

# Modélisation d'un dégivreur électromécanique pour application aéronautique

<sup>1</sup>Melissa ESTOPIER CASTILLO, <sup>1</sup>Thanh Trung NGUYEN, <sup>1</sup>Edith CLAVEL, <sup>1</sup>Nicolas GALOPIN, <sup>1</sup>Frédéric WURTZ, <sup>2</sup>Stéphane LE GARREC

<sup>1</sup>Université Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, FRANCE

<sup>1</sup>CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, FRANCE

<sup>2</sup>ZODIAC AEROSPACE, CS20001 - 78373 – Plaisir, FRANCE

**RESUME** – Les travaux présentés dans cet article portent sur la modélisation électro-magnéto-mécanique d'un dispositif de dégivrage en aéronautique. Le principe de fonctionnement de ce dispositif est basé sur la déformation d'une plaque obtenue par la répulsion de deux conducteurs électriques en vis-à-vis. L'objectif est d'obtenir un modèle adapté pour le processus d'optimisation du système. Une modélisation électro-mécanique est proposée pour obtenir la réponse mécanique du dispositif en fonction de la sollicitation électrique. Cette modélisation tient compte de la dynamique de la sollicitation et de la topologie particulière des éléments structurels du dispositif.

**Mots-clés**— dégivrage en aéronautique, modélisation électro-mécanique, force de Laplace, déformation d'une plaque.

## 1. INTRODUCTION

L'industrie aéronautique est actuellement dans la voie de conception d'un avion tout électrique, et demande des solutions innovantes pour reconcevoir l'ensemble des dispositifs de l'appareil et les rendre 100% électriques. Pour la sécurité de vol, des dispositifs contre le givre permettent de garantir un fonctionnement sécurisé des avions, et sont classifiés selon un mode d'opération : dégivrage ou antigivrage. Les solutions existantes sont souvent considérées comme énergivores et encombrantes.

Une nouvelle solution électromécanique de dégivrage pour le bord d'attaque des ailes d'avion, est proposée par notre partenaire Zodiac Aerospace. Cette technologie repose sur la répulsion de deux conducteurs parcourus par des courants de circulation opposée. L'actionneur correspondant est intercalé entre la structure du bord d'attaque de l'aile d'avion et une couche de blindage en aluminium (*abrasion shield*) voir figure 1. Ainsi, tandis que l'un des conducteurs est en contact avec la structure de l'aile de l'avion, le second est en contact avec la face interne de la couche de blindage, dont la face externe est soumise au flux d'air et à l'accrétion de givre. La répulsion des conducteurs, induite par la circulation de courants de très fortes intensités, conduit à une déformation brutale de la couche de blindage. La pellicule de glace est ainsi cassée et balayée par le flux d'air [1].

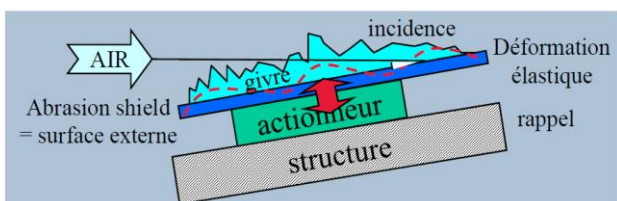


Fig.1 Emplacement de l'actionneur [1]

Après présentation de l'actionneur électromécanique, la modélisation et le couplage des modèles retenus, dans l'objectif d'une optimisation réaliste, sont présentés. Les résultats de la modélisation et de l'optimisation sont discutés.

## 2. DEGIVREUR ELECTROMECHANIQUE

L'actionneur est constitué de deux conducteurs en serpentins disposés en vis-à-vis, figure 2. Entre les deux serpentins est disposée une couche de polyimide percé de nombreux trous, et dans lesquels sont insérés des plots en élastomère. Cet ensemble est alors positionné entre deux couches de polyimide jouant le rôle de support mécanique et d'isolant électrique vis-à-vis de l'extérieur. Ces éléments structurels ont pour but d'assurer la robustesse et le retour en position initiale après chaque cycle d'activation. L'ensemble des couches est vulcanisé, ce qui conduit à un actionneur de forme parallélépipédique de dimensions 231mm x 89mm x 1mm.

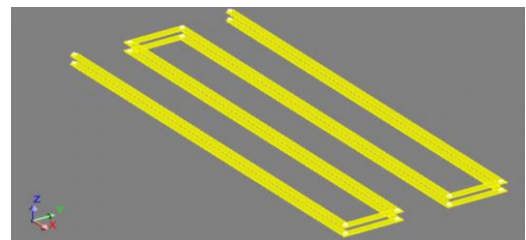


Fig.2 Disposition des serpentins conducteurs.

Cette configuration de l'actionneur permet d'exploiter le mode de flexion d'une plaque, à laquelle est assimilable la couche de blindage. Il a en effet été démontré que pour dégivrer une surface plane ou une plaque de faible dimension il est préférable de déformer la surface par flexion afin de minimiser les contraintes de rupture [2].

Du point de vue électrique, le courant électrique de très forte intensité, entre 4000 et 10000A, est généré par la décharge d'un condensateur de forte valeur, préalablement chargé à une tension de 400 à 800V.

## 3. MODELE ELECTROMECHANIQUE

La modélisation de cet actionneur est un problème multi physique reposant sur une résolution temporelle. Il nécessite le calcul des densités de forces s'exerçant sur les conducteurs en serpentins ainsi que la déformation mécanique associée de la couche de blindage. Le modèle décomposé en plusieurs étapes, est détaillé figure 3.

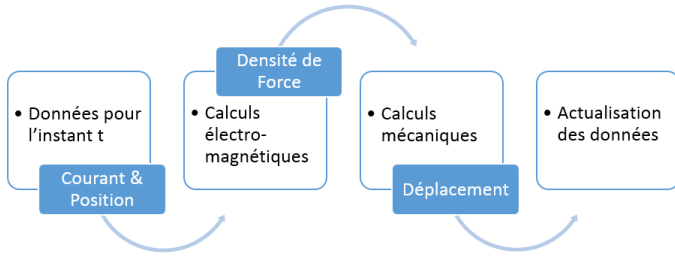


Fig.3 Chaîne de calcul multiphysique.

### 3.1. Modélisation électromagnétique

Le fonctionnement de cet actionneur repose sur une interaction électromagnétique entre conducteurs. Les conducteurs sont des parallélépipèdes rectangles, dans lesquels les densités de courant sont supposées uniformes. Cette interaction est donc décrite au moyen de la loi de Biot et Savart (1) et de la loi de Laplace (2) pour le calcul des densités de forces magnétiques.

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{\vec{j} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv \quad (1)$$

$$\vec{dF} = \vec{j} dv \times \vec{B} \quad (2)$$

Où  $\vec{B}$  est l'induction magnétique (T),  $\vec{j}$  la densité de courant ( $A/m^2$ ),  $\vec{dF}$  la densité linéique de force magnétique (N/m),  $dv$  un élément de volume ( $m^3$ ),  $r$  la position du point de calcul et  $r'$  la position de l'élément volumique  $dv$ .

### 3.2. Modélisation mécanique

Du point de vue mécanique, le problème à résoudre est celui d'une plaque [4-5]. Les conducteurs affectent peu la rigidité de la structure, si bien que les densités linéiques de forces magnétiques sont introduites directement comme terme source du problème, donc agissant directement sur la plaque. Les plots élastomères sont considérés par un terme de force élastique. En faisant l'hypothèse de propriétés matérielles uniformes, il s'agit de résoudre l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^4} + 2\beta \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^2 \partial y^2} + \alpha \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial y^4} + \frac{\gamma h}{D_x} \frac{\partial^2 w(x,y,t)}{\partial t^2} = \frac{q(x,y,t)}{D_x} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{D_y}{D_x}; \quad \beta = \frac{H_{xy}}{D_x}; \quad H_{xy} = (4D_{xy} + \mu_y D_x + \mu_x D_y)/2;$$

$$D_x = \frac{E_x h^3}{12(1-\mu_x \mu_y)}; \quad D_y = \frac{E_y h^3}{12(1-\mu_x \mu_y)}; \quad D_{xy} = G h^3 / 12$$

Où  $w(x,y,t)$  est le déplacement normal de la plaque (m) ;  $\gamma$  la densité volumique de masse ( $kg/m^3$ ) ;  $h$  l'épaisseur de la plaque (m) ;  $\mu_x$  et  $\mu_y$  les coefficients de Poisson ;  $E_x$  et  $E_y$  module d'Young (GPa),  $G$  le module de cisaillement (GPa) et  $q(x,y,t)$  le chargement du dispositif (N/m).

Une première approche en statique a permis de valider la description du problème mais elle ne prend pas en compte la dynamique et donc le temps de réponse mécanique vis-à-vis de la sollicitation électrique très rapide.

### 3.3. Couplage des modèles et modélisation dynamique

Les modèles obtenus, ont été rassemblés dans un seul programme alimenté avec les paramètres électriques et

géométriques [6]. Le code permet de faire appel à un composant issu du logiciel MacMMems, contenant le modèle électromagnétique du dispositif étudié [7]. Pour le calcul des efforts, il lance la résolution de l'équation de déformation de la plaque.

Pour la résolution de l'équation 2, trois stratégies ont été dégagées. 1) Résolution analytique rapide et précise, mais elle ne permet pas de considérer des chargements complexes comme c'est le cas de notre système (chargements linéiques, exercés par les lignes de conducteurs, positionnées aux différents endroits de la plaque). 2) Bouclage temporel, c'est une résolution multi-statique avec une actualisation des données d'entrée pour chaque instant analysé, qui ne prend pas en compte le terme dynamique de l'équation 2. 3) Résolution par un schéma aux différences finies et l'algorithme de Newark pour l'intégration temporelle [8].

## 4. RESULTATS & PERSPECTIVES D'OPTIMISATION

Des comparaisons entre le modèle et les mesures expérimentales réalisées par les industrielles ont été faites. Pour les mêmes données d'entrée, la déformation maximale sur le tapis est  $W_{max}$  (modèle)= 1,02mm  $W_{max}$  (expérimental)= 0,4mm [9]. Les résultats sont dans le même ordre de grandeur.

Des études de sensibilité ont été entreprises et certains paramètres sensibles sont déjà identifiés. Des stratégies pour les travaux d'optimisation sont en cours d'étude. La valeur que l'on cherche à optimiser est la déformation maximale car c'est pour le premier pic de l'onde de déformation que l'expulsion de la glace se produit.

## 5. CONCLUSIONS

Le modèle construit permet de calculer, de façon satisfaisante, l'effort et la déflexion de la plaque connaissant le courant d'alimentation et la configuration spatiale des conducteurs et des éléments de structure. Les différentes étapes de calcul sont en train d'être intégrées à un seul programme. La résolution du modèle contenant le terme dynamique par la méthode des différences finies étant la plus prometteuse, est en cours d'amélioration pour la rendre adapté à notre système. La précision acquise avec le modèle statique en boucle de calcul est suffisante pour procéder aux premiers travaux d'optimisation.

## 6. REFERENCES

- [1] E. Belot, S. Le Garrec and A. Delehelle, "Dossier de Définition Technique d'un Actionneur Expulse", Zodiac Aerospace, Inter-technical Report 7N-17211, Jul. 2013.
- [2] C. Laforte, "Déformation à la rupture adhesive par traction, flexion et torsion d'un substrat givré", thèse université du Québec à Chicoutimi, 2008.
- [3] I.E. Harik and G.L. Salamoun, "The analytical strip method of solution for stiffened rectangular plates", *Computers & Structures*, vol. 29, No. 2, pp. 283-291, 1988
- [4] Timoshenko S. and W. Woinowsky-Kreiger, « Theory of plates and shells », Mc.GrawHill 1959
- [5] H. L. Rakotoarison "Méthode et outil de generation automatique de modele pour l'optimisation fortement contrainte des microsystemes magnetiques", Ph.D. dissertation, Grenoble Univ., Grenoble, France, 2007.
- [6] A.R.Tavakolpour, I.Z.Mat Darus, M. Mailah, "Numerical simulation of a flexible plate system for vibration control", *WSEAS Transactions on systems and control*, Issue 3, Volume 4 2009.
- [7] Zodiac Aerospace, "RecapMesuresEI2\_UID\_1.exe", Inter-technical Report 7N-17211, 2013.