



**HAL**  
open science

## Cartes de température maximum lors de la simulation de la réticulation de la résine RTM 6 dans une plaque composite

Florentin Berthet, Sawsane Nakouzi, Fabrice Schmidt, Yannick Le Maoult

### ► To cite this version:

Florentin Berthet, Sawsane Nakouzi, Fabrice Schmidt, Yannick Le Maoult. Cartes de température maximum lors de la simulation de la réticulation de la résine RTM 6 dans une plaque composite. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.57. hal-00597932

**HAL Id: hal-00597932**

**<https://hal.science/hal-00597932>**

Submitted on 2 Jun 2011

**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.

# Cartes de température maximum lors de la simulation de la réticulation de la résine RTM 6 dans une plaque composite

## *Exothermal map of RTM6 cure*

Florentin Berthet, Sawsane Nakouzi, Fabrice Schmidt et Yannick le Maout

\*ICA-Albi – Université de Toulouse ;INSA,UPS, Mines Albi, ISAE ;ICA (Institut Clément Ader)  
Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, CROMeP, France  
Campus Jarlard, Route de teillet,  
F-81013 Albi CT cedex 09, France  
e-mail :florentin.berthet@mines-albi.fr

### Résumé

La résine RTM6 est une résine époxyde couramment employée pour les composites aéronautiques (Carbone/epoxy) par voie liquide (infusion, RTM) en raison de sa faible viscosité. Sa cuisson s'accompagne d'un dégagement de chaleur. La température de la pièce atteint son maxima au niveau du plan moyen de la pièce.

La cinétique de la cuisson de la résine RTM 6 est prise en compte par la loi de Kamal Sourour et de la diffusion. Le terme source de la réaction est introduit dans un modèle thermique de conduction 1D. La température est supposée constante sur les deux faces de la pièce. Le problème est résolu au moyen du code éléments finis COMSOL multiphysics.

Le calcul a été validé par l'expérience sur le cas d'une cuisson infra rouge dans des travaux précédents.

La carte proposée représente la température maximale atteinte au centre de la plaque de composite en fonction de la température de cuisson isotherme (imposée au bord de la plaque) et de l'épaisseur. Cette carte permet au technicien de définir des conditions de température adaptées à la pièce pour ne pas dégrader la résine et pour conserver une température relativement constante dans l'épaisseur. Il faut cependant remarquer que le calcul est très sensible aux données matériaux considérées.

### Abstract

RTM6 the resin is an epoxy resin commonly used for aeronautical composite (carbon / epoxy) by a liquid (infusion, RTM) because of its low viscosity. Her cooking is accompanied by a release of heat. The room temperature reaches its maximum at the midplane of the room.

The kinetics of curing of the resin RTM 6 is taken into account by the law of Kamal Sourour and dissemination. The source term of the reaction is introduced into a 1D thermal model of conduction. The temperature is assumed constant on both sides of the room. The problem is solved using the finite element code COMSOL multiphysics.

The calculation was validated by experience in the case of infrared cooking in previous works. The proposed map represents the maximum temperature reached in the center of the composite plate as a function of firing temperature isotherm (imposed at the edge of the plate) and thickness. This card allows the technician to set temperature conditions appropriate to the room to avoid degrading the resin and to maintain a relatively constant temperature in the thickness. Note however that the calculation is very sensitive to data materials considered.

**Mots Clés :** Carte, exothermie, RTM6, cuisson

**Keywords :** Map, exothermal, RTM6, cure

## 1. Introduction

La cuisson des composites, notamment ceux contenant une résine époxyde est une étape importante dans la fabrication des composites. La dépendance des propriétés mécaniques des composites à la présence de défauts, comme les porosités par exemple, dans le composite est désormais bien établie. Les défauts peuvent également apparaître suite à une élévation trop importante de la température. C'est pourquoi il semble utile de disposer d'une carte permettant d'avoir une certaine vue d'ensemble de la température atteinte dans le composite. L'exothermie associée à la réaction

dépend des paramètres matériaux, bien entendu, mais également de l'épaisseur du composite fabriqué et de la température de cuisson isotherme. C'est ce que nous allons voir maintenant.

## 2. Théorie

### 2.1 Conduction thermique

La température transitoire du composite peut être déterminée par l'équation Fourier en supposant une température d'équilibre instantanée entre la résine et les fibres (Eq. 1).

$$\rho_c c_{p,c} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_c \nabla T) + v_m \rho_m H_t \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (\text{Eq. 1})$$

où  $H_t$  = entropie totale de la réaction,  $\alpha$  le degré de cuisson,  $c_{p,c}$  la capacité calorifique, et  $k_c$  la conductivité thermique du composite. Les propriétés du composite sont exprimés en utilisant la loi des mélanges. Les indices c,m,f indiquent le composite, la matrice et la fibre respectivement.

$$\rho_c = \frac{\rho_m \rho_f}{\rho_m w_f + w_p \rho_f} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$c_{p,c} = c_{p,m} w_m + c_{p,f} w_f \quad (\text{Eq. 3})$$

$$k_c = \frac{k_m k_{f,t}}{(1 - v_m) k_m + k_{f,t} v_m} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$w_m = \frac{\frac{v_m}{\rho_f}}{\frac{v_m}{\rho_f} + \frac{(1 - v_m)}{\rho_m}} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$w_m + w_f = 1 \quad (\text{Eq. 6})$$

,t indique la direction transverse de la conductivité de la fibre, w est la fraction massique, v est la fraction volumique en fibre ou en matrice selon l'indice. Le composite est supposé sans porosité (Eq. 6).

### 2.2 Modélisation cinétique

#### 2.2.1 T<sub>g</sub>

La température de transition vitreuse est modélisée par l'équation de DiBenedetto (Eq. 7).

$$T_g = T_{g0} + \frac{(T_{g\infty} - T_{g0}) \lambda \alpha}{1 - (1 - \lambda) \alpha} \quad (\text{Eq. 7})$$

#### 2.2.2 Modèle cinétique

La cinétique de cuisson de la résine epoxy RTM6 suit la loi de Kamal Sourour modifiée avec un terme de diffusion (Eq.8), indice d comme diffusion. Ce terme est introduit pour prendre en compte le blocage de la réaction lorsque la T<sub>g</sub> de la résine rejoint la température de cuisson.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left( \frac{k_1 * k_d}{k_1 + k_d} + \frac{k_2 * k_d}{k_2 + k_d} \alpha^m \right) (1 - \alpha)^n \quad (\text{Eq. 8})$$

$$k_i = A_i * \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \quad (\text{Eq. 9})$$

$$k_d = A_d * \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \exp\left(-\frac{b}{f}\right) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$f = f_o + \delta(T - T_g) \quad (\text{Eq. 11})$$

avec  $f_o=0.025$  et  $\delta = 0.00048$ .

Paramètre	Unité	Valeur
A1	min-1	4.5E6
E1	J/mol	74690
A2	min-1	1.3e6
E2	J/mol	58370
Ad	min-1	1.42e28
Ed	J/mol	2.16e5
m	-	1.216
n	-	1.284
b	-	0.227
Ht	J/g	414
R	J/(mol*K)	8.314

Tab. 1. Paramètres utilisés dans la simulation.

### 2.2.3 Matériaux

Les matériaux composites sont constitués de 62% en volume de fibre de carbone de module intermédiaire (Toho tenax IMS 60) et de 38% de résine RTM6 (Hexcel), ce qui correspond à un composite fabriqué par infusion.

Les valeurs utilisées, rassemblées (Tab. 1) proviennent de la littérature [1,2,3,4]. Les données matériau (conductibilité thermiques et capacités calorifiques) concernant la fibre et la résine RTM6 sont issues de la thèse de D. Lecointe [9]. La capacité calorifique de la résine est exprimée en fonction de l'avancement de la réaction et de la température. Les valeurs de tous les paramètres utilisés ont été confrontées expérimentalement et avec succès dans le cas de cuisson par chauffage à l'aide de lampes infra rouges [5] et [7,8,10].

## 3. Résultats

Les simulations sont réalisées grâce au logiciel COMSOL multiphysics.

La simulation montre que si la température est imposée sur les deux faces de la plaque composite, la température maximale est atteinte au cœur de la plaque. Nous avons fait varier la température de cuisson isotherme de 140°C à 180°C. Nous avons fait varier l'épaisseur de 0 à 40mm. Les Figures (Fig. 1 et Fig. 2) illustrent les résultats obtenus par simulation.

La température maximale atteinte au centre de la plaque de composite en fonction de l'épaisseur de la plaque (en X) et de la température de cuisson isotherme (c'est à dire la température imposée au bord de la plaque en Y) est illustrée sous forme de carte (Fig. 1). Cette carte permet de définir des conditions de température adaptées à l'épaisseur de la pièce pour ne pas dépasser la température de dégradation de la résine (220°C). Cette condition n'est rencontrée que pour des épaisseurs

supérieures à 32mm et des températures de cuisson isotherme supérieures à 172°C (le coin en haut à gauche de la figure 1).

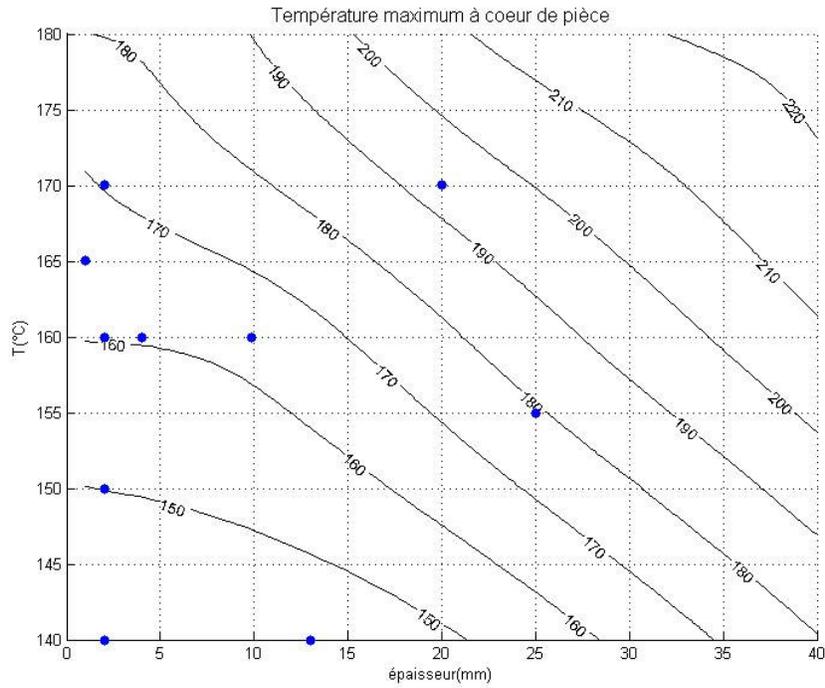


Fig. 1. Température maximale atteinte (au niveau du plan moyen) dans une pièce composite fibre de carbone /RTM6.

La figure (Fig. 2) représente l'écart de température maximal atteint au centre de la plaque de composite en fonction de l'épaisseur de la plaque (en X) et de la température de cuisson isotherme (c'est à dire la différence de température entre le coeur et le bord de la plaque).

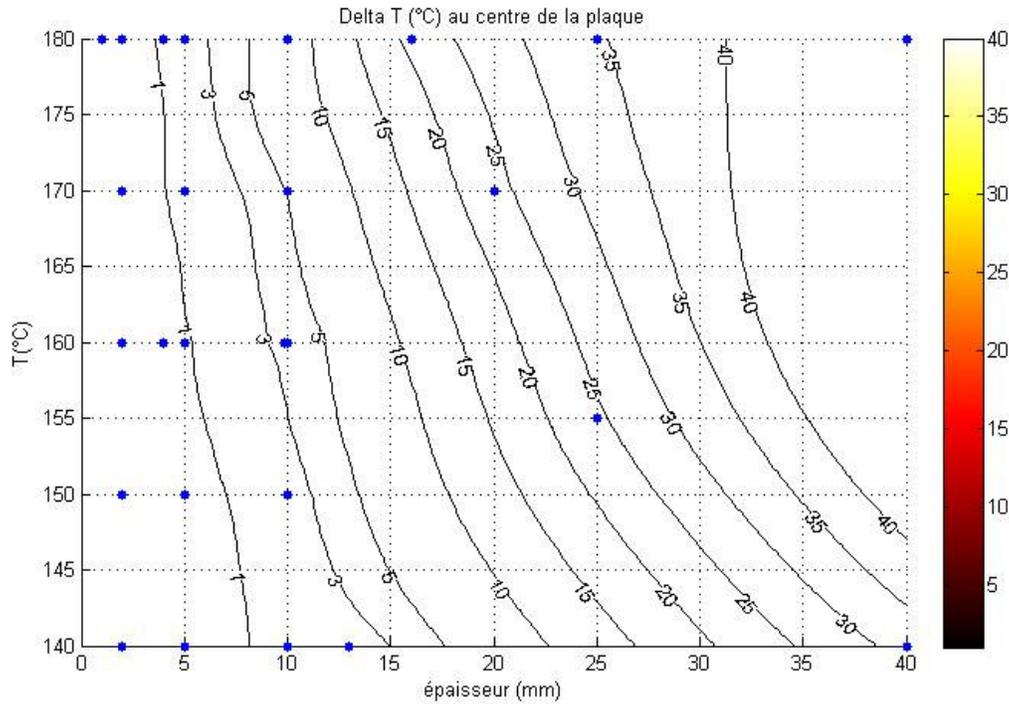


Fig. 2. Ecart (delta) température maximal atteint (au niveau du plan moyen) dans une pièce composite fibre de carbone /RTM6.

Pour conserver une température relativement constante dans l'épaisseur ( $\Delta T < 10^\circ\text{C}$ ), il faut soit cuire des plaques de moins de 10mm, soit cuire des plaques de moins de 21mm à des températures basses ( $140^\circ\text{C}$ ). Les plaques de plus de 21 mm d'épaisseur présenteront un écart de température de plus de  $10^\circ\text{C}$  lors de leur cuisson isotherme.

En dessous de 7mm d'épaisseur l'élévation de température est inférieure à  $5^\circ\text{C}$  à  $180^\circ\text{C}$ . En dessous de 10mm d'épaisseur l'élévation de température est inférieure à  $5^\circ\text{C}$  pour une cuisson à  $160^\circ\text{C}$ .

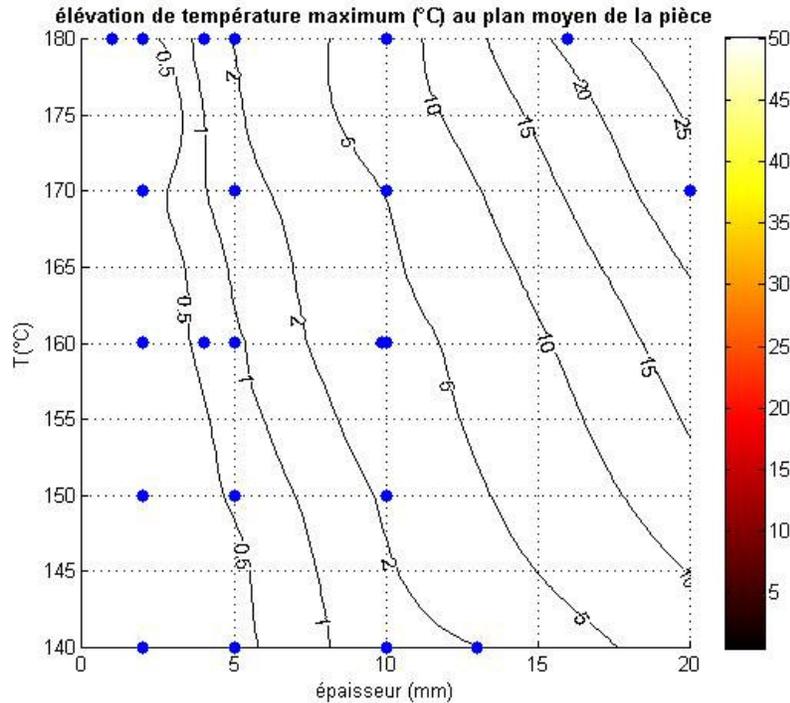


Fig. 3. Elévation de température maximal atteint (au niveau du plan moyen) dans une pièce composite fibre de carbone /RTM6.

Si l'épaisseur de la plaque fabriquée est inférieure à 4mm, l'élévation de température rencontrée dans la plaque (Fig. 3) est inférieure à  $1^\circ\text{C}$  (pratiquement).

Remarquons cependant que le calcul est très sensible aux données matériaux considérées.

#### 4. Conclusions

L'exothermie associée à la cuisson isotherme de la résine RTM6 a été cartographiée. Les cartes proposées permettent de définir des zones d'exclusion dans lesquelles la cuisson générerait des défauts préjudiciables à la qualité et aux performances mécaniques du composite fabriqué. Les graphiques proposés apportent une aide à l'ingénieur.

#### Remerciements

Les auteurs remercient la société TOSHIBA LIGHTING France qui par son support financier a permis la réalisation de ces travaux. En particulier, les auteurs sont reconnaissants à Mr. D.Goyot pour son soutien et l'attention portée à ce travail.

## Références

- [1] P.I. Karkanas, I.K. Partridge, « Modelling the cure of a commercial Epoxy resin for applications in resin transfer molding », Polymer International, 1996, vol. 41, p. 183-191.
- [2] P.I. Karkanas, I.K. Partridge , « Cure modelling and monitoring of epoxy/amine resin Systems I. Cure Modeling », Journal of applied Polymer Science, 2000, vol. 77, p. 1419-1431.
- [3] P.I. Karkanas, I.K. Partridge , « Cure modelling and monitoring of epoxy/amine resin Systems II. Network formation and chemoviscosity modelling », Journal of applied Polymer Science, 2000, vol. 77, p. 2178-2188.
- [4] F. Berthet, « Comparaison des cinétiques de réaction de la résine RTM6 au travers des diagrammes TTT » Revue des composites et des matériaux avancés. Volume 20 – n° 1/2010, page 25 à 40
- [5] S. Nakouzi et col., « Curing simulation of composites coupled with infrared heating », Int J Mater Form (2010) Vol. 3 Suppl 1:587 – 590.
- [6] J.M. Balvers, H.E.N. Bersee, A. Beukers, « Determination of cure Dependant properties fot curing simulation of thick walled Composites », AIAA 2008, 7-8 April 2008, Schaumburg,IL, 15p
- [7] S. Nakouzi, J. Pancrace, F. M. Schmidt, Y. Le Maout and F. Berthet, “Curing Simulation of Composites Coupled with Infrared Heating”, International Journal of Material Forming Volume 3, Supplement 1, 587-590, DOI: 10.1007/s12289-010-0838-
- [8] S. Nakouzi, J. Pancrace, F. M. Schmidt, Y. Le Maout and F. Berthet, ”Simulation du chauffage infrarouge des composites”, MATERIAUX 2010 – 18-22 octobre 2010 – Nantes, France, 11p.
- [9] D. Lecoite, « Caractérisation et simulation des processus de transferts lors d'injection de résine pour le processus RTM. », Thèse de l'Ecole doctorale sciences pour l'ingénieur de Nantes, 1999.
- [10] S. Nakouzi et col., « Infrared Curing simulation of liquid composites molding », à paraître ESAFORM 2011.