



**HAL**  
open science

**Suivi du procédé de la fabrication Liquid Resin Infusion (LRI) sur simulateur industriel par capteurs distribués  
= Monitoring the Liquid Resin Infusion (LRI) manufacturing process under industrial environment using distributed sensors**

Peng Wang, Jérôme Molimard, Sylvain Drapier, Alain Vautrin, Patrick Henrat

► **To cite this version:**

Peng Wang, Jérôme Molimard, Sylvain Drapier, Alain Vautrin, Patrick Henrat. Suivi du procédé de la fabrication Liquid Resin Infusion (LRI) sur simulateur industriel par capteurs distribués = Monitoring the Liquid Resin Infusion (LRI) manufacturing process under industrial environment using distributed sensors. JNC16, Jun 2009, Toulouse, France. 9 p. hal-00429542

**HAL Id: hal-00429542**

**<https://hal.science/hal-00429542>**

Submitted on 3 Nov 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.

# Suivi du procédé de la fabrication Liquid Resin Infusion (LRI) sur simulateur industriel par capteurs distribués

## *Monitoring the Liquid Resin Infusion (LRI) manufacturing process under industrial environment using distributed sensors*

Peng Wang<sup>1</sup>, Jérôme Molimard<sup>1</sup>, Sylvain Drapier<sup>1</sup>, Alain Vautrin<sup>1</sup> et Patrick Henrat<sup>2</sup>

1 : LTDS UMR CNRS 5513, SMS, ENSM-SE  
158, cours Fauriel – 42023 Saint-Étienne cedex 2 – France  
e-mails : [wang@emse.fr](mailto:wang@emse.fr), [molimard@emse.fr](mailto:molimard@emse.fr), [drapier@emse.fr](mailto:drapier@emse.fr), [vautrin@emse.fr](mailto:vautrin@emse.fr)

2 : HEXCEL Corporation SAS, 38630 Les Avenières -- France  
e-mails : [Patrick.HENRAT@hexcel.com](mailto:Patrick.HENRAT@hexcel.com)

### Résumé

Les procédés par infusion de résine LRI (Liquid Resin Infusion) sont des procédés de fabrication particulièrement intéressants pour les pièces en composites complexes ou de grandes dimensions. Ils sont basés sur l'écoulement d'une résine liquide, à travers son épaisseur, dû à une dépression. Pour améliorer notre compréhension de l'écoulement de résine dans la préforme, dans ce présent papier, une nouvelle approche directe est proposée pour détecter le front de résine lors du procédé de LRI sous environnement industriel. Pour détecter l'évolution du front de résine plus précisément et vérifier les résultats qui sont déduits de mesure indirecte avec des micro-thermocouples dans l'environnement industriel, la fibre optique telle qu'un capteur de réflexion de Fresnel est utilisé. Les résultats obtenus en particulier prouvent que les micro-thermocouples donnent des informations pertinentes sur le front de fluide.

### Abstract

LRI (Liquid Resin Infusion) processes are promising manufacturing processes to produce large, thick or complex structural parts. They are based on the resin flow, across the part thickness, induced by a low pressure between the inlet and the outlet. To improve our knowledge of the resin flow in the preform, a novel direct approach to detect the resin flow front during the LRI process under industrial environment is proposed. In order to detect the resin flow inside of the preform and verify the results, which are deduced from indirect measurement with micro-thermocouples, optical fibre sensors based on Fresnel reflection will be utilized. The results obtained prove that micro-thermocouples could be useful to characterize the resin front.

**Mots Clés :** Liquid Resin Infusion, fibre optique, micro-thermocouple, environnement industriel

**Keywords :** Liquid Resin Infusion, optical fibre, micro-thermocouple, industrial environment

## 1. Introduction

Les procédés par infusion de résine LRI (Liquid Resin Infusion) [2] sont de nouveaux procédés de fabrication de pièces complexes ou de grandes dimensions par écoulement de la résine liquide à travers l'épaisseur de l'empilement des préformes. Dans ce cas, la couche de résine est réalisée à l'aide d'un tissu drainant fortement perméable et placé au-dessus de l'empilement de fibres préformées (Fig. 1). Le différentiel de pression entre l'arrivée de résine, située au niveau du drainant, et l'évent, situé sur la base de la préforme, provoque l'infusion de la résine dans le drainant puis à travers l'épaisseur des préformes sèches.

Dans le procédé de LRI, l'épaisseur et le taux volumique de fibre de la pièce finale ne sont pas complètement maîtrisés car un sac à vide remplace un moule rigide, donc il y a des grandes variations du volume lorsque le vide ou la pression sont appliquées. Pour optimiser les paramètres de la conception et la fabrication, récemment, une modélisation de l'écoulement d'un fluide isotherme dans un milieu poreux compressible a été développée [1,3]. Dans cette approche, on suppose que la résine remplit d'abord un drainant à forte perméabilité et infuse ensuite progressivement suivant l'épaisseur de la préforme. Pour valider le modèle et améliorer la connaissance des processus de LRI, nous voulons suivre les paramètres

importants pendant ces processus, par exemple, le front de résine. Des moyens expérimentaux pour caractériser le front de résine sont principalement trouvés dans la littérature, tel que la détermination du front du fluide dans les procédés de RTM (Resin Transfer Moulding) [4-6], de VIP (Vacuum Infusion Process) [7,8] et du procédé d'infusion de résine [9-11].

Pour surmonter les inconvénients des techniques utilisées en conditions industrielles, dans ce présent papier, deux types de capteur ont été utilisés et appliqués pour caractériser le front de résine, le temps de remplissage, l'avancement de la cuisson et la température de la préforme, ce sont les paramètres clés pour la fabrication des matériaux composites par infusion de résine.

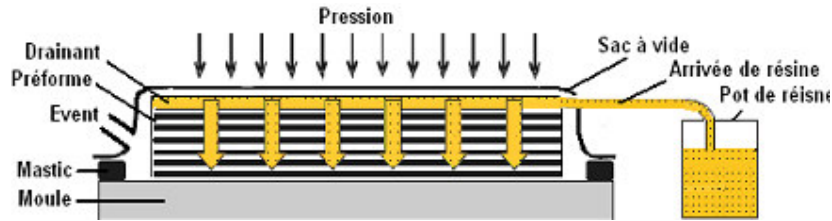


Fig. 1. Principe du procédé LRI

## 2. Approche expérimentale

### 2.1 Principe

#### 2.1.1 Micro-thermocouples

Dans notre essai, les micro-thermocouples, type K ont été choisis car ils sont les plus couramment utilisés dans l'industrie. Ce type de micro-thermocouple présente une large gamme de température entre -75°C et 250°C. Un micro-thermocouple est constitué de 2 fils de diamètre 79  $\mu\text{m}$  ; ce diamètre permet d'avoir très peu de perturbations pendant le procédé d'infusion. Les données sont acquises par le biais d'une unité d'acquisition : Agilent 34970A. La fréquence d'acquisition répond à nos besoins (fréquence maximale de 20 valeurs/seconde), et sa résolution est de 0,1°C. Les thermocouples ont été étalonnés à température stabilisée (7 paliers) et comparés avec les mesures d'une sonde platine (PT100). La précision de cet étalonnage est 0,1°C.

#### 2.1.2 Capteur à fibre optique par réflexion de Fresnel

Pour déterminer le front et l'avancement de la réticulation de la résine, l'idée est de suivre l'évolution de l'indice de réfraction de la résine au cours de la phase de remplissage et de cuisson. Le coefficient de réflexion  $R$  entre deux milieux des indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$  peut être calculé en utilisant les lois de Fresnel [12], il est exprimé sous la forme :

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (\text{eq. 1})$$

De plus, l'indice de réfraction est sensible aux variations de densité, paramètre qui augmente dans la phase de thermo-durcissement. En effet, la loi de Lorentz-Lorenz établit une relation entre l'indice de réfraction  $n$  et la densité  $\rho$  d'un milieu liquide en faisant intervenir également la réfractivité molaire  $R_M$  et la masse molaire  $M$  (voir l'équation 2).

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{R_M}{M} \rho \quad (\text{eq. 2})$$

Comme l'intensité réfléchie en bout de fibre optique dépend du coefficient de réflexion du milieu extérieur, nous pouvons suivre l'avancement du front de la résine et l'avancement de la réticulation par l'observation des variations de cette intensité réfléchie selon la relation 3. Dans cette relation,  $A_t$  correspond à un coefficient de transmission,  $R$  est le coefficient de réflexion en bout de fibre optique,  $I_0$  est l'intensité injectée dans la fibre optique (l'intensité de la source) et  $B_f$  représente le bruit de fond du montage. Les

paramètres de la relation 3 peuvent être obtenus par étalonnage avant essai ou même pendant l'essai [15]. Figure 2 donne une vue schématique du système de mesure.

$$I = A_0 R + B_f \quad (\text{eq. 3})$$

avec  $A_0 = A_r I_0$

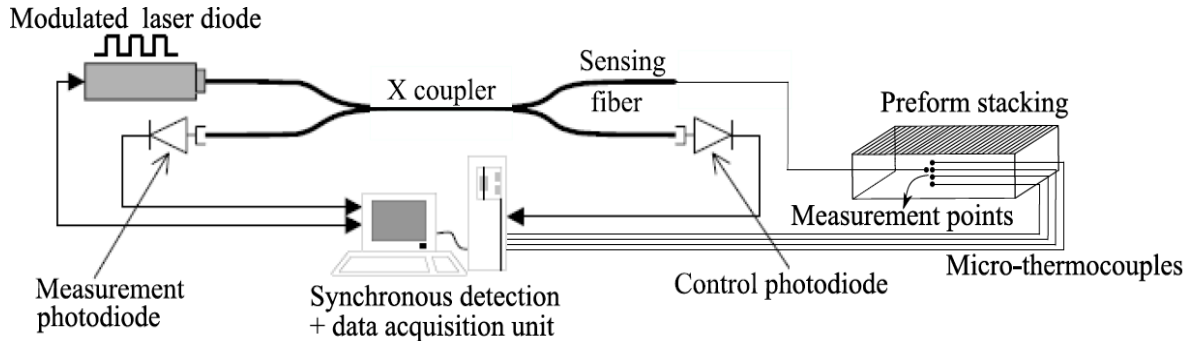


FIG. 2 – Principe du système de mesure en utilisant des micro-thermocouples et un capteur à fibre optique par la réflexion Fresnel

## 2.2 Montage expérimental

Nous avons réalisé une plaque à partir d'un empilement de 48 plis de tissu carbone, d'un produit HEXCEL Corporation SAS : le tissu UD (UD pour Uni Directionnel) de référence G1157 E01. C'est un renfort tissé avec un très faible pourcentage de fibre de verre dans le sens de la trame (96% de la masse dans la direction de la chaîne et de 4% de la masse dans la direction trame). La séquence d'empilement est croisée  $[0_6 90_6 90_6 0_6]_S$ , la plaque est donc équilibrée et symétrique d'une épaisseur d'environ 20 mm (condition libre, c'est à dire avant de la compression sous sac à vide). Les dimensions de la préforme choisie sont  $335 \text{ mm} \times 335 \text{ mm}$ . La résine époxy de HexFlow® RTM-6 est utilisée, elle est pré-chauffée dans un pot chauffant à  $80^\circ\text{C}$  avant injection dans la préforme. Pour l'élaboration, la préforme est posée sur une plaque chauffante qui est maintenue à  $120^\circ\text{C}$  pendant l'infusion de résine. Figure 3 présente un exemple d'infusion d'une plaque par procédé LRI. L'arrivée et la sortie de résine sont indiquées dans la figure. Le couvercle fermé permet d'obtenir une température homogène dans la phase de remplissage et de cuisson. Dans les tests classiques, la température pendant la phase de cuisson est de  $180^\circ\text{C}$ , elle est maintenue pendant une durée d'environ une heure et demie.

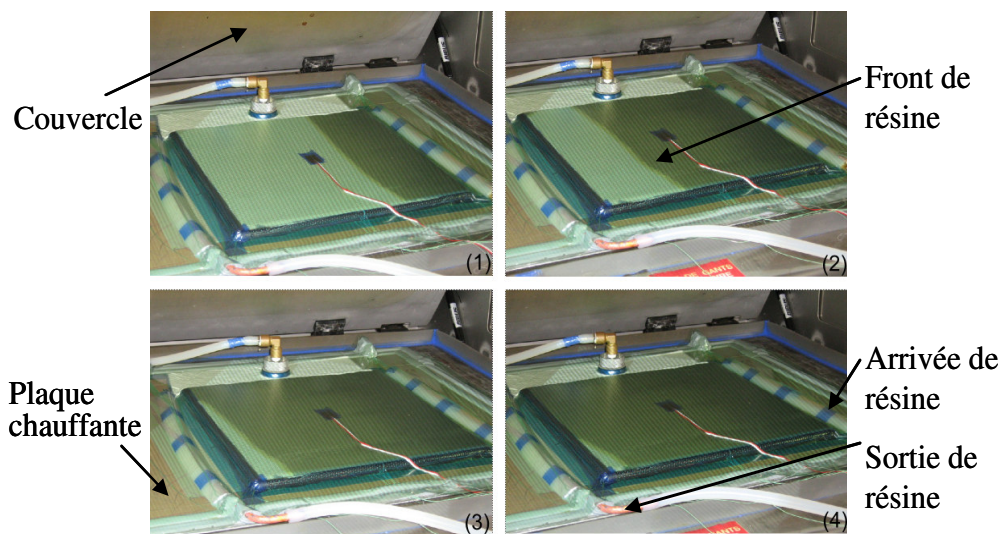


FIG. 3 – Infusion d'une plaque par procédé LRI

Pour détecter le front de résine pendant l'infusion et l'avancement de la réticulation de résine dans la phase de cuisson, l'essai consiste à infuser une plaque épaisse instrumentée avec un capteur à fibre optique et 6 micro-thermocouples. Les positionnements des capteurs sont montrés sur la figure 4 : 5 thermocouples sont placés dans l'épaisseur de la préforme. Les thermocouples 3 et 4 encadrent un capteur à fibre optique placé au centre du plan médian, avec 1 cm entre chaque capteur. Le thermocouple 1 est inséré dans le tuyau d'entrée du système pour contrôler la température de la résine à son arrivée.

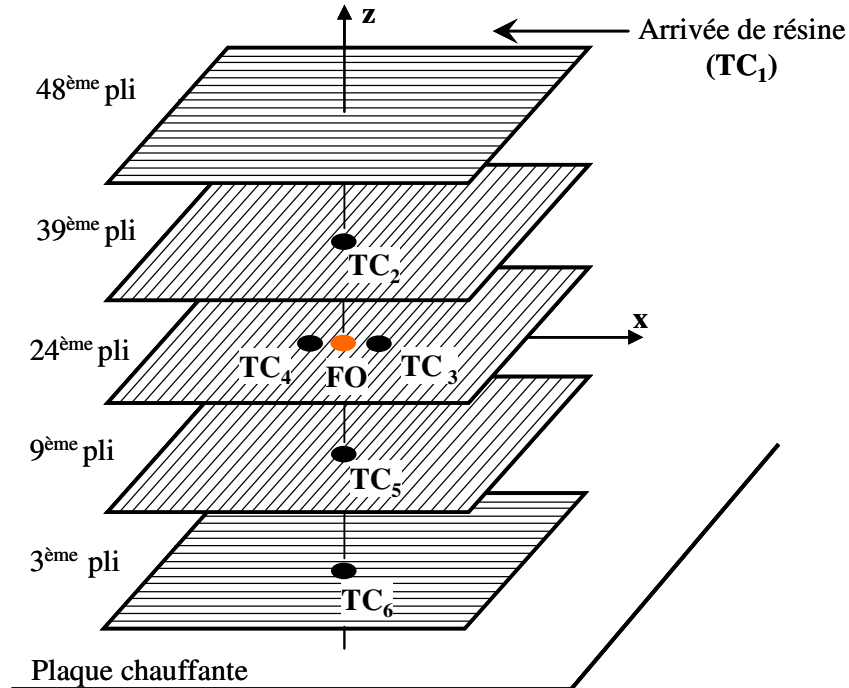


FIG. 4 – Positions des micro-thermocouples (TC) et du capteur à fibre optique (FO) dans la préforme.

## 2.3 Arrivée du front de résine

### 2.3.1 Micro-thermocouples

L'évolution de la température mesurée par le micro-thermocouple placé dans le tuyau d'entrée du système d'infusion est montrée sur la figure 5. La température chute après 10 s, ce qui peut être considéré comme le moment de début de test. En raison de l'effet de l'écoulement de résine, le thermocouple 1 colle sur le tuyau d'entrée, ainsi celui-ci mesure à présent la température à la paroi du tuyau d'entrée, qui est plus chaude. Donc la température remonte un peu juste après la chute de température. Ensuite, ce signal représente la température de l'ensemble de résine et tuyau entrée.

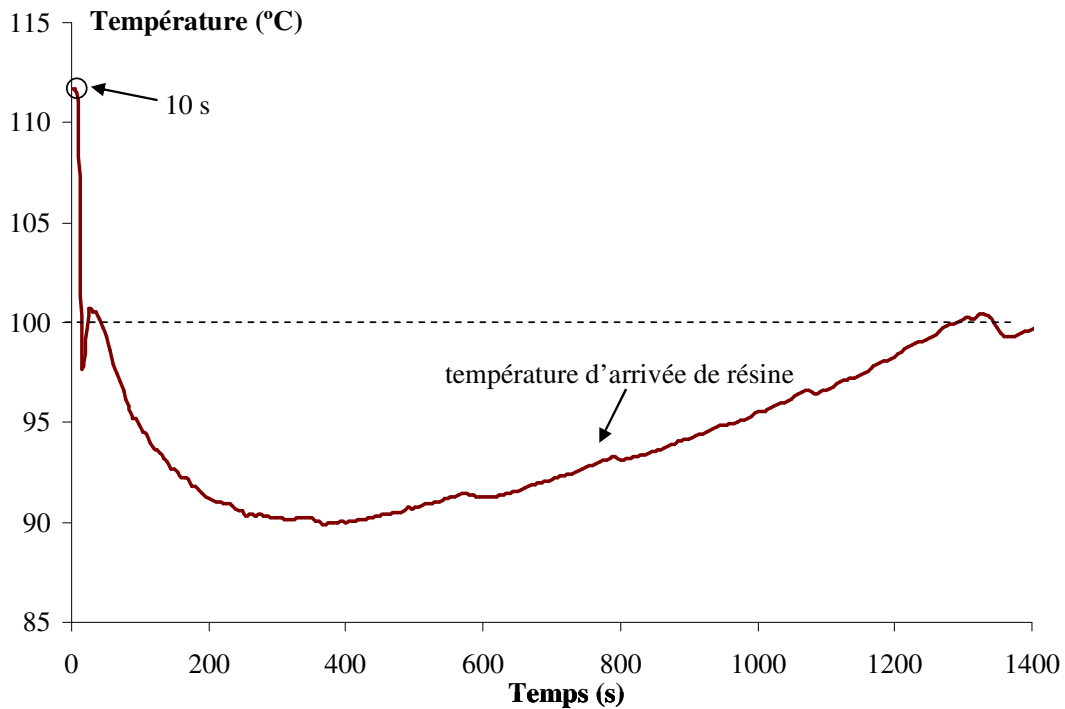


FIG. 5 – Signal du micro-thermocouple placé dans le tuyau d'entrée du système d'infusion.

Les cinq courbes de la figure 6 ont généralement des caractéristiques similaires. Temps 0 correspond au début de l'infusion de résine (le temps zéro est obtenu à partir de TC1 dans figure 5). On peut observer qu'il y a des différences de température de 10°C au début de l'infusion et d'environ 5°C à la fin du remplissage. Comme nous l'avons proposé dans les précédentes publications [10,14], les températures diminuent lorsque le test commence et que la résine entre dans le drainant. Ce phénomène confirme la présence de la résine qui tend à refroidir la préforme, car la mesure du micro-thermocouple 1 montre que la température de la résine d'entrée est toujours en dessous de 100°C pendant la phase de remplissage (voir figure 5). Les signaux du thermocouple baissent de plus en plus lorsque le front de résine se rapproche. Une fois que la résine est arrivée dans l'environnement du thermocouple, une température minimale est obtenue. Les temps d'arrivée de résine estimés par chaque thermocouple sont notés sur la figure. Après ce minimum de température, la température du thermocouple augmente car la température de la résine continue à augmenter. Lorsque la résine arrive en contact avec la plaque chauffante, elle est chauffée rapidement par conduction (voir les signaux de TC5 et TC6). Finalement, chaque température tend vers une valeur stabilisée après environ 1300 s, ce qui correspond expérimentalement à la fin du remplissage.

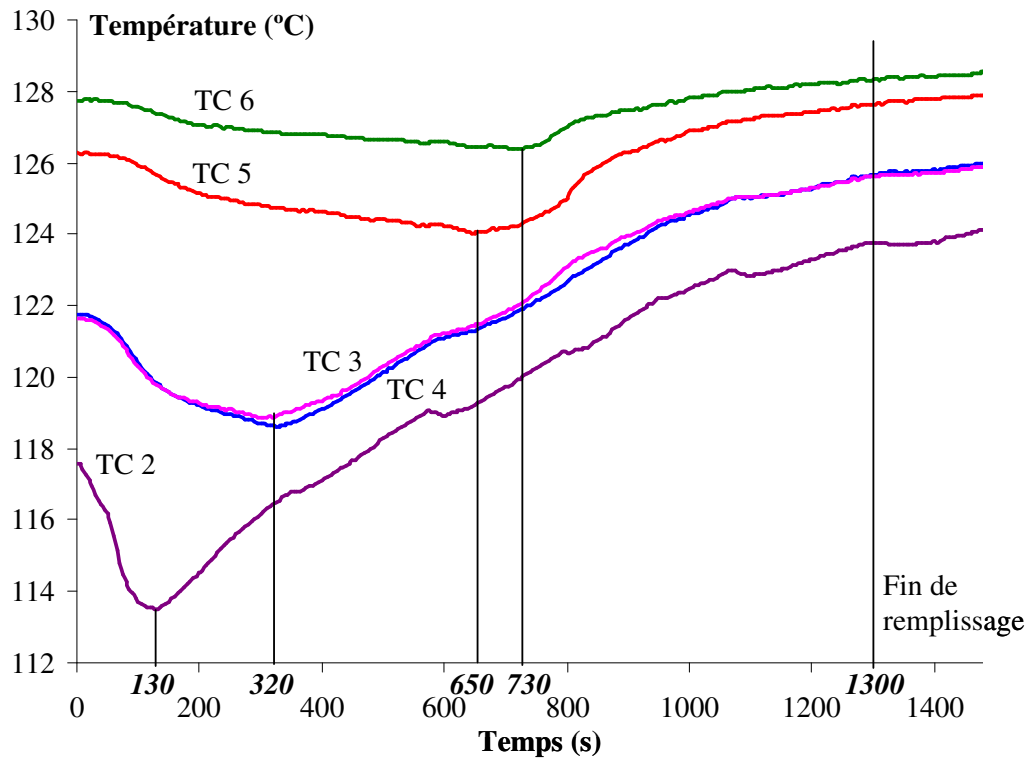


FIG. 6 – Températures mesurées par les micro-thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme.

### 2.3.2 Capteur de Fresnel

Figure 7 montre l'évolution de l'intensité lumineuse réfléchi en bout de fibre optique et des températures au voisinage de cette fibre en fonction du temps pendant le remplissage. Au début, le signal réfléchi est parfaitement stable car l'extrémité de la fibre optique est environnée d'air. Lorsque la résine touche le bout de la fibre optique, l'intensité lumineuse réfléchi chute immédiatement à cause de la variation de l'indice de réfraction. En 5 secondes, le signal de la fibre optique remonte au niveau initial, puis décroît à nouveau. Cet effet peut être lié à l'air mélangé dans l'écoulement de résine, c'est-à-dire que le front de résine n'est pas homogène. Quand l'extrémité de fibre optique est complètement baignée par la résine, le signal devient stable. On peut considérer que dans ce test la résine arrive au centre du plan médian à environ 350 s. En revanche, les réponses des thermocouples 3 et 4 présentent un minimum de température apparaît à environ 320 s (315 s pour thermocouple 3 et 325 s pour thermocouple 4), qui présente une différence de l'ordre de 10%. Pour bien fixer la position de chaque thermocouple, une petite quantité de résine (la même résine utilisée dans le test de l'infusion) a été utilisée pour coller la tête du thermocouple. Cela peut perturber la détection par thermocouple. A partir du moment où la résine arrive au voisinage de chaque micro-thermocouple posé dans la préforme présenté sur la figure 6, on observe que la résine s'écoule principalement suivant l'épaisseur. En revanche, il y a un écart de temps en direction longitudinale (10 s de différence entre TC3 et TC4) car la résine atteint TC3 avant TC4

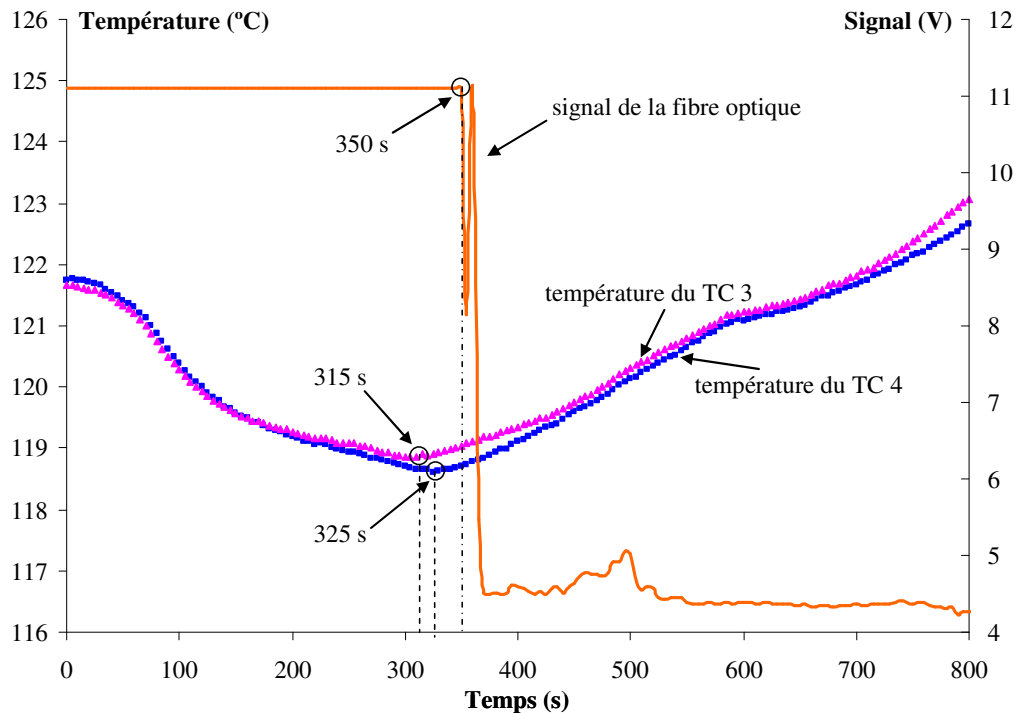


FIG. 7 – Signal de la fibre optique et températures pendant l'infusion de résine.

## 2.4 Suivi de la phase de cuisson

La Figure 8 donne la température et le signal optique des capteurs au centre du plan médian pendant toute la durée du procédé. Elle peut être divisée en 5 parties. Tout d'abord, dans la phase de remplissage, l'arrivée de résine et le minimum de température peuvent être observés en zone 1. Après 350 s, lorsque la température augmente, l'indice de réfraction et l'intensité lumineuse réfléchie diminuent. Pour des raisons purement expérimentales, ce phénomène n'a pu être caractérisé en zone 2.

La zone 3 correspond à la phase de la cuisson. Dans cette partie, la résine liquide est transformée en un solide. De plus, l'intensité lumineuse réfléchie augmente au cours de cette transformation [13]. Il s'agit de l'augmentation de la densité de la résine dans la phase de la cuisson, l'indice de réfraction de fibre optique augmente donc selon l'équation 2. Une fois que l'intensité lumineuse réfléchie est stable, on peut considérer que la phase de la cuisson est terminée et que la résine est polymérisée à 5000 s. Au cours de la phase de refroidissement dans la zone 4, le volume de résine diminue, par conséquent sa densité augmente, de même que le signal de la fibre optique. A la fin du procédé, la température et l'intensité lumineuse réfléchie se stabilisent dans la zone 5.



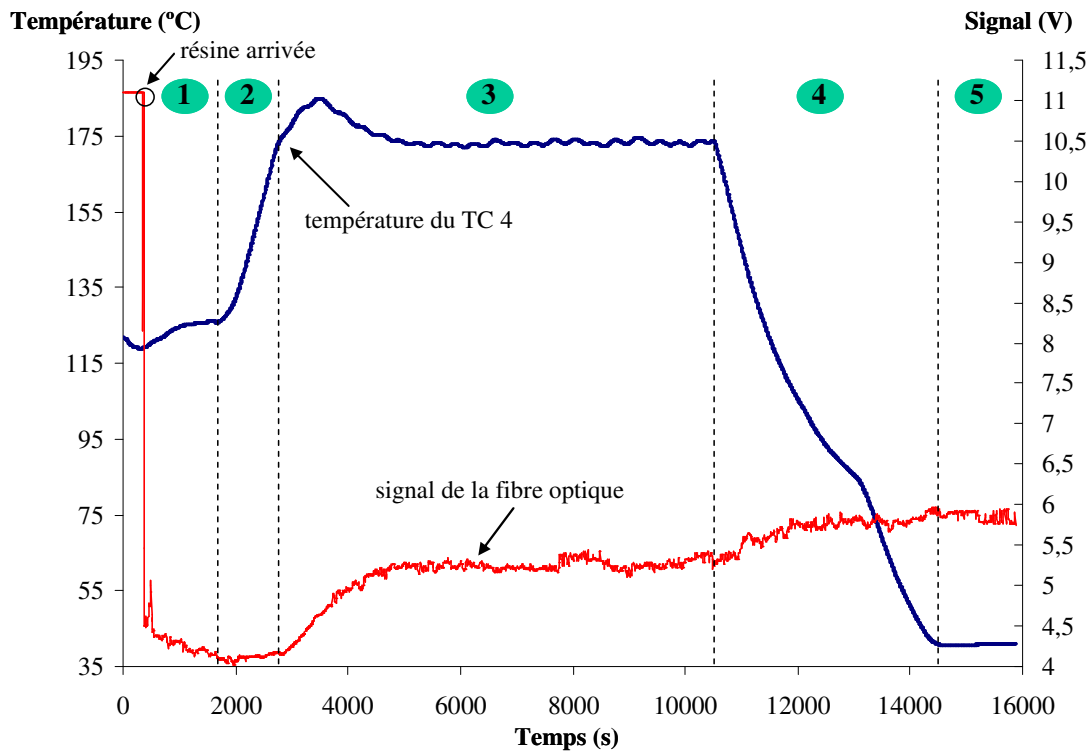


FIG. 8 – Les signaux des capteurs situés au centre du plan médian de la préforme.

### 3. Conclusion

Dans le travail actuel, un capteur à fibre optique basé sur la réflexion de Fresnel est utilisé pour détecter le front de résine pendant l'infusion d'une plaque par le procédé LRI en environnement industriel. Il est possible de suivre le procédé LRI, en particulier de détecter l'avancement de la phase de cuisson. Les micro-thermocouples permettent de suivre la température à l'intérieur de la préforme au cours du procédé. Les résultats obtenus montrent qu'ils peuvent être utilisés pour avoir une première information sur l'écoulement de résine dans la préforme. Ainsi, les thermocouples à faible intrusivité et d'utilisation aisée sont une technique prometteuse pour suivre le procédé de fabrication des matériaux composites.

Dans les travaux futurs, afin d'obtenir l'évolution du front de résine, il est envisagé de placer plusieurs capteurs à fibre optique en différents points de la préforme. Ces résultats permettront de contrôler de façon systématique les mesures des micro-thermocouples. De plus, le suivi de l'avancement de la réticulation sera également effectué à différents niveaux dans la préforme.

### Références

1. Celle P, Drapier S, Bergheau JM. Numerical Modelling of Liquid Infusion into Fibrous Media Undergoing Compaction, *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 27:647-661, 2008.
2. Williams C, Summerscales J, Grove S. Resin Infusion Under Flexible Tooling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(7): 517-524, 1996.
3. Drapier S, Celle P, Bergheau JM. Modelling Infusion-Based Processes using a Specific Approach of Fluid Infusion into Highly Compressible Preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. submitted, 2008.
4. Lim ST, Lee WI. An analysis of the three-dimensional resin-transfer mold filling process. *Composites Science and Technology*. 60:961-975, 2000.
5. Kissinger C, Mitschang P, Neitzel M. 3-Dimensional fluid propagation in RTM-processing. In: Crivelli Visconti I, editor. *Advancing with composites 2000*, 2000. Milan:Verlag, 93-98, 2008.

6. Stöven T, Weyrauch F, Mitschang P, Neitzel M. Continuous monitoring of three-dimensional resin flow through a fibre preform. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 34:475-480, 2003.
7. Modi D, Johnson M, Ling A, Rudd C. Analysis of pressure profile and flow progression in the vacuum infusion process. *Composites Science and Technology*. In press, 2008.
8. Duan YX, Tan ZY, Zhao Y, Sun J. Compression responses of preform in vacuum infusion process. *Chinese Journal of Aeronautics*. 21: 370-377, 2008.
9. Antonucci V, Giordano M, Nicolais L, Calabro A, Cusano A, Cutolo A, Inserra S. Resin Flow Monitoring in Resin Film Infusion Process. *Journal of Materials Processing Technology*. 143-144: 687-692, 2003.
10. Wang P, Demirel M, Drapier S, Vautrin A, Henrat P. In-plane and transverse detection of the fluid flow front during the LRI manufacturing process, In: 9th International Conference on Flow Processes in Composite Materials Montréal (Québec), Canada, 8-10 July, 56, 2008.
11. Govignon Q, Bickerton S, Morris J, Kelly PA. Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 39:1412-1426, 2008.
12. Vacher S, Molimard J, Gagnaire H, Vautrin A. A Fresnel's reflection optical fiber sensor for thermoset polymer cure monitoring. *Polymers and polymer composites*. 12/4: 269-276, 2004.
13. Liu YM, Ganesh C, Steele JP, Jones JE. Fiber optic sensor development for real-time in-situ epoxy cure monitoring. *Journal of Composite Materials*. 31(1): 87-102, 1997.
14. Wang P, Drapier S, Molimard J, Vautrin A, Minni J-C. Characterization of Liquid Resin Infusion (LRI) Filling by Fringe Pattern Projection and in-situ Thermocouples. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Submitted, 2008.