

Optimisation des sources internes de chaleur dans un composite actif

M. HASSON^a, K. BUET GAUTIER^a, G. L'HOSTIS^a, B. DURAND^a

a. Laboratoire Physique et Mécanique Textiles (LPMT) / EAC 4365, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace (ENSISA), 11 rue Alfred Werner, 68093 Mulhouse cedex

Résumé :

En utilisant l'effet Joule comme source interne de chaleur dans un composite, on est confronté à deux difficultés majeures : l'homogénéité de la température et des surchauffes liées aux résistances d'interfaces. Dans cette étude, ces aspects thermiques sont abordés pour un matériau composite thermiquement activé. Les sources internes de chaleur utilisées sont des fils de carbone qui sont aussi des renforts mécaniques de la structure. Différents câblages électriques sont comparés et il s'avère que ce paramètre est peu influent. Par la suite, différentes densités d'éléments chauffants sont étudiées. On montre alors qu'il est possible d'homogénéiser la température dans le composite tout en limitant les problèmes de surchauffes locales.

Abstract :

By using the Joule effect as an internal source of heating in a composite, two major problems rise : the homogeneity of the temperature and some local over heating linked to interface resistances. Here, a thermal activated composite material is studied through those thermal aspects. Carbon yarns are used as internal sources of heating used . They are also natural composite reinforcements. Various electrical wirings are compared; the conclusion is that it is a parameter of little influence. Then, various densities of heating elements are studied. It is pointed out that it is possible both to tend to homogenise the temperature in the composite and to limit the local over heating.

Mots clefs : Matériaux composites, Activation thermique, Effet Joule, Homogénéisation de la température

1 Introduction

L'effet Joule est régulièrement utilisé tant industriellement que dans des applications domestiques pour élever la température d'un système, d'une pièce. C'est également un mode classique d'activation de matériaux dits « intelligents » [1,2]. Cependant, lorsque l'on utilise des sources de chaleur discrètes telles que des fils conducteurs de l'électricité (métalliques ou autres) se pose alors la question de l'anisotropie de la conduction thermique dans le composite, de la transmission de la chaleur entre fibre et matrice et donc plus généralement de l'homogénéité de la température dans la structure [3-5]. Dans les composites, les fibres de carbone sont des éléments constitutifs naturels. Ce sont, par ailleurs, de bons conducteurs de l'électricité qui peuvent ainsi jouer le rôle de résistances chauffantes. Les matrices polymères sont, quant à elles, des isolants électriques et thermiques, aussi, aux interface fibres/matrice, on assiste à des accumulations de chaleur qui génèrent des surchauffes localisées et engendrent des dégradations de la structure. Dans ce travail, nous nous intéresserons aux éléments chauffants d'un matériau composite thermiquement activé, à leur répartition spatiale dans l'élément à chauffer et aux divers paramètres électriques (nature du branchement électrique, intensité du courant, puissance fournie). Dans un premier temps, nous décrirons rapidement le fonctionnement de la structure puis les essais mis en œuvre pour la caractériser. Enfin, les principaux résultats seront présentés afin d'établir des tendances visant à optimiser les sources internes de chaleur dans

ce composite actif.

2 Principe de fonctionnement du M3C

Le M3C (Matériau Composite à Comportement Contrôlé) est un matériau thermiquement actif [1]. Son principe de fonctionnement est relativement simple. Dans une plaque composite stratifiée ne possédant pas de symétrie miroir par rapport à son plan moyen, les effets de membrane (dans le plan de la plaque) et de flexion/torsion sont couplés. Ainsi, en choisissant des plis à coefficients de dilatation thermique linéique différents et en faisant varier la température de la plaque on peut provoquer une flexion de celle-ci (FIG.1) : il s'agit d'un effet « bilame ». Le M3C est donc un composite asymétrique avec sources internes de chaleur. Ce sont des fils de carbone qui jouent ce rôle de source de chaleur. Reliés à un générateur de tension, ils sont parcourus par un courant électrique ce qui, par effet Joule, échauffe l'ensemble de la structure et en provoque la flexion.

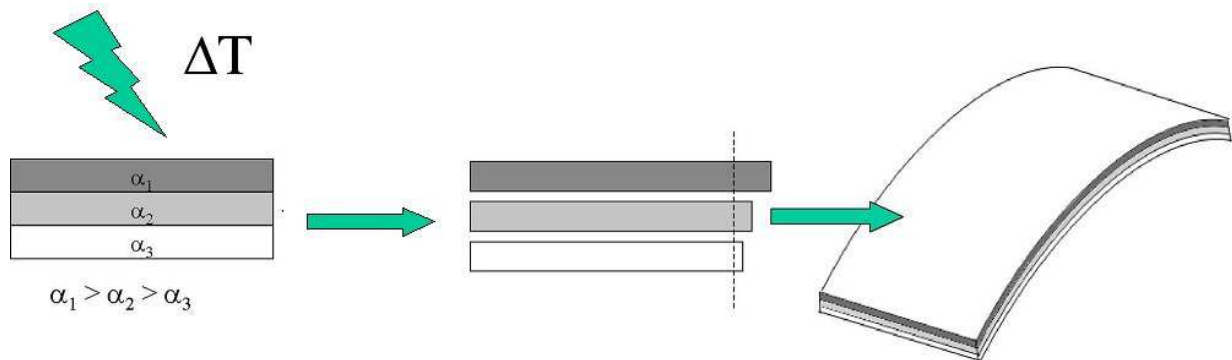


FIG. 1 – Principe de fonctionnement du M3C.

Des études antérieures ont montré les possibilités de ce composite actif en terme de puissance mécanique développée mais aussi en terme de débouchés industriels [6]. Cependant, ces premiers essais ont également mis en évidence l'importance de la couche dite active (les fils de carbones reliés au générateur) et de son organisation dans la structure. En particulier, le temps de réponse de la plaque et l'homogénéité de la chaleur sur cette plaque sont particulièrement impactés par la disposition des fils actifs de carbone dans le composite. L'objectif de la présente étude est donc d'optimiser la répartition spéciale des fils de carbone dans la plaque, le plan dans lequel se situe cette couche active étant fixée. On n'étudiera pas ici l'influence de la position de ce plan, cela ayant fait l'objet d'une étude antérieure [7].

3 Matériaux et essais

Deux séries de plaques ont été fabriquées. Chaque plaque mesure 395mmx125mmx2mm. Il s'agit de composites stratifiés avec renforts tissés et unidirectionnels. L'empilement asymétrique utilisé pour toutes les plaques est le suivant : $[T_K/T_A/90_2/T_{V2}]$ où T_K désigne un tissu d'aramide, T_V un tissu de verre, et T_A est la couche dite active. L'unidirectionnel est désigné d'après l'orientation du renfort (90°) par rapport à la plus grande dimension de la plaque. Les renforts tissés sont quant à eux alignés avec les bords de la plaque. La couche active est réalisée de deux manières différentes : dans la première série de plaques appelées P8, P12 et P16, la couche active est constituée de 8, 12 ou 16 fils de carbone équidistants et cousus sur un tissu d'aramide, parallèlement à la longueur de la plaque. Pour une plaque donnée, les fils de carbone sont tous reliés électriquement au générateur de tension via un branchement en parallèle, en série ou mixte, au choix du manipulateur. Dans la seconde série de plaques, la couche active est un tissu hybride carbone/aramide pour lequel seuls quelques uns des fils de carbone seront reliés au générateur de tension : 7 (resp. 9 et 13) fils dans la plaque P7 (resp. P9 et P13). Pour éviter les courts-circuits, les fils de carbone perpendiculaires aux fils connectés ont été détissés et supprimés de la surface textile.

La première série de plaques permet de faire varier la nature du câblage de la couche active. La seconde série permet de faire varier la densité de fils chauffants par unité de largeur de plaque.

Les différentes couches textiles sont empilées dans le moule puis une résine époxy (Epolam 2025 de chez Axson, température de transition vitreuse : 120°C) est coulée dessus. Le moule est fermé. L'ensemble est mis sous presse puis les plaques sont étuvées selon le cycle de cuisson préconisé par le fournisseur de la résine.

L'essai de référence choisi pour caractériser et comparer les plaques est un essai de flexion libre : la plaque est simplement posée sur deux appuis et alimentée en tension. Un capteur LVDT permet de mesurer la flèche (d en mm) au centre de la plaque, et des thermocouples relèvent les élévations de températures à l'aplomb d'un fil chauffant (T_{fib}) et entre deux fils de carbone (T_{mat}). Le paramètre choisi pour piloter l'alimentation électrique est l'intensité du courant fournie par fil connecté. On pratique successivement 5 cycles de chauffe et refroidissement libre.

On trace l'évolution de la flèche de la plaque ainsi que des élévations de température par rapport à la température ambiante en fonction du temps. On appelle déplacement libre la valeur du déplacement à stabilisation du système. La plaque réagissant comme un système du premier ordre, on peut lui associer une constante de temps $\tau_{63\%}$ [8], définie comme le temps nécessaire pour atteindre 63% du déplacement libre.

4 Nature du branchement électrique

Dans cette partie, on étudie la première série de plaques, construites de telle sorte que plusieurs branchements électriques soient possibles : on peut aussi bien associer tous les fils de carbone en parallèle qu'en série ou bien faire des branchements mixtes série/parallèle. On appelle L_0 la longueur d'un fil de carbone et R_0 sa résistance ($L_0=395\text{mm}$ et $R_0=30\Omega$). Sur la plaque P8 (8 fils de carbone), on peut ainsi tester les 8 fils en parallèles ou les 8 fils en série (un fil actif de longueur $8L_0$), ou encore 2 fils de longueur $4L_0$ ou 2 fils de longueur $4L_0$ en parallèle. Si on appelle n le nombre de fils connectés en parallèle, de longueur $8L_0/n$, alors la plaque a une résistance totale de :

$$R_{\text{tot}} = \frac{8R_0}{n^2} \quad (1)$$

L'intensité totale fournie à la plaque étant $I_{\text{tot}} = nI_0$, avec I_0 l'intensité par fil alors on montre que pour chaque type de branchement à intensité par fil de carbone donnée la puissance électrique totale fournie à la plaque est la même :

$$P_{\text{tot}} = R_{\text{tot}} \cdot I_{\text{tot}}^2 = 8R_0 \cdot I_0^2 \quad (2)$$

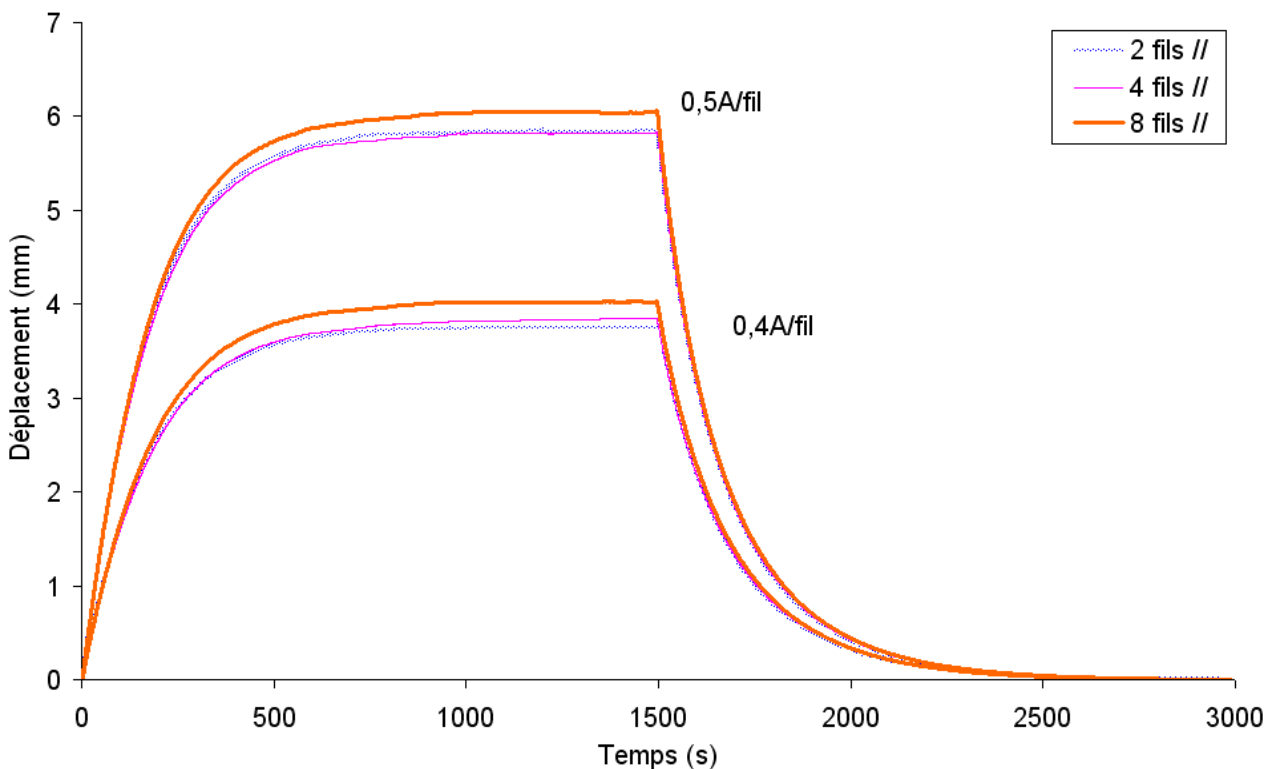


FIG. 2 – Comparaison de différents branchements.

Sur la figure 2, sont comparées les courbes réponses en déplacement de la plaque P8 pour trois branchements

différents et deux niveaux d'intensité par fil (0,4 et 0,5A/fil). Il s'agit de courbes moyennes sur les 5 cycles de chauffe/refroidissement. On peut noter sur cette figure, que la nature du branchement n'est pas un paramètre influent et que seule l'intensité par fibre est à même de modifier la réponse de la plaque. En effet, l'écart maximal enregistré pour une même intensité par fil mais des branchements différents est de 5%, alors que pour des branchements identiques mais des intensités par fil différentes on a autour de 35% d'écart sur le déplacement libre. On obtient des résultats identiques en température (aussi bien sur T_{fib} que sur T_{mat}) et ce sur les trois plaques. On décide ainsi pour la suite de l'étude de n'utiliser que des fils branchés en parallèle et d'étudier alors l'influence de la densité de fils de carbone chauffants par unité de largeur de plaque.

5 Densité de sources de chaleur

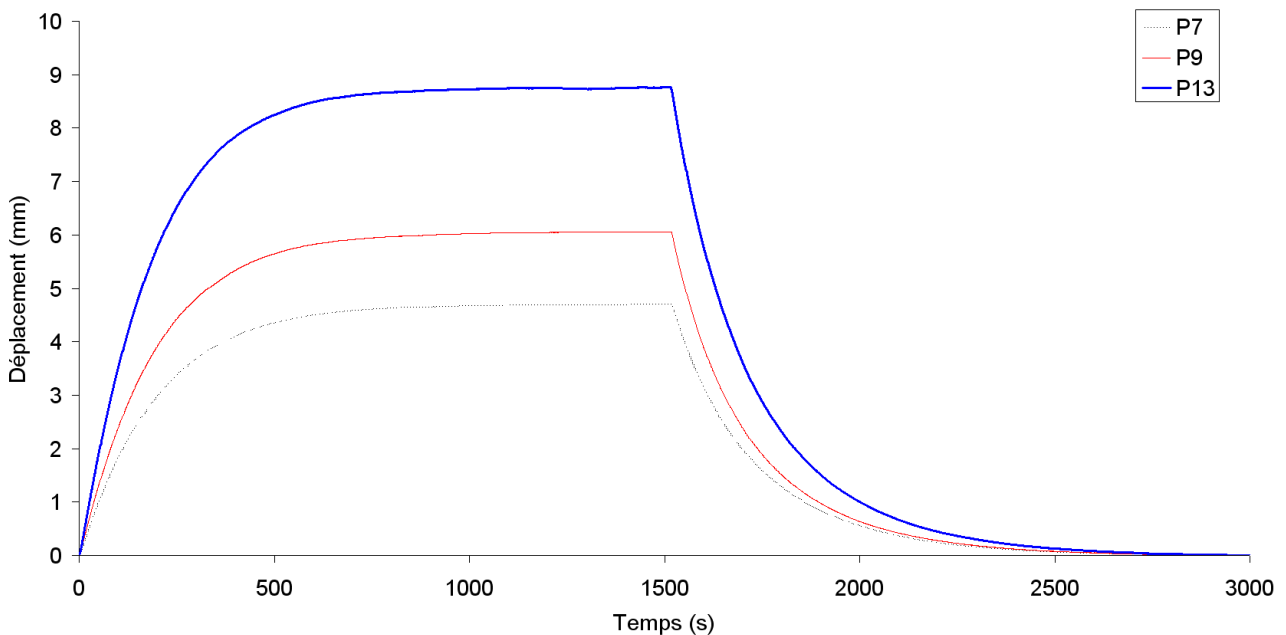


FIG. 3 – Comparaison entre plaques alimentées avec la même intensité par fil.

L'utilisation d'un tissu plutôt que des fils cousus sur un tissu garantit l'équidistance entre les fils chauffants. La résistance R_0 de chaque fil est d'environ 65Ω . Le même tissu étant utilisé pour les trois plaques de la deuxième série, la rigidité mécanique des plaques est la même : les réponses thermiques et mécaniques pourront donc être comparées entre les plaques. Les plaques P7, P9 et P13 ont exactement la même constitution ; la différence réside dans le nombre de fils connectés au générateur (7, 9 ou 13). La figure 3 montre la réponse en déplacement comparée sur les trois plaques alimentées avec la même intensité par fil. Pour une intensité par fil fixée, la densité linéique de fils chauffants augmentant, l'intensité et la puissance électrique totales fournies à la plaque augmentent. Il en résulte une augmentation du déplacement libre et des températures associées ainsi qu'une légère diminution de la constante de temps : la plaque se déforme d'avantage et plus rapidement. De plus, la température est plus homogène ce qui se traduit par un écart entre T_{fib} et T_{mat} à stabilisation plus faible quand la densité linéique de fils chauffants augmente. Le tableau 1 récapitule les valeurs associées à ces essais.

	Déplacement (mm)	Variation / P7 (%)	$\tau_{63\%}$ (s)	Variation / P7 (%)	$(T_{\text{fib}}-T_{\text{mat}})$ (°C)
P7	4,7	-	199	-	10,2
P9	6,1	+ 29	192	- 3,5	4,3
P13	8,8	+ 86	187	- 6,0	4

TAB. 1 – Résultats à stabilisation pour une intensité par fil fixée (0,3A/fil).

La figure 4 montre la réponse en déplacement comparée pour les trois plaques, lorsque la puissance totale fournie est la même.

La réponse est sensiblement la même pour les trois plaques en terme de déplacement et de température à l'aplomb des fils chauffants mais là encore l'augmentation de la densité linéique de fils chauffants favorise l'homogénéisation de la température. Cependant, la constante de temps a tendance à légèrement augmenter. Les valeurs pour ces essais sont récapitulées dans le tableau 2.

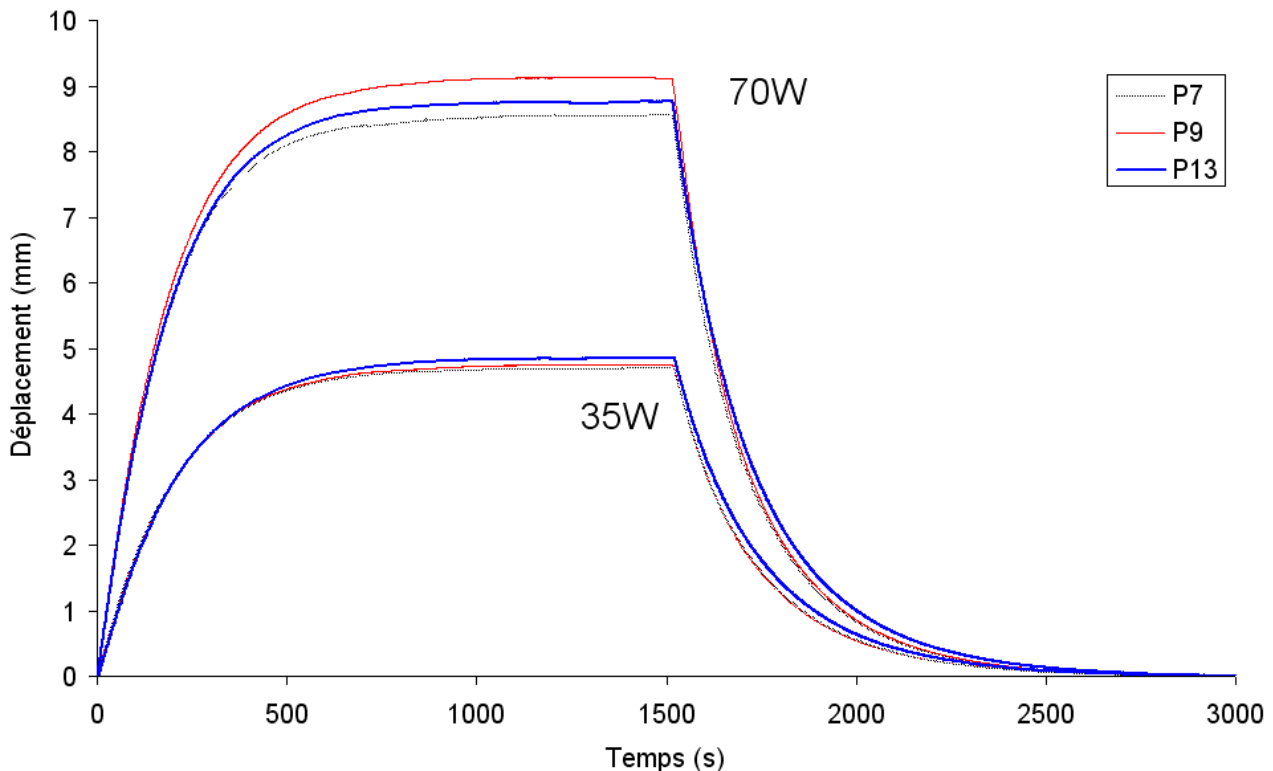


FIG. 4 – Comparaison entre plaques alimentées avec la puissance électrique totale.

	Déplacement (mm)	Variation / P7 (%)	$\tau_{63\%}$ (s)	Variation / P7 (%)	$(T_{\text{fib}}-T_{\text{mat}})$ (°C)
P7	8,6	-	179	-	19,4
P9	9,1	+ 6,6	185	+ 3,4	7,5
P13	8,8	+ 2,4	187	+ 4,5	4

TAB. 2 – Résultats à stabilisation pour une puissance fixée (70W).

6 Conclusion

Cette étude d'optimisation a mis en évidence que la nature du câblage utilisé pour relier les fils chauffants de carbone au générateur de tension n'est pas un paramètre influent. Seules la quantité de courant circulant dans les fils de carbone et la puissance électrique fournie au système complet sont des données importantes pour la gestion du comportement thermomécanique de ce composite actif. Deux problèmes avaient été soulevés en préambule à cette étude : l'homogénéisation de la température de la structure et les surchauffes locales aux interfaces. Ce dernier point est crucial. En effet, on a vu que des dégradations importantes du matériau pouvaient survenir à la suite d'accumulation de chaleur aux interfaces fibres/matrice. Ces surchauffes et dégradations sont d'autant plus importantes que l'intensité du courant circulant dans chaque fil de carbone est élevée. A la suite de cette étude, on préconise de multiplier les sources de chaleur dans la structure, afin de limiter l'intensité par fil chauffant et d'homogénéiser la température. On a vu, en effet, que la réponse thermomécanique du composite actif était moins influencée par la densité de fils chauffants que par la puissance électrique totale fournie, tant en terme de déplacement libre que de constante de temps du système. D'autres pistes sont envisagées pour favoriser l'homogénéisation de la température et limiter les effets de surchauffes locales : on peut par exemple utiliser une résine chargée en particules de carbone, de densité suffisante pour améliorer la conductivité thermique de la matrice sans provoquer de circulation de courants

parasites. Des tissus de carbone, non directement en contact avec la couche chauffante, peuvent également être utilisés favorablement pour répartir la chaleur sur la pièce composite. Ces diverses solutions sont envisagées pour le Matériau Composite à Comportement Contrôlé et seront testées dans des études à venir .

Références

- [1] C. Maupoint, G. L'hostis, H. Drobez, F. Laurent, B. Durand, G. Meyer, M3C, matériau composite à comportement contrôlé, *Techniques de l'Ingénieur*, R82, 2007
- [2] G. Trakakis, C. Galiotis, Development and testing of a self-deformed composite material, *Composite Structures*, 92, 306–311, 2010
- [3] I.E. Esparragoza, A.H. Aziz, A.S. Damle , Temperature distribution along a fiber embedded in a matrix under steady state conditions, *Composites : Part B*, 34, 429-436, 2003
- [4] A. Fosbury, S. Wang, Y.F. Pin, D.D.L. Chung, The interlaminar interface of a carbon fiber polymer-matrix composite as a resistance heating element, *Composites : Part A*, 34, 933-940, 2003
- [5] I.V. Singh, M. Tanaka, M. Endo, Effect of interface on the thermal conductivity of carbon nanotube composites, *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 842–847, 2007
- [6] H. Drobez, G. L'Hostis, K. Buet Gautier, F. Laurent, B. Durand, A new active composite, *Journal of Smart Material and Structures*, 18, 025020, 2009
- [7] H. Drobez, G. L'Hostis, K. Buet Gautier, F. Laurent, B. Durand, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20, 1541-1552, 2009
- [8] K. Buet Gautier, G. L'Hostis, F. Laurent, B. Durand, *Composites Science and Technology*, 69, 2633-2639, 2009