Body Aircraft », in 20th International Society for Airbreathing Engines, Gothenburg, Sweden, 2011.
- [3] A. Colle, "Étude d'une machine supraconductrice à flux axial pour une application aéronautique," These de doctorat, Université de Lorraine, 2020. Accessed: Nov. 27, 2020.
- [4] T. Trollier, J. Tanchon, Y. Icart, et A. Ravex, « High capacity 30 K remote helium cooling loop », *AIP Conference Proceedings*, vol. 1573, n° 1, p. 1461-1466, 2014.