

# Évaluation de la limite de fatigue des Composites à Matrice Organique CMO : Vers des nouvelles approches en auto-échauffement

## *Evaluation of the fatigue limit of Polymer-Matrix Composites PMC: Towards new approaches in self-heating*

Walid Harizi<sup>1</sup>, Imen Gnaba<sup>1</sup> et Zoheir Aboura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : Département Ingénierie Mécanique, Laboratoire Roberval  
Université de Technologie de Compiègne  
CS 60319, 60203 Compiègne Cedex  
[walid.harizi@utc.fr](mailto:walid.harizi@utc.fr), [imen.gnaba@utc.fr](mailto:imen.gnaba@utc.fr) et [zoheir.aboura@utc.fr](mailto:zoheir.aboura@utc.fr)

### Résumé

En plus de la température stabilisée, classiquement utilisée en auto-échauffement, cette étude novatrice propose d'estimer la limite de fatigue de composites à matrice organique (CMO) monolithiques grâce à d'autres grandeurs physiques : la réponse électrique du transducteur piézoélectrique embarqué à cœur et la réponse piézorésistive de CMO à base de carbone. De même, l'étude stipule une nouvelle approche automatique (basée sur le concept de calcul des distances) et objective (pas besoin d'une visualisation de la courbe expérimentale afin d'ajuster les deux régimes linéaires), nommée méthode de coude (*Knee method*), afin d'automatiser la détermination de la limite de fatigue. Les valeurs obtenues ont été confrontées à celles évaluées en fatigue classique, les résultats sont en bonne adéquation.

### Abstract

In addition to the stabilized temperature, classically used in self-heating, this innovative study proposes to estimate the fatigue limit of monolithic polymer-matrix composites (PMC) using other physical magnitudes: the electrical response of the embedded piezoelectric transducer and the piezoresistive response of carbon-based PMC. Similarly, the study stipulates a new automatic approach (based on the concept of distance calculation) and objective (no need for visualization of the experimental curve in order to adjust the two linear regimes), called the Knee method, in order to automate the determination of the fatigue limit. The obtained values were compared with those evaluated in classical fatigue, the results are in good agreement.

**Mots Clés :** Composites à matrice organique ; limite de fatigue ; réponses électrique et piézorésistive ; méthode de coude.  
**Keywords:** Polymer-Matrix Composites; fatigue limit; electrical and piezoresistive responses; Knee method.

## 1. Introduction

En essais d'auto-échauffement, la grandeur la plus utilisée est la température stabilisée à chaque bloc de chargement cyclique. Ainsi, deux méthodes ont vu le jour : la méthode de *Luong* (TCM : *Two Curves Method*) basée sur le concept d'intersection de deux régimes linéaires, et la méthode de *Risitano* (OCM : *One Curve Method*) définissant l'intersection de la deuxième asymptote avec l'axe des abscisses comme étant la limite de fatigue. L'originalité de cette étude, portant sur l'auto-échauffement de CMO, réside dans les points suivants :

- Au sein des CMO SMART (intégrant au minimum un capteur piézoélectrique à cœur), la limite de fatigue a été évaluée non seulement par la variation de leur température stabilisée mesurée en surface, mais aussi grâce à une autre grandeur physique qui est la variation de la capacité électrique du transducteur embarqué [1].
- La réponse piézorésistive (variation de la résistance électrique) d'un CMO en carbone/PPSU (polyphénylsulfone) a été utilisée, pour la première fois, en auto-échauffement pour une évaluation rapide de sa limite de fatigue [2,3].
- Une nouvelle méthode d'évaluation de la limite de fatigue de CMO en auto-échauffement a été proposée : méthode de coude "*Knee method*". Cette dernière a été appliquée sur une

régression linéaire, exponentielle et polynomiale d'ordre 3 avec enrichissement des données obtenues en température et capacité stabilisées pour des CMO en flexion 4-points. Les résultats obtenus par la méthode de coude ont été comparés à ceux évalués par la méthode TCM de *Luong* [4].

## 2. Auto-échauffement de CMO en verre/polyester intégrant un capteur PVDF à cœur

Une campagne d'essais en auto-échauffement a été réalisée sur des éprouvettes de dimensions  $300 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$  découpées à partir des plaques CMO en verre/polyester fabriquées par infusion avec une fraction volumique en fibres  $V_f = 50\%$ . Deux types d'éprouvettes CMO ont été caractérisées : vierges et Smart. Chaque éprouvette Smart intègre à son centre un transducteur piézopolymère PVDF (Polyfluorure de vinylidène). Le dispositif expérimental et le chargement mécanique en auto-échauffement ont été détaillés à la référence [1]. Les variations typiques de la température stabilisée  $\Delta T$  (courbe rouge) et la capacité stabilisée  $\Delta C$  (courbe bleue) au sein de CMO Smart sont illustrées à la Fig. 1a. Le suivi de la température a été assuré jusqu'à la ruine finale des échantillons, alors que la capacité tend vers de valeurs aberrantes à la fin du 11<sup>ème</sup> bloc due à une défaillance des fils de connexion avec le capteur PVDF. Pour les deux grandeurs, une stabilisation est assez marquée surtout durant les premiers cycles de chargement cyclique où l'endommagement est assez faible. La Fig. 1b illustre le comportement mécanique enregistré sur les échantillons CMO vierges couplé à la variation de leur température. Pour les deux CMO, quand l'endommagement s'accroît, les échantillons ne parviennent plus à atteindre leurs valeurs initiales en température et capacité lorsqu'ils sont maintenus à une charge nulle pendant 10 minutes.

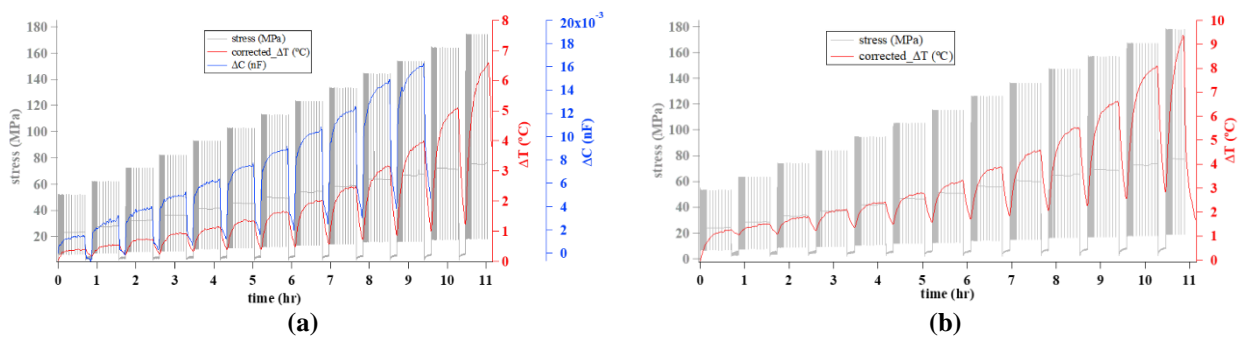


Fig. 1. a) Variation de la température et de la capacité électrique de CMO Smart, b) variation de la température au sein de CMO vierges, durant des essais d'auto-échauffement.

En traçant la variation de la température stabilisée en fonction de la contrainte maximum par bloc, pour les éprouvettes CMO Smart et vierges à la Fig. 2a et b, respectivement, deux régimes linéaires maximisant le coefficient de corrélation  $R^2$  décrivent bien la tendance de deux courbes. L'intersection de ces deux régimes est à **128,2 MPa** pour les Smart et **125,6 MPa** pour les vierges. La différence entre les deux valeurs est de 2,6 MPa l'équivalent d'un écart de **2%** uniquement. Ce résultat permet donc d'estimer la limite de fatigue en traction-traction à 2Hz de CMO verre/polyester et de confirmer la non-intrusivité des transducteurs piézoélectriques PVDF embarqués vu qu'ils ne dégradent pas l'estimation de cette grandeur. Le même travail a été réalisé, mais cette fois en se basant sur la variation de la capacité stabilisée  $\Delta C$  en fonction de la contrainte maximum (Fig. 3). L'intersection de deux régimes linéaires donne une valeur de **116,67 MPa**, donc une différence de **9%** par rapport à la limite de fatigue estimée par la variation de la température stabilisée sur les mêmes éprouvettes CMO Smart. Il faut néanmoins noter que l'évolution à deux régimes de la courbe  $(\Delta C - \sigma_{max})$  n'est pas aussi évidente que celle de la courbe  $(\Delta T - \sigma_{max})$ . Ceci est principalement dû au comportement complexe de la mesure électrique, car cette grandeur physique n'est pas uniquement liée à la variation de la température mais aussi à l'état de déformation triaxial du matériau.

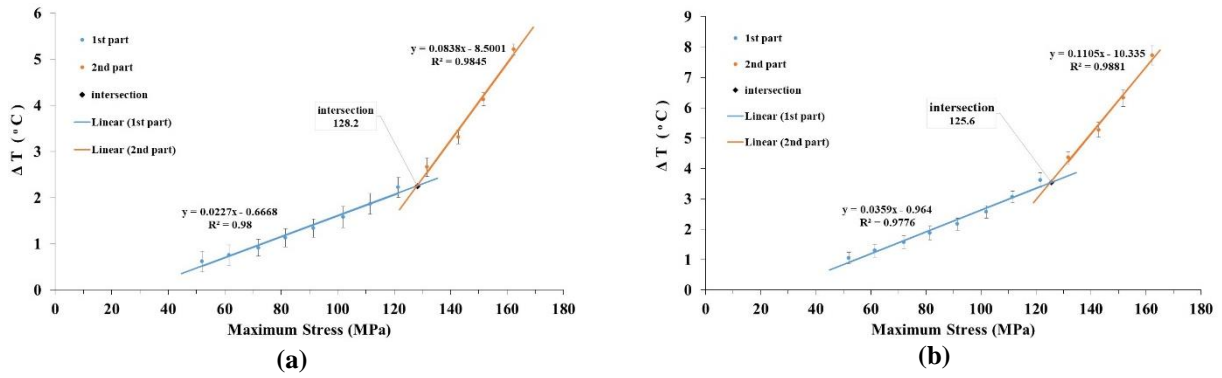


Fig. 2.  $\Delta T$  stabilisée en fonction de la contrainte maximum au sein de CMO Smart (a) et vierges (b).

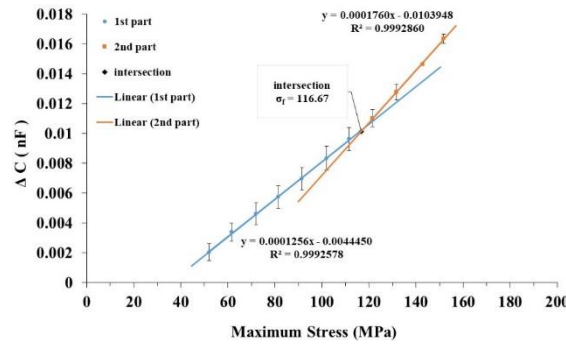


Fig. 3. Capacité stabilisée  $\Delta C$  en fonction de la contrainte maximum obtenue sur de CMO Smart en auto-échauffement.

### 3. Auto-échauffement de CMO en carbone/PPSU

De la même manière, des éprouvettes CMO en carbone/PPSU ( $250 \times 25 \times 3 \text{ mm}^3$ ,  $V_f = 40\%$ ) ont été découpées et caractérisées en auto-échauffement sur une machine hydraulique Instron 1343. Le protocole expérimental et le chargement mécanique ont été détaillés aux références [2,3]. La température stabilisée et la résistance stabilisée en fonction de la contrainte maximum pour six échantillons CMO en carbone/PPSU sont illustrées à la Fig. 4a et b, respectivement. La première donne une limite de fatigue de **273 MPa** alors que la deuxième est plus conservatrice avec une valeur de **225 MPa**, donc une réduction de **17,5%** par rapport à la limite évaluée en fonction de la température. Afin de valider ces deux limites, nous avons sélectionné la valeur la plus défavorable à notre matériau (celle évaluée par la température stabilisée puisqu'elle est la plus élevée) et nous avons appliqué une série d'essais de fatigue classique à  $\sigma_{max} = 273 \text{ MPa}$ ,  $R = 0,1$  et  $f = 2 \text{ Hz}$ . Toutes les éprouvettes testées ont pu dépasser le seuil de 2 millions de cycles, valeur imposée pour l'arrêt de la machine hydraulique, sans rupture.

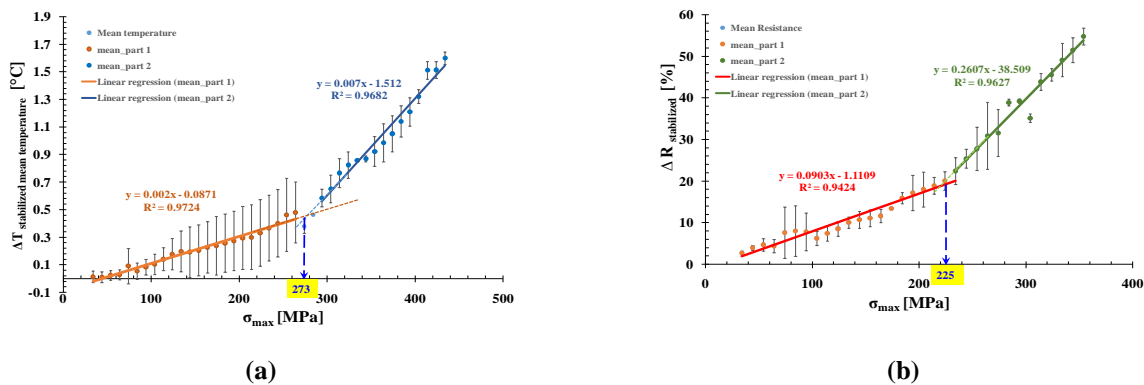
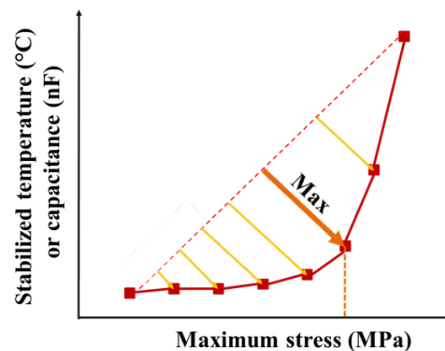


Fig. 4. Estimation de la limite de fatigue en utilisant la variation de la (a) température et (b) la résistance électrique, toutes les deux stabilisées.

#### 4. Nouvelle méthode d'estimation de la limite de fatigue en auto-échauffement : méthode de coude appliquée sur de CMO en verre/polyester en flexion 4-points

Les résultats qui ont été présentés précédemment se basent sur l'utilisation du concept de l'intersection de deux régimes linéaires pour une estimation de la limite de fatigue de CMO, que ça soit en température stabilisée, capacité stabilisée ou encore la résistance stabilisée. Il s'agit donc de la méthode de *Luong* améliorée par le concept de maximisation du coefficient de corrélation  $R^2$ . Cependant, l'ajustement du coefficient de corrélation  $R^2$  s'avère, souvent, compliqué et subjectif. Il est donc plus pertinent de développer une nouvelle approche pour une évaluation **objective** de l'intersection entre ces deux régimes. De même, la tendance qui relie ces points expérimentaux peut suivre une multitude d'interpolation : une loi exponentielle, polynomiale, linéaire entre deux points successifs, etc. Donc nous sommes censés trouver une méthode polyvalente qui peut s'appliquer sur toutes ces tendances mathématiques régissant les points expérimentaux. Pour ce faire, nous avons proposé durant la thèse de doctorat de Loan DOLBACHIAN une nouvelle approche **originale** (Fig. 5), elle consiste à :

- (1) Tracer une ligne droite entre le premier point et dernier point de la base expérimentale acquise durant les tests d'auto-échauffement. Cette base est constituée des valeurs en température stabilisée, capacité stabilisée et/ou en résistance stabilisée, en fonction de la contrainte maximum ou contrainte moyenne.
- (2) Ensuite, appliquer la régression souhaitée (exponentielle, polynomiale ou autres) sur tous les points formant la base expérimentale, à l'exception de la régression linéaire qui doit être actualisée pour chaque paire des points successifs.
- (3) Enrichir la base expérimentale par d'autres points qui doivent nécessairement être régis par la même loi d'interpolation définie à l'étape (2). Le nombre de points ajoutés dépend de la précision souhaitée sur la limite de fatigue.
- (4) Calculer la distance perpendiculaire entre chaque point (expérimental OU celui ajouté pour enrichir la base) de coordonnées  $(x_i, y_i)$  et la droite définie à l'étape (1). L'abscisse  $x_i$  du point qui donne une distance maximum est la limite de fatigue.




---

##### Algorithm 1 : Knee method algorithm

---

- 1: Plot the stabilized temperature (or capacitance) versus the maximum load (or stress)
- 2: Plot a line from the first to last points:  $Ax + By + C = 0$
- 3: Retain the original data or fit it (linear, polynomial, exponential, ...)
- 4: **for** each point  $i$ : calculate the perpendicular distance from the point  $(x_i, y_i)$  to the previous line:

$$d_i = \frac{|Ax_i + By_i + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

- 5: Find the  $\max(d_i)$  and its  $x$  value:  $x_{max}$
  - 6: Determine the fatigue limit as: fatigue limit =  $x_{max}$
- 

Fig. 5. Principe et algorithme de la méthode de coude.

L'originalité de la méthode de coude réside dans deux points fondamentaux :

- ☞ Il s'agit d'une méthode automatique et objective : la méthode est programmée et l'utilisateur n'a pas à intervenir visuellement sur ses données expérimentales (calcul de distances entre un point et une droite).
- ☞ Ajouter des points enrichissants la base expérimentale est extrêmement original car il permet d'évaluer la limite de fatigue avec précision vu que cette grandeur pourrait se retrouver entre deux points expérimentaux consécutifs. La précision doit être ajustée en se basant sur la classe de précision (00, 0.5, 1 ou 2) de la cellule de force utilisée durant les essais d'auto-échauffement.

Des essais d'auto-échauffement en flexion 4-points ont été menés sur des échantillons en CMO verre/polyester de dimensions  $250 \times 50 \times 5 \text{ mm}^3$  ( $V_f = 50\%$ ) en utilisant une machine hydraulique Landmark MTS équipée d'une cellule de force 5 kN. Le dispositif expérimental et le chargement mécanique ont été détaillés à la référence [4]. La variation de la température stabilisée de CMO et la capacité stabilisée (d'un transducteur PZT intégré au centre) en fonction de la contrainte maximum est tracée à la Fig. 6a et b, respectivement. Avec les données en température, la tendance exponentielle est plus prononcée par rapport aux données en capacité électrique. Appliquée sur les données de la Fig. 6a et b, la méthode TCM estime la limite de fatigue à **166 MPa** et **175 MPa** en utilisant la température et la capacité, respectivement. Dans ce qui suit, nous appliquerons notre nouvelle méthode (méthode de coude) et comparerons nos résultats avec les deux limites estimées par TCM (Fig. 6a et b) et la méthode d'angle maximum (dont le principe est illustré à la Fig. 6c). En température comme en capacité, la méthode de coude a été appliquée sur trois régressions mathématiques reliant les points expérimentaux : une régression linéaire entre chaque deux points consécutifs ; polynomiale et exponentielle, toutes les deux sur le jeu de données complet. La méthode d'angle maximum consiste à calculer l'angle formé entre l'axe horizontale (parallèle à l'axe des abscisses) et la droite qui relie chaque paire des points consécutifs évalués en auto-échauffement. Le point qui illustre la variation maximum de cet angle  $\Delta\theta_i = |\theta_{i+1} - \theta_i|$  est la limite de fatigue (Fig. 6c).

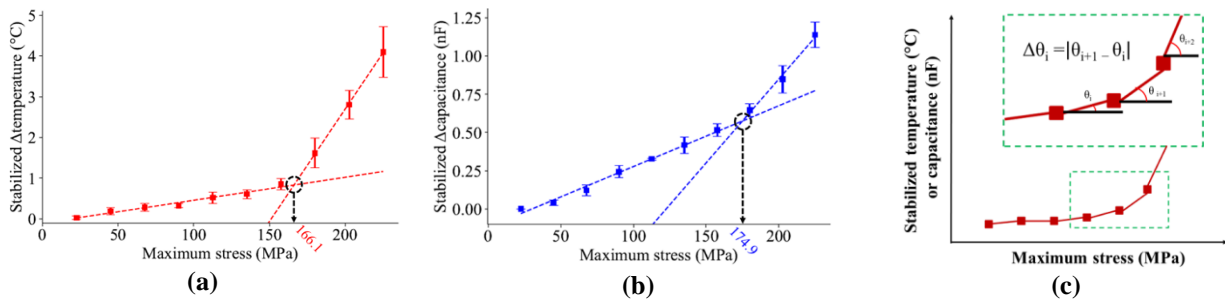


Fig. 6. Limite de fatigue estimée par TCM en fonction de la température (a), et la capacité électrique (b). Principe de la méthode d'angle maximum (c).

Le Tab. 1 résume les valeurs obtenues (en MPa) : La méthode de référence, l'intersection bilinéaire (TCM), a montré une valeur supérieure de 5,3 % pour les mesures de capacité, indiquant un écart relativement faible et offrant une confiance dans l'utilisation de cette quantité physique pour estimer la limite de fatigue. Comme mentionné précédemment, la mesure de la température a montré un comportement exponentiel clair avec des phases distinctes, facilitant l'utilisation de la méthode de l'angle. Il est bien documenté dans la littérature que si les données expérimentales démontrent un bon comportement bilinéaire, la détermination du point de changement de pentes devient assez simple. Cela explique l'écart significatif entre les résultats des mesures de capacité et de température en utilisant la méthode de différence d'angle. Lors de l'application de cette méthode à des données enrichies d'une manière polynomiale ou exponentielle, les résultats variaient significativement entre les mesures de capacité et de température, avec un écart de 22,3 %, indiquant l'invalidité de

l'utilisation de cette méthode sur des ensembles de données dérivées de l'ajustement de la courbe réelle. En ce qui concerne la nouvelle méthode développée et expliquée dans cette étude, méthode de coude, les résultats étaient remarquablement similaires pour les mesures de température et de capacité sur tous les ensembles de données, avec un écart maximum qui ne dépasse pas 0,6 % (en régression exponentielle).

Method \ Dataset	Original	Linear interpolation	Polynomial fitting	Exponential fitting
Bi-linear	174.9 166.1			
Angle	202.6 157.6		183.6 224.5	183.6 224.5
Knee	157.6 157.6	157.6 157.4	152.7 152.9	156.4 155.4

Tab. 1. Comparaison des limites de fatigue (MPa) estimées à partir des mesures de la capacité électrique (en bleu) et de la température (en rouge).

## 5. Conclusion

Dans cette étude, deux gradeurs physiques électriques (la capacité et la résistance) ont été utilisées, pour la première fois, en auto-échauffement afin d'estimer la limite de fatigue de CMO. Les valeurs obtenues ont été en accord avec celles évaluées à partir des températures stabilisées. De même, la nouvelle approche, méthode de coude, a été appliquée sur des CMO SMART en flexion 4-points. Les résultats obtenus sont prometteurs. Cependant, il serait pertinent d'appliquer cette approche sur d'autres CMO, soumis à des chargements cycliques en auto-échauffement à des fréquences et rapports de charges divers et variés, et évaluer ainsi la pertinence de cette approche en la comparant à des courbes S-N (courbes de Wöhler).

## Références

- [1] J. Najd, W. Harizi, Z. Aboura, E. Zappino, E. Carrera, Rapid estimation of the fatigue limit of Smart Polymer-Matrix Composites (PMC) using the self-heating tests, Composite Structures (2021). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115039>.
- [2] W. Harizi, R. Azzouz, Z. Aboura, A. Martins, Utilisation de la résistance électrique pour la détermination rapide de la limite d'endurance des composites thermoplastiques en carbone/PPSU lors des essais d'auto-échauffement, in: Compte Rendus Des JNC 21, 2019.
- [3] W. Harizi, R. Azzouz, A.T. Martins, K. Hamdi, Z. Aboura, K. Khellil, Electrical resistance variation during tensile and self-heating tests conducted on thermoplastic polymer-matrix composites, Composite Structures 224 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111001>.
- [4] L. Dolbachian, W. Harizi, I. Gnaba, Z. Aboura, Rapid fatigue limit estimation of smart polymer-matrix composite under self-heating bending tests using an innovative automatic approach: Knee method, International Journal of Fatigue 192 (2025) 108684. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108684>.