



HAL
open science

Sur le comportement thermoélectrique de matériaux composites pour applications aéronautiques = On the thermoelectric behaviour of composite materials for aircraft applications

Marco Gigliotti, Damien Marchand, Marie-Christine Lafarie-Frénot,
Jean-Claude Grandidier

► To cite this version:

Marco Gigliotti, Damien Marchand, Marie-Christine Lafarie-Frénot, Jean-Claude Grandidier. Sur le comportement thermoélectrique de matériaux composites pour applications aéronautiques = On the thermoelectric behaviour of composite materials for aircraft applications. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 8 p. hal-00391664

HAL Id: hal-00391664

<https://hal.science/hal-00391664v1>

Submitted on 11 Jun 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sur le comportement thermoélectrique de matériaux composites pour applications aéronautiques

On the thermoelectric behaviour of composite materials for aircraft applications

M. Gigliotti¹, D. Marchand¹, M.C. Lafarie-Frenot¹ et J.C. Grandidier¹

¹ : Laboratoire de Mécanique et Physique des Matériaux (LMPM)
Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et Aérotechnique (ENSMA)
1, Avenue Clément Ader 86961 Chasseneuil - Futuroscope, FRANCE
e-mail : marco.gigliotti@lmpm.ensma.fr

Résumé

Dans cet article les effets thermiques induits par le passage de courants continus d'intensité maximale de 8 A dans des éprouvettes composites pour applications aéronautiques et de type CFRP T300/914 [(0/90)₄]_s sont étudiés. Pour pouvoir injecter les courants, les éprouvettes ont été équipées à leurs extrémités d'électrodes métalliques à base cuivre d'épaisseur environ 50µm et produits par électrodéposition et suivant trois différents procédés industriels. Les champs transitoires de température sont mesurés sur les surfaces des éprouvettes par thermographie infrarouge et les essais sont simulés numériquement grâce à un modèle multiphysique thermoélectrique couplé.

Abstract

This article focuses on the effects of DC currents up to 8 A on the behaviour of CFRP composite materials T300/914 [(0/90)₄]_s for aircraft applications. In order to inject the current into the samples, these are equipped with 50µm thick copper electrodes produced by electrodeposition and by following three different industrial methods. The transient temperature fields are measured on the external surfaces of the samples by infrared thermography and tests are simulated by a multiphysical thermoelectric coupled model.

Mots Clés : comportement thermoélectrique, thermographie infrarouge, couplage multiphysique
Keywords : thermoelectric behaviour, infrared thermography, multiphysical coupling

1. Introduction

L'utilisation massive de composites à fibres de carbone et à matrice polymère (CFRP), en particulier pour la réalisation de panneaux de fuselage, va nécessiter une meilleure compréhension des mécanismes de vieillissement sous l'effet couplé de sollicitations mécaniques et du passage continu de courants dits de fuite. En effet, un fuselage en matériaux composites devant servir de 'masse' sera conduit à supporter des courants de fuite (relativement faibles mais de haute fréquence) provenant de tous les convertisseurs statiques embarqués dans l'appareil.

De ce fait un nouveau facteur « électrique » pourrait participer au vieillissement du matériau, éventuellement interagir avec toutes les autres sources de vieillissement et contribuer à la diminution de la durabilité de la structure.

Des courants électriques - continus ou alternés - sont souvent utilisés pour la surveillance et le contrôle (health monitoring) de matériaux et structures composites [1-3]. Il s'agit de courants de faible intensité (de l'ordre du mA), qui sont faciles à injecter dans le composite mais dont l'impact sur le matériau/structure ne peut pas être mis en évidence.

Très peu d'auteurs (par exemple [4]) ont étudié l'effet direct de courants ou de champs électromagnétiques sur les composites : ces études emploient le plus souvent des courants assez élevés (de l'ordre des dizaines d'A), dont les effets ne sont pas faciles à interpréter et hors de notre propos.

Il n'y a pratiquement pas d'études sur les effets de courants de niveau intermédiaire sur les composites, courants de l'ordre de l'Ampère et couramment rencontrés dans les applications aéronautiques. Ces courants pourraient contribuer, en particulier, à l'échauffement du matériau/structure par effet Joule et entraîner des températures relativement élevées, de l'ordre des températures de transition vitreuse de la matrice. Maîtriser ces phénomènes et évaluer leur conséquence sur la durabilité des composites est un

passage obligé pour envisager une application des fuselages composites. Pour cela il faut imaginer des protocoles expérimentaux couplant la mécanique et l'électricité, mais les couplages sont tels que la thermique va jouer un rôle très important qu'il est essentiel d'appréhender au plus tôt dans l'étude. C'est ce dernier point qui est abordé dans cet article.

Les effets thermiques induits par le passage de courants continus d'intensité maximale de 8 A dans des éprouvettes composites pour applications aéronautiques et de type CFRP T300/914 $[(0/90)_4]_s$ (dimensions moyennes : 180mm*15mm*1.8mm munies de talons standard en verre/époxy) sont étudiés. Pour pouvoir injecter les courants, les éprouvettes ont été équipées à leurs extrémités d'électrodes métalliques à base cuivre d'épaisseur environ 50 μ m et produits par électrodéposition et suivant trois différents procédés industriels. Les champs de température sont mesurés par thermographie infrarouge et les essais sont simulés numériquement grâce à un modèle multiphysique thermoélectrique couplé simple.

2. Matériaux et moyens expérimentaux

La première difficulté à résoudre est d'ordre expérimentale, il faut concevoir des échantillons sur lesquels des essais mécaniques puissent être réalisés tout en assurant simultanément un flux électrique. Le matériau utilisé pour cette étude est un composite à fibres continues de carbone et matrice époxy de type T300-914 avec un drapage $[(0/90)_4]_s$; les éprouvettes de dimensions moyennes : 180mm x 15mm x 2mm sont équipées avec de talons en composite verre – époxy (Fig. 1). Ces talons ont une double fonction, ils vont permettre d'assurer un transfert correct de la charge mécanique tout en isolant la section effective traversée par le courant des pièces de serrage. Le courant est injecté aux extrémités du matériau composite ; toutefois pour assurer un passage parfait de l'électricité et homogénéiser le flux électrique il faut améliorer la conductivité de ces extrémités.

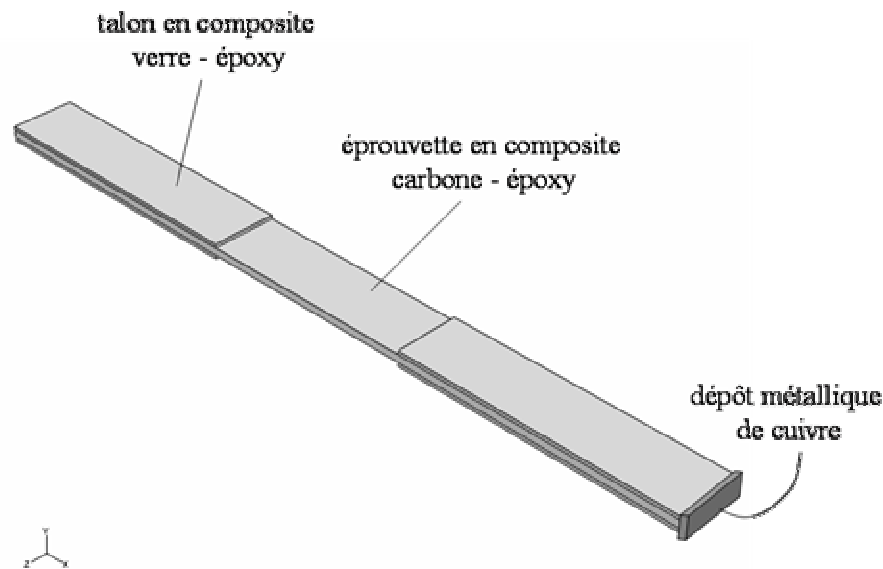


Fig. 1. Géométrie d'une éprouvette.

Pour faire circuler le courant d'un bout à l'autre de l'éprouvette en assurant une parfaite homogénéité dans les couches conductrices la technique du dépôt métallique sur les extrémités a été envisagée. Comme la matrice époxy est isolante et que seules les fibres de carbone conduisent le courant, le dépôt sert à distribuer uniformément le courant à travers les fibres tout en augmentant leur surface de contact avec l'électrode. En vue d'optimiser ce procédé, plusieurs techniques de métallisation, dont trois industrielles, ont été testées. Les techniques industrielles sont : le procédé Prodec, le dépôt électrolytique de cuivre Fréchin et le dépôt chimique dynamique de cuivre JetMetal. Bien que ces trois procédés soient différents, dans les trois cas des dépôts de l'ordre de 50/60 μ m ont été obtenus. Des techniques alternatives plus simples, de type « laboratoire » ont été également testées, en employant respectivement des dépôts de laque d'argent et un film de cuivre adhésif, et leurs performances comparées à celles des dépôts de type industriel.

Les essais ont été réalisés à l'aide d'une alimentation électrique pouvant délivrer un courant continu allant jusqu'à 8 A. Un voltmètre a été également relié aux extrémités des éprouvettes afin de suivre la tension en fonction de l'intensité de courant délivrée. Le montage expérimental spécifiquement conçu pour effectuer les essais est représenté schématiquement sur la Fig. 2 ; dans ce montage, chaque extrémité de l'éprouvette est en contact avec une plaque de cuivre montée sur ressorts, ce qui permet d'appliquer une force de contact élevée et d'assurer le maintien du contact électrique et l'immobilité du système.

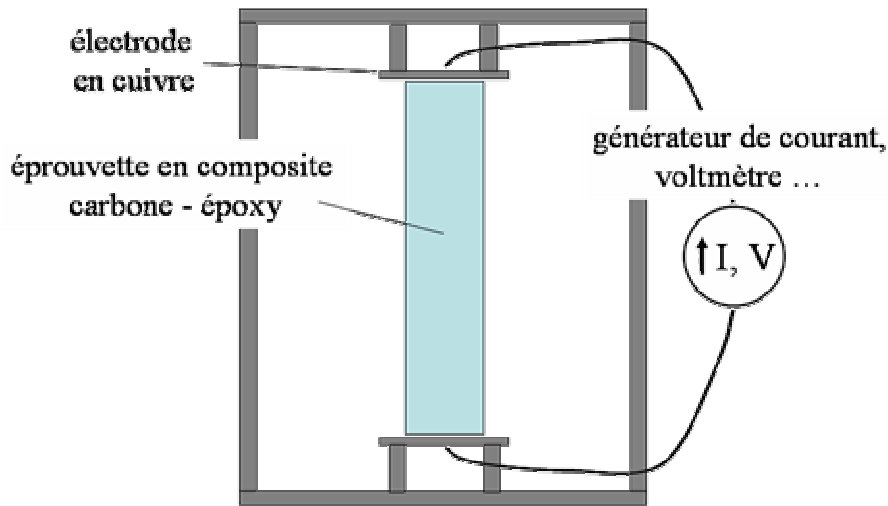


Fig. 2. Schématisation du montage expérimental.

Le suivi de température a été réalisé grâce à une caméra infrarouge CEDIP 420 M permettant d'obtenir la température en tout point de la surface avec une précision de l'ordre de 1°C et une résolution spatiale de 320×256 pixels (chaque pixel ayant une surface de $0,3\text{mm} \times 0,3\text{mm}$, avec le niveau de grossissement adopté). Les surfaces exposées ont été peintes en noir mat pour avoir une émissivité la plus proche de celle du corps noir. Les images enregistrées par la caméra ont été post traitées numériquement à l'aide du logiciel ALTAIR [7] afin d'obtenir explicitement les profils de température en tout point de la surface observée et en fonction du temps. Le protocole expérimental est le suivant : l'intensité de courant est incrémentée de façon discrète (d'un ou de plusieurs A) et soudaine, alors que la température sur la surface de l'éprouvette et la tension à ses bornes sont mesurées en continu.

3. Modélisation du couplage thermoélectrique

Si la distribution de température dans le composite est supposée à tout instant uniforme (équilibre), le bilan d'énergie global peut s'écrire en prenant explicitement en compte les termes d'échange de chaleur de l'éprouvette avec l'environnement par rayonnement et par convection :

$$Ri^2 = \varepsilon \sigma \frac{S_e}{S_p^2} (T^4 - T_0^4) + h \frac{S_e}{S_p^2} (T - T_0) \quad (\text{eq. 1})$$

où R est la résistance globale de l'éprouvette, ε est l'émissivité du corps, σ la constante de Stefan, h le coefficient d'échange convectif, T la température d'équilibre de l'éprouvette et T_0 la température de l'environnement.

L'eq. 1 doit être généralement résolue itérativement, car ε et h sont fonctions de la température, même si la dépendance de ε peut être ignorée pour la plage de valeurs de T considérées dans cette étude. Le paramètre S_e représente la surface d'échange de l'éprouvette, exposée à l'environnement, et S_p est la section de passage, à travers laquelle le courant circule. Enfin, en faisant l'hypothèse que le courant circule exclusivement dans les fibres du composite, la résistance globale de l'éprouvette, R , peut être approchée par la relation suivante :

$$R = \frac{\rho_f L_x}{V_f L_y e_0} \quad (\text{eq. 2})$$

dans laquelle ρ_f et V_f sont respectivement la résistivité et la fraction volumique des fibres, L_x et L_y la longueur et la largeur de l'éprouvette et e_0 l'épaisseur des plis à 0° .

Au niveau local, en accord avec la thermodynamique des processus irréversibles (TIP) [5], le bilan d'énergie pour le composite s'écrit :

$$\rho \frac{du}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + ri^2 - \vec{i} \cdot (\vec{\nabla} \pi)_T - \left(\frac{\pi}{T} - \frac{\partial \pi}{\partial T} \right) \vec{i} \cdot \vec{\nabla} T \quad (\text{eq. 3})$$

avec ρ la densité du composite, u l'énergie interne spécifique (par unité de masse), λ la conductivité thermique, T la température, r la résistivité électrique, \vec{i} le vecteur densité de courant (intensité de courant par unité de surface traversante, i étant son amplitude), π le coefficient de Peltier : dans un composite de type carbone – époxy le coefficient de Peltier peut être négligé, la seule forme de dissipation étant celle liée à l'effet Joule (le terme ri^2 dans l'eq. 3), qui représente aussi le seul terme de couplage thermo - électrique. En exprimant l'énergie interne sous la forme classique $u = c_v T$ (c_v est la capacité thermique du composite), si la densité de courant est connue, l'eq. 3 peut être résolue en T avec les conditions initiales et les conditions aux limites en température ou en flux de chaleur.

Pour résoudre le problème, la loi constitutive reliant le champ électrique \vec{E} à la densité de courant est utilisée (loi d'Ohm) :

$$\vec{E} = r \vec{i} \quad (\text{eq. 4})$$

Dans la section 4 les résultats de calculs numériques thermo – électriques couplés effectués en utilisant le code élément finis ABAQUS seront présentés : ces calculs permettent de simuler les champs de température tridimensionnels induits par le passage de courant dans le composite et d'aller au delà des hypothèses simplificatrices et des prédictions du simple modèle analytique (eq. 1). Le logiciel ABAQUS résout numériquement dans le module thermo – électrique couplé l'eq. 3, sans effet Peltier. Le courant est déterminé en tout point du solide à l'aide de la loi d'Ohm (eq. 4) et à partir du potentiel électrique, ϕ , pour lequel des conditions aux limites opportunes doivent être spécifiées en accord avec l'expérience. Plus de détails peuvent être trouvés dans la référence [6].

4. Résultats et discussion

La Fig. 3 illustre la distribution et l'évolution temporelle de la température dans la partie centrale et à la surface d'une éprouvette composite avec métallisation de type Prodec et pour des différentes valeurs de courant imposé. La température maximale atteinte par l'éprouvette est d'environ 215 °C à 8A.

Le courant est augmenté par des échelons successifs de l'ordre de l'ampère, sur les Figs 3 et 4 on peut observer les évolutions temporelles de température. A chaque saut de courant cette dernière croît tout en tendant vers un régime stationnaire qui va correspondre à un équilibre entre la puissance calorifique apportée par effet Joule et les échanges avec l'extérieur. Dans cette réponse s'expriment simultanément le couplage thermoélectrique et l'effet de l'environnement (entre autre, l'échange convectif) qui est spécifique à l'ambiance de l'expérimentation et qui peut être modifié (en imposant un écoulement d'air par exemple). La température maximale est la grandeur quantifiée de cet équilibre entre les échanges.

Entre les points 1 et 2 de la partie centrale les écarts de température sont très faibles et témoignent de l'homogénéité du champ de température en peau.

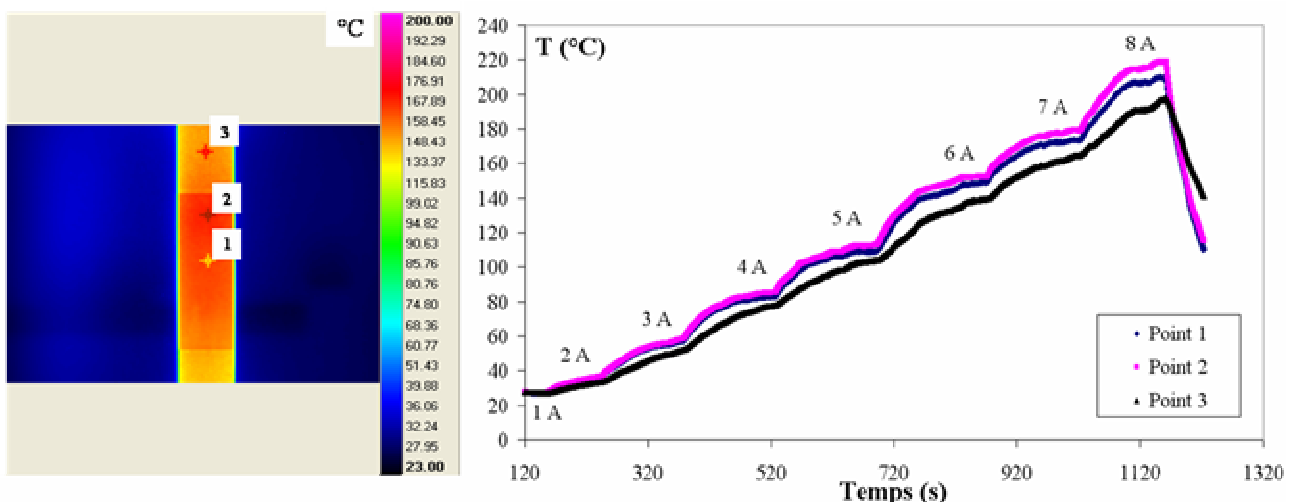


Fig. 3. Distribution ($t \approx 900s$) et évolution temporelle de la température dans la zone centrale d'une éprouvette (métallisation de type Prodec).

La Fig. 4 illustre la distribution et l'évolution temporelle de la température près des contacts pour différentes valeurs de courant imposé toujours pour une éprouvette avec métallisation Prodec. On retrouve une distribution de température assez uniforme dans la partie d'éprouvette en carbone – époxy. En surface des talons en verre – époxy le champ est tout aussi uniforme que dans la partie utile mais à un niveau de

température différente ; la différence maximale de température mesurée entre ces deux zones – point 1 et point 2 - est d'environ 20°C.

Aucun échauffement particulier n'est observé au niveau des dépôts métalliques/électrodes en cuivre, ce qui confirme la bonne conductivité de l'interface dépôt/composite et évite des effets locaux de bords indésirables.

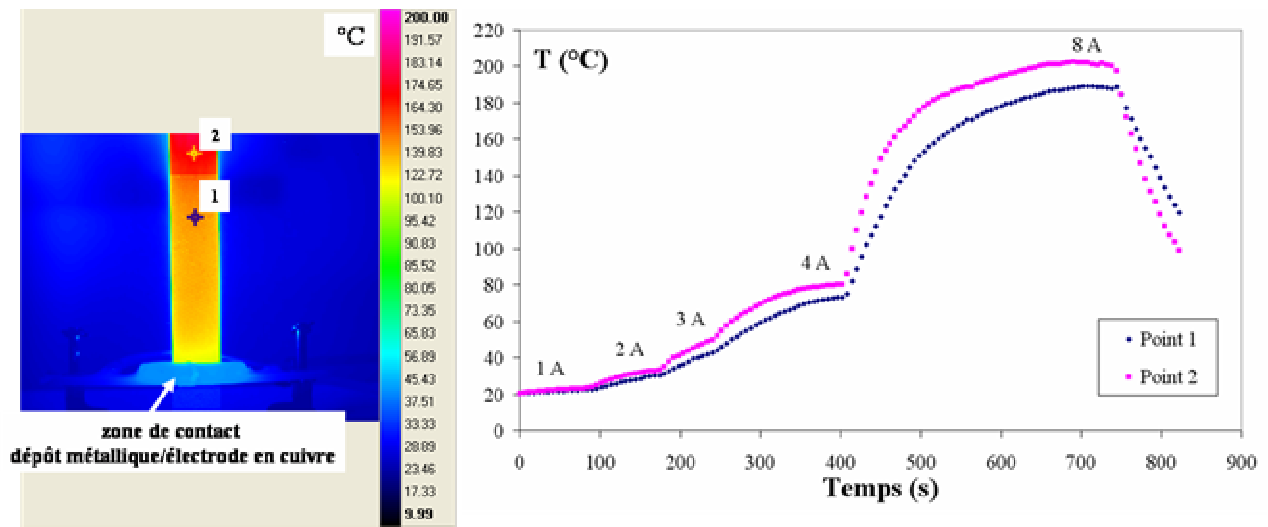


Fig. 4. Distribution ($t \approx 170s$) et évolution temporelle de la température dans la zone de contact (métallisation de type Prodec).

La Fig. 5 montre la tension mesurée aux bornes d'une éprouvette avec métallisation Prodec en fonction du courant délivré. On remarque que, dans la plage de températures étudiée, la loi d'Ohm est bien respectée et que la résistance mesurée par régression linéaire de l'éprouvette est d'environ 0.44 Ω .

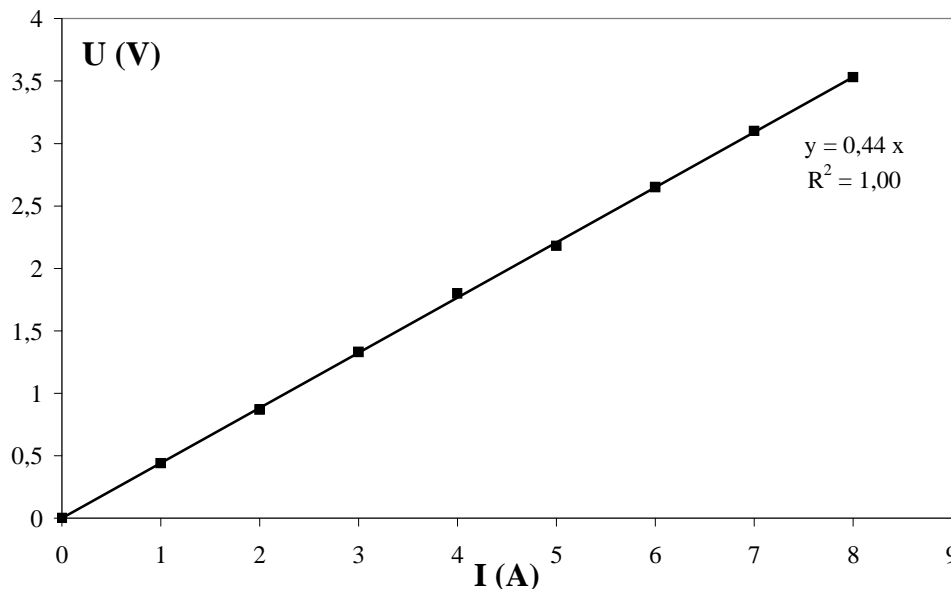


Fig. 5. Tension mesurée en fonction du courant délivré pour une éprouvette avec métallisation de type Prodec.

Le comportement des éprouvettes avec métallisation Fréchin et JetMetal est qualitativement similaire à celui illustré dans les Figs. 3 à 5 pour l'éprouvette avec métallisation Prodec. En revanche, l'éprouvette métallisée avec un dépôt de laque d'argent présente un échauffement plus important près des contacts avec les électrodes en cuivres, du fait d'une résistance de contact très élevée ; de plus, des températures relativement élevées provoquent une détérioration rapide du contact : à 4 A, la laque d'argent s'évapore.

Un autre type d'électrode a été obtenu en collant des bandes de film de cuivre adhésif sur les extrémités de l'éprouvette après les avoir poncées et dégraissées. Pour améliorer l'adhésion de la colle, les éprouvettes ont été exposées à une température de 150°C pendant 30 minutes.

La résistance mesurée de ces d'éprouvettes à été trouvée égale à 40Ω ce qui témoigne de valeurs des résistances de contact excessivement élevées qui brouillent les résultats expérimentaux.

Le Tab. 1 résume les résultats expérimentaux pour tous les cas testés et pour tous les types de métallisation, notamment les températures maximales de surface ainsi que les valeurs de résistance mesurées.

	Prodec	Fréchin	JetMetal	Laque	Cuivre Adhésif
Intensité de courant max. atteinte (A)	8	8	8	4	1
T_{max} (°C)	215	194	190	X	X
R (Ω)	0.44	0.44	0.40	0.95	40
Echauffement au contact	NON	NON	NON	OUI	OUI
Observations performances	Optimale	Optimale	Optimale	Rupture du contact à 4 A	Irréalizable

Tab. 1. Tableau récapitulatif des mesures expérimentales effectuées pour tous les cas testés.

Les éprouvettes avec métallisation JetMetal présentent les valeurs les plus basses de température maximale et de résistance totale. La plage des résistances mesurées se situe entre 0.4 et 0.45 Ω . La valeur théorique de résistance d'une éprouvette obtenue par l'éq. 2 est d'environ 0.37 Ω , valeur proche des résistances mesurées qui elles sont affectées par la résistance des fils et par la résistance de contact au niveau des électrodes en cuivre. Les performances des trois types de métallisation sont assez similaires et très satisfaisantes ; en résumé les trois procédés industriels sont bien adaptés pour pouvoir faire circuler des courants de forte intensité dans des matériaux composites tout en assurant l'homogénéité du flux électrique sans induire une forte résistance de contact qui aurait pu perturber la mesure de température et l'identification de la résistance totale de l'éprouvette.

La Fig. 6 montre la comparaison entre les températures maximales mesurées à l'état stabilisé et celles prédites par le modèle analytique simple (eq. 1) en fonction de la densité de courant pour une éprouvette avec métallisation Prodec. Ce calcul a été effectué avec $R = 0.37 \Omega$, $\varepsilon = 0.99$ et une valeur moyennée du coefficient de convection avec l'air ambiant h égale à $8 \text{ W/m}^2\text{C}$. La comparaison entre prédictions et mesures s'avère tout à fait satisfaisante.

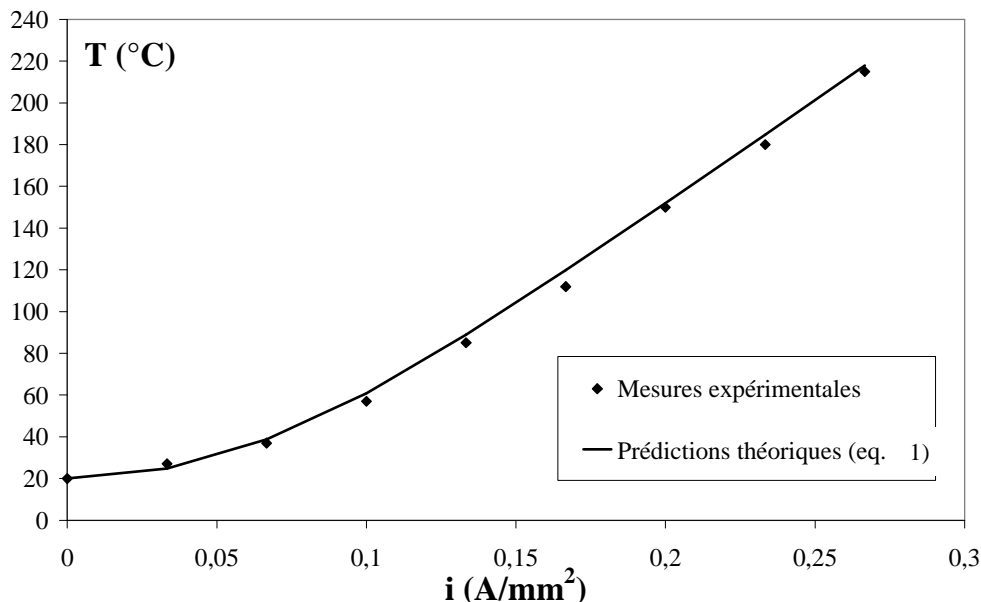


Fig. 6. Comparaison entre les températures mesurées et prédites par le modèle analytique (eq. 1) en fonction de la densité de courant pour une éprouvette avec métallisation Prodec.

Des calculs numériques thermo électriques couplés ont été effectués en utilisant le logiciel commercial ABAQUS, sur les deux configurations d'éprouvettes illustrées dans la figure 7.

Dans les deux cas, les électrodes en cuivre n'ont pas été détaillées, leur influence étant négligée ; le courant a été supposé circuler dans les seules couches à 0° et a été imposé à travers une différence de potentiel appropriée entre les extrémités.

Les propriétés du matériau sont les mêmes que celles utilisées pour les simulations du simple modèle analytique (eq.1).

La Fig. 8 présente les températures (à l'équilibre) calculées pour les deux configurations pour un courant total de 8 A circulant dans le matériau composite.

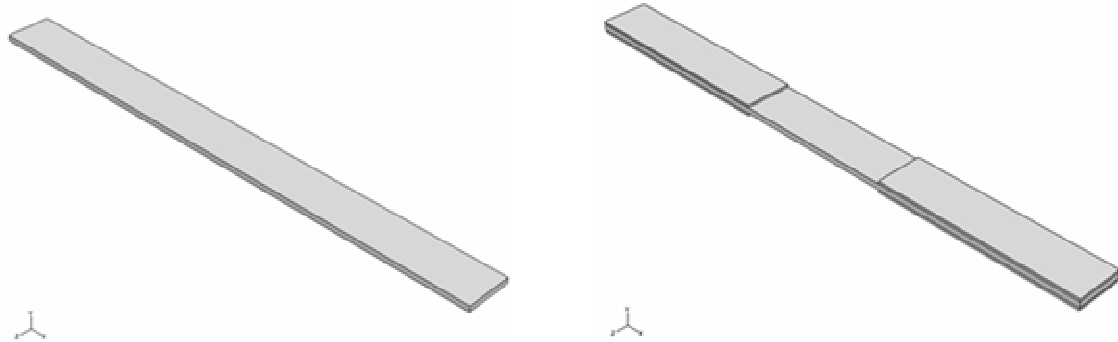


Fig. 7. Géométrie des éprouvettes utilisée pour le calcul numérique ABAQUS.
(Configuration A (gauche) : éprouvette sans talon,
Configuration B (droite): éprouvette avec talons de verre).

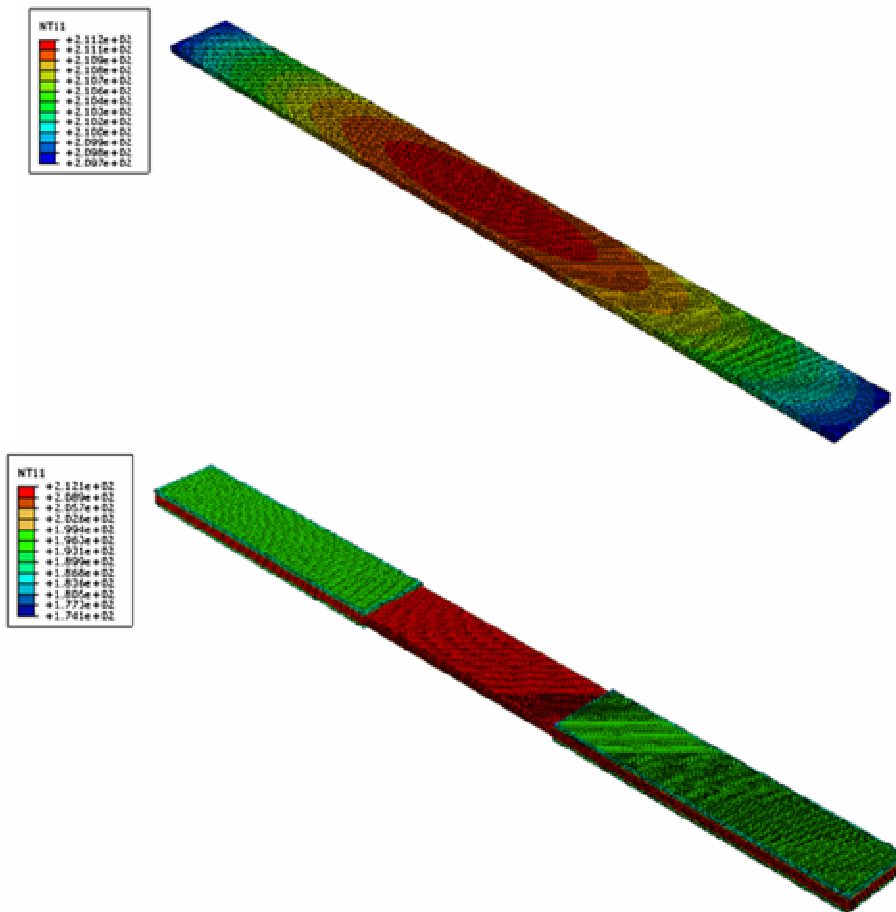


Fig. 8. Champ de température (à l'équilibre) calculé pour les deux configurations
(courant total circulant dans le matériau composite : 8A).

Un très bon accord est trouvé entre les températures simulées et celles mesurées par thermographie infrarouge. En particulier, on remarque que la distribution de température à l'intérieur de l'éprouvette est assez homogène, sauf en correspondance avec les talons en verre/époxy ; en fait, ces talons sont caractérisés par des valeurs très petites des coefficients de conductibilité thermique et électrique et, surtout, ne contribuent pas à l'échauffement de l'éprouvette par effet Joule.

De plus, les valeurs moyennes de la solution numérique sont les mêmes que celles calculées par le modèle analytique, éq. 1.

5. Conclusions

Dans cet article les effets thermiques induits par le passage de courants continus dans des matériaux composites de type carbone-époxy pour applications aéronautiques ont été étudiés. Les champs de température mesurés par thermographie infrarouge ont été comparés aux prédictions de modèles analytiques et numériques thermo-électro-mécaniques couplés, avec un bon accord qualitatif et quantitatif.

En particulier, il est montré que, pour un courant de 8A, la température maximale mesurée au centre de l'éprouvette est d'environ 200°C. La résistance totale mesurée (incluant l'éprouvette, les contacts et les fils électriques) est de l'ordre de 0.4-0.45 Ω pour tous les courants testés et dans toute la gamme de températures ; la résistance de contact est petite et ne produit pas d'échauffement localisé aux électrodes.

Les champs de température observés expérimentalement ont été reproduits en utilisant des modèles multiphysiques thermoélectriques couplés et par des simulations numériques réalisées en utilisant le code de calcul commercial ABAQUS. Ces modèles ont pu expliquer l'hétérogénéité des champs de température induite par la présence des talons verre/époxy : ces talons sont caractérisés par des valeurs très petites des coefficients de conductibilité thermique et électrique et, surtout, ne contribuent pas à l'échauffement de l'éprouvette par effet Joule.

En particulier, il est montré que, pour un courant de 8A, la température maximale mesurée au centre de l'éprouvette est d'environ 200°C. La résistance totale mesurée (incluant l'éprouvette, les contacts et les fils électriques) est de l'ordre de 0.4-0.45 Ω pour tous les courants testés et dans toute la gamme de températures ; la résistance de contact est petite et ne produit pas d'échauffement localisé aux électrodes.

Les champs de température observés expérimentalement ont été reproduits en utilisant des modèles multiphysiques thermoélectriques couplés et par des simulations numériques réalisées en utilisant le code de calcul commercial ABAQUS. En particulier ces modèles ont pu expliquer l'hétérogénéité des champs de température induite par la présence des talons verre/époxy : ces talons sont caractérisés par des valeurs très petites des coefficients de conductibilité thermique et électrique et, surtout, ne contribuent pas à l'échauffement de l'éprouvette par effet Joule.

Remerciements

La présente recherche a été menée dans le cadre du programme VICOMTHE, financé par la FNRAE. Nous tenons à remercier les partenaires de cette recherche, AIRBUS Toulouse, LIM ENSAM Paris et LGMT-UPS Toulouse.

Références

- [1] K. Schulte, C. Baron, « Load and Failure Analysis of CFRP Laminates by Means of Electrical Resistivity Measurements ». *Composites Science and Technology*, Vol. 36, pp. 63-76, 1989.
- [2] J.C. Abry, S. Bochart, A. Chateauminois, M. Salvia, G. Giraud, « In-situ Detection of Damage in CFRP Laminates by Electrical Resistance Measurements ». *Composites Science and Technology*, Vol. 59, pp. 925-935, 1999.
- [3] J.B. Park, T. Okabe, N. Takeda, W.A. Curtin, « Electromechanical Modeling of Unidirectional CFRP Composites Under Tensile Loading Condition ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 33, pp. 267-275, 2002.
- [4] O.I. Zhupanska, R.L. Sierakowski, « Effects of an Electromagnetic Field on the Mechanical Response of Composites ». *Journal of Composite Materials*, Vol. 41, pp. 633-651, 2007.
- [5] Kondepoudi, D. and Prigogine, I., « Modern Thermodynamics: from Heat Engines to Dissipative Structures ». Wiley, New York, 1998.
- [6] ABAQUS 6.7 Users Manual.
- [7] ALTAIR CEDIP User Manual.