

# Commande linéarisée et mesure intégrée de la température dans un composite actif

A.Collaine<sup>a</sup>, J-M.Freyburger<sup>a</sup>, B.Durand<sup>a</sup>

a. Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, 11 rue A.Werner, 68093 MULHOUSE Cedex (France)

## Résumé :

*Les travaux présentés dans cette publication concernent le développement du contrôle du composite intelligent M3C (composite qui se déforme grâce à une variation de température obtenue par effet joule via des fibres de carbone intégrées). Nous présentons plus particulièrement la linéarisation de la commande et la mesure de température. La linéarisation est obtenue par une alimentation en tension modulée en largeur d'impulsion. La mesure de température découle de la mesure de variation de résistance électrique du composite (loi de Matthiessen).*

## Abstract :

*The work presented in this publication achieve of the control of the smart composite CBCM (Controlled Behavior of Composite Material). We specifically present the command linearization and temperature measurement. Linearization is obtained by a pulse width modulation voltage supply. Measurement of temperature arises from the measurement of the plate resistance variation (Matthiessen Act).*

**Mots clefs :** composite, commande, PWM, mesure, température.

## 1 Contexte et objectifs

Depuis quelques années, le LPMT travaille en collaboration avec le CETIM CERMAT au développement de structures actives. Les premiers travaux ont donné lieu à la conception d'un nouveau composite breveté : le M3C (Matériau Composite à Comportement Contrôlé). Comme tous les matériaux actifs, le M3C est activé via sa structure : ainsi l'empilement des renforts du composite permet la déformation de celui-ci par effet joule via la mise en place d'un gradient de température ou de coefficients de dilatation. Ses points forts par rapport aux autres matériaux actifs résident dans le fait que sa déformation est continue et qu'il n'est pas limité par la rigidité de la structure [1][2].

A ce jour, différentes applications ont été mises en œuvre : frette, volet aérodynamique, aile active [1][2]. La frette et l'aile active utilisent des petites plaques de M3C qui intégrées au produit assurent la déformation de celui-ci (parches pour la frette, pièces de structure pour l'aile). Le volet aérodynamique est entièrement réalisé en M3C. Dans ces applications, les performances obtenues (valeur de déformation, rapidité ...) sont fonction de la constitution du matériau composite actif et de la consigne de tension appliquée. Ceci confère à ces applications des limites.

Apparaît alors la nécessité de rendre le matériau « intelligent », c'est-à-dire garantir que sa réponse soit conforme à la demande en produisant une déformation égale à la déformation attendue et ce en un minimum de temps. Ce besoin impose la mise en place d'un asservissement qui rende le composite le moins sensible possible aux perturbations extérieures (par exemple variations de température ambiante, opposition à une déformation perturbatrice ...) tout en lui conférant une commande optimale.

Dans le cadre des travaux sur la régulation, nous étudions la déformation en flexion d'une plaque de M3C posée en appui libre en ses extrémités, commandée par un échelon de tension. Le paramètre de déformation enregistré par le montage expérimental est la flèche de la plaque, mesurée en son milieu. Cet enregistrement est fait via un capteur de déplacement LVDT. De plus, nous enregistrons la température du matériau en différents points de la surface supérieure de la plaque via des thermocouples. Ceci afin de garantir de ne pas

dépasser des températures qui risqueraient de détériorer la plaque. La consigne de tension est envoyée par une alimentation pilotée par un système d'entrées / sorties NI sous Labview (voir figure 1).

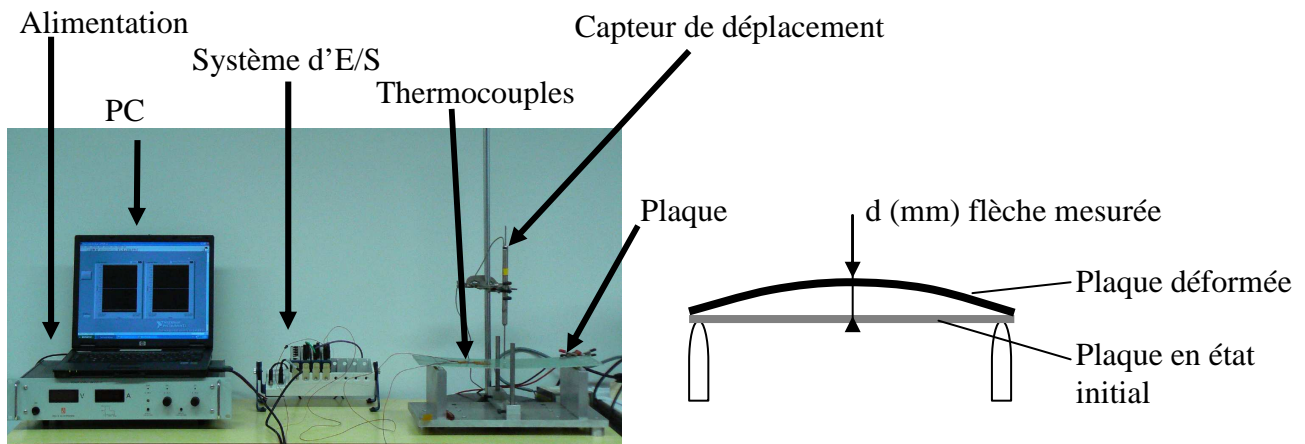


FIG. 1 – Montage expérimental et principe de la mesure de déplacement.

Des travaux relatifs à l'identification d'une plaque composite ont montré que le comportement du M3C peut être apparenté à un système du premier ordre présentant différentes non-linéarités [3] :

- les constantes de temps à la montée et à la descente sont différentes ;
- des retards sont observés sur les mesures de température et celle de déplacement. La valeur du retard est différente pour chacune des mesures ;
- le déplacement obtenu est quasi proportionnel à la puissance de commande elle-même proportionnelle au carré de la tension de commande ;
- le système est chauffant mais non refroidissant : il est possible d'agir sur la montée en température mais pas sur la descente.

Compte tenu des non linéarités observées, la mise en œuvre de l'asservissement ne peut se résumer à la simple application d'une boucle de régulation et d'une correction PID. De plus, le montage expérimental actuel est un montage de recherche qui ne peut être reproduit à l'identique dans une application. En effet, le matériel est coûteux (alimentation variable, capteur de déplacement), il est encombrant (capteurs externalisés). De plus, les mesures de températures ne sont pas fiables puisqu'elles sont réalisées à la surface de la plaque.

En conséquence de ces observations, les travaux actuels sont menés dans deux directions connexes. La première a pour objectif de rendre au maximum le système linéaire pour pouvoir utiliser les outils de régulation les plus simples et les moins coûteux possibles. La seconde a pour objectif d'intégrer au maximum le montage notamment en internalisant la fonction capteur aussi bien pour le déplacement que pour la température. Cet aspect pourra d'ailleurs à plus long terme permettre d'intégrer de nouvelles fonctionnalités à la plaque relatives au suivi de santé du matériau (health monitoring), son auto-préservation (self healing) ou encore son auto-réparation (self repair).

Dans cette communication, nous présentons deux résultats allant dans le sens des deux objectifs précédemment cités. Le premier est la mise en place d'une commande linéarisée. Le second est l'utilisation de la variation de résistance électrique de la plaque composite pour la mesure de température.

## 2 Linéarisation de la commande

### 2.1 Principe

Partant du constat que le déplacement, conséquence de l'élévation de température obtenue par effet joule, est quasi proportionnel à la puissance de commande [3], nous avons essayé de mettre en œuvre une commande en puissance. Ceci peut être simplement fait en alimentant la plaque par un signal modulé en largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation ou PWM).

Le principe est le suivant : la tension d'alimentation continue en entrée de la plaque est remplacée par un signal rectangulaire périodique d'amplitude  $E$  donnée, de période  $T$  fixée et à largeur d'impulsion variable. La donnée de commande devient alors le rapport cyclique  $\alpha$  défini comme le rapport entre le temps pendant lequel le signal est haut  $T_{ON}$  et la période du signal  $T$ . Ainsi  $\alpha = \frac{T_{ON}}{T}$ . La puissance électrique du signal est alors égale à  $\alpha \cdot \frac{E^2}{R}$ . Le rapport cyclique est lui-même généré par une consigne de tension.

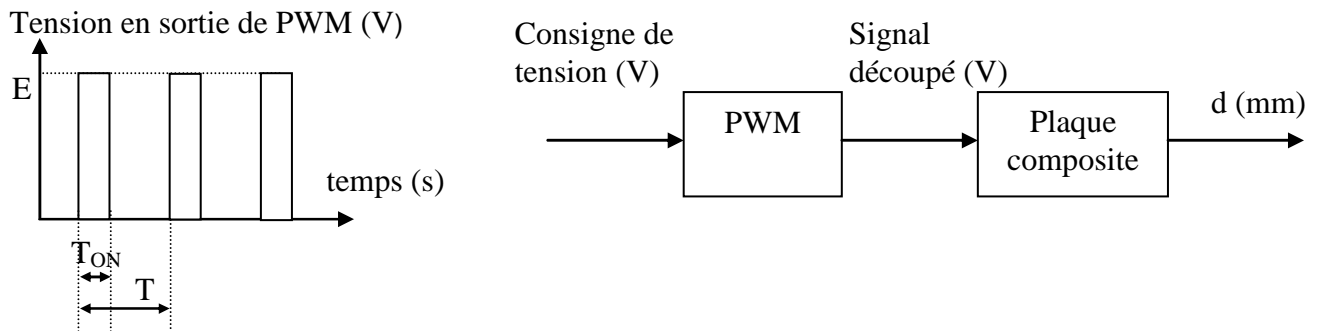


FIG. 2 – Signal PWM et schéma de principe de la commande

## 2.2 Mise en œuvre

### 2.2.1 Réalisation de la PWM

Plusieurs solutions s'offraient à nous pour la réalisation de l'alimentation par PWM. Une première solution logicielle présentait des aléas de fonctionnement (problèmes de gestion temps réel du logiciel). Nous avons en conséquence opté pour une réalisation matérielle.

La PWM est réalisée par un boîtier externe utilisant une alimentation fixe, un microcontrôleur et un MOSFET qui assurent le découpage du signal. Le rapport cyclique est fonction de la consigne de tension qui alimente le boîtier.

Nous avons choisi les paramètres suivants :

- fréquence : 10 Hz soit une période  $T = 100$  ms, valeur largement en dessous de la plus petite constante de temps du système (au mieux 15 s sur les derniers assemblages de matériaux testés) ;
- résolution = 1 ms ;
- amplitude de la tension d'alimentation  $E = 24$  V.

Par ailleurs la PWM est étalonnée de sorte qu'une consigne de tension de 0 à 10 V nous permette d'obtenir un rapport cyclique de 0 à 100 %.

### 2.2.2 Tests

Différentes expérimentations ont été réalisées afin de valider le principe. Nous présentons ci après les résultats obtenus sur une plaque test de dimensions  $395 * 125 * 2$  mm. Elle est constituée de différentes couches (voir tableau 1) noyées dans une matrice en résine Epolam 2025 de chez Axson mise en œuvre selon les prescriptions du constructeur.

Les essais de caractérisation de la plaque ont permis d'observer un déplacement maximum de 6,1 mm obtenu pour un échelon de tension de 26,7 V correspondant à une puissance électrique de 57 W.

Nombre de couches	Désignation	Masse surfacique (g/m <sup>2</sup> )
2	Tissu de verre	196
2	UD de verre disposé perpendiculairement à la plaque	588
1	Tissu d'aramide avec couche active (CA)	173 (masse CA négligée)
1	Tissu d'aramide	173

TAB. 1 – Constitution de la plaque test

Nous avons enregistré les réponses en déplacement et température pour différentes valeurs de rapport cyclique. Les résultats de ces enregistrements sont représentés sur les graphiques proposés figure 3. Le premier graphique représente les deltas de températures (différence entre température mesurée et température ambiante) et le déplacement en fonction du rapport cyclique. Il montre la proportionnalité attendue. Pour les températures, deux valeurs ont été enregistrées : la première, nommée « T° entre fils », est la température à la surface de la plaque « entre » deux fils de carbone ; la seconde, nommée « T° sur fils », est la température à la surface de la plaque au dessus d'un fils.

Le second graphique permet de comparer les résultats obtenus en déplacement en fonction de la puissance avec les deux systèmes d'alimentation (alimentation en tension continue ou par PWM). Les deux droites se superposent, les résultats sont donc bien identiques. La puissance électrique consommée pour un déplacement donné est la même quelle que soit l'alimentation choisie.

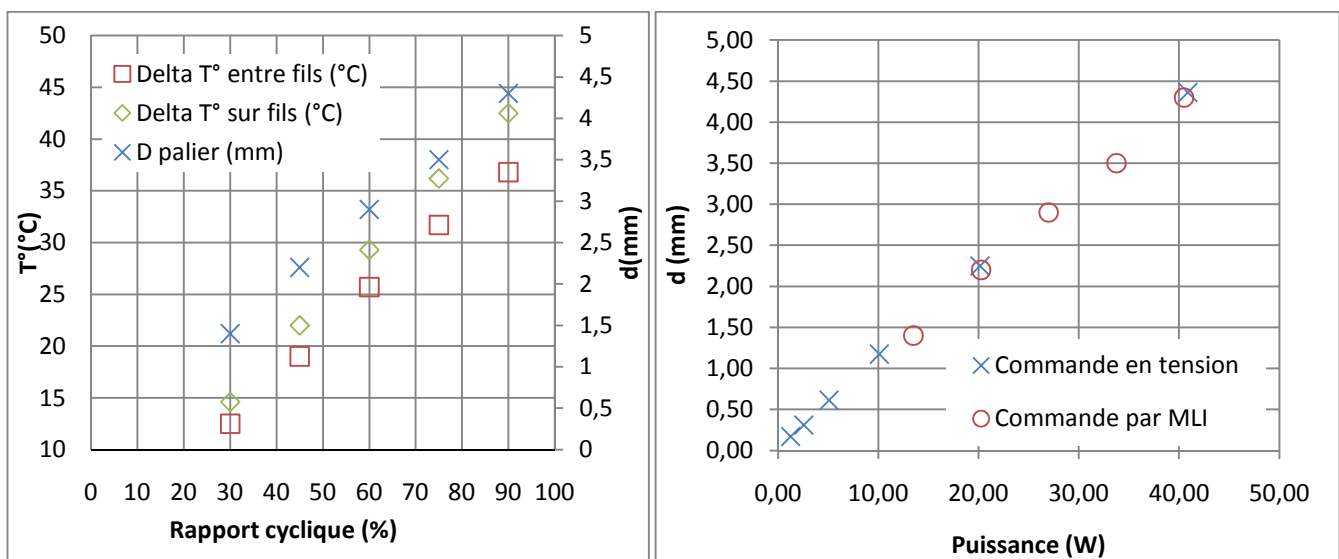


FIG. 3 – Résultats de l'alimentation par PWM et comparaison avec l'alimentation par un échelon de tension

### 2.3 Conclusions et perspectives relativement à l'alimentation par PWM

Comme le montrent ces résultats, le principe d'alimentation par PWM est validé. Toutefois les solutions présentent des limites dans la mise en œuvre. Le choix d'une amplitude de tension à 24 V limite les possibilités en terme de puissance de commande. Ces limites ne nous permettent pas forcément d'atteindre le maximum des performances de déplacement d'une plaque donnée (cela dépend de la résistance de celle-ci). C'est le cas pour la plaque pour laquelle nous avons présenté les résultats qui en réponse à un échelon de tension continue a permis d'obtenir 6,1 mm de déplacement alors qu'avec la PWM actuelle, on peut espérer au mieux obtenir 4,5 mm (à 100% de rapport cyclique).

Par ailleurs nous avons observé qu'avec la configuration actuelle, les résultats, pour de faibles valeurs de rapport cyclique (dans certains cas jusqu'à 30 %), présentent une instabilité sur la durée de T<sub>ON</sub>. Ceci peut avoir plusieurs causes : logiciel du microcontrôleur, câblage PWM, connectique des plaques testées....

L'objectif est de revoir le dimensionnement de l'alimentation par PWM pour qu'elle soit adaptée à davantage d'applications et de la régler pour limiter les instabilités.

### 3 Mesure de la température

#### 3.1 Evolution de la résistance

Le carbone, bon conducteur d'électricité, a la particularité de voir sa résistance diminuer lorsqu'on élève sa température. La loi de Matthiessen modélise cette évolution par l'équation  $R(T) = R_0.(1+\alpha T)$  avec  $\alpha$  coefficient de température et  $R_0$ , la résistance mesurée à 0 °C. Pour le carbone, différentes valeurs du coefficient de température figurent dans la littérature. Un ordre de grandeur proposé est  $\alpha = -0,0004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Actuellement, l'élévation de température dans les plaques de M3C est obtenue par effet joule via ces fils de carbone. Lors de l'identification de la réponse à un échelon de tension, nous avons mesuré la résistance aux bornes de la plaque et nous avons effectivement observé une variation de résistance linéairement décroissante en fonction de l'élévation de température.

La figure 4 ci après montre l'exemple d'un enregistrement effectué dans le cas d'un essai en réponse à un échelon de tension de 20,7 V. Le déplacement obtenu est égal à 3,6 mm.

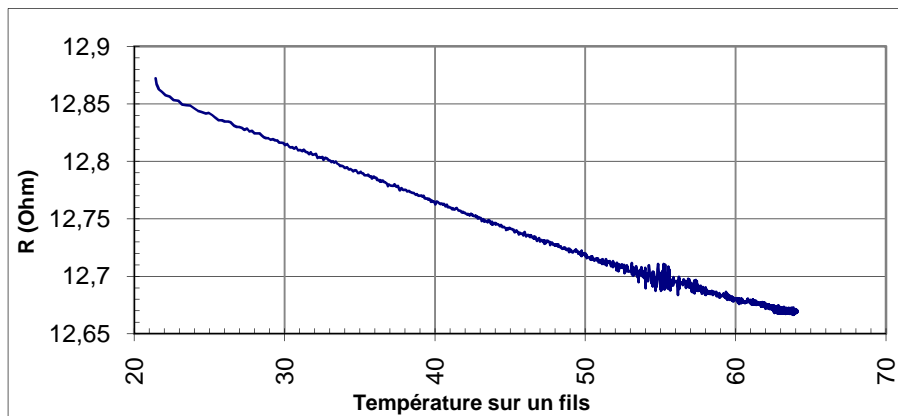


FIG. 4 – Evolution de la résistance de la plaque en fonction de la température

A partir de cet essai, nous avons déterminé l'équation de la droite de régression linéaire :  $R = -0,00411 \cdot T + 12,93$ . On retrouve donc les résultats annoncés par la loi de Matthiessen.

#### 3.2 Conséquences sur la mesure de température

En conséquence, la température à l'intérieur du composite est parfaitement déductible de la mesure de la résistance de la plaque. Actuellement, la valeur de résistance est déduite en temps réel des mesures de courant et tension aux bornes de la plaque (mesures qui utilisent un shunt et un pont diviseur pour être adaptées aux caractéristiques du système d'acquisition). Par l'intermédiaire d'une relation linéaire inverse, nous déduisons la température du matériau :  $T = -243,3 \cdot R + 3146,0$ .

#### 3.3 Conclusions et perspectives sur à la mesure de température

Les mesures de résistance réalisées nous permettent d'avoir une image de la température du matériau. Mais la mesure actuelle présente quelques problèmes qu'il conviendra de résoudre.

Le premier concerne la précision de la mesure. Sur la plaque testée, la variation de résistance à enregistrer est de 0,17 Ohm seulement pour une variation de température de 38 °C. La chaîne d'acquisition doit donc présenter des caractéristiques de précision suffisantes. De plus, la relation linéaire que nous avons mis en œuvre donne une image de la température à la surface du matériau, qui bien évidemment n'est pas la même que celle à l'intérieur du composite. Il faut que l'on parvienne à faire la corrélation entre ces valeurs.

Le deuxième problème concerne le couplage de l'alimentation par PWM et de la mesure de la résistance : il faudra pouvoir caler la mesure dans le temps par rapport au signal rectangulaire (mesure à faire sur le haut des crêteaux).

## 4 Conclusion

Dans cet article nous avons présenté deux actions menées dans le domaine du contrôle du M3C : l'alimentation du composite par une PWM permettant la linéarisation de la chaîne de commande et la mesure de la température du matériau par l'intermédiaire du système d'acquisition sans utilisation de thermocouples.

Au-delà de ces travaux, notre objectif est de mettre en place une structure d'asservissement performante intégrant une boucle de régulation et une correction efficace. Les premiers résultats dans ce domaine n'ont pas été concluants. Mais ils avaient été obtenus avec l'alimentation par PWM réalisée de manière logicielle. A la suite de la transformation de la PWM logicielle en PWM matérielle, nous devons refaire les tests de base sur le système bouclé pour confirmer ou non les résultats et décider de la méthode à appliquer.

Pour la partie capteur, notre objectif est de mesurer la température et le déplacement du matériau sans capteurs externalisés. Pour ce faire, nous devons travailler à la conception de plaques incluant les éléments nécessaires à ces mesures (autres fils de carbone utilisés comme jauges d'extensométrie, fibres optiques ...), tout en couplant cela avec les bons systèmes de mesure (ponts de jauge, amplificateurs de mesure, réseaux de Bragg ...). Ces développements doivent nous permettre à plus long terme d'intégrer d'autres fonctionnalités au matériau.

## 5 Remerciements

Nous tenons à remercier Didier Bresch pour sa participation très active à la réalisation de la PWM par microcontrôleur.

## Références

- [1] H. Drobez, G. L'Hostis, K. Gautier, F. Laurent, B. Durand, A new active composite, *Journal of smart material and structures*, Vol 18 (2009) 025020, 2009.
- [2] H. Drobez, G. L'Hostis, A. Collaine, J.M. Freyburger, F. Laurent, B. Durand, Développement de structures composites intelligentes, *Matériaux et Techniques*, DOI: 10.1051/mattech/2009013, 2009.
- [3] A. Collaine, J.M. Freyburger, G. L'Hostis, F. Laurent, B. Durand, The Controlled Behaviour of Composite Material Model for Control, *Experimental techniques*, DOI:10.1111/j.1747-1567.2008.00471.x., 2009.