

L'hybridation électrique au service de la décarbonation de l'aviation

Par Régine SUTRA-ORUS, Dr Christophe VIGUIER, Dr Pierre-Alain LAMBERT, Dr Stéphane AZZOPARDI, Dr Thierry LEBEY et Dr Bertrand REVOL

Safran Tech

L'industrie du transport aérien est résolument engagée dans une trajectoire de décarbonation qui la mènera à la neutralité carbone en 2050. Depuis l'avènement de la propulsion à réaction, l'accroissement d'efficacité énergétique des avions de transport a été considérable, et pour une large partie portée par les technologies des systèmes propulsifs. Les technologies de propulsion thermique comportent encore une marge de progression, mais désormais celles-ci doivent être complétées d'une action renforcée sur tous les autres leviers à disposition : introduction de concepts disruptifs réduisant encore la consommation par le recours, notamment, à l'électrification ; optimisation des opérations en vol ; recours à des carburants substitutifs aux hydrocarbures fossiles. L'action de Safran s'étend à tous ces axes en simultanément, mais nous développerons dans cet article quelques challenges auxquels faire face dans le cadre d'une plus grande électrification, en particulier l'hybridation électrique des moteurs.

L'industrie du transport aérien est résolument engagée dans une trajectoire de décarbonation de ses produits et de ses opérations qui doit la mener, selon les objectifs de l'ATAG¹, à la neutralité carbone en 2050.

¹ Air Transport Action Group.

Depuis l'avènement de la propulsion à réaction, l'accroissement d'efficacité énergétique des avions de transport a été considérable, et pour une large partie portée par les technologies des systèmes propulsifs : augmentation des rendements thermiques et aérodynamiques ; allègement des structures par le recours aux matériaux composites.

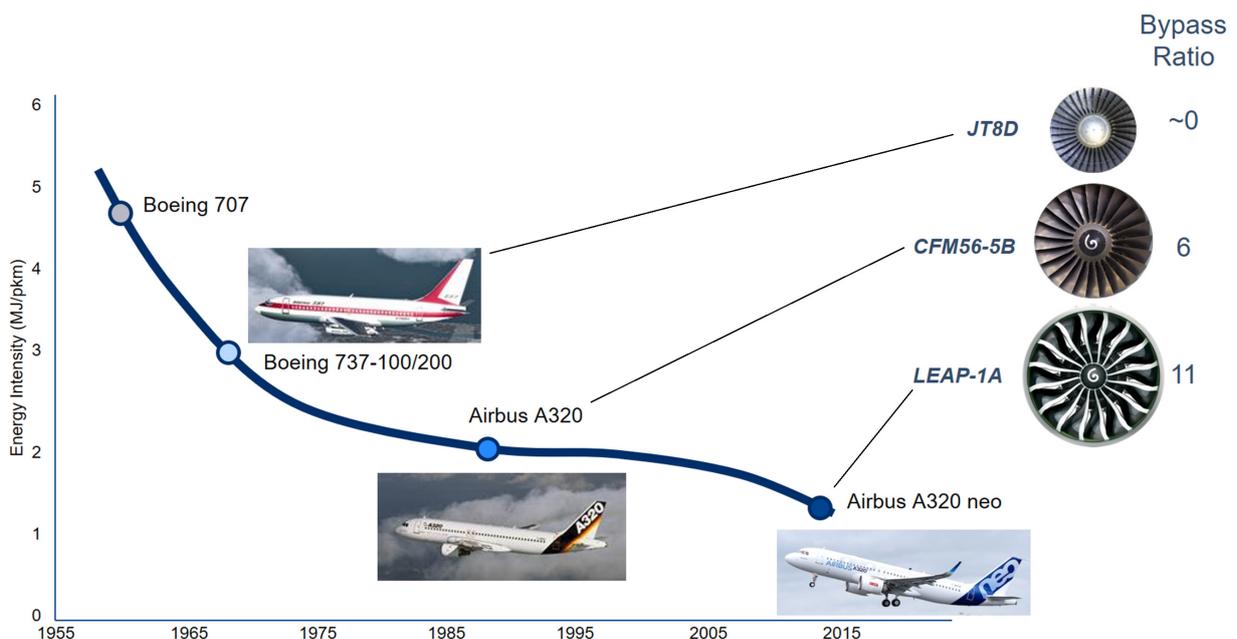
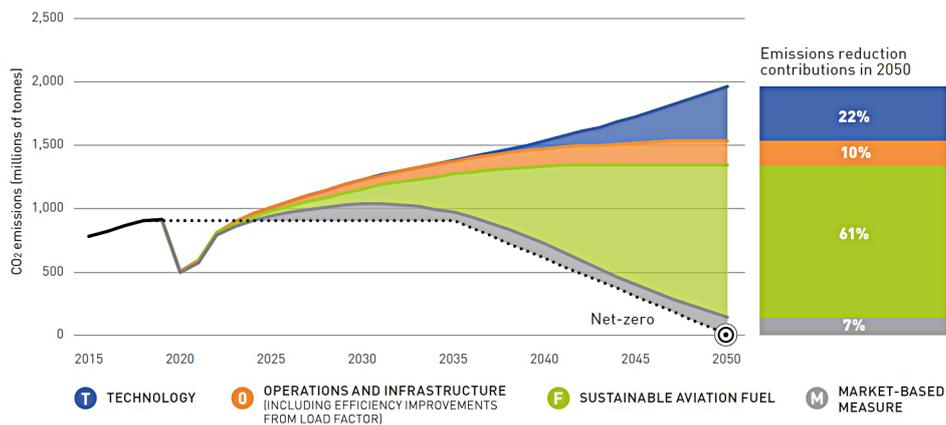


Figure 1 : L'intensité énergétique des avions de transport a été divisée par cinq en soixante ans, et 70 % de cette amélioration est due à la propulsion (© Safran).



Les technologies de propulsion thermique comportent encore une marge de progression, mais désormais celles-ci doivent être complétées d'une action renforcée sur tous les autres leviers à disposition pour être au rendez-vous des enjeux de 2050 : introduction de concepts disruptifs réduisant encore la consommation par le recours, notamment, à l'électrification ; optimisation des opérations en vol ; recours à des carburants substitutifs aux hydrocarbures fossiles.

L'action de Safran s'étend à tous ces axes en simultanément :

- Anticipation des concepts en rupture envisageables : voilure haute à fort allongement ; propulsion distribuée ; moteurs enterrés.

- Carburants alternatifs au kérosène (SAF2), *via* des partenariats avec l'industrie et un travail avec les autorités pour favoriser l'émergence de filières de carburants d'aviation durables, et des études d'impact d'une variété de biocarburants et carburants synthétiques sur les matériels, l'opération et les émissions moteur.
- Exploration des architectures, fonctions et technologies de propulsion hydrogène, que ce soit par combustion dans des moteurs thermiques ou *via* pile à combustible, cette dernière étant moins mature

² Sustainable aviation fuels d'origine biomasse ou synthétique par capture de carbone.

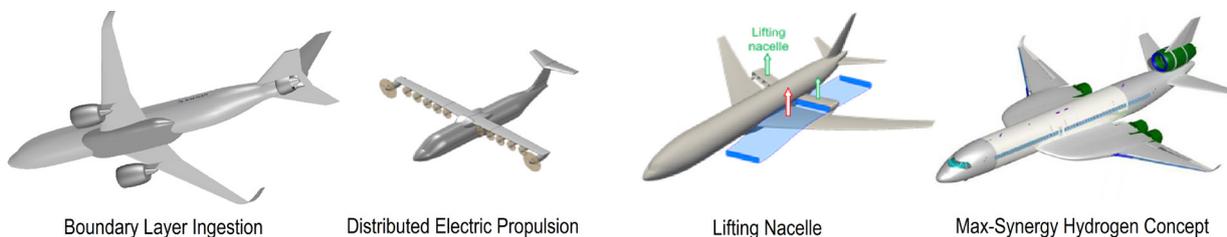


Figure 3 : Exemples de concepts d'avions de transport en rupture (© Safran).

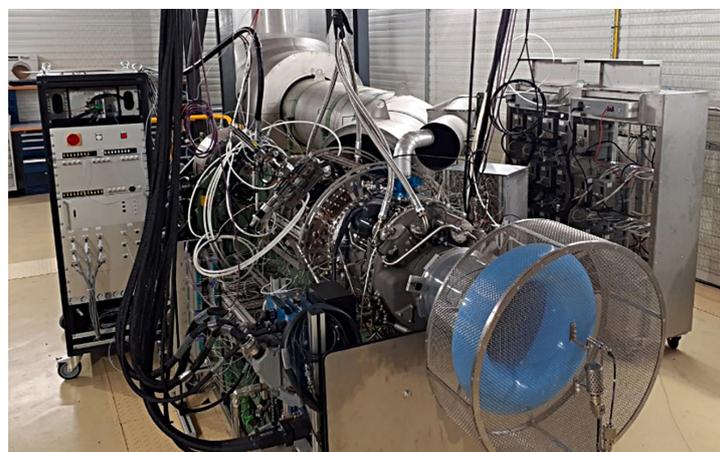


Figure 4 : Avec son banc BEARCAT fortement instrumenté, Safran Tech est en mesure d'étudier finement l'impact de différents carburants substitutifs sur le comportement d'un moteur réel (© Safran).

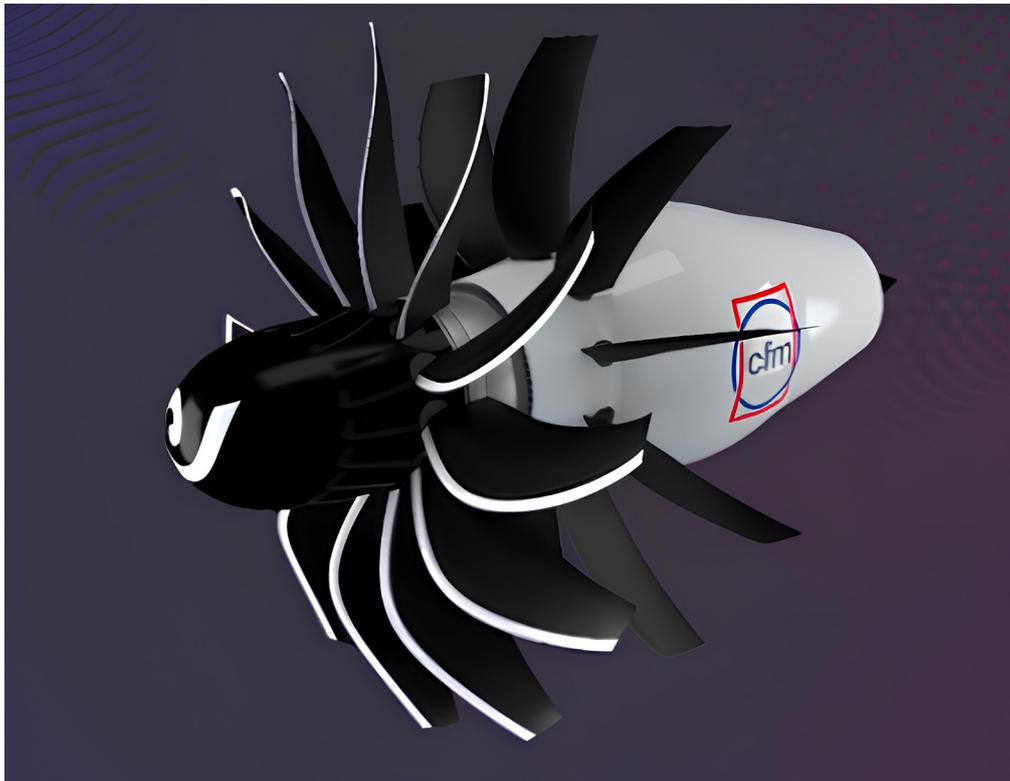


Figure 5 : Le démonstrateur RISE de CFM, financé par Clean Aviation préfigure la prochaine génération de turbofans à hélice ouverte et très forte efficacité, visant des gains d'émissions de 20 % (© Safran).



Figure 6 : Avec son programme MATCH, Safran a élaboré et validé expérimentalement les principes d'hybridation électrique d'un turbofan à double corps et double flux (© Safran).

mais intéressante pour lever les limitations associées à la masse des batteries pour la propulsion électrique ou hybride.

- Tous ces travaux ne dispensent pas de travailler encore à l'efficacité énergétique de la propulsion, au travers d'architectures en rupture de type Open Fan permettant un saut de rendement propulsif et la poursuite de l'accroissement des températures de cycle afin d'améliorer encore le rendement, ce qui se traduit aussi par une plus grande compacité. Le

recours à la fabrication additive autorise la conception d'échangeurs très performants pour le management thermique de ces moteurs très chauds.

- L'hybridation électrique du turbofan permet d'assister son opération dans toutes les phases de vol, et de maximiser les synergies avec la tendance à l'électrification des fonctions non propulsives.
- Le concept de roulage électrique au sol permet un meilleur rendement que l'utilisation des moteurs au ralenti.

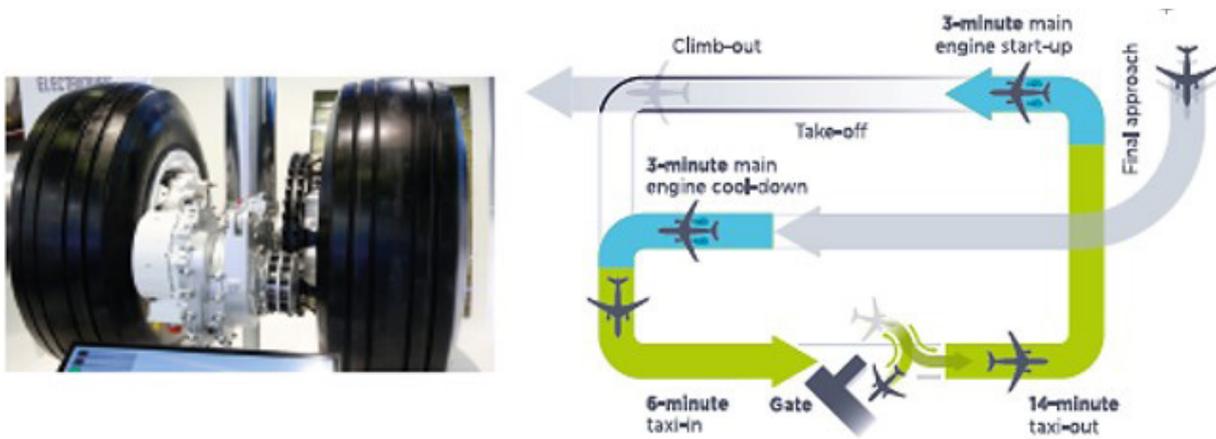


Figure 7 : Grâce à des moteurs électriques intégrés dans les roues et alimentés par l'APU, les émissions en roulage au sol dans l'aéroport peuvent être réduites de 60 % pour le CO_2 et de 50 % pour les NO_x (© Safran).

Dans ce qui suit, nous nous focaliserons sur les axes hybridation et « avion plus électrique ».

L'augmentation de la puissance électrique nécessaire pour alimenter les différentes charges des avions dits « plus électriques » ou à propulsion électrique ou hybride impose soit d'augmenter les niveaux de tension usuels de l'aéronautique afin de limiter les courants, soit d'envisager la mise en œuvre de technologies supraconductrices. Le centre de recherche de Safran travaille sur ces deux axes.

Premier axe de recherche

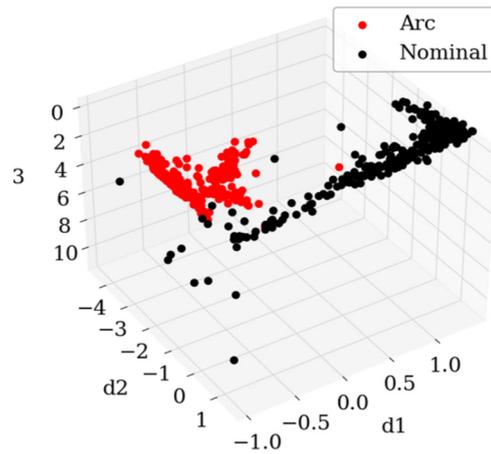
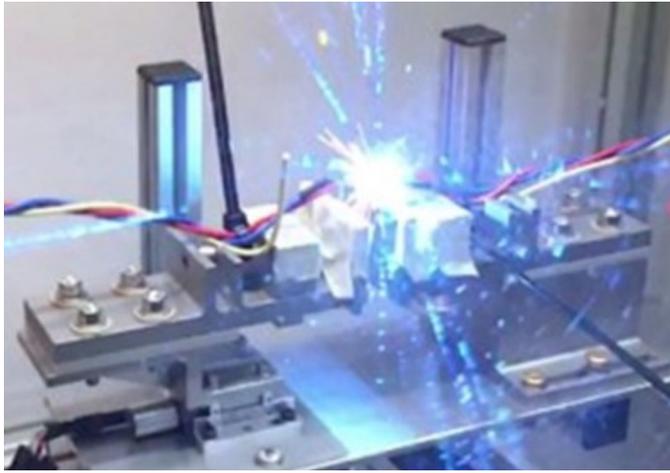
Des tensions comprises entre 540 VDC et 1 000 VDC sont envisagées en fonction des architectures propulsives ou non propulsives qui seront retenues par les avionneurs. Ces niveaux de tension font apparaître des phénomènes physiques tels que les décharges partielles (DP), dans des systèmes qui en étaient exempts jusqu'ici, et dont les caractéristiques, comme leur seuil d'apparition, vont être aggravées par rapport aux applications terrestres par la variation de pression avec l'altitude.

Ces décharges dégradent progressivement les isolants jusqu'à la rupture et le court-circuit du système dans lequel elles se produisent. Leur signature électrique, d'amplitude très faible (quelques mV), est très difficile à identifier.

Afin de proposer des technologies électriques robustes et fiables mais compatibles des contraintes propres à l'aéronautique (en termes de masse et de volume) Safran Tech développe différents modèles et outils permettant la prédiction des contraintes aux bornes des systèmes électriques et l'identification des points faibles potentiels. Le but est ici de les corriger dès la phase de design. Cette approche consiste aussi à proposer des matériaux plus résistants et à quantifier les marges. Les systèmes réalisés suivant cette méthodologie sont ainsi définis « exempts de décharges partielles par design » (ou "PD-free"). Mais, encore faut-il le vérifier ! C'est sur ce second aspect que porte une autre partie des travaux. Citons par exemple l'utilisation de capteurs enfouis dans le bobinage des machines électriques permettant *via* des filtrages et des traitements numériques la détermination des seuils d'apparition des décharges partielles, vérifiant ainsi nos designs. Enfin, une approche reposant sur



Figure 8 : Exemple de tests de décharges partielles sur une machine 500 kW réalisés chez Safran (© Safran).



Figures 9 et 10 : Reconnaissance par IA d'un arc électrique produit par séparation d'électrodes (© Safran).

la reconnaissance des DP en service (utilisant par exemple de l'IA) et la détermination de la durée de vie sous DP des matériaux permet la construction d'une approche de maintenance prédictive des systèmes électriques.

Safran Tech travaille également sur un autre type de décharge : les arcs électriques, qu'ils se produisent au sein des éléments de coupure (contacteurs) ou en cas de défaut.

Dans le premier cas, il s'agit de développer des outils de modélisation et de simulation de type magnétohydrodynamique (MHD), capables d'aider au dimensionnement optimisé des composants susceptibles de fonctionner dans des environnements sévères (basse pression, vibrations, très forts courants, etc.).

Dans le second cas, il s'agit de développer, sur la base d'acquisition d'observables physiques simples (courant, tension...), des algorithmes utilisant des techniques de l'intelligence artificielle (par exemple le machine learning) permettant une détection fiable et robuste de ce type de défauts.

Deuxième axe de recherche

Le deuxième axe de recherche se focalise sur le développement de machines électriques supraconductrices pour des applications propulsives de forte puissance. En effet, les définitions des futures configurations avions pouvant embarquer de l'hydrogène sont aussi propices à l'introduction de telles technologies, la source de froid étant déjà présente. La technologie supraconductrice autorise des fonctionnements à forte densité de courant (ratio courant sur surface d'un conducteur). Les matériaux supraconducteurs ont la propriété de posséder une résistivité nulle à des températures cryogéniques ($< -200^{\circ}\text{C}$), limitant très fortement les pertes par effet joule et autorisant donc l'utilisation de densité de courant 100 à 1 000 fois plus importante que des technologies de fils en cuivre conventionnelles. D'autres matériaux massifs supraconducteurs ont la caractéristique de dévier les lignes de champ magnétique, là où des aimants classiques

les canalisent. Ces deux types de matériaux supraconducteurs ont fait l'objet d'investigations dans notre département, avec l'étude et la réalisation de deux machines électriques à inducteur supraconducteur et modulation de flux pour des puissances de 50 kW et 500 kW.

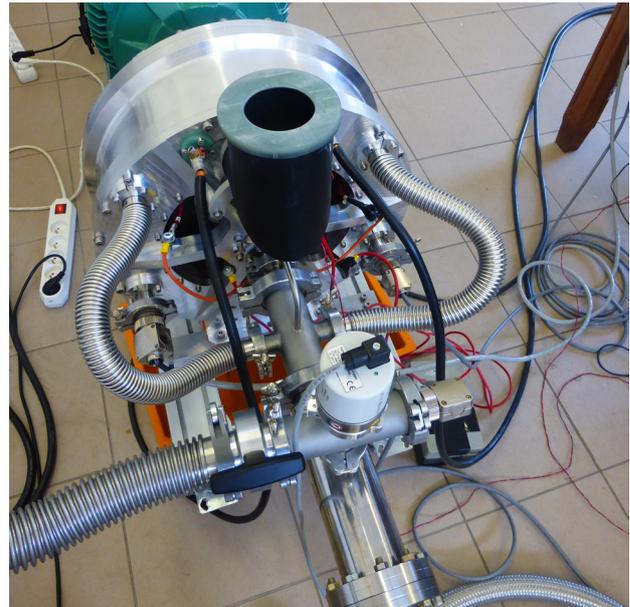
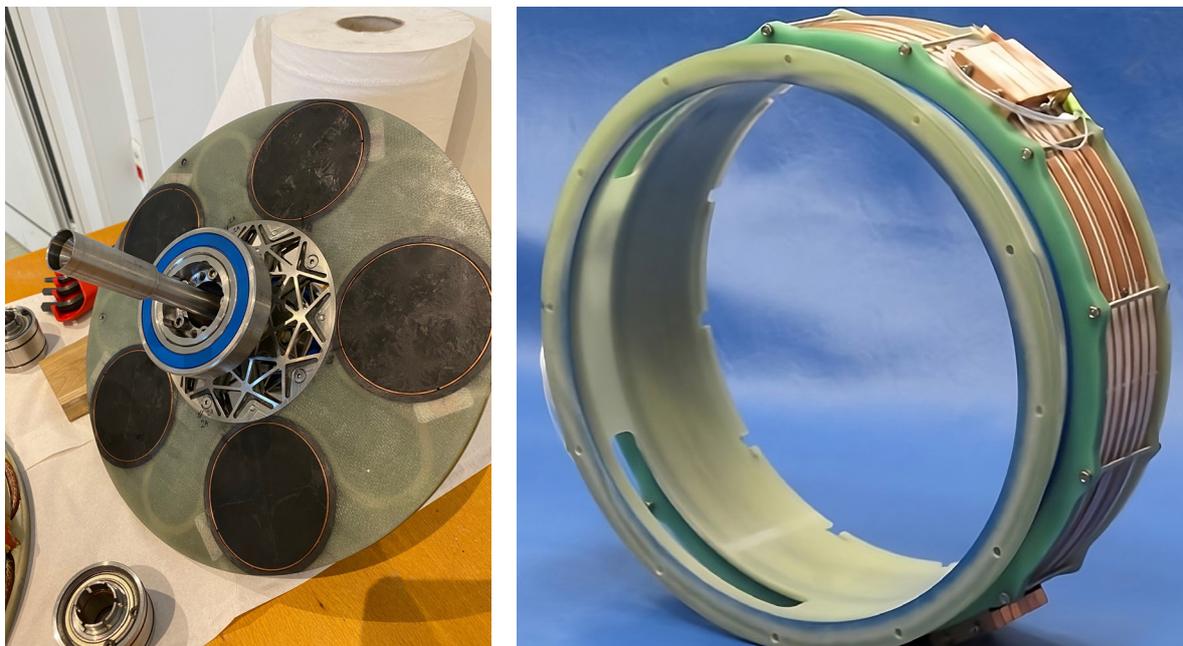


Figure 11 : Machine 50 kW partiellement supraconductrice (© Safran).

Autres approches

- Outre l'émergence de ces technologies non conventionnelles, des efforts sont également à apporter sur les topologies « classiques » de machines électriques, afin de rendre toujours plus performants ces équipements sur des réseaux haute tension. Par exemple, des travaux sont menés sur la réalisation d'aimants possédant une orientation magnétique prédéfinie par optimisation. Ces travaux vont du matériau aux procédés de fabrication, en passant par la méthodologie d'orientation du champ magnétique.

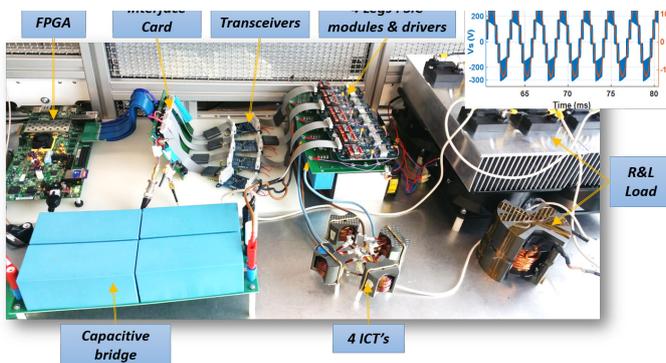


Figures 12 et 13 : Rotor et bobinage supraconducteur 50 kW (© Safran).

Un deuxième exemple est l'architecture de refroidissement par l'utilisation de conducteurs creux ayant le double rôle de transporter des courants et du fluide et pouvant s'appuyer sur des technologies de fabrication additive. Ces machines électriques sont pilotées par des convertisseurs à base d'électronique de puissance.

- Les matériaux tels que le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN) utilisés dans les composants à semi-conducteur de puissance apportent une rupture technologique indéniable dans les électroniques de puissance du XXI^e siècle. En effet, classés comme semi-conducteurs à large bande interdite (wide band gap en anglais), ces nouveaux dispositifs permettent d'atteindre des performances surpassant l'état de l'art du matériau silicium. Utilisés comme interrupteurs pour aiguiller l'énergie dans un convertisseur de puissance,

ils présentent un meilleur comportement en température (basse ou haute), une tenue à des champs électriques plus élevés (SiC), une rapidité de fonctionnement accrue (commutation entre les états passant et bloqué). Afin de répondre aux besoins de l'électrification des avions (fonctions propulsives et non propulsives), nous mettons en œuvre ces nouveaux composants à semi-conducteur de puissance en nous focalisant sur des solutions de packaging de puissance optimisés électriquement et thermo-mécaniquement ; sur des circuits de commandes rapprochés permettant de faire le suivi de l'évolution de paramètres électriques liés au vieillissement du composant à semi-conducteur et d'en compenser certaines dérives ; et sur des topologies de convertisseurs de puissance à rendement élevé, à haute disponibilité et à forte intégration, utilisant ces composants de manière optimale.



Figures 14 et 15 : Vue interne d'un module de puissance 1,2 kV SiC MOSFET et phase 18 kW d'un onduleur SiC multiniveau entrelacé couplé (© Safran).

- En contrepartie de leurs avantages importants, ces nouveaux composants entraînent des contraintes supplémentaires liées à la compatibilité électromagnétique (CEM). La CEM est garante du bon fonctionnement des équipements électriques dans leur environnement en s'assurant qu'ils ne se perturbent pas entre eux. Bien que les niveaux d'émissions conduites fixés par la norme DO-160G (norme de référence dans l'aéronautique civile) soient probablement révisables pour les nouvelles architectures de réseaux électriques, les besoins de filtrage restent indispensables. La diminution constante des temps de commutation, et donc l'augmentation des gradients de tension et de courant (dv/dt et di/dt), bénéfiques à la réduction des pertes de commutation, représentent un problème inhérent à la pollution électromagnétique. Des filtres haute fréquence spécifiques destinés à réduire les émissions conduites ont un impact direct sur le volume et la masse des convertisseurs. La diminution de cette masse uniquement dédiée à du filtrage est un axe contributeur à la réduction de la consommation de carburants. Statistiquement, on établit que 30 % à 40 % de la masse et du volume d'un convertisseur sont réservés aux éléments de filtrage réalisés à l'aide de composants conventionnels (inductances, condensateurs...). Ces éléments passifs doivent être dimensionnés pour résister aux limites électriques (courant ou tension) imposées par la puissance de la structure, tout en limitant leur impact sur la masse.

L'augmentation des fréquences de commutation et les forts gradients de courant et de tension produits par la commutation de composants à base de SiC ou de GaN intensifient le spectre des perturbations sur la gamme spectrale prévue par les normes en émission (par exemple DO160G section 21). Ce passage aux hautes fréquences, typiquement dans les zones où les gabarits normatifs imposent les niveaux les plus bas, augmente naturellement les besoins d'atténuation des filtres. Les briques filtrantes doivent avoir des plages de fonctionnement étendues en fréquence où le comportement des matériaux devient critique. Le besoin d'une densité de puissance toujours plus élevée repousse plus loin encore les limites de l'intégration des composants. Les dispositifs conventionnels (par exemple : convertisseur + câbles + machines) sont remplacés par des équipements plus compacts dans lesquels les convertisseurs sont intégrés aux machines électriques (appelées "smart-machines"). Le convertisseur, la machine et le système de refroidissement sont placés dans la même enveloppe. Il en résulte des couplages capacitifs et inductifs directs entre les différents constituants. Avec l'augmentation des gradients de tension et de courant, les sources d'interférences des convertisseurs génèrent des niveaux de perturbations encore plus néfastes pour les charges et d'autant plus contraignants pour les filtres. Une nouvelle répartition des cellules filtrantes peut être nécessaire, comme celle illustrée à la Figure 16.

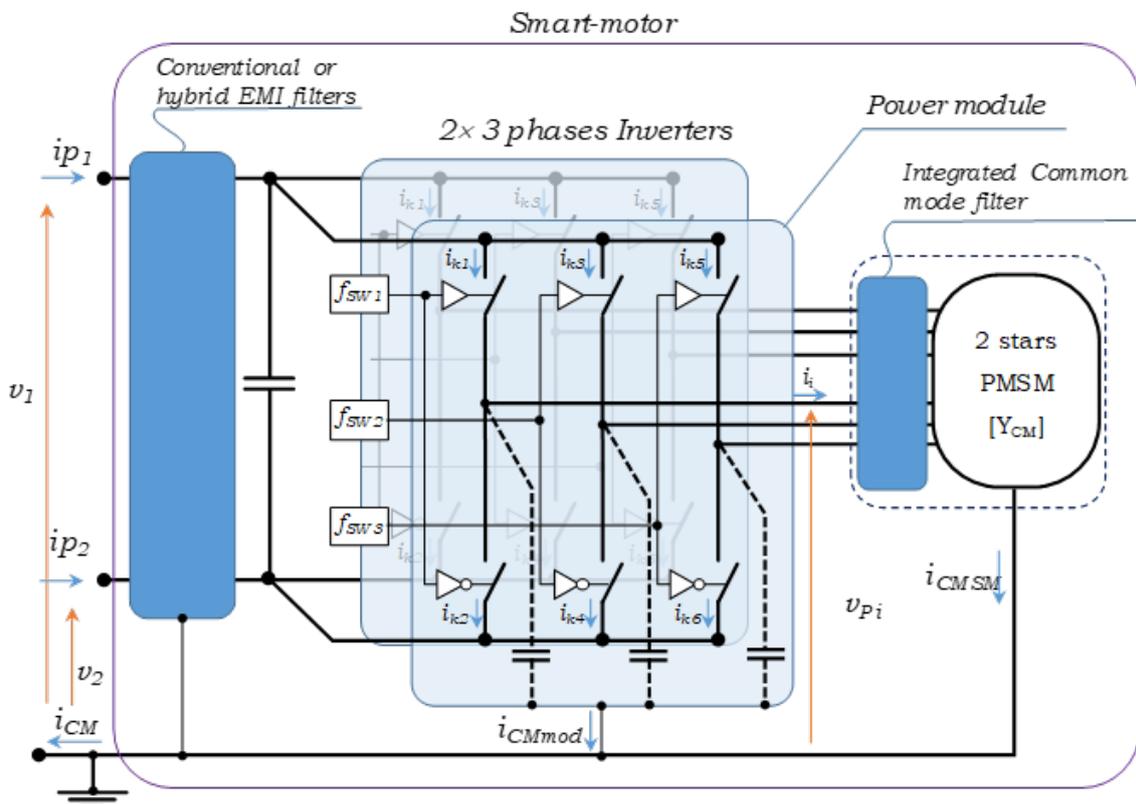


Figure 16 : Exemple de topologie d'un "smart-motor" avec filtres distribués (© Safran).

De tels agencements sont également conçus pour assurer un degré élevé de fiabilité, en offrant une certaine redondance (par exemple, double stator et onduleur). Les étages de filtrage doivent contribuer à améliorer la fiabilité de fonctionnement tout en s'inscrivant dans cette tendance tournée vers l'intégration. Les éléments inductifs (par exemple inductances de mode commun) restent la partie la plus délicate à dimensionner et à intégrer du fait de leur volume important. Pour s'assurer un dimensionnement optimal qui réponde aux exigences normatives, Safran Tech travaille sur la modélisation haute fréquence des chaînes de puissance validée par tests afin de prédéterminer

toutes les interactions électromagnétiques entre les équipements de puissance, pour proposer des contre-mesures efficaces à moindre coût de masse et de volume.

Dans cet article, nous développons l'axe hybridation électrique, mais plus de 75 % du programme de recherche de Safran est consacré à la décarbonation, en ignorant aucune piste. L'optimisation des technologies s'appuie sur une recherche poussée dans le domaine des matériaux ainsi que sur les nouvelles méthodes et outils développées par le centre de recherche, en s'appuyant, entre autres, sur de l'intelligence artificielle.

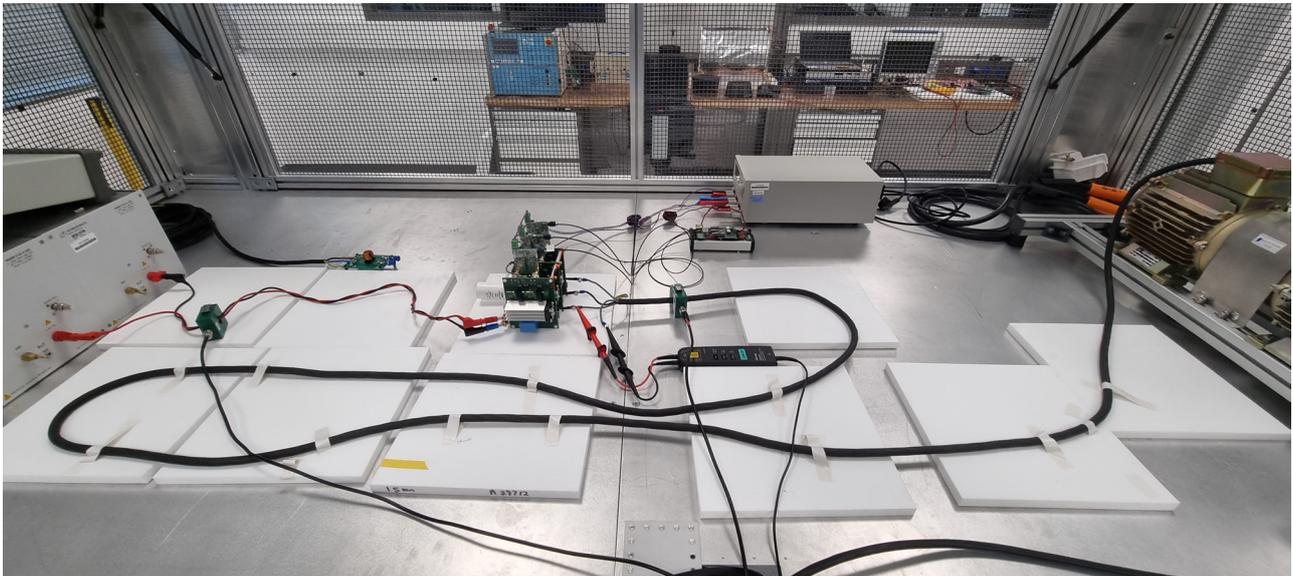


Figure 17 : Banc d'essais et de validation des modèles (© Safran).