

A



Le projet DEMEA a
reçu le soutien du
Ministère du
Redressement
Productif

Une technologie de rupture pour le dégivrage d'entrée d'air d'un turbo-moteur

Dans le domaine aéronautique, le givrage est une difficulté majeure. Pour cette raison, la fonction dégivrage de tous les aéronefs (en particulier des entrées d'air moteur) est d'une importance capitale pour la sécurité des vols.

Notamment différente des dispositifs existants, une technologie innovante, basée sur le chauffage par micro-ondes des parties exposées au givre, est actuellement étudiée dans le cadre d'un programme de recherche DGA. A partir de simulations numériques et d'essais partiels ayant nécessité de nombreux échanges et recalages, un démonstrateur a été réalisé. Il sera testé en juin sur un générateur dynamique de givre.

Le contexte

Les petits aéronefs sont souvent les plus exposés au givrage, car ils volent plus souvent et plus longtemps que les gros porteurs, à basse altitude où l'humidité est généralement la plus élevée par temps froid.

Les procédures à suivre pour voler en conditions givrantes sont très contraignantes.

Les mauvaises conditions météo créent des contraintes inacceptables pour certains opérateurs (secours, évacuation sanitaire, militaire et offshore) et donc des surcoûts, retards, voire des annulations de vol. Il en résulte que la demande de pouvoir voler en condition givrante ou en se mettant seulement à l'abri d'une menace de givrage, existe réellement.

Dans ce domaine, les techniques en développement d'assistance au pilotage (radar météo, mais aussi réorientation des décisions des pilotes, ...) intégrées à l'avionique sont aujourd'hui très prometteuses, mais encore limitées aux gros porteurs. Il est probable qu'elles équiperont l'aviation légère. Elles conduisent à une amélioration significative de la sécurité, mais n'ont pas les mêmes fonctionnalités que les systèmes de dégivrage et d'anti-givrage embarqués. Ceux-ci resteront toujours indispensables et incontournables pour se dégager de

situations de givrage imprévisibles ou simplement imprévues.

Les systèmes de dégivrage existants, appliqués à la motorisation, pénalisent le cycle thermodynamique de la machine et/ou complexifient les problématiques d'intégration.

Les technologies les plus utilisées consistent à :

- prélever l'air chaud à la sortie du compresseur pour réchauffer les zones sensibles de l'entrée d'air,
- alimenter par voie filaire de nombreuses résistances électriques chauffantes insérées dans ces mêmes zones,
- filtrer et/ou séparer les particules de glace dans l'entrée d'air.

Il en résulte que les dispositifs existants pour les turbomachines d'hélicoptère présentent des limites en opération, car les technologies employées sont parfois pénalisantes en termes d'encombrement, de masse, de coûts, ou d'efficacité énergétique.

Face à ce constat, TURBOMECA a breveté (PCT-WO 2008/132376) une technologie originale de dégivrage et d'anti-givrage d'entrée d'air pour ses moteurs, par chauffage micro-ondes de matériaux placés sur les parties sensibles.

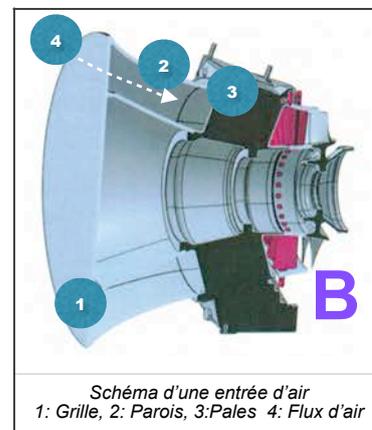


Schéma d'une entrée d'air
1: Grille, 2: Pariois, 3: Pales 4: Flux d'air

Du point de vue technique, le principe proposé est basé sur un transfert d'énergie aux zones à dégivrer (pales de pré-rotation, grille d'entrée d'air) en utilisant des ondes électromagnétiques. Etant peu énergivore, il est applicable aux petits aéronefs intrinsèquement moins motorisés que les gros porteurs.

Du point de vue opérationnel, il présente de nombreux avantages vis à vis des attentes des utilisateurs d'aéronefs, en particulier en améliorant :

- la disponibilité,

Comment ça marche?

Le principe:

On utilise les micro-ondes confinées dans une cavité conductrice constituée par la grille d'entrée d'air, le conduit et les pales pour chauffer des peintures absorbantes (qui convertissent l'énergie électromagnétique en énergie thermique). Elles sont déposées en faible épaisseur (quelques centaines de μm) sur les zones sensibles et permettent de faire fondre la glace qui pourrait se former sur celles-ci (fonction dégivrage) ou éviter le dépôt de glace (fonction anti-givrage). Cette solution, qui permet un transfert d'énergie au cœur du matériau, présente un avantage majeur en terme de rendement énergétique par rapport aux systèmes existants utilisant un chauffage résistif (analogie avec les plaques à induction vs les plaques vitrocéramiques).

Les constituants de la cavité étant conducteurs (métal ou composite carbone), l'emploi de matériaux purement diélectriques absorbant les micro-ondes ne présente aucune efficacité, car le champ électrique tangentiel à leur surface est nul. La solution de matériaux magnétiques déposés sous de faibles épaisseurs (pour minimiser le poids) sur les éléments sensibles a donc été retenue.

Les points prioritaires pris en compte dans la réalisation du démonstrateur:

- une garantie de l'absence de points en dessous de 0°C , pour éviter des dépôts locaux de glace,
- une maîtrise des fuites hyperfréquences dans le flux d'air des maquettes d'essai, pour être compatibles des normes CEM,
- une robustesse et une efficacité du système de chauffage hyper fréquences.

Absence de zones en dessous de 0°C

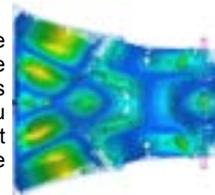
L'énergie électromagnétique rayonnée dans la cavité est fournie par des antennes de type monopole. Elle varie spatialement, car elle correspond à la combinaison des modes propres de la cavité comme le montre la figure ci-contre (obtenue par calcul). Ces dépôts hétérogènes d'énergie conduisent naturellement à des gradients de température sur les matériaux chauffants qui sont réduits grâce à la conduction thermique du support. Les modélisations effectuées, associées à des essais permettent de dimensionner le système et d'optimiser les temps de chauffage : choix des compositions de peinture, de leur épaisseur, emploi de supports très conducteurs de la chaleur, stratégie d'injection des signaux de chauffage, ...

Robustesse et efficacité du système de chauffage

Des solutions et des technologies utilisées dans les systèmes contrôle-commande soumis à des environnements électromagnétiques sévères (utilisation de capteurs de température à fibre optique par exemple) ont été retenues. Le logiciel de pilotage développé permet d'optimiser le chauffage en temps réel (commutation des antennes, cycles de chauffage adaptés aux contraintes environnementales) et de réduire au maximum l'énergie dédiée au dégivrage.

Maîtrise des fuites hyperfréquence

De par nature, la cavité est une « cage de Faraday » imparfaite car elle comporte deux ouvertures qui sont traversées par le flux d'air et, par nature non modifiables géométriquement (maille de la grille p.ex.), pour des critères aérodynamiques. Pour garantir la sécurité du personnel durant les essais à forte puissance, des solutions matérielles ont été conçues et réalisées. Elles permettent de limiter les niveaux de fuite pour le rendre compatible des normes NF.



C

- la capacité de pénétration en zone givrante,
- la sécurisation des vols par la diminution de la vulnérabilité.

Les travaux réalisés

Ils entrent dans le cadre du projet DEMEA financé par la DGA (RAPID) :

D'une durée initiale de 4 ans, DEMEA s'achèvera fin novembre 2015 par une démonstration expérimentale de son efficacité dans des conditions opérationnelles sur le petit anneau givrant de la DGA/EP à Saclay (flux d'air de plusieurs centaines de m³/s à des températures pouvant descendre à -40°C).

Partant de la vérification du concept par des simulations numériques de plus en plus complexes, les travaux réalisés ont nécessité :

- un développement de peintures magnétiques chauffantes compatibles de l'environnement opérationnel rencontré,
- la réalisation d'une maquette numérique multi-physiques (électromagnétisme-thermique) et d'une maquette physique d'entrée d'air instrumentée intégrant ces peintures sur les pièces à dégivrer, ainsi qu'un système contrôle-commande de chauffage hyperfréquence à 2,45 GHz (fréquence de chauffage autorisée),
- la mesure sans flux d'air des cartographies des températures sur les pièces à dégivrer et la comparaison avec des simulations,
- une extrapolation par calcul avec prise en compte du flux d'air.

Le projet s'appuie sur 3 partenaires et deux sous-traitants :

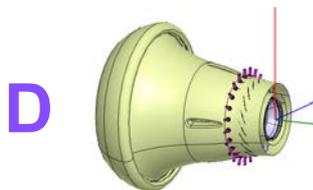
- RESCOLL, porteur de projet, pour la partie matériau (conception, formulation et réalisation) et simulations-mesures thermiques et hyperfréquences (réalisées par le laboratoire IMS de l'université de Bordeaux).
- NEXEYA Systems, pour la partie génération des hyperfréquences : système contrôle-commande, source, antennes.
- TURBOMECA, End User, pour la spécification du besoin, la fourniture du démonstrateur, son instrumentation et la conduite des essais dynamiques.

L'expertise et la conduite technique du projet ont été réalisées par METEXO.

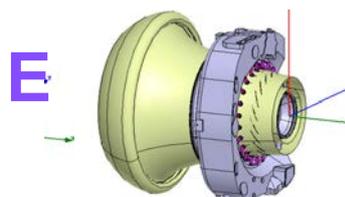
Nous résumons ces travaux ci-après, en présentant en particulier les interactions entre les simulations numériques et les essais qui ont permis de lever progressivement les verrous technologiques et de concevoir le démonstrateur qui sera testé en juin¹ dans un environnement représentatif de celui subi dans un cadre opérationnel.

La maquette numérique

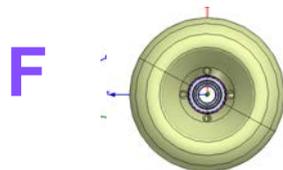
Une première étape a permis la prise en compte de la structure (fournie par Turbomeca sous Catia) dans le logiciel ANSYS (code d'électromagnétisme).



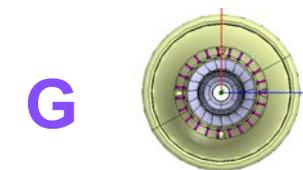
Plan Catia d'origine



Maquette numérique HFSS

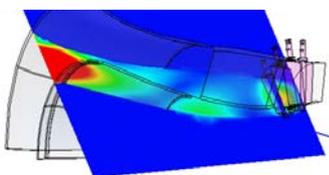


Conduit: vue AV



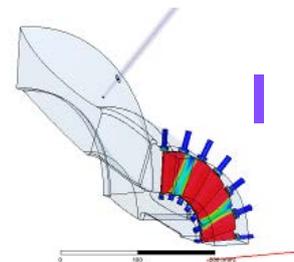
Conduit : vue AR

Les premiers calculs, réalisés sans matériau absorbant, ont été faits en injectant une onde électromagnétique dans le plan de la grille. Ils ont permis d'avoir la cartographie² des champs magnétiques dans la cavité (les champs électriques étant nuls sur des parois conductrices), optimiser le maillage et, in fine, valider le modèle numérique.



énergie dans la cavité (plan de coupe)

H



énergie déposée dans les pales

Les peintures absorbantes

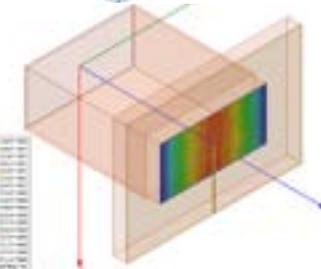
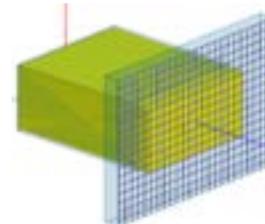
Constituées à partir de formulations à base d'un liant epoxy, elles sont chargées d'un mélange de poudres actives à propriété magnétique. Elles ont été réalisées, caractérisées en hyperfréquence sur des tores dans une ligne APC7 avec un analyseur de réseau (permittivité et perméabilité complexe).



Un échantillon de grille peinte a été placé en sortie d'un guide d'onde de puissance, pour être chauffé.



Les mesures d'élévation en température en plusieurs points ont été comparées aux simulations.



I

II

J

K

L

¹ Un addendum à cet article sera publié dans une prochaine revue Essais & Simulations. Il présentera les essais réalisés et les performances en dégivrage obtenues.

² La carte de champ est indépendante de la position et du type de source (au premier ordre). Elle change peu lorsqu'on remplace une injection du signal par la grille ou par des antennes, si celles-ci ne sont pas trop proches des objets à dégivrer.

On note une bonne corrélation entre les mesures et les simulations (courbes à droite), l'écart étant dû à une incertitude au niveau de l'homogénéité de l'épaisseur de la peinture déposée.

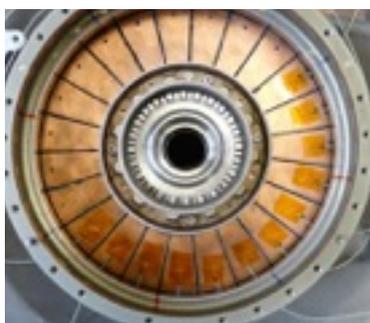
La première maquette d'étude

Fournie par Turbomeca à partir de sous-ensembles d'une entrée d'air moteur, elle est constituée:

- d'un carter structurant (à grande inertie thermique) servant de support à l'ensemble des pièces constituant le conduit et le système d'orientation des pales,



- d'un conduit d'air constitué de 2 pièces coniques (interne et externe) en matériau composite carbone,
- d'une grille métallique monobloc en inox (maille de la grille: 5 mm) insérée entre deux brides en matériau composite et fixée par des vis sur le conduit d'air,
- d'un simulateur de pales recouvertes des peintures micro-ondes pré-citées,



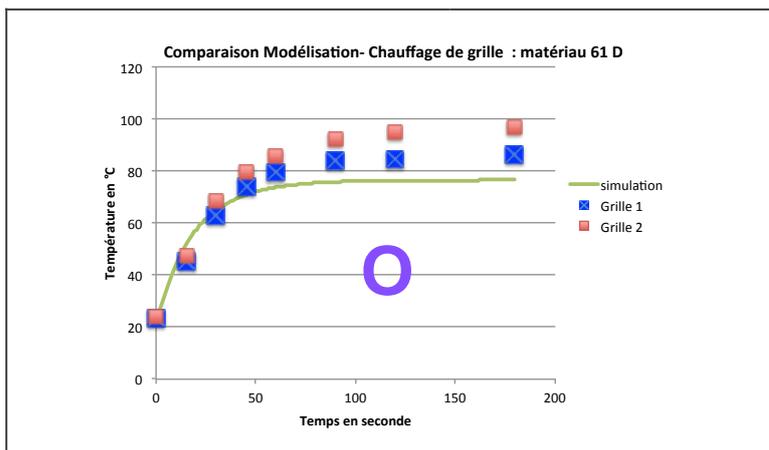
- de quatre antennes monopole placées sur un même plan à 90° à mi-distance grille-pales,
- d'un magnétron de laboratoire pouvant générer 1 kW rayonné.

La comparaison calculs-mesures

Les simulations numériques ont été réalisées en 2 étapes successives:

1. Les champs électromagnétiques ont été calculés avec le logiciel ANSYS-HFSS. Ils ont fourni l'énergie électrique déposée au logiciel ANSYS thermique.
2. Ce dernier a pris en compte les conductivités thermiques des peintures et de leur supports métalliques (inox ou cuivre) et fourni la cartographie thermique surfacique des pales.

Dans un premier temps, pour limiter les temps de calcul, les maillages des structures ont été faits sans raffinement



excessif avec un jeu de pales réparties d'une façon parfaitement axisymétrique³. Cette approche permet de ne pas prendre en compte l'épaisseur des peintures absorbantes ou les petites singularités géométriques (fils métalliques des grilles p.ex).

Les comparaisons simulations-essais présentées dans la suite se limitent donc aux pales. Elles ont été complétées par des essais pour la grille.

Chauffage avec une seule antenne

Sont présentés ci-dessous les premiers recalages à température ambiante réalisés avec une seule antenne alimentée, compte tenu du matériel de laboratoire disponible.

Ils avaient pour but:

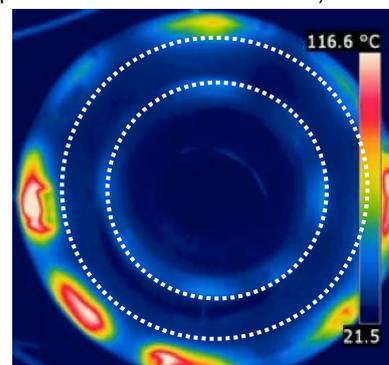
- d'avoir une première approche du chauffage des pales recouvertes de matériau magnétique, par micro-ondes.
- de recalcer les simulations numériques faites dans les mêmes conditions.

Ils montrent la cartographie des températures⁴ relevées au bout d'un temps fixé sur la surface des pales.

Le chauffage est quasi-uniforme sur le quart éclairé par l'antenne en vis-à-vis.

On note un bon accord entre la modélisation et la mesure. L'expérience a été reproduite avec chacune des antennes (1 seule alimentée à la fois) et donne des résultats équivalents.

Par contre, l'échauffement est faible (ΔT de 14°C). Il est dû à des défauts technologiques de la maquette au niveau de la continuité électrique entre les sous-ensembles créant des zones de chauffage très importantes (plus de 200°C) au niveau de l'anneau de fixation de la grille situé à l'extérieur du conduit, comme le montre la cartographie thermique ci-dessous (en pointillé les bords de l'entrée d'air).

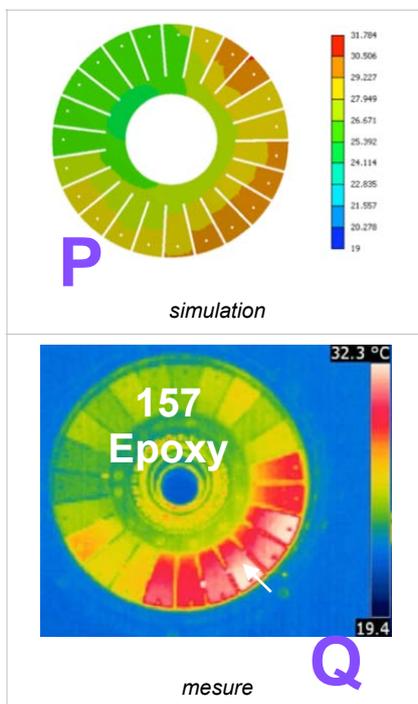


Ceci montre la difficulté de maîtrise des claquages dus aux défauts technologiques imparfaitement modélisables en présence d'un champ électromagnétique intense.

Chauffage avec deux antennes

A partir du modèle recalé ci-dessus, les calculs ont été réalisés pour des températures de -10°C et -20°C sans flux d'air et comparés à des essais en étuve aux mêmes températures.

La comparaison visuelle calcul-mesure présentée dans les 2 images en haut de la page 4 est difficile à faire compte tenu des échelles de couleur différentes. Associée aux mesures par thermocouple faites en quelques points, elle permet de conclure que les températures maximales obtenues en simulation et en essai sont quasi-



³ Les 23 pales réelles ont été simulées par 24 pales pour avoir une symétrie d'ordre 4. Ceci ne modifie pas de manière importante les cartographies de champ.

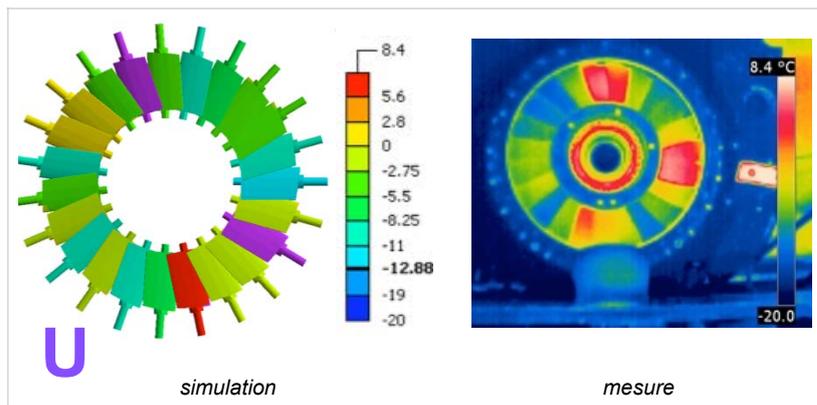
⁴ Les dynamiques de température (19°C à 33°C) sont les mêmes en simulation et mesure, mais les échelles de couleurs différentes.

identiques et les cartographies thermiques très proches.

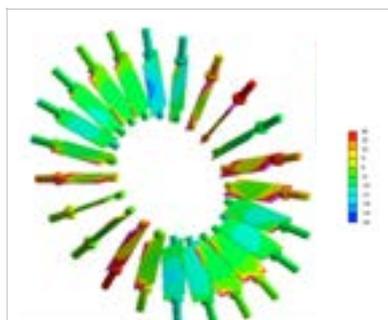
Etudes paramétriques

A partir du modèle validé, il a été possible de faire varier les caractéristiques des matériaux recouverts de peinture chauffante (conductivité thermique, géométrie,...), les paramètres de chauffage (puissance hyperfréquence injectée, durée, type de commutation,...).

Nous présentons ci-dessous, à titre d'exemple les cartes de température sur les pales pour deux angles d'ouverture (et donc pour des débits d'air très différents).

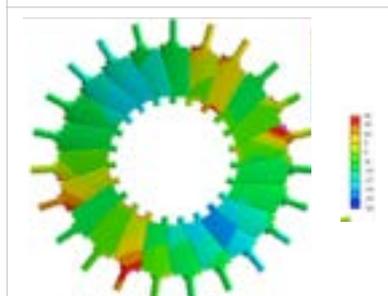


S



2 antennes
pales ouvertes : débit d'air : 6,7 kg/s
température air : -20°C
 $2^{\circ}\text{C} < T_{\text{pales}} < 40^{\circ}\text{C}$

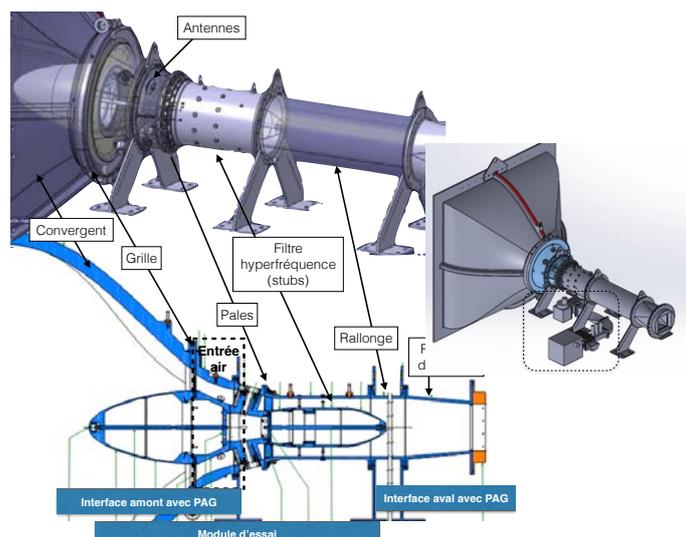
T



1 kW hyper sur 2 antennes
pales fermées : débit d'air : 2,2 kg/s
température air : -20°C
 $5^{\circ}\text{C} < T_{\text{pales}} < 20^{\circ}\text{C}$

Parmi d'autres types de travaux réalisés à partir de la simulation (confortés parfois par des essais partiels), nous pouvons citer :

- la maîtrise des claquages électriques potentiels compte tenu des puissances hyperfréquences rayonnées dans la cavité,
- la limitation des fuites à des niveaux acceptables (normes CEM) : calculs validés par des essais, développement d'un système statique de filtrage,
- les spécifications du démonstrateur à réaliser pour les essais dynamiques dans l'anneau givrant :
 - peintures magnétiques,
 - conductivité thermique des matériaux peints afin d'homogénéiser les températures,
 - électronique de puissance du système de chauffage hyperfréquence,
 - contrôle commande.



W

Le démonstrateur:

Les figures ci-dessus montrent une vue 3D (partie haute) et une vue en coupe du module d'essai

Il est constitué :

- d'une maquette mécanique instrumentée équipée d'un système de filtrage statique des hyperfréquences (stubs), afin de garantir l'absence de fuites à des niveaux inacceptables pour les matériels et les personnes (67 V/m).
- du système de chauffage hyperfréquence :
 - asservi en température sur 6 points (pales et grille),
 - permettant d'alimenter deux parmi quatre antennes et de réaliser les cycles nécessaires au dégivrage, avec une puissance maximale totale de 6 kW.

Celui-ci est associé au système contrôle-commande placé à proximité des antennes pour limiter les pertes dans les câbles. Dans une version opérationnelle, il sera beaucoup plus réduit en volume.

Les travaux à venir

Les essais dynamiques sont planifiés en juin 2015 sur la veine d'essais du petit anneau givrant (PAG) du Centre d'Essais des Propulseurs de la DGA à Saclay.

Conclusion

A partir de moyens d'essais de laboratoire, associés à des calculs multi-physiques (électromagnétisme+thermique), il a été possible :

- de définir les spécifications d'un système de dégivrage basé sur un chauffage hyperfréquence,
- d'en estimer son efficacité par des simulations (vérifiées par des essais) en environnement normal (et en présence d'un flux d'air givrant correspondant aux conditions rencontrées sur le plan opérationnel).
- de réaliser un démonstrateur qui permettra de valider expérimentalement les résultats des extrapolations obtenues par calcul.

Si les résultats attendus sont conformes aux prévisions, il sera alors possible de comparer ce système de dégivrage à ceux existants (performances, masse, énergie nécessaire, ..), et s'il est plus performant, prendre en compte l'ensemble des contraintes opérationnelles pour adapter le démonstrateur à ces nouvelles spécifications.

En plus du fait de développer un programme de recherche « ab initio » permettant de démontrer l'efficacité d'un nouveau procédé de dégivrage, DEMA est aussi un outil de recherche collaboratif concret permettant de créer des synergies entre les donneurs d'ordre industriels, les PME, les ETI et les petits laboratoires, pour innover et explorer des technologies alternatives en rupture avec celles existantes.

Jean-Paul PRULHIERE, Metexo
Eric ROYER, Turbomeca
Mathieu OYHARCABAL, Rescoll
Guillaume PERCHET, Nexeya
Gilles RUFFIE, Fabrice BONNAUDIN, IMS