



**HAL**  
open science

# La mesure des contraintes résiduelles dans les matériaux composites par la méthode du trou incrémental : influence de l'échauffement local

Aboubakar Sedick Ibrahim Mamane, Sylvain Giljean, Benoit Gachet, Gildas l'Hostis, Marie-José Pac

## ► To cite this version:

Aboubakar Sedick Ibrahim Mamane, Sylvain Giljean, Benoit Gachet, Gildas l'Hostis, Marie-José Pac. La mesure des contraintes résiduelles dans les matériaux composites par la méthode du trou incrémental : influence de l'échauffement local. Congrès National de la Recherche des IUT, Université de Haute-Alsace (UHA) Mulhouse - Colmar [Université de Haute-Alsace (UHA)], Mar 2024, Mulhouse, France. hal-04619735

**HAL Id: hal-04619735**

<https://hal.science/hal-04619735v1>

Submitted on 21 Jun 2024

**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.

---

# La mesure des contraintes résiduelles dans les matériaux composites par la méthode du trou incrémental : influence de l'échauffement local

---

Aboubakar Sédick Ibrahim Mamane<sup>1</sup>

[aboubakar-sedick.ibrahim-mamane@uha.fr](mailto:aboubakar-sedick.ibrahim-mamane@uha.fr)

Benoît Gachet<sup>2</sup>

[Benoit.gachet@uha.fr](mailto:Benoit.gachet@uha.fr)

Gildas L'Hostis<sup>1</sup>

[gildas.lhostis@uha.fr](mailto:gildas.lhostis@uha.fr)

Sylvain Giljean<sup>1</sup>

[sylvain.giljean@uha.fr](mailto:sylvain.giljean@uha.fr)

Marie-José Pac<sup>1</sup>

[marie-jose.pac@uha.fr](mailto:marie-jose.pac@uha.fr)

<sup>1</sup> IUT, Université de Haute-Alsace  
Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, UR 4365

<sup>2</sup> Université de Haute-Alsace  
Laboratoire de Photochimie et d'Ingénierie Macromoléculaires, UR 4567

**Thèmes** – Matériaux – Mécanique

**Résumé** – *Les contraintes résiduelles ainsi que leur mesure sont un enjeu d'actualité pour optimiser la fonctionnalité et la durabilité des pièces en matériaux composites. Une plaque de composite carbone/époxy stratifié unidirectionnel obtenue par enroulement filamentaire dans des conditions industrielles est utilisée dans cette étude. Les contraintes résiduelles sont mesurées par la méthode du trou incrémental. L'approche numérique et expérimentale de la méthode ainsi que le couplage des deux sont présentés. Il a également été mis en évidence, par observation à l'aide d'une caméra infrarouge, que la température maximale générée pendant le perçage atteint 136°C. Des analyses de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) modulée ont montré une augmentation de la température de transition vitreuse de la matrice polymère ainsi que l'existence d'une enthalpie exothermique dans la zone de perçage : le perçage cause un changement des propriétés locales du composite. Ces résultats soulèvent une question tout à fait légitime et ouverte : quelle est l'influence de ces modifications locales sur les valeurs des contraintes résiduelles mesurées ?*

**Mots-Clés** – Contraintes résiduelles ; trou incrémental ; Simulation par éléments finis.

# 1 Introduction

Les propriétés d'une pièce mécanique dépendent du matériau utilisé mais aussi de la technique de fabrication employée. Garantir sa qualité nécessite la maîtrise ou au moins la connaissance de son état de contraintes résiduelles. Il s'agit de contraintes emprisonnées à l'intérieur du matériau sans aucune charge extérieure. Elles sont générées lors de la fabrication ou pendant la vie de la pièce et peuvent avoir des effets néfastes sur ses propriétés ou sa durabilité [1]. Dans ce travail, la méthode du trou incrémental est utilisée pour déterminer le niveau de contraintes résiduelles dans des échantillons de composites carbone/époxy. Une investigation a été menée sur les conséquences de l'échauffement dû au perçage sur les propriétés locales du composite.

## 2 Matériaux et méthode

### 2.1 Matériaux

Le matériau étudié est un composite carbone/époxy unidirectionnel fabriqué à partir de fibres de carbone T700SC-24000-50C et d'une résine époxy Araldite 1564. L'Aradur 3474 est utilisé comme agent de durcissement. Les échantillons sont des plaques composées de 12 couches d'une épaisseur d'environ 0,33 mm chacune. Les plaques ont été fabriquées par enroulement filamentaire selon la norme internationale ISO 1268-5 [2]. L'échantillon est d'abord laissé 16h à température ambiante pour durcir. Il est ensuite cuit à l'étuve pendant 10h à 70°C avant d'être refroidi à l'air ambiant.

### 2.2 Méthode

Les contraintes résiduelles sont mesurées par la méthode du trou incrémental (figure 1). Cette méthode consiste à percer par incréments successifs l'échantillon et à mesurer, pour chaque incrément, les déformations provoquées par la redistribution locale des contraintes. Ces déformations dites déformations de relaxation sont mesurées grâce à des rosettes de jauges spécifiques.

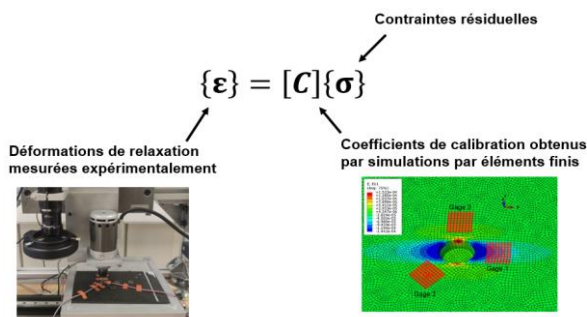


Figure 1 - Principe du calcul des contraintes résiduelles par la méthode du trou incrémental

Elles sont ensuite converties en contraintes en utilisant

l'équation présentée dans la figure 1. Cette conversion nécessite le calcul par simulation par éléments finis de coefficients dits coefficients de calibration [3].

## 3 Résultats des contraintes résiduelles

### 3.1 Déformations de relaxation mesurées

Les données d'acquisition brutes des déformations de relaxation mesurées sont présentées en figure 2.

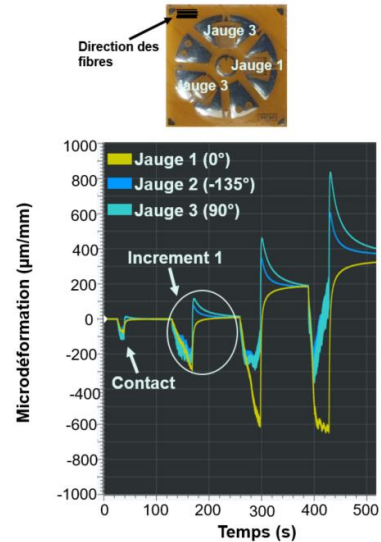


Figure 2 - Données d'acquisition brutes des déformations,

La jauge 1 est orientée dans le sens des fibres, la jauge 2 à -135° par rapport aux fibres et la jauge 3 à 90° par rapport aux fibres. Les conditions expérimentales sont données dans la table 1.

Table 1 - Conditions expérimentales du test du trou incrémental

Profondeur d'incrément	Diamètre perçage	Vitesse rotation	Vitesse avance	Température ambiant	Humidité
0,33 mm	2 mm	5000 tr/min	0,01 mm/s	22 ± 2°C	46 ± 2%

Chaque incrément est composé d'une phase de perçage et de relaxation pour permettre le refroidissement du matériau. Ce sont les déformations en fin de relaxation (table 2) qui sont utilisées pour le calcul des contraintes.

Table 2 : Déformations de relaxation mesurées en fin de relaxation pour les 2 premiers incréments

Incrément	1			2		
	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>3</sub>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>3</sub>
Déformation (µm/m)	5,5	17,4	32,4	128,0	163,0	197,0

La méthode du trou incrémental, dont la mesure se fait en surface, perd en fiabilité au fur et à mesure que le trou s'approfondi (principe de Saint-Venant). Ici, seuls les résultats des 2 premiers incréments sont présentés.

### 3.2 Contraintes résiduelles obtenues

A partir des déformations mesurées et des coefficients de calibration numériquement calculés [3], les contraintes résiduelles des 2 premiers incréments de l'échantillon sont calculées. Les résultats sont présentés dans la table 3.

Table 3 : Contraintes résiduelles mesurées pour les 2 premiers incréments

Incrément	1			2		
	$\sigma_x$	$\sigma_{xy}$	$\sigma_y$	$\sigma_x$	$\sigma_{xy}$	$\sigma_y$
Contraintes (MPa)	-2,5	0,0	-3,1	-177,4	5,1	-33,2

Comme on pouvait s'y attendre pour un échantillon unidirectionnel, les contraintes de cisaillement  $\sigma_{xy}$  sont faibles. Au 2<sup>ème</sup> incrément, la contrainte  $\sigma_x$  est largement plus importante que les autres. Cela s'explique par la présence des fibres dont la direction longitudinale correspond à la direction x considérée. La connaissance de cet état de contraintes peut être très intéressante pour améliorer le procédé de fabrication ou pour optimiser le dimensionnement des pièces.

## 4 Conséquences de l'échauffement dû au perçage

### 4.1 Mesure du champ thermique

Le champ de température de l'échantillon a été mesuré tout au long du test de trou incrémental à l'aide d'une caméra infra-rouge (figure 3). Les résultats montrent une température maximale s'élevant à 136°C au niveau du trou pendant la phase de perçage (figures 3b). Pendant la phase de relaxation, le champ thermique est plus important dans le sens des fibres (figures 3c) du fait de la conductivité thermique du carbone. Après les 90 secondes de relaxation, l'échantillon refroidit (figure 3d) et revient à sa température d'avant perçage (figure 3a).

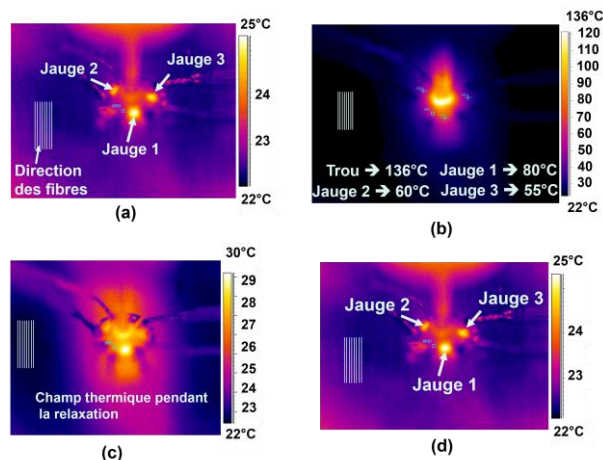


Figure 3 - (a) champ thermique à la fin des incréments précédents, (b) pendant le perçage, (c) pendant la relaxation, (d) à la fin de la relaxation

Compte tenu de la température de transition vitreuse relativement faible du matériau ( $T_g = 79^\circ\text{C}$ ) et des valeurs élevées de température pendant le perçage, il est tout à fait légitime de se poser la question des conséquences sur les propriétés locales du composite.

### 4.2 Résultats de la DSC modulée

Pour vérifier l'influence éventuelle de l'échauffement sur les propriétés locales du composite, des tests de DSC modulés ont été réalisés. Pour des raisons de précision, ces tests ont été réalisés sur un échantillon de matrice seule fabriqué dans les mêmes conditions que le composite. La  $T_g$  avant perçage est de  $101^\circ\text{C}$  et celle après perçage est de  $116^\circ\text{C}$  au niveau du trou. L'enthalpie exothermique résiduelle est de  $23 \text{ J/g}$  avant perçage et seulement  $12 \text{ J/g}$  après perçage. Cela signifie que le perçage provoque localement une augmentation de la  $T_g$  et une avancée de la polymérisation.

## 5 Conclusions

Ce travail présente la mesure des contraintes résiduelles par la méthode du trou incrémental. L'aspect expérimental de la méthode avec la mesure des déformations de relaxation, son aspect numérique avec le calcul des coefficients de calibration et le couplage des 2 pour déterminer les contraintes résiduelles ont été présentés dans le cas d'un composite carbone/époxy unidirectionnel. La mesure du champ thermique pendant le perçage a montré une température atteignant les  $136^\circ\text{C}$  au niveau du trou. Des tests de DSC modulés ont montré une évolution locale de la  $T_g$  et de la polymérisation. Cette réorganisation locale du matériau pourrait avoir une influence sur la valeur des contraintes mesurées. Toutefois, des études plus approfondies sont nécessaires pour vérifier cette hypothèse.

## Références

- [1] P. P. Parlevliet, H. E. N. Bersee, et A. Beukers, « Residual stresses in thermoplastic composites – a study of the literature. Part III: Effects of thermal residual stresses », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, n° 6, p. 1581-1596, juin 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2006.12.005.
- [2] « Standard - Fibre-reinforced plastics - Methods of producing test plates - Part 5: Filament winding ISO 1268-5 », Svenska institutet för standarder, SIS. Consulté le: 28 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sis.se/produkter/gummi-och-plastindustri/armerad-plast/iso12685/>
- [3] A. S. Ibrahim Mamane, S. Giljean, M.-J. Pac, et G. L'Hostis, « Optimization of the measurement of residual stresses by the incremental hole drilling method. Part I: Numerical correction of experimental errors by a configurable numerical-experimental coupling », *Compos. Struct.*, vol. 294, p. 115703, août 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115703.