



**DOSSIER**

**42**

## Spécial Eurosatory La défense, une filière clef pour les essais et la simulation

### Essais et modélisation 10

Nafems, Teratec, WNE...  
Les rendez-vous à ne pas manquer

### Mesure 33

Enova Paris : les outils de mesure  
pour l'industrie des essais



## La défense, une filière clef pour les essais et la simulation

# 42

- 42 Eurosatory 2016, une belle édition se prépare
- 43 L'hexapode : un simulateur de mouvement dynamique à six degrés de liberté
- 44 Simson, un simulateur pour l'imagerie sonar
- 46 Un savoir-faire unique dans les essais balistiques
- 48 MBDA : des essais d'environnement extrême couplés aux simulations numériques
- 51 DGA TT ou comment allier expérience, innovation et efficacité pour la maîtrise technique des systèmes terrestres
- 55 Une technologie de rupture pour le dégivrage d'entrée d'air d'un turbomoteur

### Actualités

- 6 Munich accueillera la 12<sup>e</sup> Conférence Comsol en octobre
- 6 La communauté de la simulation numérique se réunit en juin à Charenton
- 8 Sopemea investit dans des équipements industriels écoresponsables

### Essais & modélisations

- 10 Forum Teratec, un événement incontournable de la planète HPC
- 11 Exploitez vos données industrielles pour mieux prédire
- 11 Simufem : votre partenaire modélisation éléments finis et calculs de structures



- 12 Ouvrir le HPC aux PME avec SiMSEO
- 14 Élargir la simulation numérique à toutes les entreprises
- 16 Comment les composites ont envahi l'industrie aéronautique... Conséquences sur la conception et la simulation



### Spécial Essais dans la filière nucléaire

- 20 WNE : le nucléaire civil de retour au Bourget
- 21 Une expertise forte pour relever les défis du nucléaire
- 24 Optimiser l'exploitation d'une centrale avec la simulation
- 27 Robotiser le démantèlement de la centrale de Marcoule : le pari du CEA
- 30 Faire face aux nouveaux défis du nucléaire grâce aux capteurs

### Mesure

#### Enova Paris

- 33 Une édition parisienne placée sous le signe du dynamisme
- 34 Métrologie de silhouettes par la méthode de corrélation d'images virtuelles
- 36 Comparaison de techniques de CND émergentes sur des pièces aéronautiques en matériaux composites
- 38 Focus produits
- 40 Facilitez la vie des opérateurs



### Vie de l'ASTE

- 61 Astelab revient en octobre, à Paris, sur le thème de la mécanique

**Programme des formations** 62

**Agenda** 63

**Index des annonceurs** 64

PROJET

# Une technologie de rupture pour le dégivrage d'entrée d'air d'un turbomoteur

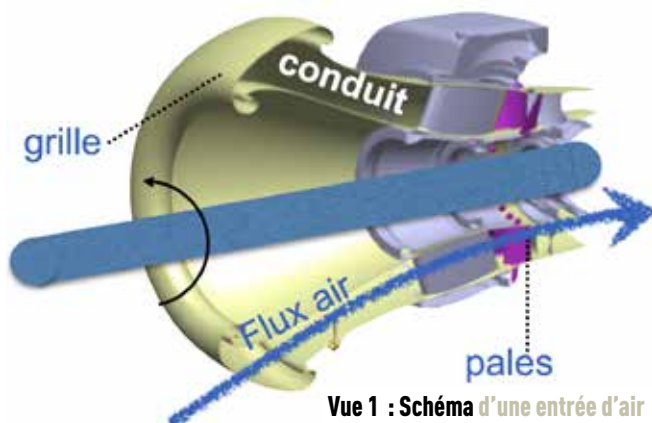
Dans le domaine aéronautique, le givrage est une difficulté majeure. Pour cette raison, la fonction dégivrage de tous les avions (en particulier des entrées d'air moteur) est d'une importance capitale pour la sécurité des vols. Notamment différente des dispositifs existants, une technologie innovante, basée sur le chauffage par micro-ondes des parties exposées au givre, a été étudiée dans le cadre d'un programme de recherche DGA. À partir de simulations numériques et d'essais partiels ayant nécessité de nombreux échanges et recalages, un démonstrateur a été réalisé. La démarche employée a permis de conforter par un essai global sur une installation de référence de la DGA (Petit Anneau Givrant) la viabilité du principe de chauffage par hyperfréquence, mais avec des performances insuffisantes vis-à-vis du besoin (les températures de dégivrage atteintes ont été de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour un objectif de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Sont présentées ci-après les différentes étapes de sa réalisation.

## LE CONTEXTE

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

Les technologies les plus utilisées pour les moteurs d'hélicoptère (turbomachines) 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.



Elles présentent des limites en performance, et aussi des inconvénients significatifs en termes de 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'antigivrage d'entrée d'air pour ses moteurs, par chauffage micro-ondes de matériaux absorbant ces ondes et placés sur les parties sensibles. Sa faisabilité a été démontrée par simulation numérique et essais partiels dans le cadre d'une étude interne. Les résultats prometteurs obtenus ont montré l'intérêt de poursuivre cette étude de faisabilité par un projet de démonstrateur expérimental. Du point de vue technique, le principe proposé est basé sur un transfert d'énergie aux zones à dégivrer (pales de prérotation, grille d'entrée d'air) en utilisant des ondes électromagnétiques. Du point de vue opérationnel, il présente de nombreux avantages vis-à-vis des attentes des utilisateurs d'avions, en particulier en améliorant la disponibilité, la capacité de pénétration en zone givrante, et 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) et qui s'est achevé fin 2015 par une estimation expérimentale de son efficacité dans des conditions opérationnelles sur le petit anneau givrant (PAG) de la DGA/EP à Saclay (flux d'air de plusieurs centaines de  $\text{m}^3/\text{s}$  à des températures négatives).

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

- un développement d'une filière de matériaux magnétiques absorbants adaptés à la fréquence de chauffage retenue (2,45 GHz),
- la réalisation d'une maquette numérique multiphysique (électromagnétisme-thermique) et d'une maquette de laboratoire intégrant ces matériaux sur les pièces à dégivrer, ainsi qu'un système contrôle – commande de chauffage hyperfréquence,
- la mesure sans flux d'air des cartographies des températures sur les pièces à dégivrer de la maquette et la comparaison avec des simulations,
- une extrapolation aux conditions qui seront rencontrées dans le petit anneau givrant (PAG) du CEPR, avec prise en compte de la convection par un coefficient d'échange,
- la fabrication d'un démonstrateur instrumenté pour les essais PAG.

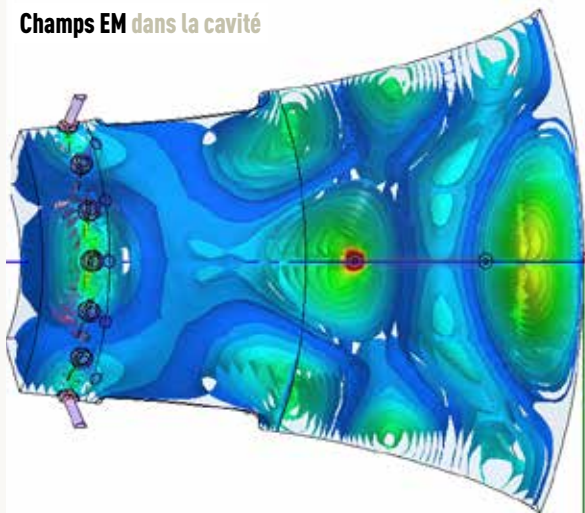
## Comment ça marche ?

### Le principe :

C'est celui des fours micro-ondes du commerce. On utilise les micro-ondes (2,45 GHz) 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  $\mu\text{m}$ ) 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 antigivrage). 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

**Champs EM dans la cavité**



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, de concevoir et réaliser le démonstrateur et d'en mesurer les performances dans des conditions représentatives de l'environnement opérationnel.

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.

### Ses limites :

L'énergie électromagnétique rayonnée dans la cavité est fournie par des antennes de type monopole (donc monofréquence). 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. Pour les réduire, on utilise la conduction thermique du support. Cela implique que les phénomènes de convection avec l'air ne soient pas prépondérants. Dans le cas contraire, il faut utiliser d'autres techniques (brassage de modes, source hyperfréquence large bande...) incompatibles du budget prévu pour ce projet.

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

- une absence de points en dessous de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 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 hyperfréquences.

### Absence de zones en dessous de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

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 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**

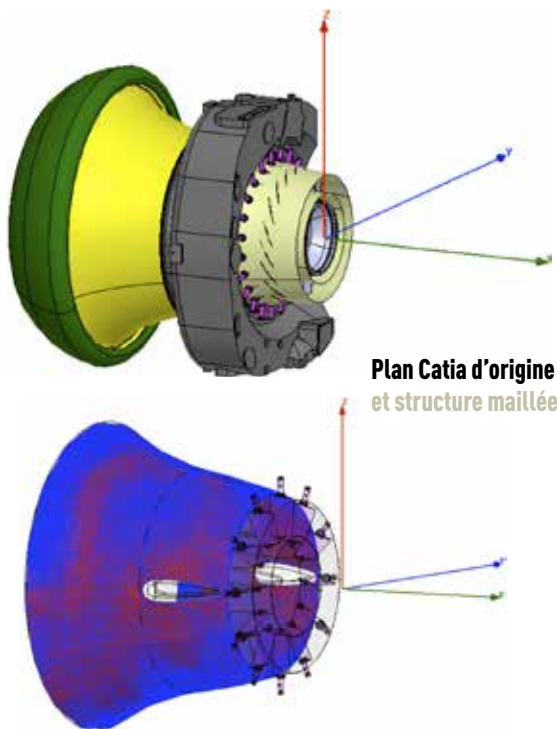
De par nature, la cavité est une « cage de Faraday » imparfaite car elle comporte deux ouvertures qui sont traversées par le flux d'air

et, **non modifiables géométriquement** (maille de la grille par 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.

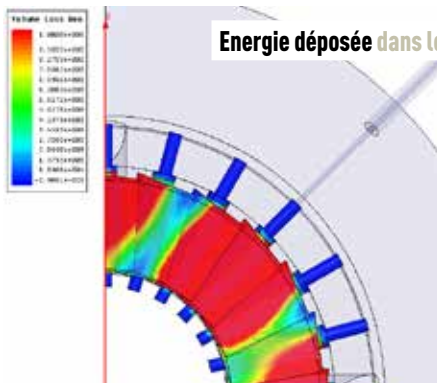
Tous ces points sont détaillés dans l'article.

**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). 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 cartographie des champs électromagnétiques dans la cavité et les énergies déposées sur les parties à chauffer, optimiser le maillage et, *in fine*, valider le modèle numérique.



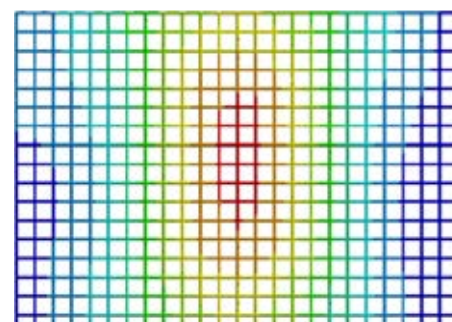
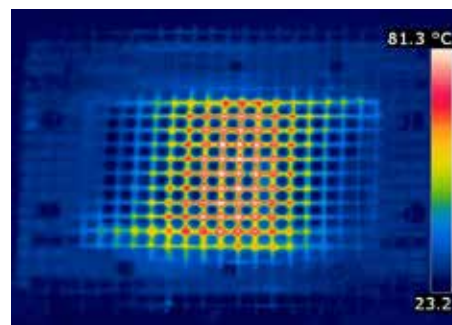
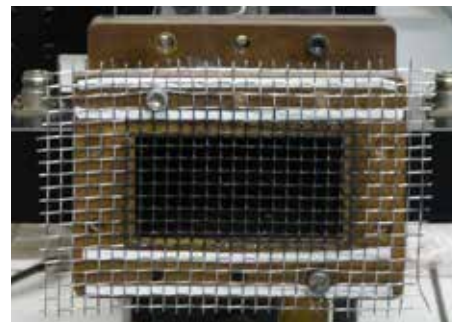
**Plan Catia d'origine et structure maillée**



**Energie déposée dans les pales**

**LES PEINTURES ABSORBANTES**

Constituées à partir de formulations à base d'un liant époxy, 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. 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.

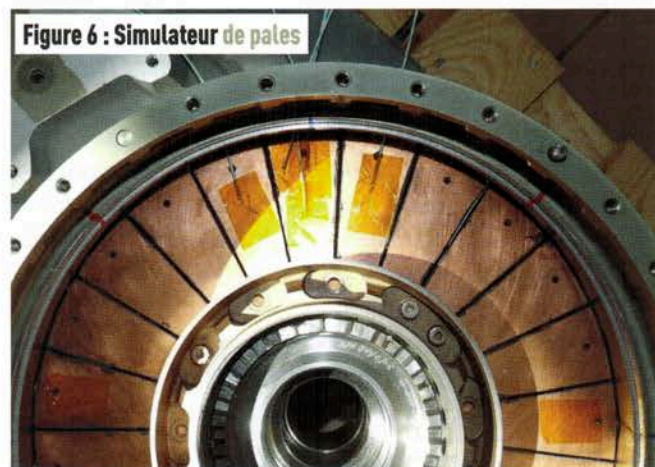


**Chauffage grille: Montage d'essai, mesures, simulations**

**LA 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 (maille de la grille : 5 mm) et d'un simulateur de pales recouvert des peintures micro-ondes précitées,



- 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 champs électromagnétiques ont été calculés avec le logiciel ANSYS-HFSS. Les énergies électromagnétiques déposées sur les parties chauffées ont été utilisées comme données d'entrée pour le logiciel ANSYS thermique. Celui-ci a pris en compte les conductivités thermiques des peintures et de leurs supports métalliques (inox ou cuivre), le coefficient d'échange moyen avec l'air ambiant et fourni la cartographie thermique surfacique des pales à l'équilibre.

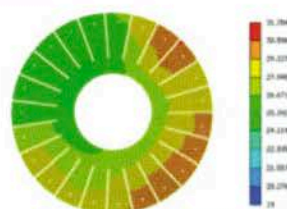
Les comparaisons simulations-essais n'ont pu être faites que sur les pales, compte tenu de l'impossibilité de modéliser finement la grille (simulée par une impédance de surface équivalente) avec les moyens de calcul disponibles. Elles ont été complétées par des mesures de température (par thermographie IR et thermocouples) sur la maquette complète (grille et pales peintes).

Elles avaient pour but :

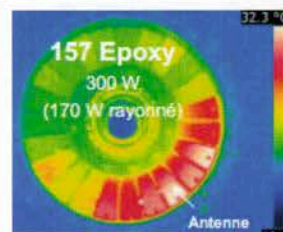
- d'avoir une première approche du chauffage des pales recouvertes de matériau magnétique par micro-ondes
- de recalibrer les simulations numériques par des essais faits dans les conditions de laboratoire à température ambiante et sans flux d'air
- de les valider à des températures négatives par des essais en étuve
- d'extrapoler aux conditions rencontrées dans le PAG (avec flux d'air)

**Le recalage**

- Fait avec une seule antenne et à température ambiante de 20 °C, il montre un bon accord entre la modélisation et la mesure (les dynamiques de température sont les mêmes, mais les échelles présentées sont de couleurs différentes). Le chauffage est quasi-uniforme sur le quart éclairé par l'antenne en vis-à-vis.

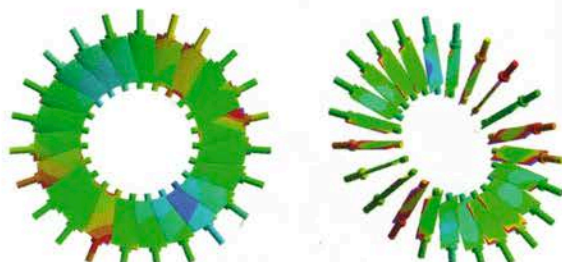


**Figure 7 : Comparaison simulation essais (1 antenne)**



**La validation**

- À partir du modèle recalé ci-dessus, les calculs ont été réalisés avec 2 antennes alimentées simultanément pour des températures ambiantes de -10 °C et -20 °C sans flux d'air et comparés à des essais en étuve aux mêmes températures. Ils ont permis de conclure que les températures maximales obtenues en simulation et en essai sont quasi-identiques et les cartographies thermiques très proches.



**Figure 8 : Simulations : Températures des pales (positions fermée et ouverte)**

## L'extrapolation

- Elle a permis de définir 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, système contrôle-commande.

## LE DÉMONSTRATEUR :

Il est constitué :

- d'une maquette mécanique instrumentée équipée d'un système de filtrage statique des hyperfréquences (stubs) derrière les pales, 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 successivement par commutation mécanique deux parmi quatre antennes (pour homogénéiser la carte des températures relevées sur les pales) 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 serait beaucoup plus compact.

## LES ESSAIS FINAUX

Réalisés fin 2015, ils ont prouvé la viabilité du principe de chauffage par hyperfréquence, mais avec des performances insuffisantes vis-à-vis du besoin (les températures de dégivrage atteintes ont été de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour un objectif de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Le matériau magnétique a montré une bonne adhérence et une stabilité de la peinture aux conditions expérimentales testées, indiquant que la formulation retenue, à base de résine époxyde, pourrait servir de base à une suite de travaux, avec une possibilité de performances de chauffage améliorées.

## CONCLUSION

La démarche employée a permis par une succession d'étapes de complexité croissante (matériau, composant peint, maquette de laboratoire) :

- de valider et recalibrer une maquette numérique et l'extrapoler aux conditions PAG,
- de conforter par un essai global sur une installation de référence le principe de chauffage par hyperfréquence, même s'il a été très limité en température. Il a en effet été possible de dégivrer le système à des températures de l'ordre de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  avec un fort coefficient d'échange (débit entre 2,5 et 5 kg/s), pour une puissance hyperfréquence de 6 kW (limite du démonstrateur).



Figure 9 : Maquette instrumentée (avec à gauche le système de chauffage)

Le matériau magnétique a montré une bonne adhérence et une stabilité de la peinture aux conditions expérimentales testées, indiquant que la formulation retenue, à base de résine époxyde, pourrait servir de base à une suite des travaux, avec une possibilité de performances de chauffage améliorées.

Une poursuite à court terme des travaux, centrés sur les besoins de dégivrage d'une entrée d'air n'est donc pas envisagée au stade actuel, car le TRL effectue obtenu à la fin de ces essais est trop bas par rapport à celui attendu (>5). En plus du fait de développer un programme de recherche « ab initio » permettant de quantifier l'efficacité d'un nouveau procédé de dégivrage, DEMEA a aussi été 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 PRULHIÈRE, Metexo**  
**Eric ROYER, Turbomeca**  
**Mathieu OYHARCABAL, Rescoll**  
**Guillaume PERCHET, Nexeya**  
**Gilles RUFFIE, Fabrice BONNAUDIN, IMS**

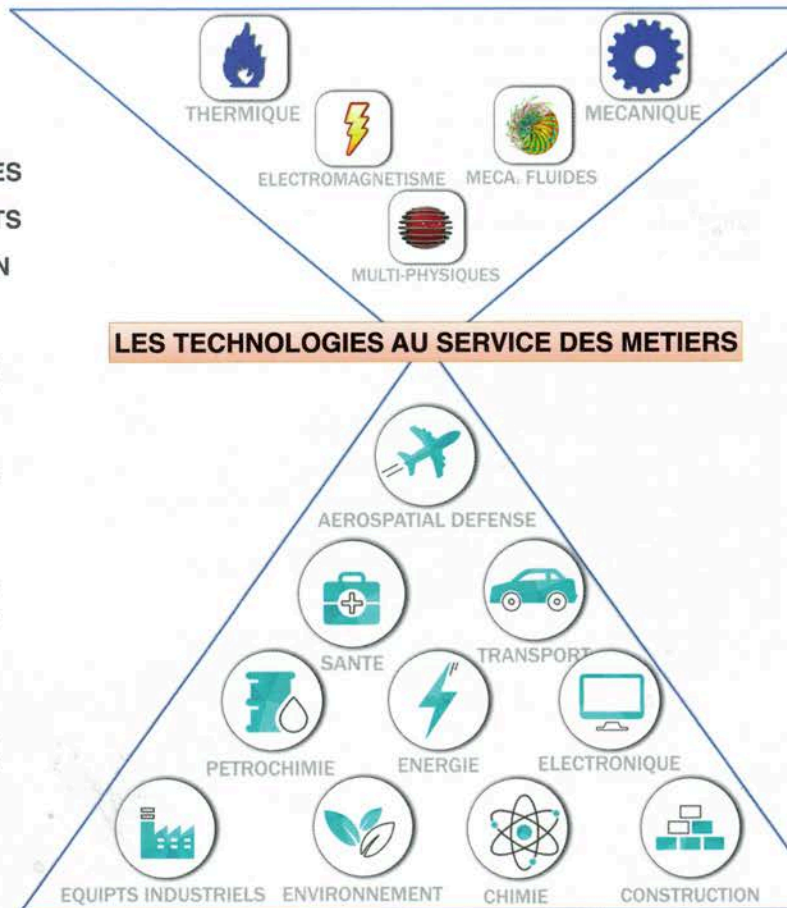


## Mosart-PME

plateforme de la simulation numérique

MUTUALISATION DES **COMPETENCES**  
 MONTAGE DES **PROJETS INNOVANTS**  
 ACCOMPAGNEMENT ET **FORMATION**

- ✓ **Objectif**
  - Mise à disposition d'entreprises d'une plateforme de mutualisation de compétences dédiée aux technologies de la modélisation et de la simulation numérique.
- ✓ **Structure associative indépendante**
  - constituée d'entreprises de toutes tailles : Startups, PME, grands comptes, organismes de recherche.
- ✓ **Mission d'accompagnement**
  - Traduction des besoins exprimés par une entreprise
  - Mise en relation avec des experts de l'industrie qui leur apporteront les compétences recherchées dans le domaine de simulation numérique
  - Projets collaboratifs
- ✓ **Collaborations**
  - avec des plate-formes existantes: en région (SNASA, CompositeAdour, MetallicAdour, ...) et en France (MICADO, NAFEMS,...).



HélioParc, 2 av. Président Pierre Angot 64000 F  
 06-71-67-22-71 [mosart-pme@mosart-pme.org](mailto:mosart-pme@mosart-pme.org)  
[www.mosart-pme.org](http://www.mosart-pme.org)