

Endommagement en fatigue

II.1 Les différents types d'endommagement

Lorsqu'un défaut ou un endommagement est présent au sein d'un composite stratifié, la matrice et l'interface fibre/matrice sont les premières à se dégrader en commençant par des défauts microscopiques comme la micro-fissuration de la matrice ou la décohésion fibre/matrice comme le montrent les figures 17a et figure 18.

Les défauts deviennent plus importants, changent d'échelle et de vitesse d'apparition avec une coalescence des micro-défauts qui provoque des ruptures transverses, des délaminages qui sont observables sur la figure 17b, des ruptures de fibres observables sur la figure 17c et 18.

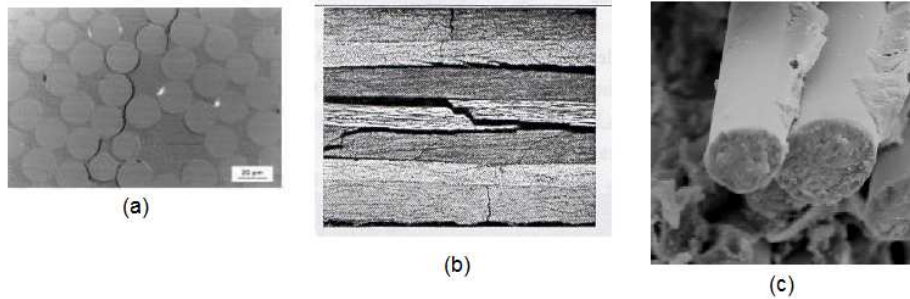


Figure 17 : (a) décohésion fibre/matrice, (b) délaminage et (c) rupture de fibres [6]

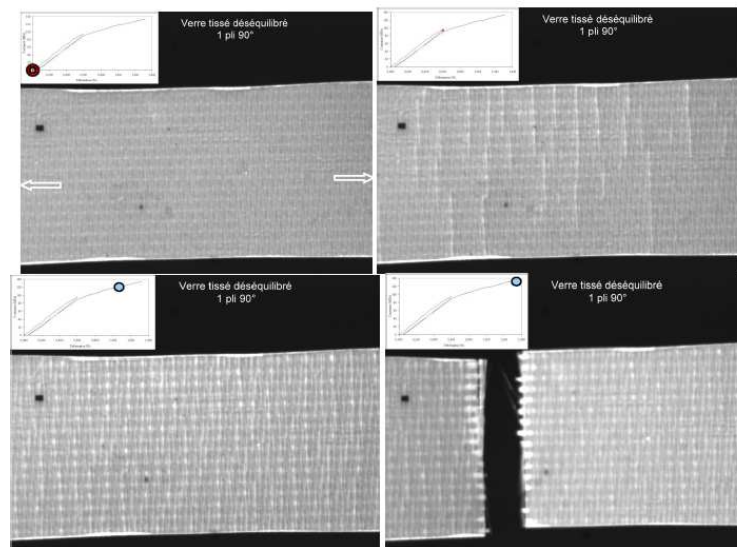


Figure 18 : Endommagement dans un pli orienté à 90° lors d'un essai de traction charge/décharge pour un stratifié verre/époxy [55]

II.2 Chargement en fatigue

Les structures, telles que les pâles d'éolienne, sont des pièces qui subissent aussi des charges répétées, aléatoires ou cycliques de plus ou moins forte intensité en superposition de son chargement nominal. Dès que le vent est suffisant pour entraîner aérodynamiquement la pale, celle-ci subit un chargement dynamique aléatoire, avec une valeur moyenne et une amplitude aléatoires, dépendant du vent, et donc du temps. Par des méthodes de type RainFlow, tu peux ramener ces chargements aléatoires à des chargements cycliques types, générant un endommagement de fatigue équivalent.

C'est pour cela qu'il faut prendre en compte le phénomène de fatigue dans l'étude de la structure car il conduit à des ruptures sous chargement plus faible que la limite de rupture sous chargement statique.

Pour bien dimensionner la structure, il est donc nécessaire de prédire la durée de vie de la structure ou de la dimensionner avec une contrainte maximale inférieure à la limite de fatigue (seuil d'endurance).

L'étude du comportement en fatigue se décompose en 3 étapes [56].

- Première étape au cours de laquelle le composite est chargé jusqu'à un certain nombre de cycles entre une contrainte minimale σ_{min} et une contrainte maximale σ_{max} .
- Deuxième étape avec un cycle charge/décharge permettant de mesurer la rigidité résiduelle du stratifié
- Troisième étape avec un palier d'observation permettant d'analyser l'endommagement et son évolution.

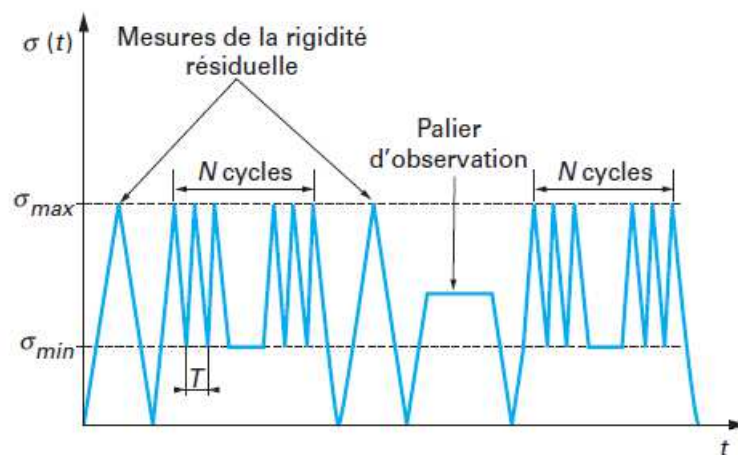


Figure 19 : Traction cyclique ondulée, procédure d'analyse [56]

II.3 Endommagement en fatigue

En se plaçant à l'échelle du pli, le comportement sous charge cyclique des matériaux composites stratifiés montre une baisse des propriétés mécaniques de résistance en fatigue et une baisse sensible de certaines rigidités lorsque le niveau de chargement ou le nombre de cycles augmente. La variation relative de rigidité est l'effet global à l'échelle du matériau de l'endommagement, qui correspond à la dégradation à l'échelle locale puis globale du matériau, par amorçage et propagation local puis global de fissures. Cette chute des propriétés mécaniques est due à la fissuration interne qui s'amorce au sein du composite. L'évolution de la rigidité dépend beaucoup du type d'empilement et de la direction de sollicitation, mais il existe une évolution globale qui décrit l'endommagement des composites stratifiés, que montre la figure 20, comme l'explique Reifsnider dans ces études [57]. L'évolution de l'endommagement est généralement illustrée par une courbe S-N (Stress function of Number of cycle) aussi appelée courbe de Wöhler.

- Première phase d'initiation avec naissance de micro-dommages
- Deuxième phase de croissance régulière et lente des dommages avec chute progressive de la rigidité de par le développement progressif des micro-dommages
- Troisième phase avec une baisse rapide de la rigidité qui conduit à la rupture du composite.

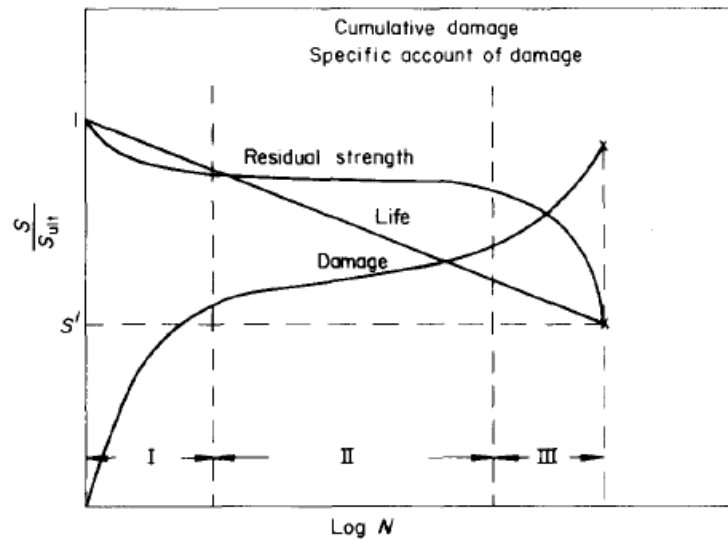


Figure 20 : Diagramme d'évolution S-N de la résistance résiduelle, de la variation des endommagements et de la vie de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles pour un stratifié graphite/époxy [57]

Les travaux de Wang [58] ont permis d'identifier les différences de comportement en fatigue, d'un composite stratifié UD verre/époxy pour un essai de traction, dont le comportement est visible en figure 21 et un essai de flexion, dont les résultats sont visibles sur la figure 22 pour différentes valeurs de sollicitation.

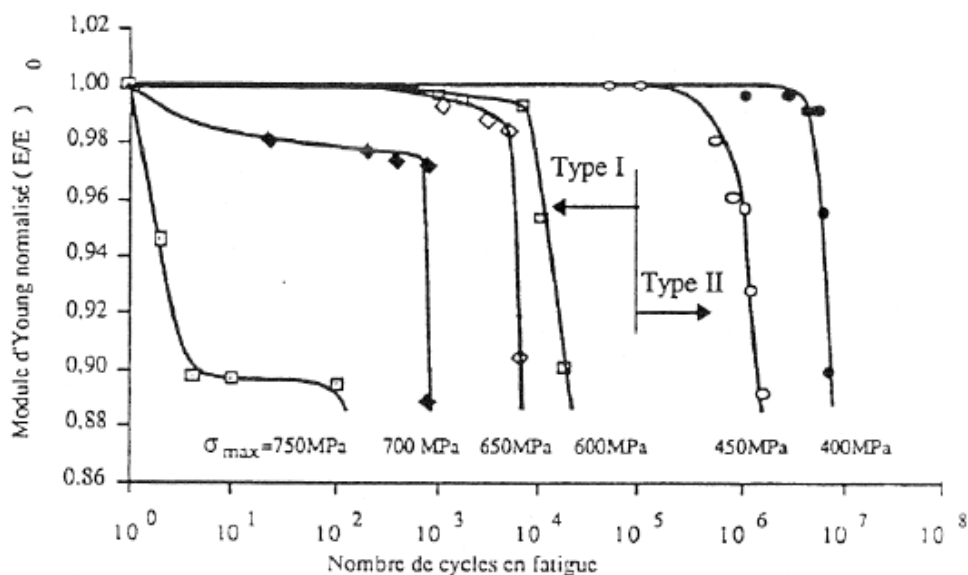


Figure 21 : Courbes S-N pour un composite stratifié UD verre/époxy en fatigue sous traction ondulée [58]

Pour un essai de fatigue en traction comme sur la figure 21, Wang définit deux types de rupture qui dépendent de la contrainte maximale appliquée : un premier type (Type I) caractérisé par une rupture de fibres suivie par des délaminages et un second type (type II) caractérisé par une rupture aux interfaces fibres/matrice, due au cisaillement. Pour chaque type, une évolution en plusieurs stades est constatée, 3 stades pour le type I et 2 stades pour le type II. Pour le type I, un premier stade est mis en évidence avec soit une chute brutale du module d'Young ($\sigma_{max} > 700$ MPa) où la charge maximale appliquée en fatigue est assez grande pour amorcer des ruptures de fibres, soit une phase d'accommodation pour des charges plus faibles où le module d'Young varie peu. Le deuxième stade correspond à une diminution progressive de la raideur qui s'explique par l'apparition de rupture de fibres et de délaminage, et leurs propagations. Le troisième stade correspond à une perte de raideur d'au moins 10% où la dégradation du module d'Young s'accélère jusqu'à rupture finale de l'éprouvette.

Pour le type II, le premier stade correspond à une diminution progressive du module d'Young tout au long de l'essai jusqu'à moins de 10%. Le deuxième stade se définit par une chute brutale du module d'Young qui correspond à la rupture finale de l'éprouvette.

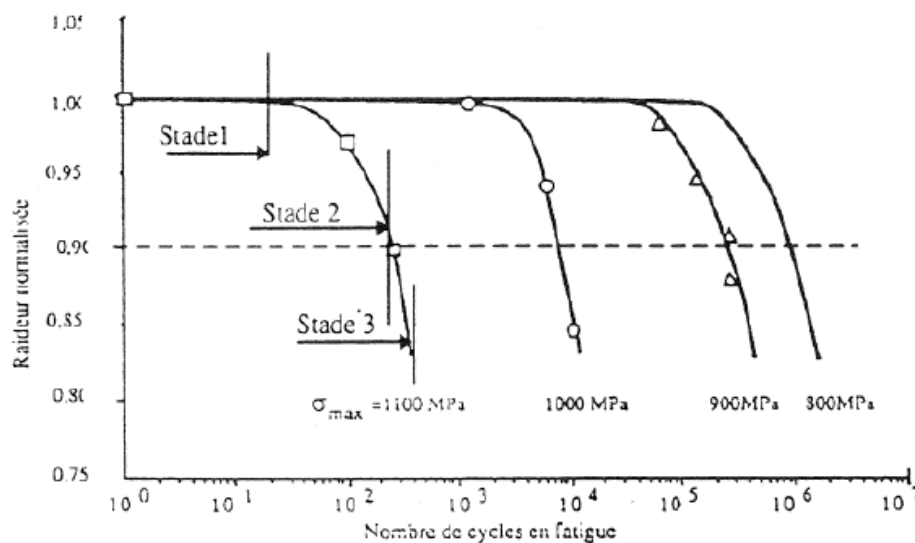


Figure 22 : Courbe S-N pour un composite stratifié verre/époxy UD en fatigue par flexion ondulée [58]

Pour un essai de flexion 3 points en fatigue, Wang décrit aussi 3 stades d'endommagement. Le premier stade correspond à une phase d'accommodation où la raideur varie très peu. Le deuxième stade est défini par une diminution progressive du module d'Young et l'apparition et l'augmentation du nombre de ruptures de fibres, et de délaminages sont observées. Le dernier stade, qui apparaît au-delà de 10% de perte de raideur, se caractérise par une rupture brutale de l'éprouvette à cause des ruptures de fibres par compression à partir du point d'application de l'effort qui progressent très rapidement dans l'éprouvette.

III. Modélisation d'un essai en fatigue jusqu'à rupture

III.1 Exemple de modélisation en fatigue jusqu'à rupture avec défauts

Cette partie se base sur les travaux de Naderi et al. [59] qui modélisent par éléments finis un essai de fatigue en traction sur un composite stratifié carbone/époxy. La modélisation de l'endommagement se divisera en 2 types :

- Une loi de dégradation instantanée :

Lorsqu'un élément, matrice et fibre, arrive à rupture, en se basant sur le critère de rupture, les propriétés diminuent instantanément à une valeur appropriée et l'élément ne résiste plus par rapport à la charge.

Si un élément rentre dans le cadre d'une dégradation instantanée, certaines ou toutes les propriétés du matériau sont réduites à un zéro virtuelle. Le type de propriété affectée dépend du type de rupture, et deux types de rupture soudaine sont considérés :

- o Rupture catastrophique :

Rupture fibre en traction ou compression $\rightarrow [E_{11}, E_{22}, E_{12}, \nu_{12}] = [0, 0, 0, 0]$

$$[X_b, X_c, Y_b, Y_c, S_{12}] = [0, 0, 0, 0, 0]$$

- o Rupture non catastrophique :

Rupture matrice en traction ou compression $\rightarrow [E_{11}, E_{22}, E_{12}, \nu_{12}] = [E_{11}, 0, E_{12}, 0]$

$$[X_b, X_c, Y_b, Y_c, S_{12}] = [X_b, X_c, 0, Y_c, S_{12}]$$

Rupture fibre/matrice en cisaillement $\rightarrow [E_{11}, E_{22}, E_{12}, \nu_{12}] = [E_{11}, E_{22}, 0, 0]$

$$[X_b, X_c, Y_b, Y_c, S_{12}] = [X_b, X_c, Y_b, Y_c, 0]$$

- Une loi de dégradation graduelle :

Elle se base sur l'approche phénoménologique de Shokrieh et Lessard [60] qui développent la notion de résistance et de rigidité résiduelle. Les différents paramètres de la loi sont déterminés expérimentalement par ajustement des courbes expérimentale et numérique.

$$\frac{E(n, \sigma, r) - \sigma}{R_s - \sigma} = \left[1 - \left(\frac{\log(n) - \log(0.25)}{\log(N_f) - \log(0.25)} \right)^\beta \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2)$$

$$\frac{E(n, \sigma, r) - \sigma}{E_s - \sigma} = \left[1 - \left(\frac{\log(n) - \log(0.25)}{\log(N_f) - \log(0.25)} \right)^\beta \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

On a donc une dégradation progressive des paramètres mécaniques en fonction du nombre de cycle en fatigue. Cette loi sera intégrée à la simulation numérique sous Abaqus pour simuler l'endommagement en fatigue.

L'étude de Naderi et Maligno se base sur l'exemple d'une plaque composite stratifiée sous traction en fatigue comme présenté sur la figure 23, en carbone/époxy AS4/3501-6 dont les propriétés sont connues [60] et sont présentées dans le tableau ci-dessous :

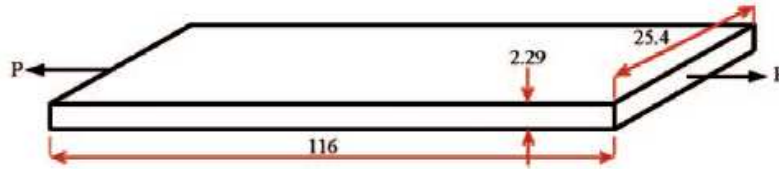


Figure 23 : Schéma et dimensions du stratifié étudié [59]

Material properties	AS4/3501-6
Longitudinal modulus, E_{11} (GPa)	138
Transverse modulus, E_{22} (GPa)	10.2
Shear modulus, E_{12} (GPa)	5.7
Poisson's ratio, ν_{12}	0.3
Material nonlinearity, δ	1.015×10^{-8}
Longitudinal tension strength, X_t (MPa)	2070
Longitudinal compression strength, X_c (MPa)	1380
Transverse tension strength, Y_t (MPa)	86
Transverse compression strength, Y_c (MPa)	230
In-plane shear strength, S (MPa)	186

Tableau 2 : Propriétés du composite carbone/époxy AS4/3501-6 [60]

Les résultats expérimentaux de l'étude de la résistance et de la rigidité résiduelle sont présentés sur la figure 24 (a)-(g). La fonction d'extrapolation de la courbe expérimentale se base sur les équations (2) et (3). Pour les figures 24 (a), (b) et (c) qui montrent les résultats expérimentaux dans le sens longitudinal, une légère augmentation de la résistance et de la rigidité est constatée et c'est pour cela qu'on les caractérise en transformant les équations (2) et (3) par :

$$\frac{E(n, \sigma, r) - \sigma}{R_s - \sigma} = [1 - N^a + cN^d(1 - N)^e]^{\frac{1}{b}} \quad (4)$$

$$\frac{E(n, \sigma, r) - \frac{\sigma}{\varepsilon_f}}{E_s - \frac{\sigma}{\varepsilon_f}} = [1 - N^a + cN^d(1 - N)^e]^{\frac{1}{b}} \quad (5)$$

a , b , c , d et e sont déterminés par ajustement des courbes expérimentale et numériques, et N est le nombre de cycles normalisé et se calcule de la manière suivante :

$$N = \frac{\log(n) - \log(0.25)}{\log(N_f) - \log(0.25)} \quad (6)$$

Les paramètres d'extrapolation expérimentale sont présentés dans le tableau 3.

	a	b	c	d	e	α	β	λ	γ
Longitudinal stiffness	2.07	0.63	2.62	2.07	0.74	-	-	-	-
Longitudinal tensile strength	3.76	0.77	1.72	2.3	0.99	-	-	-	-
Longitudinal compressive strength	5.03	0.01	1.07	5.07	0.03	-	-	-	-
Transverse stiffness	-	-	-	-	-	-	-	14.77	0.1155
Transverse tensile strength	-	-	-	-	-	9.6287	0.1255	-	-
Transverse compressive strength	-	-	-	-	-	67.36	0.0011	-	-
Shear stiffness	-	-	-	-	-	-	-	0.7	11

Tableau 3 : Paramètres d'extrapolation expérimentale pour le composite carbone/époxy AS4/3501-6 [59]

Pour prédire le comportement en fatigue du stratifié sous contrainte, on crée une éprouvette du même type que sur la figure 23, sous le logiciel commercial Abaqus, sans considérer les phénomènes de délamination, et l'éprouvette est maillée avec des éléments shell triangulaire à 3 nœuds (S3). La base de l'éprouvette est fixée en x et y, et l'autre base est chargée en fatigue avec une traction oscillatoire comme le montre la figure 25(a).

Les propriétés mécaniques du stratifié, et donc de chaque élément, sont attribuées aléatoirement en fonction d'une distribution gaussienne avec une variation de $\pm 0.3\%$, dans le but de répartir de manière stochastique les propriétés de résistance et de rigidité afin de prendre en compte les défauts initiaux.

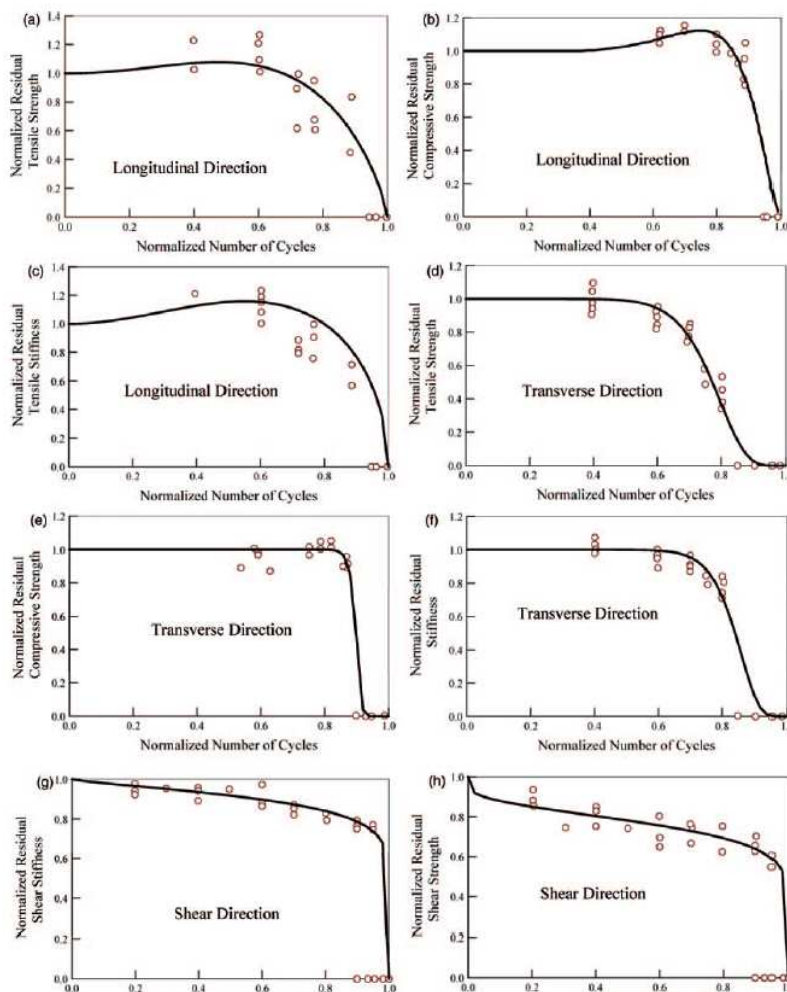


Figure 24 : Propriétés normalisées du stratifié carbone/époxy AS4/3501-6 en fonction du nombre normalisé de cycles sous traction en fatigue [59]

Il a été montré que les défauts de mise en forme des stratifiés tels que les porosités et les plissements sont à l'origine de l'amorçage d'endommagement tel que les phénomènes de délaminage. Pour prendre en compte ces défauts, les propriétés affectées à certains éléments sont estimées à 90% des propriétés du stratifié. La figure 25(b) représente la répartition gaussienne de la rigidité dans l'éprouvette.

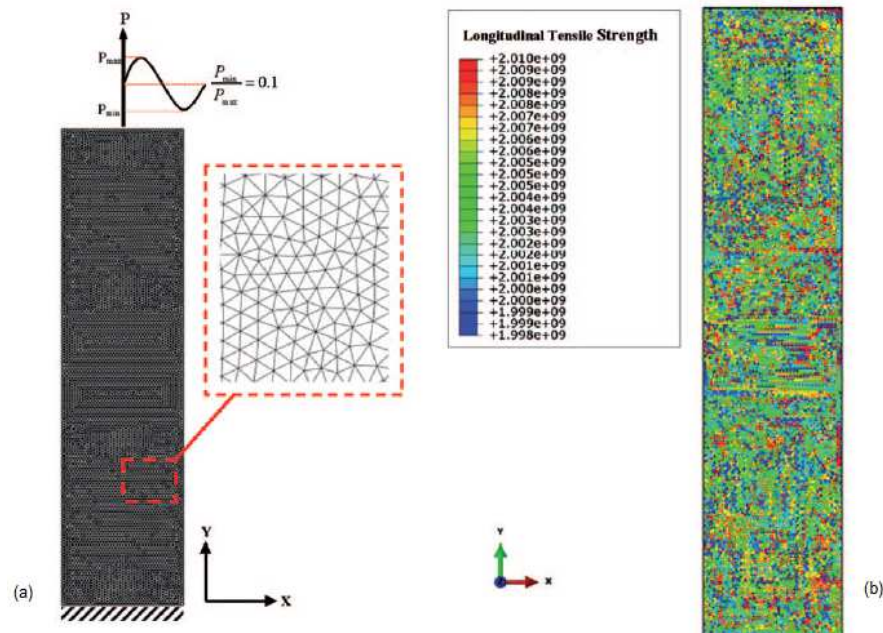


Figure 25 : Maillage de l'éprouvette (a) et répartition aléatoire gaussienne dans l'éprouvette (b) [59]

L'endommagement en fatigue est implémenté sous Abaqus en utilisant une subroutine UMAT et USDFLD. La subroutine UMAT, appelée pour chaque élément, définit les caractéristiques mécaniques du matériau. La subroutine USDFLD inclut des variables définies par l'utilisateur et est appelée pour chaque élément. Dans cette étude, les propriétés du stratifié dépendent de 5 variables : la première et la seconde sont le critère de rupture de fibre en traction et en compression, la troisième et la quatrième représentent le critère de rupture de la matrice en traction et en compression, et la cinquième est le critère de rupture de matrice/fibre en cisaillement.

Comme on peut le remarquer sur la figure 26 qui montre le déroulement de la simulation, on commence par la préparation du modèle. Ensuite, les propriétés du stratifié sont générées par une distribution gaussienne et sont attribuées à chaque élément. L'analyse des contraintes à la suite du cycle de fatigue basée sur le maximum et le minimum de la charge. La prochaine étape consiste à l'analyse des critères de rupture avec la subroutine USDFLD. Les valeurs des critères de rupture sont stockées comme variables d'état dépendant de la solution qui sont appelées dans la subroutine UMAT. Si le critère de rupture est supérieur à 1.0, alors on applique une loi d'endommagement instantané avec des propriétés qui sont diminuées jusqu'à une faible valeur.

La simulation construit alors une nouvelle matrice jacobienne et lors du prochain cycle, les critères de ruptures sont calculés en se basant sur la nouvelle distribution des contraintes.

Si les critères de rupture sont respectés, il n'y a pas d'endommagement instantané et les propriétés du matériau évoluent en fonction de la loi d'endommagement graduelle avec la résistance et la rigidité résiduelle. Le nouveau nombre de cycles est obtenu par addition du nombre d'incrémentations de cycles au dernier nombre de cycles.

La procédure est répétée à chaque cycle jusqu'à la rupture catastrophique et que le composite ne puisse plus subir de cycles.

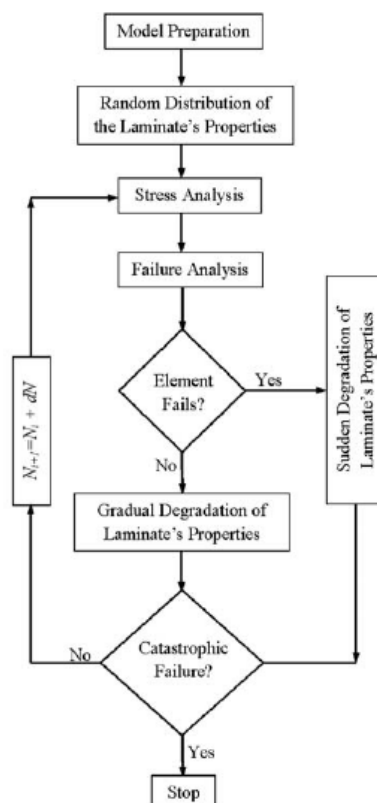


Figure 26 : Déroulement de la simulation de l'endommagement en fatigue [59]

III.2 Critère de rupture

Dans le cadre du projet SIMSCEF, 3 critères de rupture différents en quasi-statique seront examinés :

- Critère de Puck ;
- Critère de Hill ;
- Critère de Yamada-Sun.

L'étude de Hinton et al. [61] présente les résultats comparatifs entre plusieurs critères d'endommagement. La comparaison se fait sur 125 cas différents de chargement et les résultats sont classés en 4 catégories :

- A : Prédiction avec $\pm 10\%$ par rapport à la valeur expérimentale ;
- B : Prédiction entre $\pm 10\%$ et $\pm 50\%$ par rapport à la valeur expérimentale ;
- C : Prédiction supérieure à $\pm 50\%$ par rapport à la valeur expérimentale ;
- NA : Pas de valeurs.

Le tableau 4 illustre les résultats de cette étude à travers un tableau récapitulatif.

Grade type	A	B	C	NA	A+B
Zinoviev	53	43	29	0	96
Bogetti	51	44	30	0	95
Puck	64	30	31	0	94
Cuntze	62	32	31	0	94
Tsai	50	35	40	0	85
Sun(L)	52	31	42	0	83
Edge	50	32	43	0	82
Huang	42	38	45	0	80
Mayes	52	27	46	0	79
Wolfe	39	31	55	0	70
Hart-Smith3	39	30	41	15	69
Chamis2	44	24	53	4	68
Rotem	37	30	58	0	67
Hart-Smith1	41	16	23	45	57
Hart-Smith2	36	19	25	45	55
Sun(NL)	21	17	21	66	38
Eckold	20	14	48	43	34
McCartney	10	4	4	107	14
Cuntze-B	59	38	28	0	97
Tsai-B	57	36	32	0	93
Mayes-B	58	33	34	0	91
Wolfe-B	53	32	40	0	85
Edge-B	51	34	40	0	85
Huang-B	43	37	45	0	80
McCartney-B	26	13	19	67	39

Tableau 4 : Tableau comparatif des différents critères de ruptures pour 125 cas de chargement différents [61]. Le chiffre représente le nombre de fois que le critère a satisfait au niveau i (A, B, C ou NA).

On observe bien que le critère de Puck est le critère qui a le plus de bons résultats, c'est-à-dire de résultats A. On retrouve derrière le critère de Hill, qui ici est désigné par Tsai et qui est un critère de Hill modifié, et le critère de Yamada-sun, désigné ici par Sun. Ceci s'explique par le fait que le critère de Puck prend en compte non seulement la caractérisation de la rupture de la matrice mais aussi celle du délaminage. De plus, il ajoute une composante transverse.

On choisit alors, d'utiliser le critère de Puck dans notre étude. Le critère de Puck [62] se définit tel que :

- Rupture des fibres :

$$f_{E(F)} \begin{cases} \frac{\sigma_1}{R_{\parallel}^t} = 1 & \text{pour } \sigma_1 \geq 0 \\ \frac{\sigma_1}{R_{\parallel}^c} = 1 & \text{pour } \sigma_1 \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

Avec R_{\parallel}^t et R_{\parallel}^c les contraintes à la rupture longitudinale en traction et compression.