

# Caractérisation du comportement mécanique en fatigue et influence des défauts

## Introduction

Les structures, telles que les pâles d'éolienne, sont des pièces qui subissent des charges répétées, aléatoires ou cycliques de plus ou moins forte intensité en superposition de leur chargement quasi-statique. C'est pour cela qu'il faut prendre en compte le phénomène de fatigue dans l'étude de la structure car il peut conduire à des ruptures sous un chargement inférieur à la limite à rupture voir élastique sous chargement statique. Il est donc aussi nécessaire de caractériser l'influence des défauts de mise en œuvre, comme la porosité ou les plissements, sur le comportement mécanique en fatigue.

## I. Définition d'un essai de fatigue

Le principe d'un essai de fatigue est de répéter  $x$  fois un chargement de manière cyclique, qui est le plus souvent un chargement sinusoïdal. Il permet d'identifier le nombre de cycles nécessaire pour atteindre la rupture ou une diminution de raideur définie. Le comportement mécanique en fatigue, à l'échelle du pli, des matériaux composites stratifiés montrent une baisse des propriétés mécaniques de résistance en fatigue et une baisse de certaines rigidités lorsque le niveau de chargement ou le nombre de cycles augmente. Cette variation relative de la rigidité définit l'endommagement en fatigue. Cette chute des propriétés mécaniques est due à l'apparition d'endommagements internes qui s'amorcent au sein du composite.

L'évolution de la rigidité dépend beaucoup du type d'empilement et de la direction de chargement, mais il existe une évolution globale qui décrit l'endommagement des composites stratifiés, qui est illustrée sur la figure 129, comme l'explique Reifsnider dans ces études [1].

L'évolution de l'endommagement est généralement illustrée par une courbe dite S-N (Stress function of Number of cycle) aussi appelée courbe de Wöhler.

- Première phase d'amorçage 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.

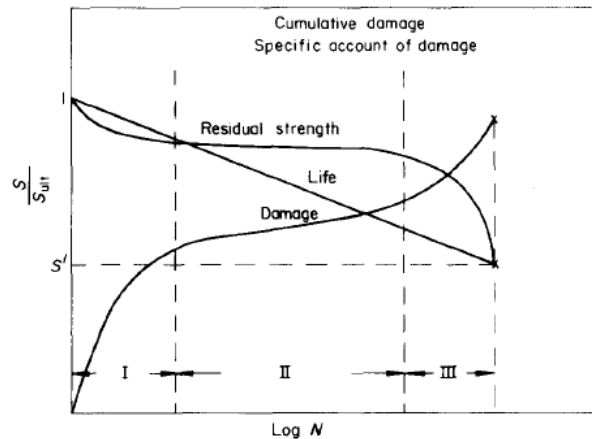


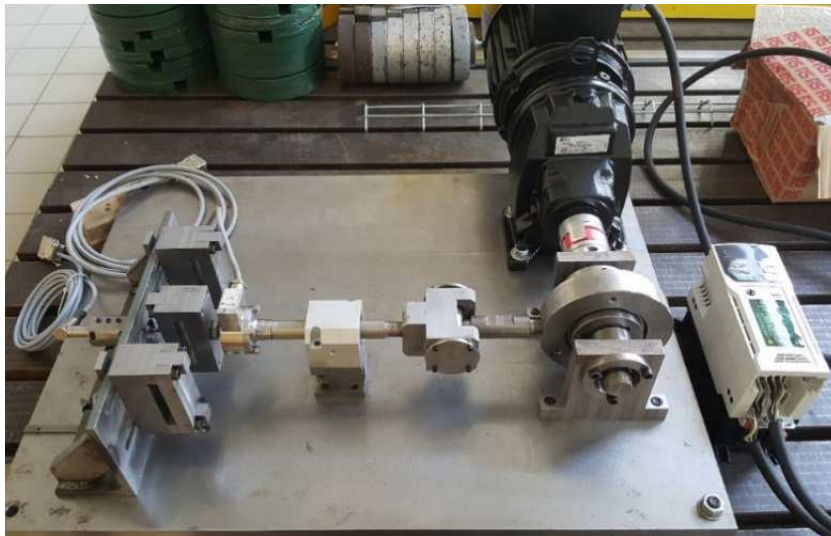
Figure 129 : Diagramme d'évolution S-N de la résistance résiduelle, de la variation des endommagements et de la vie de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles pour un stratifié graphite/époxy [1]

Le principe d'un essai de fatigue est d'appliquer un chargement cyclique sur une éprouvette ou structure, à une certaine fréquence, tout en mesurant la rigidité en temps réel. L'essai s'arrête une fois qu'un des critères d'arrêt est rempli : rupture de l'éprouvette, nombre de cycles atteint ou diminution d'un certain pourcentage de la raideur.

Dans le cadre du projet, l'étude en fatigue se fera sur un cas de chargement en flexion 3 points. Le comportement des composites stratifiés en fatigue dans le cadre d'un chargement en flexion 3 points est connu et détaillé dans les travaux de Wang [2] dans le chapitre 1 paragraphe III.2. La rigidité de l'éprouvette stagne et se stabilise au début de l'essai, puis apparaît une diminution progressive de la rigidité avec une augmentation du nombre d'endommagements tels que des fissures ou du délaminage, et enfin une rupture brutale de l'éprouvette.

## Dispositif d'essai de fatigue en flexion 3 points

Les essais en fatigue en flexion 3 points sont effectués sur une machine mécanique développée par M. Guillaumat et M. Bin Hamed. Le principe est de transformer le mouvement rotatif d'un moteur en translation à l'aide d'un double excentrique. La figure 130 montre le dispositif d'essai avec à droite le motoréducteur, qui permet de régler la fréquence, branché au moteur qui crée le mouvement rotatif et qui est transmis par un système d'accouplement au double excentrique. Celui-ci va transformer le mouvement rotatif en translation afin d'appliquer la flèche avec l'appui centrale en bout de tige. Il est donc possible d'appliquer un chargement sinusoïdal en flexion 3 point sur une éprouvette. Un capteur de force est placé juste avant l'appui central et un capteur de déplacement LVDT est placé derrière l'éprouvette.



*Figure 130 : Dispositif d'essai en fatigue en flexion 3 points*

Ce dispositif permet de régler plusieurs paramètres d'un essai de flexion 3 points, à savoir la distance entre les appuis et la flèche. Il est donc contrôlé en déplacement imposé. La flèche est réglable en modifiant l'angle entre les deux pièces excentrées. Avec ce double excentrique et ce système, il est possible d'appliquer une flèche de  $\pm 10$  mm.

La conception de la machine fait que les essais sont aussi limités au niveau du rapport de charge  $R$  qui définit l'essai de fatigue, car le support de l'éprouvette bloque le chargement dans un sens. Ce rapport de charge établit le rapport entre la contrainte minimum et la contrainte maximum. Généralement une étude complète en fatigue caractérise le matériau pour plusieurs rapports de charge.

Du fait que l'essai soit contrôlé en déplacement et qu'un essai en fatigue est défini par une amplitude de contrainte il faut déterminer au préalable la force minimale et maximale appliquées durant l'essai, et de les régler manuellement en réglant l'angle du double excentrique et la position des appuis extérieurs avant de lancer l'essai.

Les dimensions de l'éprouvette et les valeurs des paramètres caractéristiques du dispositif sont présentées sur la figure 131 et le tableau 87.

Les mesures des capteurs de force et de déplacement LVDT sont acquises en temps réel par un système d'HBM constitué d'un module Quantum et du logiciel Catman. Un script développé dans ce logiciel est utilisé pour calculer au cours de l'essai des valeurs caractéristiques telles que la force minimal et maximale, la force moyenne, l'amplitude de force, le déplacement moyen ou l'amplitude de déplacement. Ce script permet aussi d'automatiser l'essai en prenant en compte deux critères d'arrêt : un nombre de cycles maximum atteint et/ou une perte de rigidité basée sur la variation de l'amplitude de force.

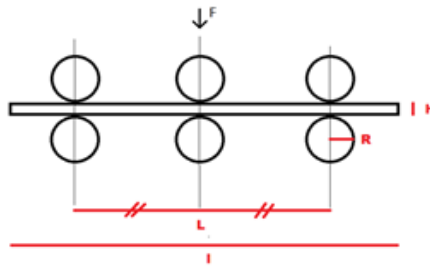


Figure 131 : Schéma du montage de flexion 3 points

Dimensions	Valeurs en mm
l longueur de l'éprouvette	100
B largeur de l'éprouvette	15
h épaisseur de l'éprouvette	2 (sain) et 2,8 (porosité)
L distances entre les appuis	80
R rayon des appuis	5

Tableau 87 : Dimensions des éprouvettes de flexion 3 points

La figure 132 montre l'interface de visualisation des données mesurées en temps réel durant l'essai, avec en bas les graphiques de la force et du déplacement en fonction du temps, au milieu les graphiques des valeurs des amplitudes et moyennes de déplacement et de force en fonction du nombre de cycles, et en haut un tableau résumant toutes ces valeurs tous les cycles entre 0 10 cycles, tous les 10 cycles entre 72 et 100, tous les 100 cycles entre 100 et 1000, tous les 1000 entre 1000 et 10 000, tous les 10 000 entre 10 000 et 100 000 cycles et tous les 100 000 cycles entre 100000 et 1000 000 de cycles. Ces valeurs caractéristiques mesurées sont affichées en temps réel sur des cases à droite de la page de visualisation.

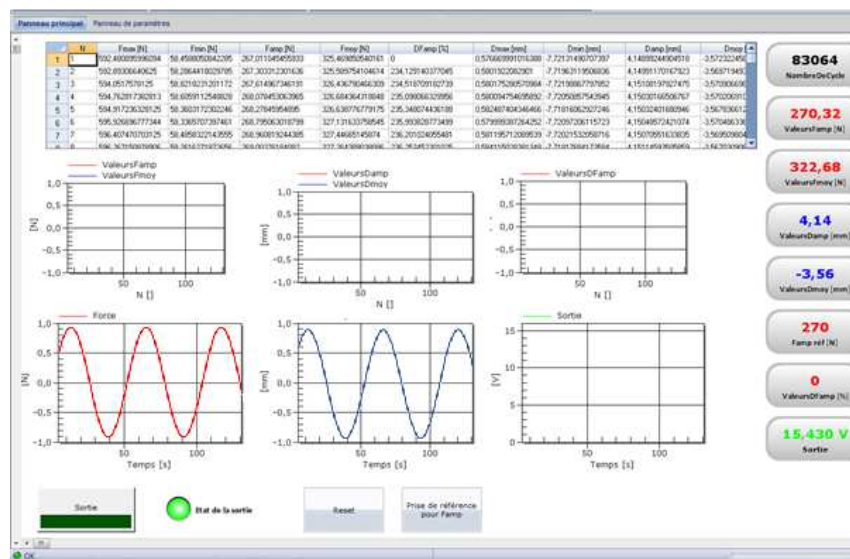


Figure 132 : Interface de visualisation des données mesurées lors de l'essai de fatigue en flexion 3 points

### III. Essais de fatigue en flexion 3 points

Dans le cas de cette étude, l'essai de fatigue en flexion 3 points est arrêté par deux critères possibles, à savoir : une perte de rigidité de l'éprouvette de 5% basée sur la variation de l'amplitude de force et un nombre de cycles maximum de 1.000.000. Une perte de rigidité de 5% est communément utilisée dans les études en fatigue car au-delà de cette valeur, les endommagements sont tellement importants que l'éprouvette est proche d'une rupture brutale. Une perte de rigidité de 5% arrive communément dans la troisième et dernière phase de l'évolution de l'endommagement en fatigue avec une baisse rapide de la rigidité. De plus, l'étude étant limitée dans le temps, un nombre maximum de cycles est défini afin que les essais ne durent pas trop longtemps et la fréquence d'essai est fixée à 4,5 Hz (maximum de la machine dans sa configuration actuelle) ce qui fait 1.000.000 cycles en 61 heures. Avec des fréquences supérieures à 4,5 Hz, les vibrations observées sur le dispositif sont trop importantes. Des essais avec un thermocouple ont permis de confirmer qu'il n'y a pas d'auto-échauffement de l'éprouvette à cette fréquence.

Les essais de fatigue sont contrôlés soit en force soit en déplacement. Dans le cas de cet essai de fatigue en flexion 3 points, le paramètre contrôlant l'essai est le déplacement, en faisant varier l'angle du double excentrique, il est possible de définir la flèche minimum, la flèche maximum et donc la flèche totale. Sachant que les dimensions des éprouvettes de fatigue sont assez variable, il est plus précis de comparer les résultats des essais à une contrainte fixée plutôt qu'à une flèche fixée. C'est pour cela que les contraintes appliquées, avec les flèches choisies, sont calculés avec la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2Bh^2} \quad (76)$$

L'épaisseur des éprouvettes saines étant fines et la flèche étant limitée à  $\pm 10$  mm, il n'est pas possible de réaliser des essais de fatigue à des contraintes supérieures à 800 MPa. Les essais se font à un rapport de charge  $R \approx 0,1$ .

#### III.1 Résultats pour les éprouvettes saines

##### III.1.1 Courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler du matériau sain est présentée à la figure 133 avec les différents points désignant une éprouvette rompue et les points avec une flèche à 1.000.000 de cycles qui signifie que l'éprouvette n'a pas atteint sa rupture.

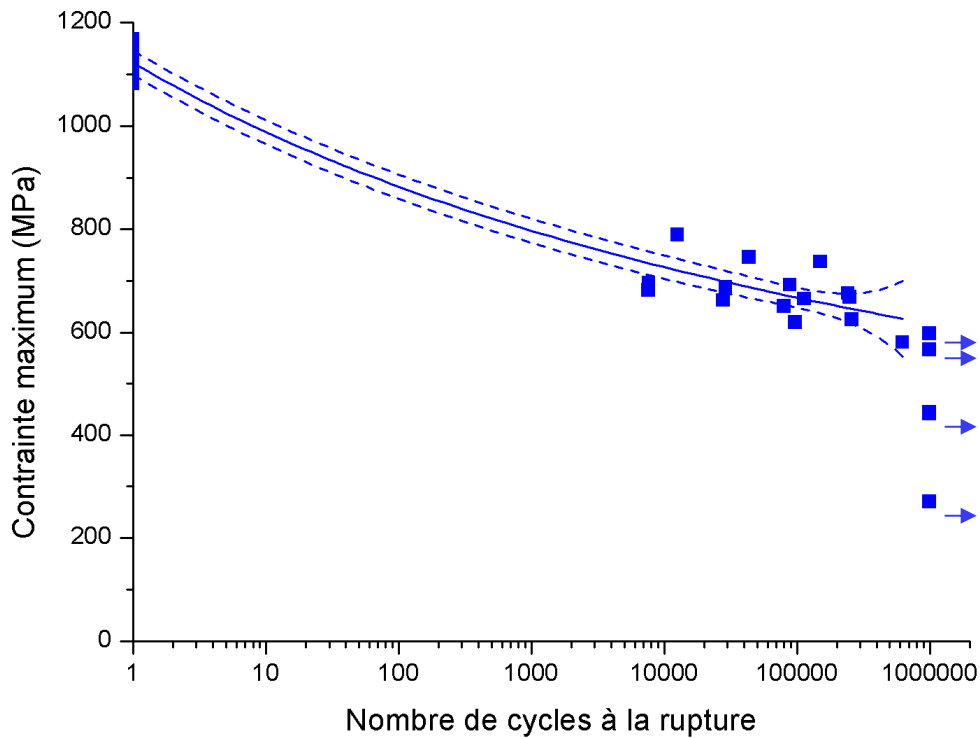


Figure 133 : Courbe de Wöhler en flexion 3 points pour le matériau sain, avec en pointillé la courbe de confiance à 95%

La courbe de Wöhler correspond aux éprouvettes rompues en fonction de la contrainte maximum  $\sigma_{max}$  aux premiers cycles et du nombre de cycles à la rupture  $N_{rupture}$ . Les données de nombre de cycles à la rupture sont représentées avec une échelle logarithmique pour plus de lisibilité. Une loi de Farzadaghi-Harris est utilisée pour modéliser le comportement en fatigue du matériau en fatigue.

Ce modèle est une loi puissance qui est généralement utilisée pour modéliser le comportement en fatigue, et est définie telle que :

$$\sigma_{max} = (a + bN_{rupture}^c)^{-1} \quad (77)$$

Le modèle de Harris est illustré avec des bandes de confiance à 95%, ce qui signifie que tous les jeux de paramètres qui donnent un modèle compris entre ces deux bandes est à 95% proches de la meilleure solution. La valeur de chaque paramètre est énoncée dans le tableau 88.

Paramètres	Valeurs sain	Valeurs porosité 1,2%	Valeurs porosité 3,0%
a	-0,08184	-0,15503	8,4E-4
b	0,08273	0,15604	1,9E-4
c	6,3E-4	2,6E-4	0,101

Tableau 88 : Valeur des paramètres de la loi de Harris pour le matériau sain



La courbe de Wöhler du matériau sain présente une variabilité assez importante, qui caractérise les essais de fatigue, avec un nuage de point entre 10.000 cycles et 1.000.000 cycles. Plusieurs essais n'ont pas abouti à la rupture de l'éprouvette dont un essai vers 600 MPa. Pour une même contrainte maximale, les éprouvettes peuvent rompre à des nombres de cycles très différents. La courbe de Wöhler du matériau sain présente plusieurs éléments caractéristiques des courbes en fatigue pour les matériaux composites, à savoir la tendance de la courbe de comportement qui est quasiment une droite et le changement de variabilité entre les essais quasi-statiques et les essais à grand nombre de cycles. En effet, pour les essais statiques à 1 cycle, la variabilité est fonction de la contrainte alors que pour les essais à grands nombres de cycles, la variabilité est fonction du nombre de cycles. Pour une contrainte de plus ou moins 700 MPa, des éprouvettes ont rompu vers 10.000 cycles alors que d'autres ont rompu vers 100.000 cycles.

### III.1.2 Faciès de rupture

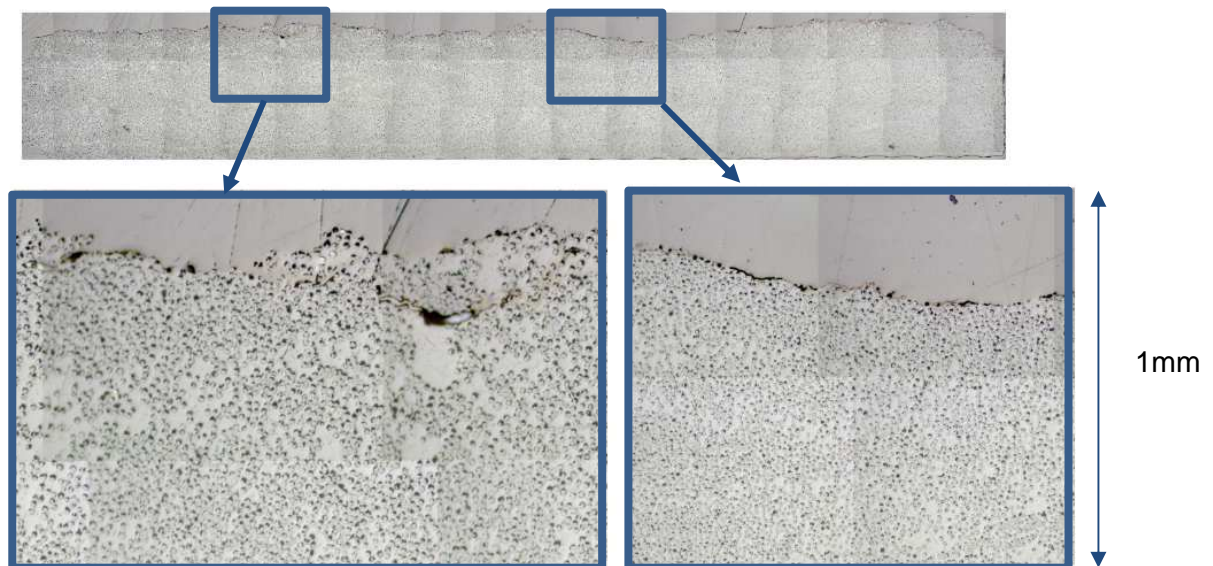


Figure 134 : Faciès de rupture d'une éprouvette saine en fatigue flexion 3 points avec présence de délaminage

Quelques éprouvettes rompues en fatigue ont été observées en microscopie optique proche du faciès de rupture. La figure 134 présente l'un de ces faciès avec des parties zoomées, qui montrent un des endommagements caractéristiques des chargements en flexion 3 points, et notamment en fatigue, à savoir du délaminage.

## III.2 Résultats pour les éprouvettes avec porosité niveau « - »

### III.2.1 Courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler du matériau possédant la faible valeur de porosité de 1,2%, visible sur la figure 135, a la même tendance que la courbe du matériau sain, à savoir une droite qui relie les points quasi-statiques et les points à un grand nombre de cycles.

Les essais avec 1,2% de porosité présentent moins de variabilité avec des résultats moins espacés. Pour chaque paramètres de la loi de Harris de ce matériau, la valeur qui est visible dans le tableau 89, est très légèrement supérieure à celle pour le matériau sain, particulièrement pour les coefficients  $a$  et  $b$  qui définisse la pente de la courbe. Plus les coefficients sont proches de 0, moins la courbe sera pentue. Ceci semble indiquer qu'un taux de porosité de 1,2% de porosité n'a pas une grande influence sur le comportement en fatigue en flexion 3 point du composite stratifié étudié.

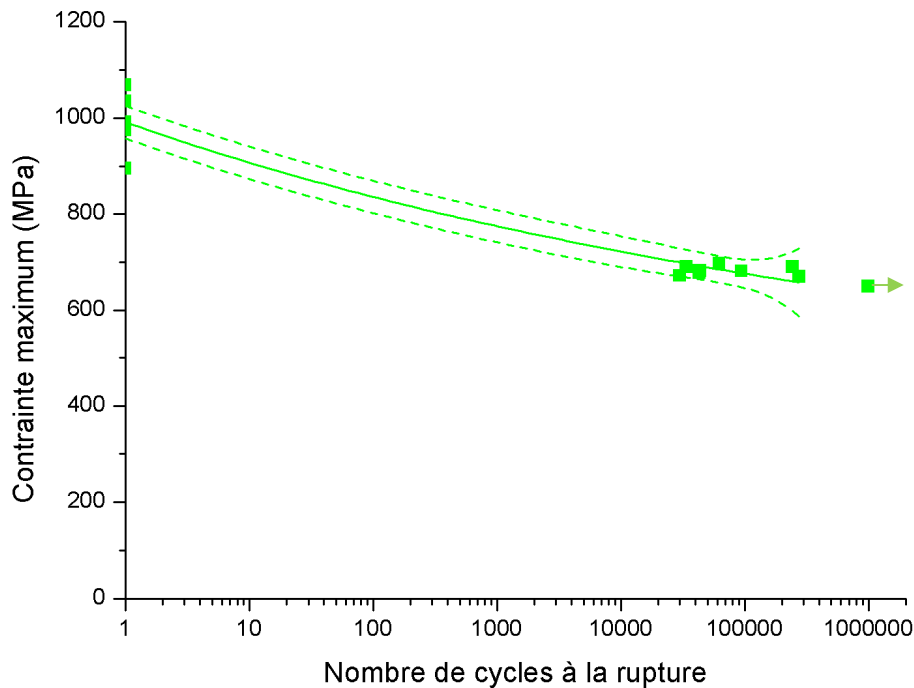


Figure 135 : Courbe de Wöhler en flexion 3 points pour le matériau porosité -, à 1,2% de porosité, avec en pointillé, la courbe de confiance à 95%

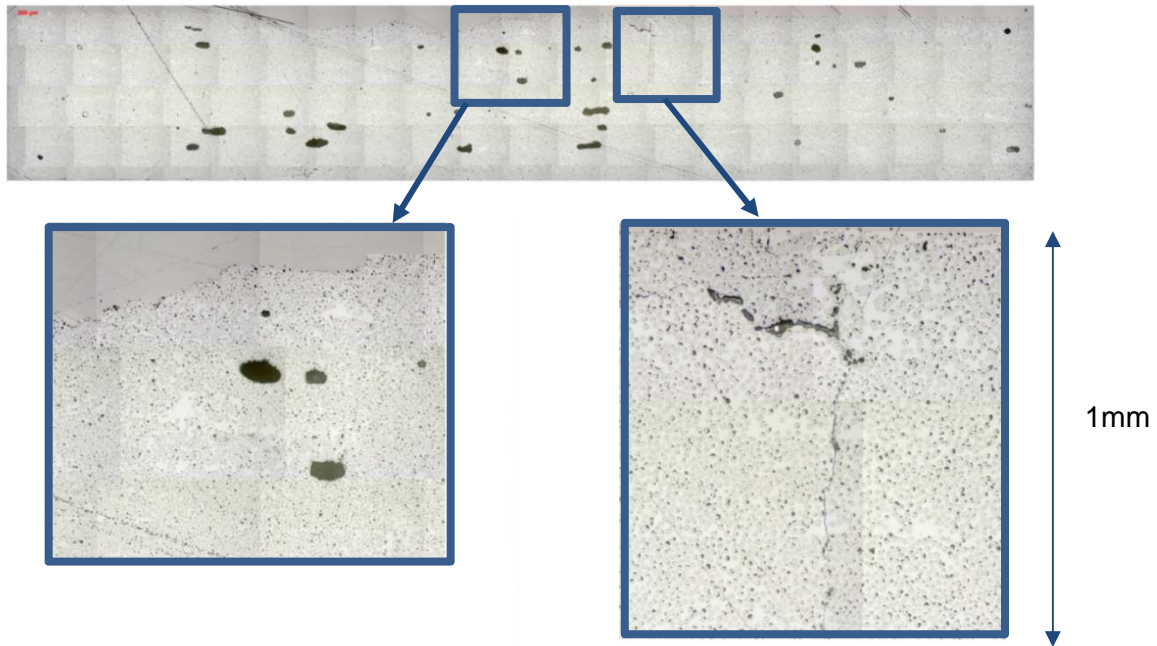
Paramètres	Valeurs	Valeurs
a	-0,15503	8,4E-4
b	0,15604	1,9E-4
c	2,6E-4	0,101

Tableau 89 : Valeur des paramètres de la loi de Harris pour le matériau porosité – à 1,2% de porosité

### III.2.2 Faciès de rupture

Les coupes micrographiques d'éprouvettes, avec 1,2% de porosité, rompues pendant les essais montrent, comme précédemment, des endommagements typiques des essais de fatigue sur composite, à savoir du délaminage et de la fissuration. Un exemple est présenté sur la figure 136 avec un zoom sur un endommagement par délaminage et un sur un endommagement par fissuration. Aucune des fissures observées ne suit un parcours préférentiel de pores en pores, ce qui semble montrer que les pores n'ont pas d'influence notable sur l'endommagement en fatigue en flexion 3 points.





**Figure 136 : Faciès de rupture d'une éprouvette porosité -, à 1,2% de porosité, en fatigue flexion 3 points avec présence de délaminage à gauche et de fissuration à droite**

Les résultats des essais et l'étude des faciès de rupture peuvent amener à conclure qu'un taux de porosité de 1,2% n'a pas d'influence significative sur le comportement en fatigue en flexion 3 points d'un composite stratifié. Cette hypothèse est confrontée à la comparaison des résultats entre le matériau sain et les matériaux avec porosité au paragraphe IV.1.

### **III.3 Résultats pour les éprouvettes avec porosité niveau « + »**

#### **III.3.1 Courbe de Wöhler**

La courbe de Wöhler du matériau avec un niveau de porosité important de 3,0%, est visible sur la figure 137 ainsi que le modèle de Harris qui caractérise le comportement en fatigue. Celui-ci semble être le même que pour le matériau sain et avec celui à 1,2% de porosité, avec une grande variabilité caractéristique des essais de fatigue. La valeur de chaque paramètre du modèle de Harris est énumérée dans le tableau 90. Les valeurs ne sont pas du même ordre de grandeur comparé à celles du matériau sain et du matériau porosité -, particulièrement pour le paramètre  $c$  qui définit la forme de la courbe. Cette différence s'explique par la présence du point résultat d'une éprouvette ayant rompu à 1000 cycles ce qui change la forme de la courbe et donc l'interprétation des valeurs du modèle.

Paramètres	Valeurs
a	8,4E-4
b	1,9E-4
c	0,101

**Tableau 90 : Valeur des paramètres de la loi de Harris pour le matériau porosité +, à 3,0% de porosité**

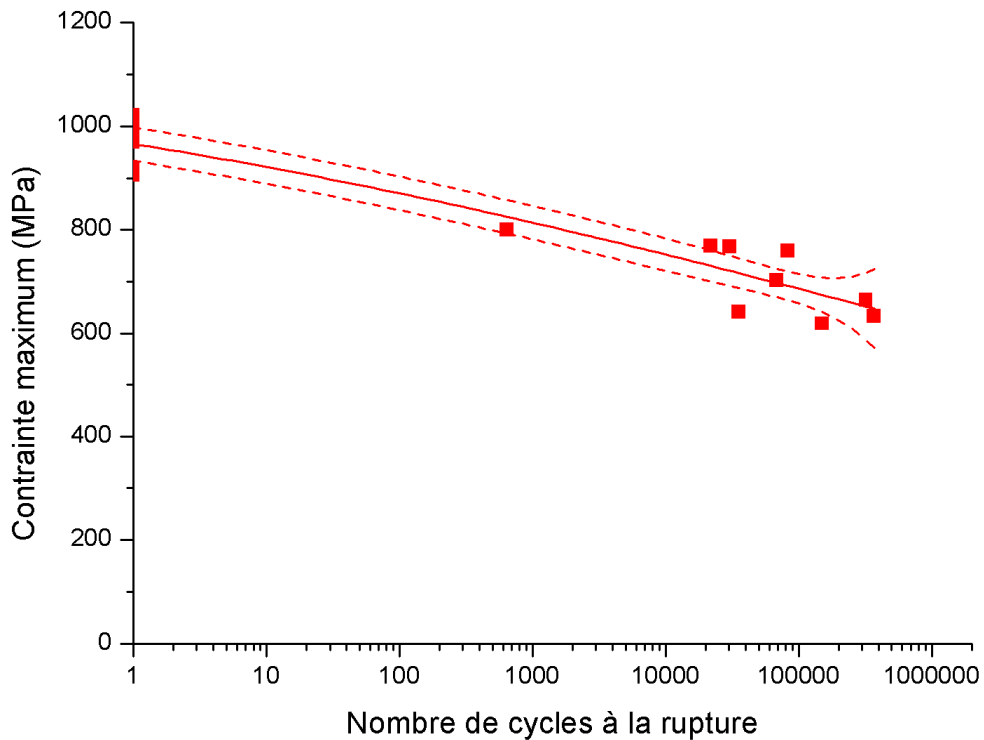


Figure 137 : Courbe de Wöhler en flexion 3 points pour le matériau porosité +, à 3,0% de porosité, avec en pointillé, le courbe de confiance à 95%

### III.3.2 Faciès de rupture

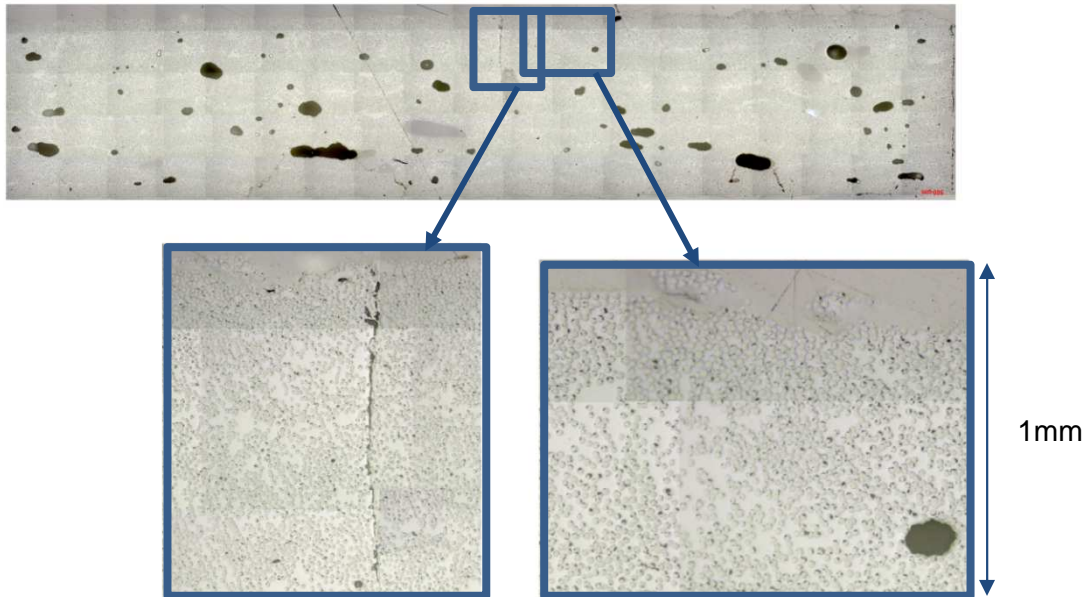


Figure 138 : Faciès de rupture d'une éprouvette porosité +, à 3,0% de porosité, en fatigue flexion 3 points avec de la fissuration à gauche et du délaminage à droite

La figure 138 illustre un exemple de coupe micrographique d'une éprouvette avec 3,0% de porosité rompue en fatigue en flexion 3 points. La coupe présente des endommagements tels que des délaminages et de la fissuration, qui sont aussi présents dans les coupes micrographiques du matériau avec 1,2% de porosité et du matériau sain.

Statistiquement, la fissuration ne suit pas de chemins préférentiels le long des pores et les délaminages ne semblent pas partir d'un macro-pore. Ceci semble confirmer le fait que les pores n'ont toujours pas d'influence sur le comportement en fatigue en flexion 3 points d'un composite stratifié.

### III.4 Résultats pour les éprouvettes avec le plissement P1

Les essais de fatigue sur le matériau avec plissement sont divisés en 2 types : les essais avec les 2 plis sous le plissement qui sont du côté traction de la flexion 3 points, et ceux du côté compression.

En effet, le comportement du matériau en fatigue va dépendre du sens de chargement par rapport au défaut de plissement. Le plissement fragilise le matériau particulièrement car il divise le stratifié en 2 parties, à savoir pour cette étude, une partie avec 8 plis et une partie avec 2 plis.

#### III.4.1 Courbe de Wöhler

La figure 139 représente la courbe de Wöhler du matériau avec le plissement P1, avec en rose les essais avec les 2 plis sous le plissement du côté traction de la flexion, et en violet du côté compression de la flexion. Les deux configurations n'ont pas le même comportement en fatigue flexion 3 points. En effet l'amas de points pour la traction est légèrement sous l'amas de points pour la compression.

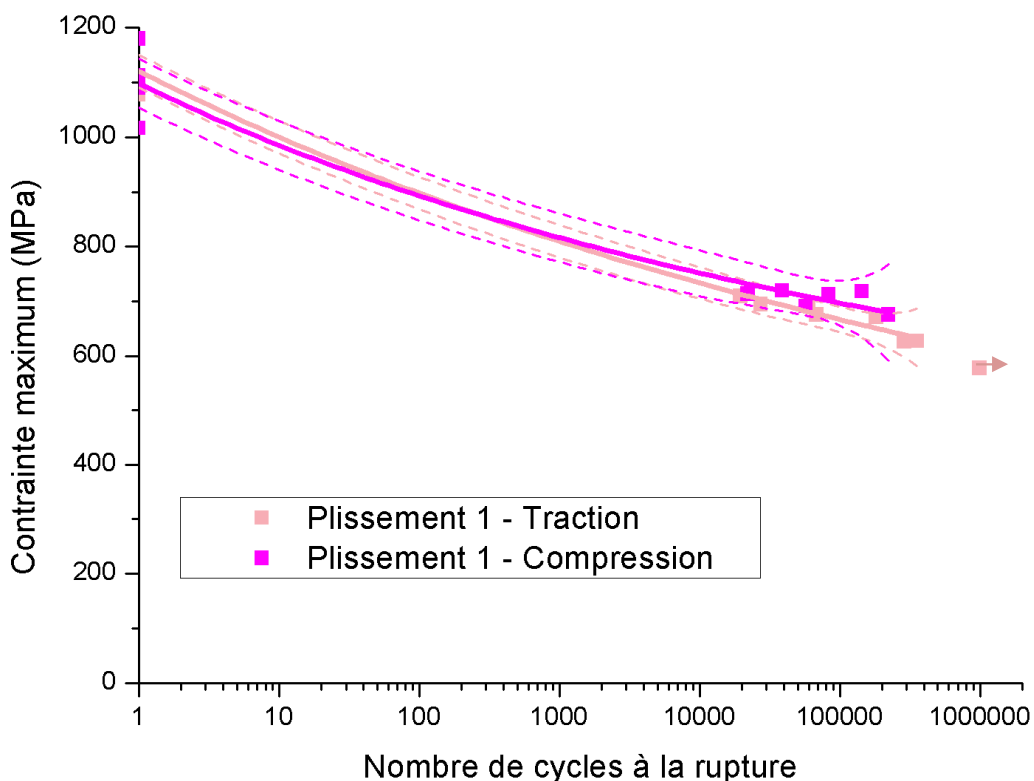


Figure 139 : Courbe de Wöhler en flexion 3 points pour le matériau avec le plissement P1, avec en pointillé, la courbe de confiance à 95%

Cette différence entre les 2 types de configuration est conforme au fait que la traction est dominante dans l'essai car le rapport de charge appliqué est de 0,1 et donc la configuration avec les 2 plis en traction est moins résistante que la configuration avec 8 plis en traction (soit 2 plis en compression). Les comportements restent cependant très proches.

Les résultats des essais de fatigue sur le matériau avec plissement présentent la même variabilité que ceux du matériau sain et du matériau avec porosité. La valeur des paramètres de la loi de Harris, pour chaque configuration, est énumérée dans le tableau 91. Les deux configurations ont des valeurs de paramètres différentes mais du même ordre de grandeur et équivalentes à celles du matériau sain.

Paramètres	Valeurs Traction	Valeurs Compression
a	-0,00088	-0,08469
b	0,00178	0,08560
c	0,02550	0,00053

Tableau 91 : Valeur des paramètres de la loi de Harris pour le matériau plissement 1

### III.4.2 Faciès de rupture

Une coupe micrographique transversale d'un échantillon, avec le plissement P1, rompu en fatigue flexion 3 points est visible sur la figure 140. Cette coupe montre des endommagements en délaminage, comme présentés sur le zoom, avec l'ensemble d'un pli qui s'est désolidarisé du reste de l'empilement. Aucune fissure n'est observée sur les zones analysées, mais cela ne signifie pas qu'il n'y en a pas quelques-unes ailleurs.

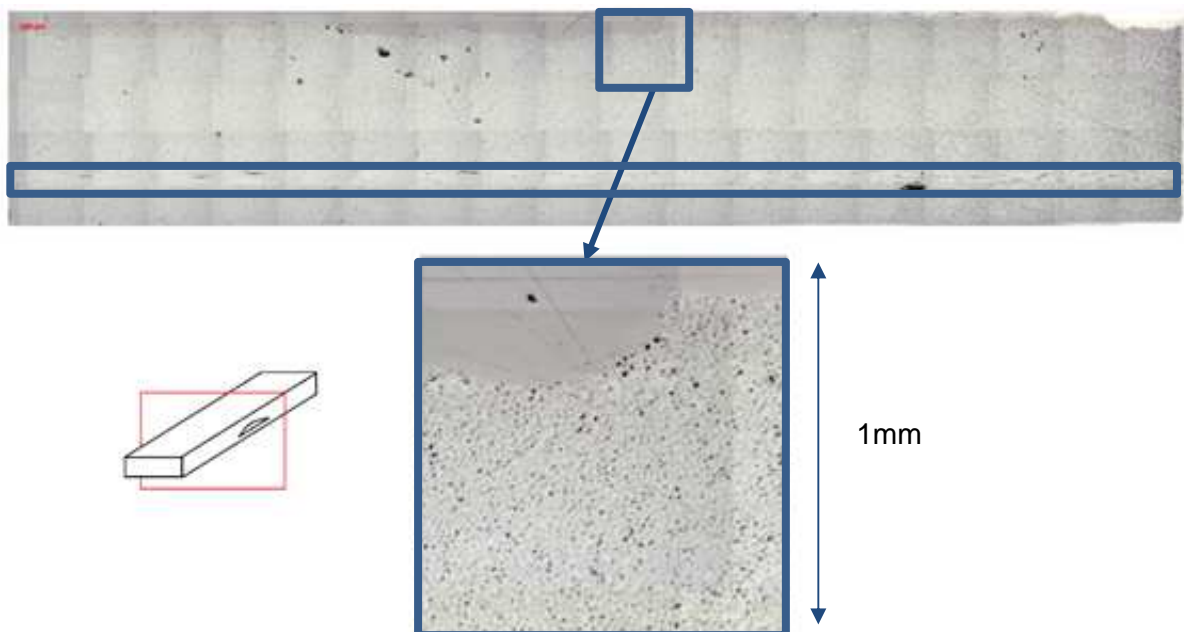


Figure 140 : Faciès de rupture d'une éprouvette avec le plissement P1 en fatigue flexion 3 points avec du délaminage et le plissement encadré en bleu

### III.5 Résultats pour les éprouvettes avec le plissement P2

#### III.5.1 Courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler du matériau avec le plissement P2, pour la configuration traction et compression, est visible sur la figure 141 avec les modèles de Harris pour chaque configuration.

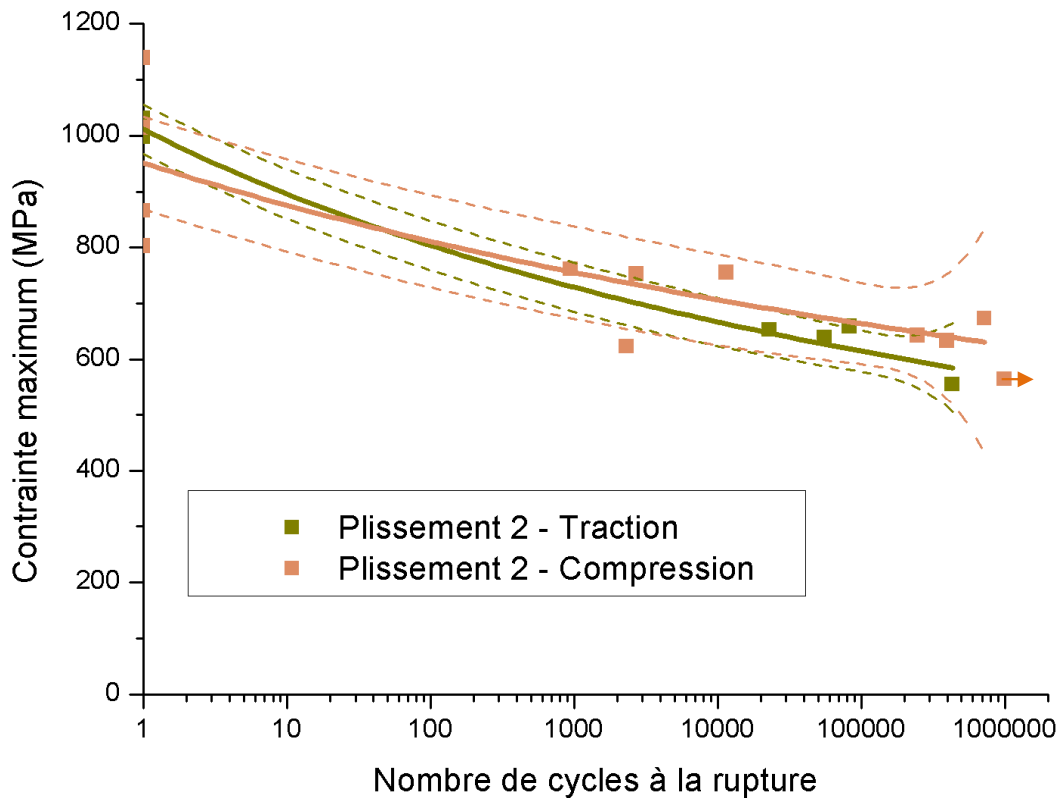


Figure 141 : Courbe de Wöhler en flexion 3 points pour le matériau avec le plissement P2, avec en pointillé, le courbe de confiance à 95%

La courbe présente bien une variabilité caractéristique des essais de fatigue avec des points résultats plus ou moins éparpillés. Comme précédemment, les points résultats de la configuration en traction semblent être légèrement sous ceux de la configuration entre compression.

Paramètres	Valeurs Traction	Valeurs Compression
a	-0,57932	-0,46783
b	0,58031	0,46888
c	9,5E-4	8,4E-4

Tableau 92 : Valeur des paramètres de la loi de Harris pour le matériau plissement 2

Les valeurs des coefficients des deux configurations sont énumérées dans le tableau 92. Elles confirment le fait que le comportement en fatigue du matériau avec plissement est plus faible en configuration traction qu'en configuration compression.

En effet, les valeurs  $a$  et  $b$  sont supérieures ce qui indique que la pente du modèle est plus importante et donc que le comportement en fatigue est plus faible.

La comparaison des valeurs du modèle de Harris du matériau sain et du matériau avec le plissement P1 semble indiquer une influence du plissement 2 sur le comportement du matériau en fatigue.

### III.5.2 Faciès de rupture

La figure 142 présente un exemple de coupe transversale micrographique d'un échantillon avec le plissement 2 ayant rompu en fatigue en flexion 3 point.

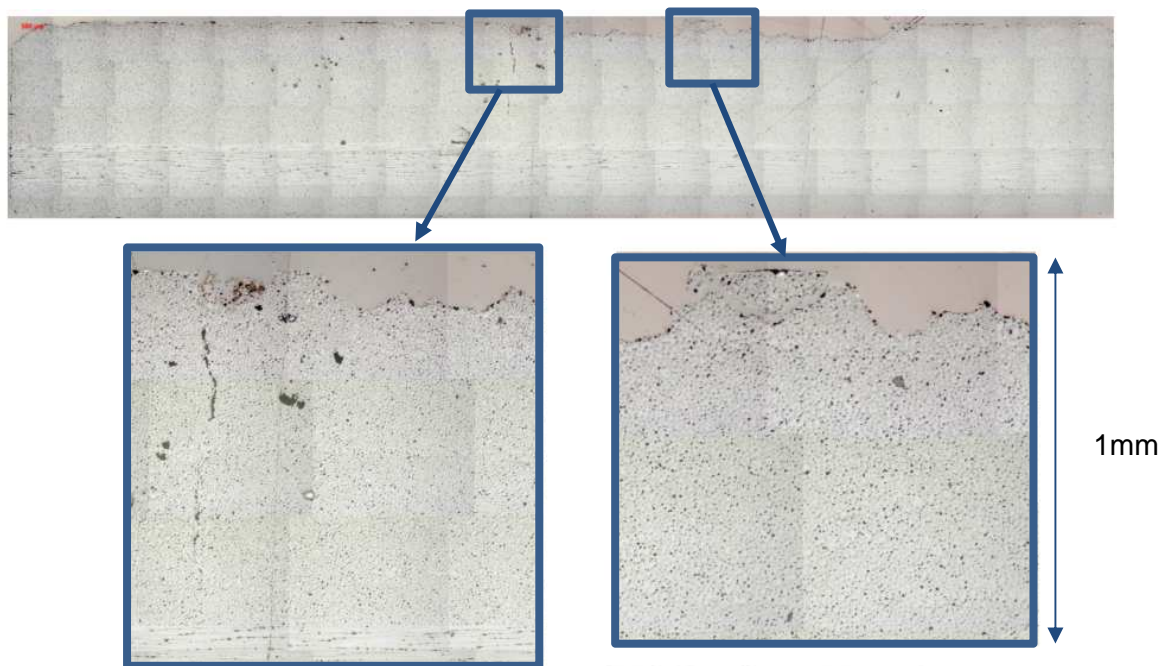


Figure 142 : Faciès de rupture d'une éprouvette avec le plissement P2 en fatigue flexion 3 points avec de la fissuration à gauche et du délaminage à droite

Le faciès de rupture de l'échantillon montre deux types d'endommagement typiques des essais de fatigue : du délaminage et de la fissuration. Ce sont les mêmes endommagements que ceux du matériau sain, avec porosité et avec le plissement P1.

## IV. Analyse de l'influence des défauts sur le comportement en fatigue

Les résultats des essais de fatigue pour le matériau sain vont être comparés avec ceux des matériaux avec plissement et avec porosité, afin d'identifier une possible influence du défaut sur le comportement en fatigue.



#### IV.1 Influence du défaut de porosité

Les courbes de Wöhler du matériau sain, du matériau porosité « - » à 1,2% de porosité et le matériau porosité « + » avec 3,0% de porosité, ainsi que les modèles de Harris de chacun des matériaux, sont présentés sur la figure 143. L'influence du défaut de porosité sur le comportement mécanique en quasi-statique, en flexion 3 points, est visible sur les points résultats à 1 cycle, où les points des matériaux avec porosité sont inférieurs à ceux du matériau sain. L'hypothèse d'une influence du défaut de porosité sur le comportement en fatigue en flexion 3 points n'est pas validée à la vue des points résultats des courbes de Wöhler. L'ensemble des points résultats du matériau sain, porosité « - » et porosité « + », forment un amas de points difficile à discriminer.

Un zoom sur l'amas de points résultats avec les courbes du modèle de Harris est visible sur la figure 144. Ceci permet de confirmer le fait que les points résultats du matériau sain, du matériau porosité « - » et porosité « + », sont regroupés en un amas indissociable.

De plus les courbes du modèle de Harris de chaque matériau sont très proches, avec des valeurs des paramètres  $a$  et  $b$  plus ou moins proches entre elles, comme l'indique le tableau 93.

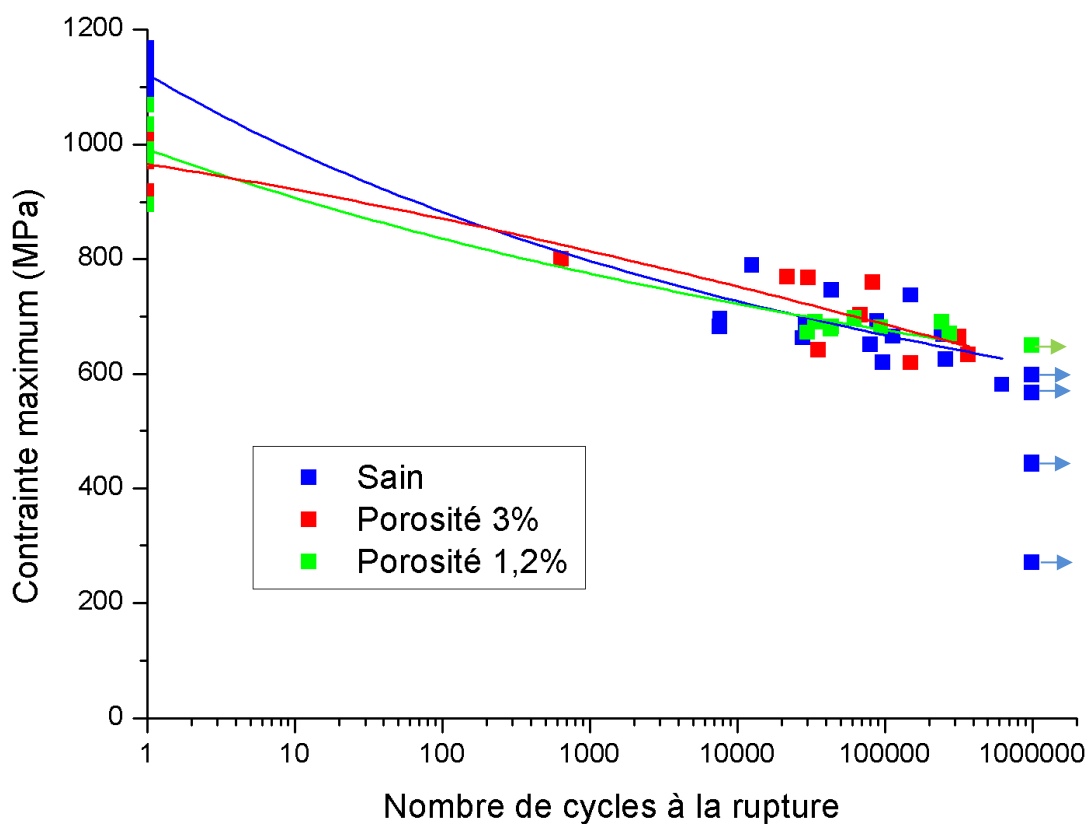


Figure 143 : Courbe de Wöhler en flexion 3 points pour le matériau sain et avec porosité



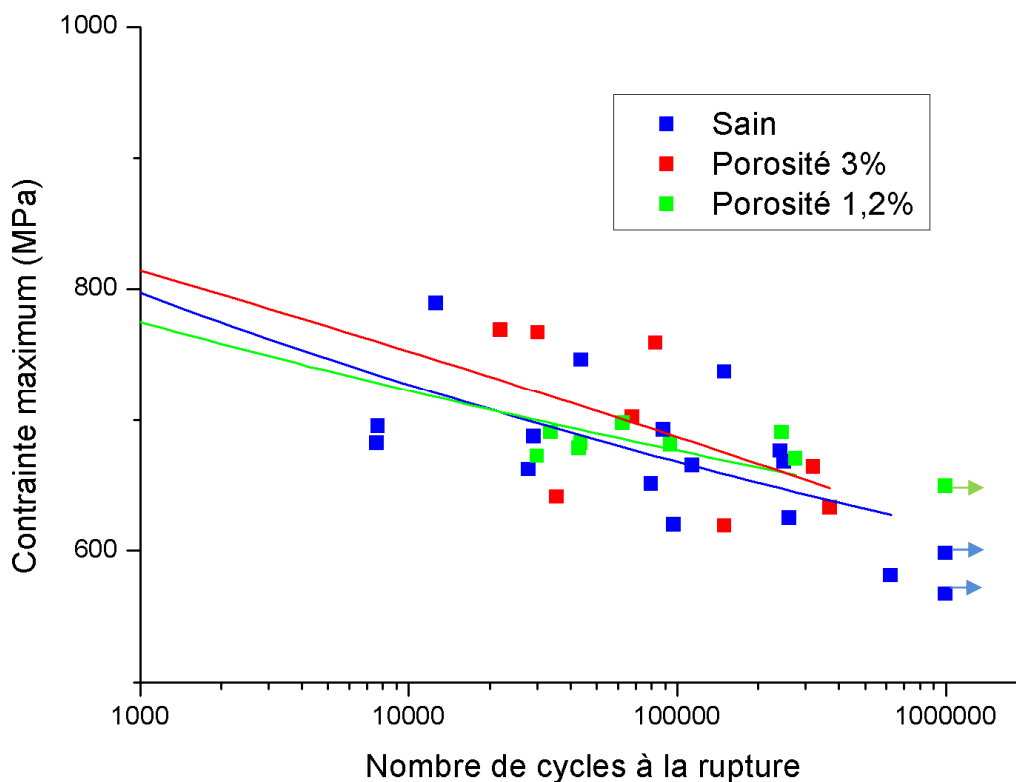


Figure 144 : Courbe de Wöhler en flexion 3 points, entre 1000 et 1000000 de cycles, pour le matériau sain et avec porosité

Paramètres	Valeurs sain	Valeurs porosité « - »	Valeurs porosité « + »
a	-0,08184	-0,15503	8,4E-4
b	0,08273	0,15604	1,9E-4
c	6,3E-4	2,6E-4	0,101

Tableau 93 : Valeur des paramètres de la loi de Harris pour le matériau sain, porosité – et porosité +

La comparaison des faciès de rupture des éprouvettes rompus en fatigue en flexion 3 points, pour le matériau sain, avec 1,2% de porosité et 3,0% de porosité montre que les 3 matériaux ont les mêmes endommagements, à savoir du délaminage et de la fissuration. Ces deux endommagements, typiques des essais de flexion 3 points, ne suivent pas de chemin préférentiel en suivant par exemple des macros pores.

L'hypothèse de l'influence du taux de porosité sur le comportement en fatigue en flexion 3 points est donc invalidée par l'analyse des essais de fatigue dont il ressort 3 arguments :

1. Les points résultats du matériau sain, avec 1,2% et 3,0% de porosité sont regroupés en un amas indissociable ;
2. Le modèle de Harris du matériau sain, avec 1,2% et 3,0% de porosité sont très proches avec des valeurs de paramètres  $a$  et  $b$  proches de 0 qui confirment le point précédent ;

3. Les endommagements engendrés par l'essai de fatigue sont identiques pour le matériau sain, avec 1,2% et 3,0% de porosité. De plus les endommagements ne suivent pas de chemins préférentiels sous l'influence des macro-pores.

#### ***IV.2 Influence du défaut de plissement***

La figure 145 présente les courbes de Wöhler du matériau sain, avec le plissement P1 et avec le plissement P2. Elles sont complétées par la courbe du modèle de Harris de chaque matériau. Comme pour le défaut de porosité, l'influence du défaut de plissement sur le comportement quasi-statique en flexion 3 points est visible sur les points résultats à 1 cycle avec des valeurs plus faible pour le plissement P2. L'influence du plissement P1 en quasi-statique est moins importante que celle du plissement P2. Le comportement en fatigue du composite stratifié en flexion 3 points semble être influencé seulement par la présence d'un plissement du type P2 en configuration de traction. L'amas de points résultats du matériau avec le plissement P2, en configuration traction, est légèrement en dessous des autres points résultats.

Le zoom sur l'amas de points résultats, visible sur la figure 146, montre bien que les points résultats du matériau plissement P2, en configuration de traction, se situent en dessous de l'amas des autres points. De plus, les points du matériau plissement P2, en configuration compression, sont assez dispersés et certains se trouvent en dessous de l'amas de points. Cela semble indiquer que le comportement en fatigue en flexion 3 points est fragilisé par la présence d'un plissement de type 2, c'est-à-dire avec des dimensions élevées ce qui peut sembler assez logique. Cette hypothèse est renforcée par la tendance des courbes du modèle de Harris pour chaque matériau. Ainsi, celle pour le matériau avec plissement P2 se situe bien en dessous des autres.

Les valeurs des paramètres du modèle de Harris, pour chaque matériau, confirment l'hypothèse d'une influence du plissement P2 sur le comportement en fatigue en flexion 3 points. Le tableau 94 énumère ces paramètres et les valeurs des coefficients  $a$  et  $b$  pour le plissement 2 sont supérieures à celles du matériau sain, pour les deux configurations, en étant assez éloigné de 0 ce qui indique que la pente de la courbe est forte et que le défaut engendre donc un dégradation accélérée du matériau.

Ceci renforce l'hypothèse de l'influence du plissement 2 sur le comportement en fatigue du composite stratifié. Les valeurs des paramètres pour le plissement 1 sont proches de celles du matériau sain en étant proche de 0.

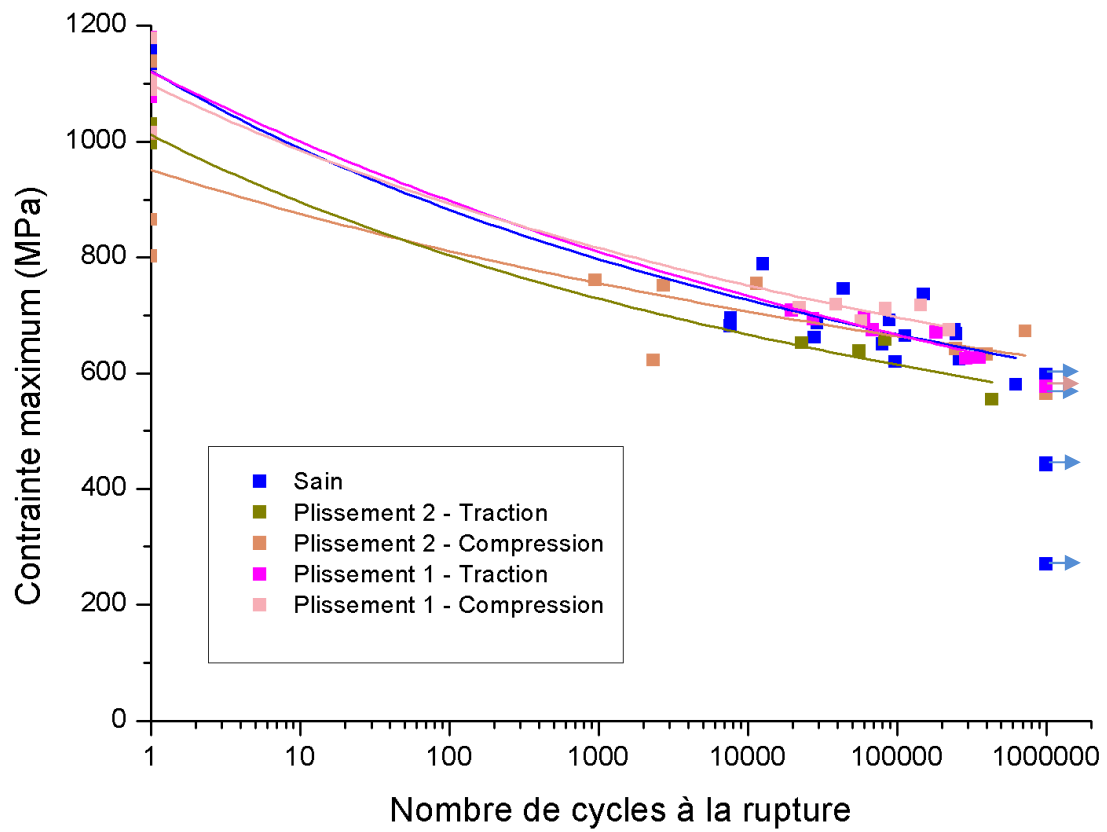


Figure 145 : Courbe de Wöhler en flexion 3 points pour le matériau sain et avec plissement

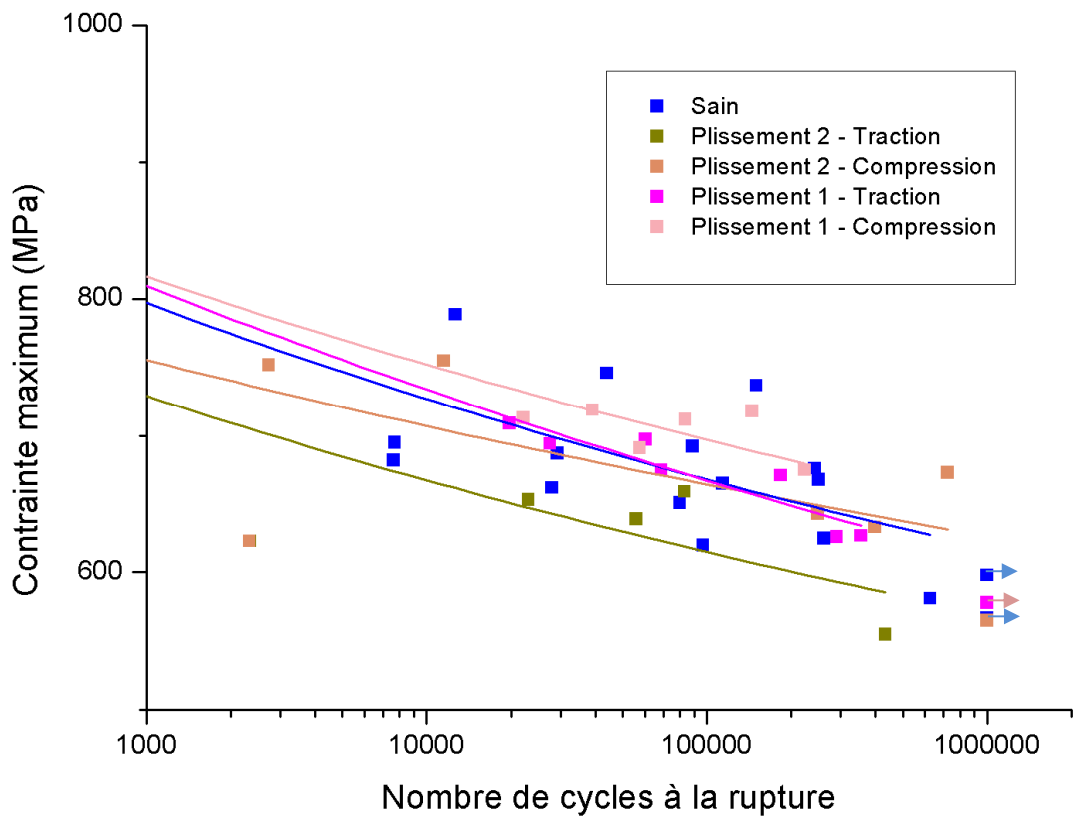


Figure 146 : Courbe de Wöhler en flexion 3 points, entre 1000 et 1000000 de cycles, pour le matériau sain et avec plissement

Paramètres	Valeurs sain	Valeurs P1 Traction	Valeurs P1 Compression	Valeurs P2 Traction	Valeurs P2 Compression
a	-0,08184	-8,8E-4	-0,08469	-0,57932	-0,46783
b	0,08273	0,00178	0,08560	0,58031	0,46888
c	6,3E-4	0,02550	5,3E-4	9,5E-4	8,4E-4

**Tableau 94 : Valeur des paramètres de la loi de Harris pour le matériau sain, plissement 1 et plissement 2**

Les faciès de rupture des éprouvettes, rompues en fatigue flexion 3 points, des 3 matériaux présentes les mêmes endommagements caractéristiques des essais de flexion, à savoir du délaminage et de la fissuration. Tout comme pour le défaut de porosité, les endommagements ne suivent pas de chemin préférentiel en fonction du plissement.

Donc au vu de l'analyse de résultats des essais de fatigue du matériau avec plissement et sain, l'hypothèse de l'influence du défaut de plissement sur le comportement en fatigue en flexion 3 point est validée pour des plissements de grandes dimensions.

## Conclusion

Une campagne d'essais de fatigue en flexion 3 points est mise en place afin de caractériser l'influence des défauts de porosité et de plissement sur le comportement en fatigue d'un composite stratifié. Pour cela, une machine de fatigue avec un suivi de la raideur de l'éprouvette est conçue au sein du laboratoire. Des essais de fatigue avec un rapport de charge de 0,1 sont effectués sur le matériau sain, le matériau porosité « - » à 1,2% de porosité, le matériau porosité « + » à 3,0% de porosité, le matériau avec le petit plissement P1 et le matériau avec le grand plissement P2. Les résultats des essais de fatigue sont analysés à l'aide d'une courbe de Wöhler et le comportement est modélisé avec la loi de Harris. De plus une analyse du faciès de rupture permet d'observer les endommagements dus à l'essai de flexion et possiblement influencés par un défaut. Les courbes de Wöhler des matériaux étudiés présentent des tendances typiques des matériaux composites stratifiés, plutôt en droite, avec un changement de type de variabilité entre les essais quasi-statiques et les essais à grand nombre de cycles.

La comparaison des résultats des essais sur le matériau sain, le matériau porosité « - » et porosité « + », démontre que le défaut de porosité n'a pas d'influence sur le comportement en fatigue en flexion 3 points. En effet, les points résultats des différents matériaux sont confondus dans un amas de points, les valeurs des paramètres du modèle de Harris sont très proches pour les 3 matériaux, et les faciès de rupture des 3 matériaux présentent les mêmes modes d'endommagement à savoir du délaminage et de la fissuration.