

# Modélisation de la durée de vie des matériaux composites CMO

**M. Kaminski<sup>a</sup>, F. Laurin<sup>a</sup>, J.-F. Maire<sup>a</sup>, R. Desmorat<sup>b</sup>**

a. ONERA The French Aerospace Lab, 29 avenue de la Division Leclerc, 92320 Châtillon

b. LMT Cachan, 61 Avenue du Président Wilson, 94230 Cachan

## Résumé

*Ce papier s'intéresse à la prévision de la durée de vie des matériaux composites. Après avoir expliqué les mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites, nous présentons les modèles de durées de vie cyclique et incrémental développés à l'Onera pour les composites tissés 3D CMO.*

**Mots clés :** fatigue, composite tissé 3 D CMO, modèles de durée de vie cyclique et incrémental.

## 1. Introduction

L'utilisation croissante des matériaux composites dans des applications structurales amènent les ingénieurs et chercheurs à considérer les sollicitations de fatigue comme une cause potentielle de rupture, même pour les structures pour lesquelles la fatigue n'est pas considérée comme un problème. En effet, les matériaux composites ont jusqu'à ces dernières années été considérés comme insensibles à la fatigue puisque les chargements perçus par les structures étaient trop faibles pour qu'ils initient un endommagement local pouvant conduire à la ruine de la pièce sous chargement répété. Or, l'amélioration croissante des méthodes de dimensionnement des composites et l'objectif de minimisation de la masse des aéronefs font que les pièces en composite sont de plus en plus soumises à des chargements en service proches de leur résistance statique, ce qui réduit les marges de dimensionnement sous chargement statique et induit une réduction importante de la durée de vie. Il est donc nécessaire de modéliser la réponse du matériau sous sollicitations de fatigue et de proposer des méthodes pour prévoir la durée de vie des pièces en composite. Pour ce faire, il est important dans un premier temps de comprendre les mécanismes d'endommagement qui pilotent la ruine des composites sous sollicitation de fatigue et de développer des méthodes de prévision de la durée de vie spécifiques à ces matériaux. Les modèles de durée de vie développés à l'Onera pour les composites tissés CMO sont présentés.

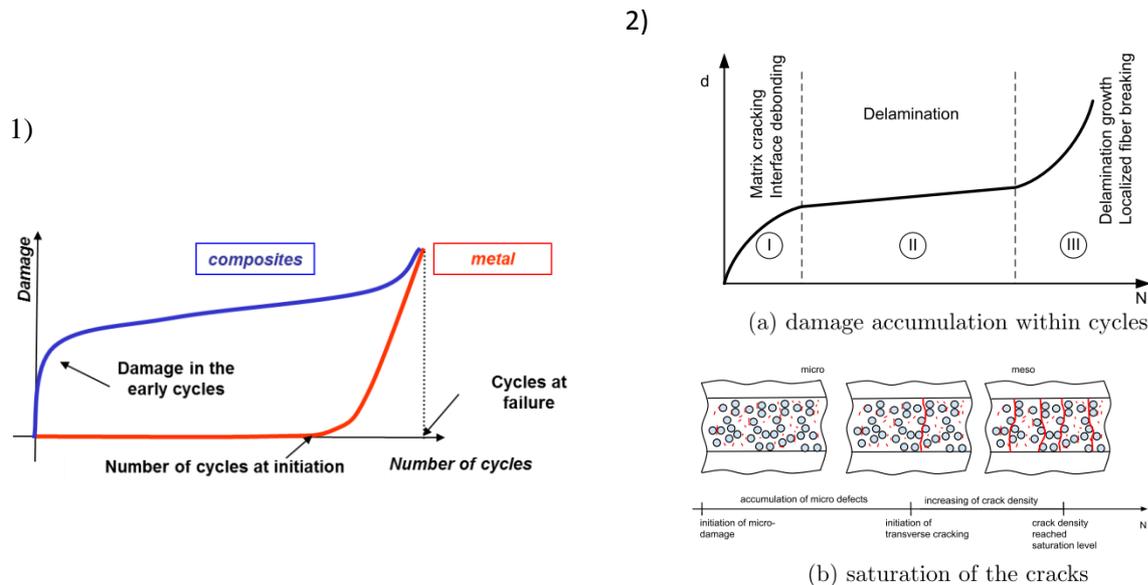
## 2. Les mécanismes d'endommagement en fatigue

### 2.1 Métal vs. Composites

Les matériaux métalliques et composites présentent des comportements différents sous des sollicitations de fatigue. Les composites sont connus pour avoir une meilleure résistance à la fatigue par rapport aux matériaux métalliques. Une comparaison entre l'évolution de l'endommagement dans les matériaux composites et les matériaux homogènes tels que les matériaux métalliques est présentée sur la Figure 1. Pour les matériaux métalliques, durant une grande partie de la durée de vie totale, la détérioration du matériau est progressive et invisible. La perte de rigidité n'est pas

significative durant la fatigue. Des petites fissures apparaissent, croissent progressivement et coalescent rapidement pour former une fissure macroscopique qui mène à la rupture de la pièce.

Dans les matériaux composites, l'endommagement démarre très tôt sous une sollicitation de fatigue, seulement après quelques centaines de cycles voire durant le premier cycle à un niveau de contrainte élevé. Cet endommagement précoce est suivi d'une dégradation progressive du matériau qui se traduit par une diminution progressive de sa rigidité. Ensuite, des endommagements plus sévères apparaissent comme des ruptures de fibres et une propagation instable du délaminage qui conduisent à la ruine catastrophique de la pièce.



**Figure 1 :** Représentation schématique de l'endommagement de fatigue 1) dans les métalliques (rouge) et les composites (bleu) et 2) description plus fine des mécanismes d'endommagement dans les composites à fibres longues durant une sollicitation de fatigue [23]

Ces différences entre les matériaux métalliques et composites impliquent de proposer et développer des méthodes de modélisation de la fatigue spécifiques à chacun. La prévision de l'amorçage d'une fissure est souvent suffisante pour un matériau métallique alors qu'il est nécessaire de suivre l'évolution des différents mécanismes d'endommagement dans les composites et d'estimer leurs effets sur le comportement du matériau et de la rupture (performances résiduelles). Les méthodes développées jusqu'à ce jour pour les matériaux métalliques ne sont pas adaptées aux matériaux composites à fibres longues qui demandent une description fine de leurs mécanismes d'endommagement. Les principaux mécanismes d'endommagement observés dans les composites à fibres longues sous chargement de fatigue sont : la fissuration matricielle, des décohésions à l'interface fibre/matrice, le délaminage, des ruptures de fibres et finalement la rupture globale. L'évolution de l'endommagement est non linéaire en fonction du nombre de cycles comme illustré sur la Figure 1B.

### 3. Modélisation de la prévision de durée de vie

#### 3.1 Les différents types de modélisation

Le comportement des matériaux composites sous sollicitation de fatigue fait l'objet de recherches depuis de nombreuses années. Les modèles développés peuvent être classés en trois catégories selon [1] :

- les modèles empiriques ([2],[3],[4],[5],[6],[7]), pour la plupart linéaires, ne prennent pas en compte les mécanismes spécifiques d'endommagement et les séquences de chargement. Ils fournissent le nombre de cycles à rupture. Ils nécessitent des campagnes expérimentales longues et coûteuses pour chaque empilement et cas de charge considérés.

- les modèles phénoménologiques sont basés sur des lois de dégradation empiriques de la rigidité ([8],[9],[10],[11],[12],[13],[14]) ou de la résistance ([15],[16],[17],[18],[19],[20]). Ces modèles ne prennent pas en compte l'histoire du chargement i.e. les états successifs de l'endommagement, la redistribution des contraintes, etc.

- les modèles d'endommagement progressif décrivent l'apparition progressive de fissures ou des délaminages. Ils font appel à plusieurs variables relatives aux effets du dommage (décohésion des interfaces, fissures matricielles, délaminage, etc.).

Dans la suite est présenté la méthodologie de prévision de la durée de vie proposée à l'Onera pour les composites tissés CMO qui fait partie de cette troisième catégorie de modèles. Cet exemple est intéressant car il a l'avantage de présenter le modèle dans deux versions complémentaires : une version cyclique et une version incrémentale comme détaillé ci-après.

### **3.2 Modèle pour la prévision de la durée de vie des composites tissés CMO**

Les matériaux composites tissés 3D CMO, de par leur architecture particulière, constituent une alternative aux matériaux stratifiés (tissé 2D ou d'unidirectionnel). En effet, l'usage de tissage 3D permet de lier les couches entre elles et d'éviter la propagation de délaminage sur des surfaces importantes. Ainsi, ce matériau présente de très bonnes propriétés résiduelles après impact. Ces matériaux innovants sont de plus en plus utilisés dans les turboréacteurs.

Un modèle de prévision de la durée de vie basée sur une loi d'évolution de cumul de l'endommagement en fonction du nombre de cycles ODM\_CMO a été proposée par l'Onera [21]. Plus récemment, ce modèle a été réécrit dans un formalisme incrémental *ODM*, c'est-à-dire un modèle où la loi de cumul de l'endommagement en fatigue est fonction du temps [22]. Ce type de formalisme permet de s'affranchir de la définition d'un cycle et permet donc de simuler des chargements spectraux complexes, aléatoires voire anisothermes, ce que ne peut pas faire un modèle en cycles.

Ces deux modèles de prévision de la durée de vie sont basés sur le modèle d'endommagement et de rupture ODM développé pour les matériaux tissés 3D à matrice organique qui est défini à l'échelle macroscopique afin de prévoir la tenue de structures représentatives de cas industriels réels (tels que des pieds d'aubes). Le comportement non-linéaire observé en traction pour un matériau tissé 3D CMO peut être décomposé en trois grandes phases, comme illustré sur la Figure 2 où sont présentés les principaux mécanismes intervenant au cours de chaque phase. La loi de comportement pour les CMO est basée sur la mécanique de l'endommagement continu où les variables internes traduisent les effets des différents endommagements. De par le fort contraste entre les propriétés mécaniques des constituants (fibre de carbone et matrice therm durcissable), les mécanismes de méso-fissuration sont pilotés par la microstructure. Ainsi, trois variables d'endommagement sont définies : (i)  $d_1$  qui représente les méso-dommages matriciels orientés sens chaîne (fissurations matricielles ou fissures intra-torons), (ii)  $d_2$  qui représente les méso-dommages matriciels orientés sens trame (fissurations matricielles ou fissures intra-torons) et (iii)  $d_3$  qui représente les décohésions inter-torons orientées dans la direction hors-plan du matériau.

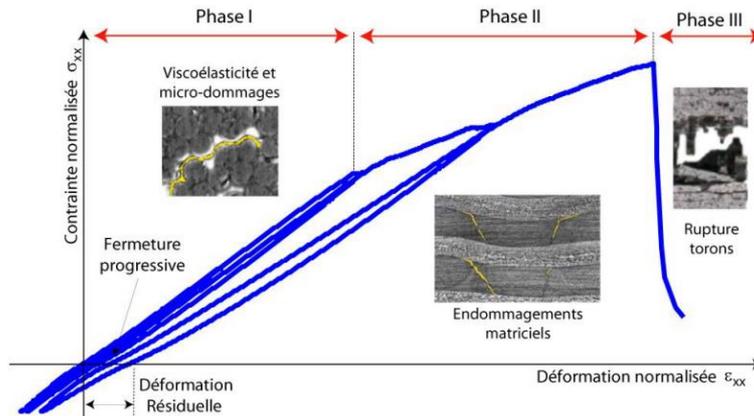


Figure 2 : Courbe contrainte / déformation d'un matériau tissé 3D CMO sous sollicitation de traction sens trame

Les trois variables d'endommagement ( $d_k$ ,  $k = 1, 2$  ou  $3$ ) sont fonction des forces motrices ( $y_k$ ,  $k = 1, 2$  ou  $3$ ) qui sont elles-mêmes définies en fonction de la partie positive de la déformation élastique.

Les mêmes mécanismes d'endommagement étant observés sous sollicitation statique ou de fatigue (mais avec des cinétiques d'évolution différentes)[24], la contribution de la loi de fatigue est simplement sommée à la contribution statique de l'endommagement dans les modèles de prévision de la durée de vie. Le principe de ces deux modèles, en cycles et incrémental, est résumé sur la Figure 3.

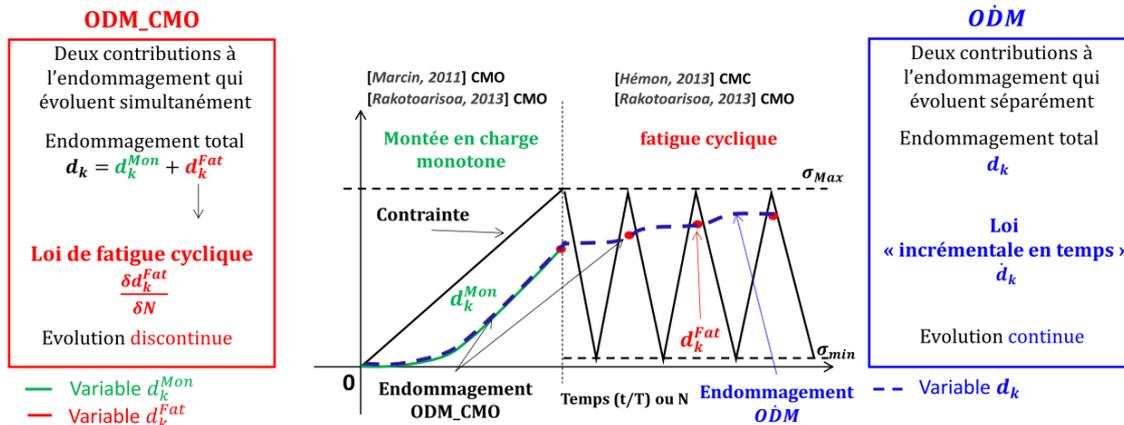


Figure 3 : Approche en cycles ODM\_CMO (rouge) et approche "incrémentale" ODM (bleue)

Pour le modèle cyclique ODM\_CMO, les forces motrices de l'endommagement matriciel pour les chargements monotones gouvernent également l'endommagement matriciel durant la fatigue  $d_k = d_k^{Mon}(\sqrt{y_{Max}}) + d_k^{Fat}(y_{Max}, R_{yk})$  ( $k = 1, 2, 3$ ) et l'évolution cyclique ( $N$  étant le nombre de cycles) de l'endommagement est donnée par :

$$\frac{dd_k^{Fat}}{dN} = (d_{\infty(k)} - d_k)^{\gamma_k} \left( \frac{((1-R_{yk})^{\beta_k} y_{Max(k)} - y_0^{Fat(k)})_+}{y_c^{Fat(k)}} \right)^{\delta_k} \quad \text{où } R_{yk} = \begin{cases} \frac{y_{min(k)}}{y_{Max(k)}} & \text{si } y_{Max(k)} > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

$y_0^{Fat(k)}$  est le seuil d'endommagement en fatigue,  $y_{Max(k)}$  est la force motrice maximale et  $y_c^{Fat(k)}$ ,  $\gamma_k$ ,  $\beta_k$ ,  $\delta_k$  sont des paramètres matériaux. L'endommagement atteint la valeur  $d_{\infty(k)}$  à saturation. L'introduction du rapport de charge en force motrice  $R_y$  permet de décrire les effets de contrainte moyenne. La prévision de la durée de vie est possible seulement si un critère de rupture est défini dans le modèle. Il est défini dans [21] comme l'apparition de la première rupture de torons. La

rupture progressive des autres torons va engendrer le caractère adoucissant du comportement (phase III de la Figure 2).

Dans la version incrémentale du modèle de fatigue ODM, la loi d'évolution des endommagements est décomposée en deux contributions majeures :

$$\begin{aligned} \dot{d}_k = & (d_{sat(k)} - d_k) \left\langle \frac{\varepsilon_{eq(k)Max} - \varepsilon_{0(k)}^m}{S_{m(k)}} \right\rangle_+^{s_{m(k)}} \langle \dot{\varepsilon}_{eq(k)Max} \rangle_+ \\ & + (d_{sat(k)} - d_k)^{y_k} \left\langle \frac{f_k}{S_{f(k)}} \right\rangle_+^{s_{f(k)}} [\langle \dot{\varepsilon}_{eq(k)} \rangle_+ - \dot{\varepsilon}_{eq(k)Max}] \end{aligned} \quad (2)$$

Le choix a été fait d'utiliser les déformations équivalentes  $\varepsilon_{eq(k)}$  déterminées comme  $\varepsilon_{eq(k)} = \sqrt{\frac{2y_k}{C_{kk}^0}}$  où  $C_{kk}^0$  est le tenseur de rigidité initial. La première partie de l'équation (2) est activée uniquement lors du chargement statique, c'est-à-dire pour des chargements supérieurs au maximum des chargements appliqués au matériau jusqu'à présent, soit en vérifiant la condition ( $\dot{\varepsilon}_{eq(k)Max} > 0$ ) et lorsque le niveau de chargement est supérieur au seuil d'endommagement statique  $\varepsilon_{0(k)}^m$ . La deuxième partie est uniquement activée pour des chargements de fatigue pour lesquels le niveau de chargement peut induire de l'endommagement (soit la condition  $\dot{\varepsilon}_{eq(k)} > 0$ ) et est supérieur au seuil de fatigue  $\varepsilon_{0(k)}^f$ . Les deux parties ne peuvent être activées en même temps. Les effets de la contrainte moyenne qui ne sont pas naturellement décrits par le modèle, sont pris en compte au moyen d'une fonction critère  $f_k = \varepsilon_{eq(k)} - m_{kk} \check{\varepsilon}_{kk}^e - \varepsilon_{0(k)}^f$  où le coefficient  $m_{kk}$  est un paramètre matériau à identifier [25]. L'originalité de ce travail a été de proposer une moyenne évolutive, la moyenne évoluant à chaque pas de temps en même temps que le chargement. Ainsi, la moyenne proposée tient compte de toute l'histoire du chargement. Elle fait appel à la moyenne évolutive des composantes 11, 22 et 33 du tenseur des déformations élastiques notées  $\check{\varepsilon}_{kk}^e$  avec  $kk$  la composante correspondant au mécanisme en jeu selon l'équation  $\check{\varepsilon}_{kk}^e(t) = \frac{1}{\varepsilon_{kk}^{e(ac)}} \int_0^t \varepsilon_{kk}^e |\dot{\varepsilon}_{kk}^e| d\tau$  avec  $\varepsilon_{kk}^{e(ac)}(t) = \int_0^t |\dot{\varepsilon}_{kk}^e| d\tau$ . Pour le moment, le modèle ne prend pas en compte les déformations visqueuses contrairement au modèle cyclique [21]. Cela sera nécessaire dès lors que des chargements en cisaillement ou hors-plan seront appliqués puisque la viscosité est une des sources significatives de non-linéarité du comportement du matériau. Le modèle ODM permet également de construire un modèle en cycles à partir de l'intégration analytique de la loi d'endommagement temporelle. Ces deux approches très complémentaires conduisent donc à des résultats quasi identiques. Dans le modèle ODM, le critère de durée est plus simple que pour ODM\_CMO [21], la durée de vie est estimée lorsqu'un des endommagements mésoscopiques atteint une valeur critique, *i.e.* équivalent à une perte de fonctionnalité de la pièce due à une perte de raideur trop importante. Les modèles ont été implantés dans le code éléments finis Abaqus et sont en cours de validation sur structures.

### 3. Conclusion

Il n'existe pas de méthode unique pour la prévision de la durée de vie pour l'ensemble des matériaux composites. Afin de proposer un modèle de durée de vie, il est important de bien comprendre les mécanismes d'endommagement. Il a été montré que les mécanismes d'endommagement sont les mêmes sous sollicitation statique et de fatigue. Ce constat nous a permis d'étendre à la fatigue les modèles de comportement existants à l'Onera, en l'occurrence ici pour les matériaux tissés 3D CMO, et éprouvés depuis de nombreuses années. Ces modèles ont été implantés dans un code éléments

finis commercial et sont en cours de validation sur pièces structurales. Différents points mériteront d'être introduits et approfondis comme l'ajout de la viscosité dans le modèle incrémental, une réflexion sur le critère de rupture et un effort plus important pour réduire les temps de calcul.

## Références

- [1] Degrieck J. and Van Paepegem W., Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials: Review, *Applied Mechanics Reviews*, 54 (2001) 279-300.
- [2] Hashin Z, Rotem A. A fatigue criterion for fibre reinforced composite materials. *J Compos Mater* 1973;7(4):448-64.
- [3] Reifsnider KL, Gao Z. A micromechanics model for composites under fatigue loading. *Int J Fatigue* 1991;13(2):149-56.
- [4] Philippidis TP, Vassilopoulos AP. Fatigue strength prediction under multiaxial stress. *J Compos Mater* 1999;33(17):1578-99.
- [5] Bond IP. Fatigue life prediction of GRP subjected to variable amplitude loading. *Composites Part A* 1999;30(8):961-70.
- [6] Liu Y, Mahadevan S. Stochastic fatigue damage modeling under variable amplitude loading. *Int J Fatigue* 2007;29(2007):1149-61.
- [7] Vassilopoulos AP, Georgopoulos EF. Novel computational methods for fatigue life modeling of composite materials. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Switzerland; Technological Educational Institute of Kalamata, Greece. In: Vassilopoulos AP, editor. *Fatigue life prediction of composites and composite structures*. Oxford, Cambridge, New Delhi: Woodhead Publishing Limited. p. 139-73. ISBN 978-1-84569-525-5.
- [8] Sidorff F, Subagio B. Fatigue damage modelling of composite materials from bending tests. In: Matthews FL, Buskell NCR, Hodgkinson JM, Morton J, editor. *Sixth international conference on composite materials (ICCM) & Second European conference on composite materials (ECCM)*, London (UK); 1987. p.4.32-4.39.
- [9] Kawai M. Damage mechanics model for off-axis fatigue behavior of unidirectional carbon fiber-reinforced composites at room and high temperatures. In: Massard T, Vautrin A, editor. *Twelfth international conference on composite materials (ICCM)*, Paris, France; 1999. p. 322.
- [10] Yang JN, Jones DL, Yang SH, Meskini A. A stiffness degradation model for graphite/epoxy laminates. *J Compos Mater* 1990;24(7):753-69.
- [11] Brønsted P, Lilholt H, Andersen SI. Fatigue damage prediction by measurements of the stiffness degradation in polymer matrix composites. In: Degallaix S, Bathias C, Fougères R, editor. *International conference on fatigue of composites. Conference proceeding*, Paris, France, La Société Française de Métallurgie et de Matériaux; 1997. p. 370-7.
- [12] Hwang W, Han KS. Fatigue of composites – fatigue modulus concept and life prediction. *J Compos Mater* 1986;20(2):154-65.
- [13] Ahmadzadeh GR, Shirazi A, Varvani-Farahani A. Damage assessment of CFRP [90/±45/0] composite laminates over fatigue cycles. *Appl Compos Mater* 2011;18:559-69.
- [14] Varvani-Farahani A, Haftchenari H, Panbechi M. An energy-based fatigue damage parameter for off-axis unidirectional FRP composites. *Compos Struct* 2007;79(2007):381-9.
- [15] Shokrieh MM, Lessard LB. Multiaxial fatigue behaviour of unidirectional plies based on uniaxial fatigue experiments, Part I: modelling. *Int J Fatigue* 1997;19(3):201-7.
- [16] Broutman LJ, Sahu S. A new theory to predict cumulative fatigue damage in fiberglass reinforced plastics. In: *Composite materials: testing and design (second conference)*, ASTM (American Society for Testing and Materials) STP 497; 1972. p. 170-88.
- [17] Barnard PM, Butler RJ, Curtis PT. The strength-life equal rank assumption and its application to the fatigue life prediction of composite materials. *Int J Fatigue* 1988;10(3):171-7.
- [18] Schaff JR, Davidson BD. Life prediction methodology for composite structures (Part I—constant amplitude and two-stress level fatigue; Part II—spectrum fatigue). *J Compos Mater* 1997;31(2):128-81.
- [19] Philippidis TP, Passipoularidis VA. Residual strength after fatigue in composites: theory vs. experiment. *Int J Fatigue* 2007;29:2104-26.
- [20] Mivehchi H, Varvani-Farahani A. Temperature dependence of stress-fatigue life data of FRP composites. *Mechanics of composite materials*, vol. 47, No. 3, July, 2011.
- [21] Rakotoarisoa, C., *Prévision de la durée de vie en fatigue des composites à matrice organique tissés interlock*. 2013. Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne.
- [22] Angrand, L., *Lois d'endommagement incrémentales pour la prévision de durée de vie des composites tissés à matrice organique*. 2016. Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [23] Vasiukov, D., Panier, S., Hachemi, A., *Direct method for life prediction of fibre reinforced polymer composites based on kinematic of damage potential*, *International Journal of Fatigue*, vol. 70, p.289-296, 2015
- [24] Henry, J., *Mécanismes d'endommagement en fatigue dans les tissus multicouches 3Ds*, Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne
- [25] Desmorat R., Angrand L., Gaborit P., Kaminski M., Rakotoarisoa C., *On the introduction of a mean stress in kinetic damage evolution laws for fatigue*, *International Journal of Fatigue*, 2015