

Étude expérimentale de l'endommagement dans les stratifiés

La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information.

Albert Einstein

Sommaire

3.1 Introduction	49
3.2 Choix des stratifications	50
3.3 Élaboration des stratifiés	52
3.3.1 Préparation des échantillons	52
3.3.2 Observations microscopiques	54
3.3.2.1 Distribution des fibres	54
3.3.2.2 Les défauts d'élaboration	55
3.4 Dispositif expérimental	55
3.4.1 Machines d'essais mécaniques et instrumentation des éprouvettes	55
3.4.2 Les moyens d'observation	57
3.4.3 Montage d'observation optique in-situ	58
3.5 Comportement mécanique du matériau unidirectionnel	60
3.5.1 Protocole expérimental	60
3.5.2 Essais de traction uni-axiale dans l'axe des fibres	61
3.5.3 Essais de traction uni-axiale dans le sens transverse	64
3.5.4 Essais de traction uni-axiale hors-axe	65

3.5.5	Conclusion	70
3.6	La fissuration intra-laminaire : aspects qualitatifs	71
3.6.1	Des chargements spécifiques	71
3.6.2	Caractéristiques physiques de la fissuration	73
3.6.2.1	Un réseau quasi-périodique	73
3.6.2.2	Influence de la micro-structure	73
3.6.2.3	Propagation des fissures	75
3.6.2.4	Fissuration des plis externes	76
3.6.2.5	Ordre d'apparition des fissures	76
3.6.3	Influence de l'épaisseur du pli fissuré	77
3.6.4	Interaction fissuration/délamination	79
3.7	Comportement du stratifié et analyse de l'endommagement sous sollicitations quasi-statiques	81
3.7.1	Introduction	81
3.7.2	Essais de traction quasi-statique monotone sur stratifiés	81
3.7.3	Analyse de la fissuration sous chargements quasi-statiques	83
3.7.3.1	Cinétiques de fissuration et chutes de rigidités	83
3.7.3.2	Influence de l'épaisseur de la couche fissurée	86
3.8	Comportement du stratifié et analyse de l'endommagement en fatigue	90
3.8.1	Introduction	90
3.8.2	Analyse de l'évolution de l'endommagement	91
3.8.2.1	Influence du niveau de contrainte maximum	91
3.8.2.2	Analyse des chutes des rigidités longitudinales macroscopiques	94
3.8.2.3	Influence de l'épaisseur du pli fissuré	99
3.8.3	Comparaison quasi-statique/fatigue	106
3.8.4	Essais à deux niveaux de chargement	108
3.8.5	Cumul de l'endommagement	114
3.9	Conclusion	117

3.1 Introduction

Nous l'avons montré dans l'analyse de la littérature faite au chapitre précédent (CHAP. 2), l'endommagement des composites stratifiés est un phénomène complexe qui met en jeu plusieurs mécanismes. Aussi, nous faisons le choix d'axer notre étude sur un seul mécanisme : **la fissuration intra-laminaire**.

Bien que n'étant pas catastrophique pour l'intégrité d'une structure, la fissuration peut être soit à l'origine, soit être un facteur accélérant pour d'autres types de défauts tels que le délaminage ou les ruptures de fibres qui eux s'avèrent beaucoup plus nuisibles pour la tenue mécanique d'une structure [Thionnet, 1991] [Huchette et al., 2009]. Dans ce cadre, il devient important de pouvoir prédire l'apparition et l'évolution de la fissuration.

Aussi, nous proposons dans ce chapitre, une étude expérimentale de la fissuration sous chargements quasi-statiques et cycliques. Les objectifs que nous nous fixons sont les suivants :

1. obtenir des renseignements qualitatifs ;

L'idée est ici d'étudier la géométrie des fissures, leur orientation, leur mode de propagation ou de multiplication, l'historique d'apparition ... Ces observations sont capitales dans la mesure où nous souhaitons écrire un modèle basé sur les mécanismes physiques qui gouvernent l'endommagement.

2. mettre en évidence les interactions entre les différents types d'endommagement ;

Nous nous attacherons entre autre à déterminer quel est le rôle de la fissuration dans le processus d'apparition et la propagation du délaminage.

3. identifier les différents facteurs qui influent sur la cinétique de fissuration ;

Il s'agit ici d'étudier l'influence du niveau de chargement, de l'épaisseur de la couche fissurée, du mode d'ouverture des fissures ...

4. quantifier l'endommagement par fissuration, son évolution et l'influence de l'apparition de fissures sur les propriétés mécaniques du matériau.

Notre but ultime étant de capitaliser un maximum de renseignements tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif qui nous permettront de dégager les principales caractéristiques et paramètres à prendre en compte lors de la modélisation. Ainsi, les résultats expérimentaux serviront de base à l'écriture et l'identification d'un modèle d'endommagement par fissuration intra-laminaire.

Dans ce qui suit nous commencerons par présenter et justifier l'utilisation des différentes stratifications étudiées. Nous présenterons ensuite les différents protocoles, équipements et essais expérimentaux mis en place pour caractériser le comportement mécanique du pli unidirectionnel et étudier l'endommagement au sein des stratifiés. En outre nous présenterons une technique de détection et de suivi de l'endommagement par une analyse optique in-situ. Un stratifié est un empilement de plusieurs plis, il est donc important de connaître le comportement du pli de base. Aussi, nous présenterons dans un premier temps les essais réalisés sur le pli unidirectionnel avant de proposer les résultats obtenus au cours des essais réalisés sur les stratifiés croisés sollicités en quasi-statique puis en fatigue. Nous présenterons tout d'abord les résultats obtenus d'un point de vue qualitatif qui découlent d'une simple observation visuelle. Nous en dégagerons entre autres les caractéristiques physiques de l'endommagement ou les interactions entre différents mécanismes d'endommagement. Enfin, nous terminerons par les résultats nous permettant de quantifier l'endommagement et notamment de déterminer des cinétiques de fissuration, ou d'évaluer les dégradations des propriétés mécaniques.

3.2 Choix des stratifications

Un composite stratifié est avant tout un empilement de plusieurs plis orientés dans différentes directions dont il est important de connaître le comportement. Pour cela, on réalise des essais de traction quasi-statique sur l'unidirectionnel, dans le sens des fibres, dans le sens transverse et dans les directions hors-axes. Nous utiliserons donc les séquences (0_n°) , (90_n°) , (45_n°) , $(\pm 45_n^\circ)_s$, $(\pm 30_n^\circ)_s$ et $(\pm 20_n^\circ)_s$ (TAB. 3.1). Ces essais servent notamment à l'identification des coefficients de la matrice de rigidité telle qu'elle a été définie par loi de HOOKE généralisée (EQ. 2.1).

Nous nous intéressons ensuite à l'endommagement par fissuration intra-laminaire. Il est bien évident que le choix de stratifications doit se faire en fonction des informations recherchées. L'analyse bibliographique faite au chapitre précédent (CHAP. 2) montre que l'épaisseur et la séquence d'empilement sont deux paramètres directement liés au choix de la stratification et qui ont une grande influence sur la fissuration.

Les séquences $(0_n^\circ/90_m^\circ)_s$, appelées également *cross-plyed*, se prêtent bien à l'étude de la fissuration car elles ont la particularité de s'endommager majoritairement par fissuration intra-laminaire. On parle alors de fissuration transverse. Ce type de séquence permet notamment d'étudier l'influence de l'épaisseur en faisant varier le nombre de plis orientés à 90° tout en fixant le nombre de plis à 0° . Ainsi, nous utiliserons les séquences $(0_3^\circ/90_3^\circ/0_3^\circ)$, $(0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ)$ et $(0_3^\circ/90_{12}^\circ/0_3^\circ)$.

La cinétique de fissuration d'un pli diffère en fonction de sa position dans l'empilement, plus particulièrement suivant qu'il se trouve sur les couches intérieures ou dans les couches de peau [Nairn et al., 1993]. Aussi des essais sur la séquence $(90^\circ/0_2^\circ/90^\circ)$ permettent d'étudier la fissuration des couches extérieures.

Enfin, des séquences de type $(0_n^\circ/\pm\theta_m^\circ)_s$ permettent d'étudier l'influence du mode d'apparition des fissures (fissures ouvertes ou cisailées). La séquence $(0_n^\circ/\pm 45_m^\circ)_s$

permet d'avoir des fissures sollicitées majoritairement en cisaillement, alors que la séquence $(0_n^\circ / \pm 55_m^\circ)_s$ est une configuration mixte entre le cisaillement et l'ouverture.

L'ensemble de ces stratifications soumises à un chargement adéquat permettent d'étudier les mécanismes d'endommagement et notamment d'isoler les différents paramètres qui influent sur la cinétique de fissuration. En outre, ils permettent de maîtriser le type d'endommagement, d'étudier l'influence de l'épaisseur, de la position du pli fissuré dans l'empilement et du mode d'apparition des fissures (TAB. 3.2).

Séquences	Informations recherchées
(0_3°)	Module élastique : E_{11} Coefficients de Poisson : ν_{12}, ν_{21} Caractéristiques à rupture : $\sigma_{11R}, \varepsilon_{11R}$
(90_3°)	Module sens transverse : E_{22} Caractéristiques à rupture : $\sigma_{22R}, \varepsilon_{22R}$
(45_3°)	Module de cisaillement : G_{12} Caractéristiques à rupture : $\sigma_{12R}, \varepsilon_{12R}$
$(\pm 20_3^\circ)_s, (\pm 30_3^\circ)_s, (\pm 45_3^\circ)_s$	Comportement hors axes

TABLE 3.1 - *Récapitulatif des stratifications utilisées pour la caractérisation du comportement de l'unidirectionnel*

Séquences	Informations recherchées
$(0_3^\circ/90_3^\circ/0_3^\circ)$	Analyse de la fissuration intra-laminaire Influence de l'épaisseur de la couche fissurée et du niveau de chargement
$(0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ)$	
$(0_3^\circ/90_{12}^\circ/0_3^\circ)$	
$(90^\circ/0_2^\circ/90^\circ)$	Influence de la séquence d'empilement
$(0_3^\circ / \pm 45_3^\circ)_s$	Influence du mode de sollicitation
$(0_3^\circ / \pm 55_3^\circ)_s$	

TABLE 3.2 - *Récapitulatif des stratifications utilisées pour l'étude de l'endommagement*

3.3 Élaboration des stratifiés

L'ensemble des stratifiés utilisés dans cette étude ont été élaborés à partir du pré-imprégné fourni par la société STRUCTIL sous la forme d'une bobine dont les principales caractéristiques sont données dans le tableau (TAB. 3.3).

Type de fibre	Masse de fibre	Type de résine	Taux de résine
carbone (HR)	300g/m ²	R367-2	38 %
TR50	±15		±2

TABLE 3.3 - Caractéristiques du pré-imprégné (données fabricant)

3.3.1 Préparation des échantillons

Les différentes stratifications nécessaires pour cette étude ont été élaborées par plaques de 300 × 300 mm² moulées à partir d'empilements de 3 à 18 plis (environ 1 à 6 mm). La polymérisation a été effectuée dans un four autoclave par la société STRUCTIL suivant le cycle (pression, température) donné figure 3.1. L'application d'une pression d'environ 3.7 bars ayant pour but de favoriser la pénétration de l'époxy entre les fibres et d'éliminer l'excédent de résine présent initialement dans le pré-imprégné.

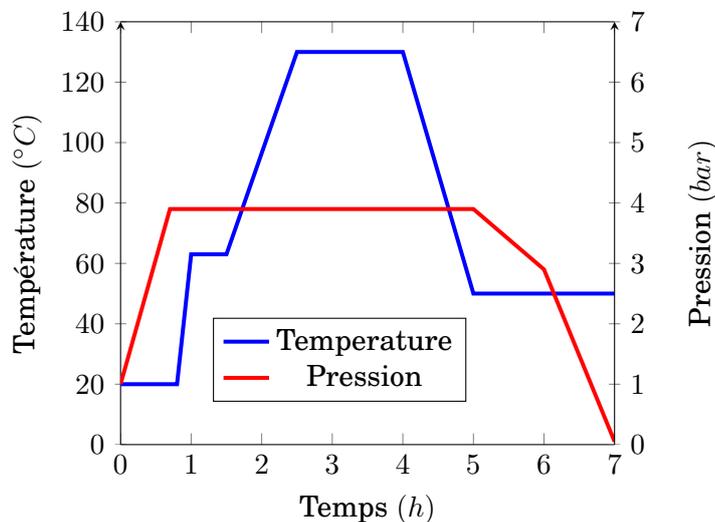


FIGURE 3.1 - Cycle de polymérisation de la résine R367-2

Les éprouvettes sont découpées à la meule diamant dans les plaques ainsi fabriquées. Les découpes sont réalisées dans différentes directions par rapport à l'axe des fibres de manière à obtenir les orientations souhaitées (FIG. 3.2). Enfin pour éviter tout endommagement provoqué par la pression des mâchoires des mors au cours des essais, les éprouvettes sont équipées de talons en composite verre/époxy tel que le

recommande la norme ISO 527-5. Les talons sont collés à l'aide d'une colle époxy bi-composants (Araldite).

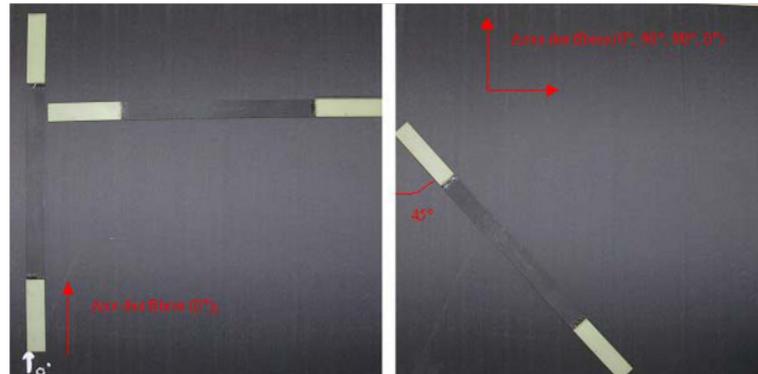


FIGURE 3.2 - Découpe des éprouvettes dans les plaques stratifiées [Blassiau, 2005]

Certaines normes (ASTM D 638 par exemple) préconisent d'utiliser des éprouvettes dites « haltères » ou à section réduite pour favoriser la rupture dans la zone utile lors d'un essai de traction. Toutefois, l'utilisation de ce type de géométrie introduit plusieurs problèmes dans le cas des matériaux composites à fibres continues. D'abord, se pose le problème de l'usinage qui peut sévèrement endommager le matériau [Ghidossi, 2003]. Ensuite, cela soulève de nombreuses interrogations quant aux concentrations de contraintes présentes dans les zones courbes. Finalement, bien que sensibles à toute contrainte parasite qui pourrait favoriser l'initiation de la rupture, les éprouvettes droites semblent le meilleur compromis [Levesque, 2000].

La géométrie et les dimensions des éprouvettes retenues sont présentées sur la figure (FIG. 3.3). La longueur des éprouvettes est de 250 mm tel que le recommande la norme ASTM D 3039 et elle est d'un ordre de grandeur largement supérieur aux autres dimensions ce qui permet de respecter le principe de SAINT-VENANT dans la zone utile de l'éprouvette.

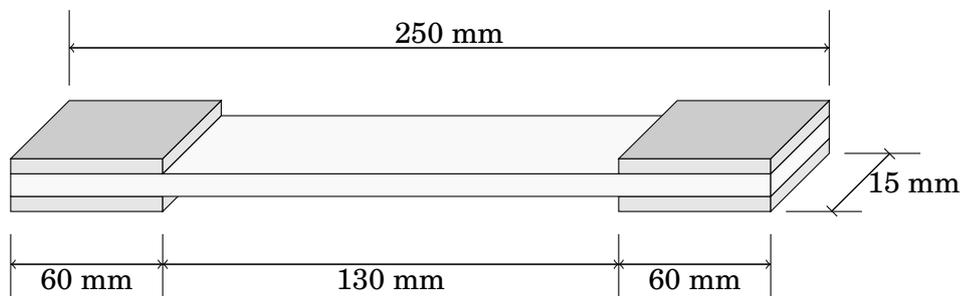


FIGURE 3.3 - Géométrie et dimensions des éprouvettes testées exprimées en mm

3.3.2 Observations microscopiques

3.3.2.1 Distribution des fibres

La figure 3.4 montre le champ poli d'un stratifié de type $(0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ})$ et met en évidence l'hétérogénéité de la micro-structure. De part sa nature même, le composite est un matériau hétérogène puisqu'il est constitué de deux matériaux distincts et non miscibles : les fibres et la matrice (FIG. 3.4a). De plus, nous pouvons remarquer la distribution irrégulière des fibres dans la matrice. Il présente en effet des zones riches en fibres et d'autres riches en matrice (FIG. 3.4b). Comme nous l'avons expliqué précédemment, les stratifiés sont obtenus par empilement de différents plis de pré-imprégnés. Cette superposition est à l'origine de l'hétérogénéité dans la répartition des fibres. Elle est notamment à l'origine des zones inter-plis riches en résine. Enfin, notons qu'au sein même du pli, la répartition des fibres n'est pas uniforme. Les zones riches en résine observées dans chaque pli correspondent aux chemins empruntés par la résine entre les différentes mèches de fibres lors de l'élaboration du composite. ALBEROLA, MERLE et BENZARTI [Alberola et al., 1999] montrent, dans le cas d'un verre/époxy, que l'hétérogénéité de la répartition des fibres est indépendante de la fraction volumique de fibres et qu'elle est due au procédé de fabrication, à la viscosité de la matrice et aux interactions qui se développent entre les fibres.

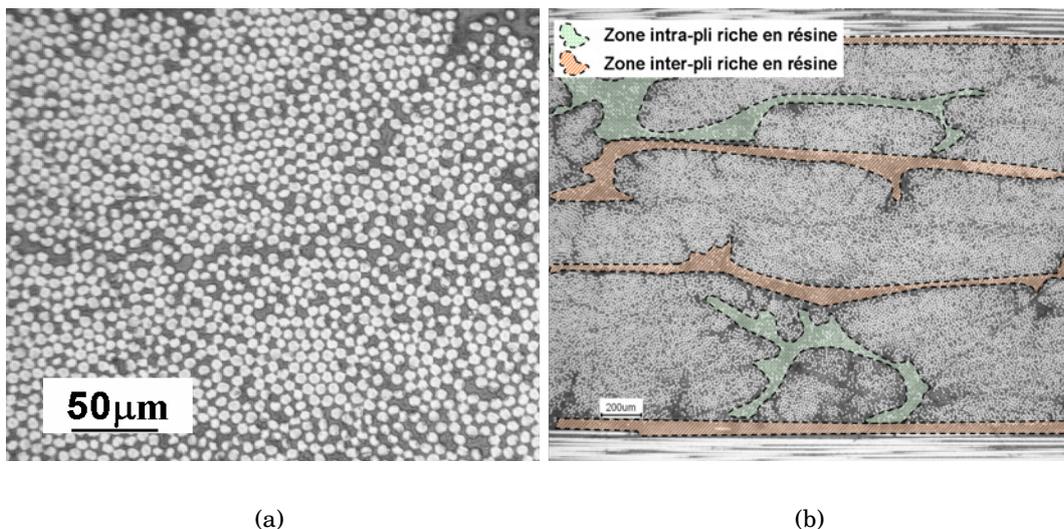


FIGURE 3.4 - *Champ poli d'un stratifié de type $(0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ})$ mettant en évidence l'hétérogénéité de la distribution des fibres*

3.3.2.2 Les défauts d'élaboration

Les observations microscopiques révèlent la présence de défauts consécutifs à l'élaboration des stratifiés. Ces défauts sont essentiellement des porosités qui se trouvent majoritairement dans les zones riches en résine. Elles sont de formes circulaires ou allongées et leur taille (diamètre ou longueur) varie de quelques dizaines à une centaine de micromètres (FIG. 3.5).

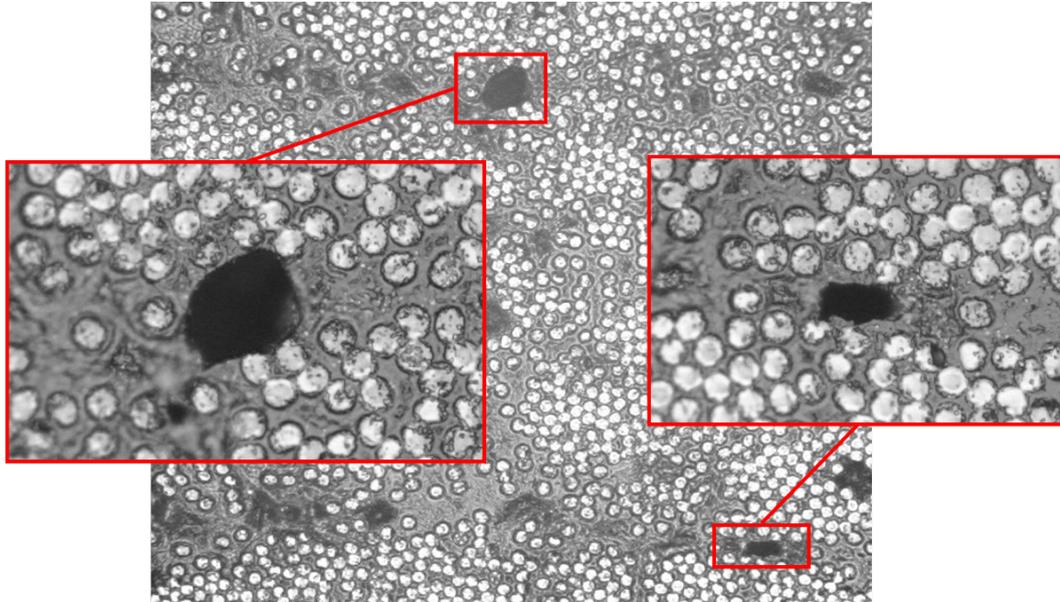


FIGURE 3.5 - Champ poli d'un stratifié de type $(0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ})$

3.4 Dispositif expérimental

3.4.1 Machines d'essais mécaniques et instrumentation des éprouvettes

On peut classer les essais réalisés dans cette étude en deux catégories : les essais de traction quasi-statique (traction monotone ou charge/décharge) et les essais de traction cyclique.

Les essais de traction quasi-statique ont été réalisés sur une machine de traction électro-mécanique à vis de marque INSTRON. Cette machine permet un pilotage en charge (contrainte) ou en déplacement (déformation). Pour plus de stabilité et pour simplifier l'asservissement de certains essais (notamment les essais de charge-décharge) nous avons choisi un asservissement en contrainte. La contrainte appliquée à l'éprouvette est calculée à chaque instant à l'aide de la relation suivante (EQ. 3.1) :

$$\sigma = \sigma_{t_0} + \frac{\dot{F}}{S} \times (t - t_0) \quad (3.1)$$

où σ_{t_0} est la contrainte appliquée en (MPa) à l'éprouvette à l'instant t_0 , \dot{F} la vitesse de charge appliquée par la machine en $(N \cdot s^{-1})$ et S la section de l'éprouvette

3. Etude expérimentale de l'endommagement dans les stratifiés

en (mm^2). Nous avons choisi une vitesse de charge de $1MPa \cdot s^{-1}$. Afin d'avoir une meilleure précision sur les résultats, la cellule de charge est adaptée à la séquence testée. Ainsi, la machine a successivement été équipée d'une cellule de charge de 1000, 5000 ou 10000 daN .

Les essais de traction cyclique ont été réalisés sur une machine de traction hydraulique de marque MAYES. La machine est équipée d'une cellule de charge de 20000 daN (FIG. 3.7). Là encore, nous avons choisi un pilotage en charge.

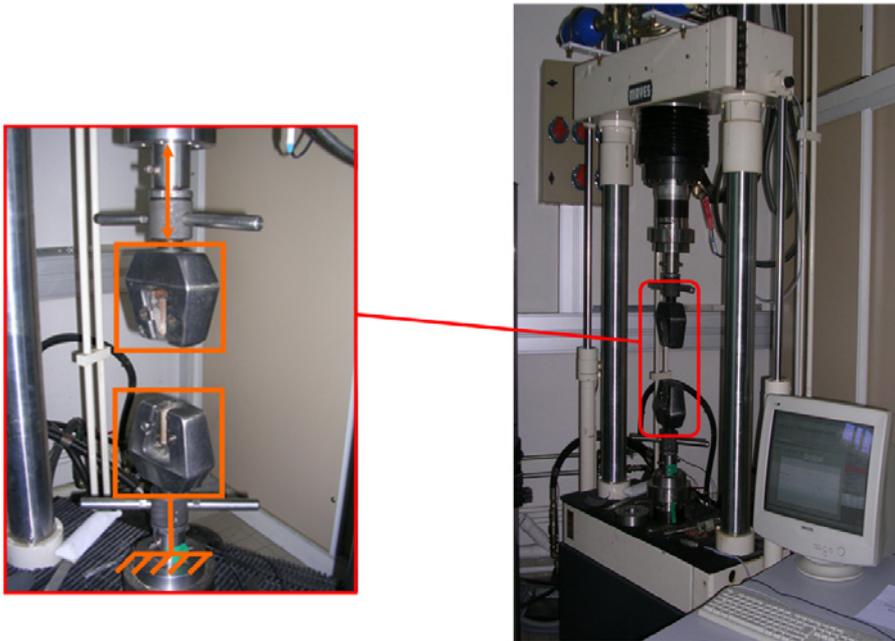


FIGURE 3.6 - *Vue générale de la machine hydraulique utilisée pour les essais de traction cyclique et des mors auto-serrants*

Les éprouvettes sont maintenues à l'aide de mors auto-serrants. Ce choix est justifié par les charges importantes en présence dans ces essais. Ce type de mors est le plus adapté pour éviter le glissement de l'éprouvette (FIG. 3.7). Nous rappelons que les éprouvettes sont équipées de talons en composite fibres de verre / résine époxy afin que celles-ci ne soient pas endommagées par les mâchoires des mors comme le préconise la norme ASTM D638.

Enfin, le suivi des propriétés mécaniques des stratifiés est fait par extensométrie. Les éprouvettes sont équipées d'un extensomètre (base de mesure 25 mm) pour mesurer le déplacement longitudinal permettant de calculer la déformation associée et, lorsque cela était nécessaire, d'une jauge de déformation donnant accès à la déformation dans le sens transverse.

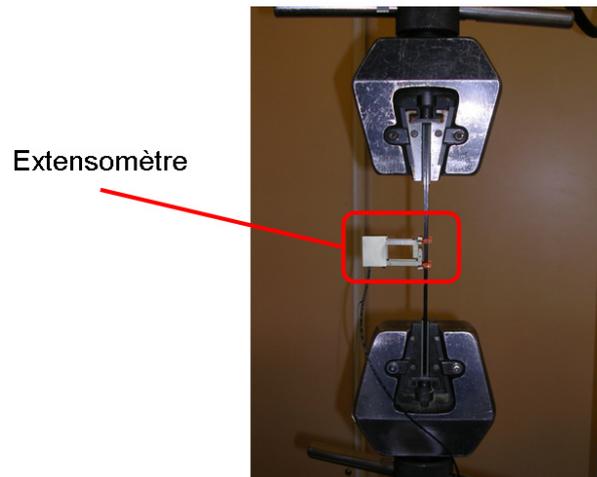


FIGURE 3.7 - *Instrumentation des éprouvettes*

3.4.2 Les moyens d'observation

De nos jours, il existe diverses méthodes de détection de l'endommagement dans les matériaux composites. Le ressuage et la réplique d'éprouvette, qui consistent à prendre une empreinte du champ de l'éprouvette, sont parmi les plus simples et les plus anciennes techniques d'observation. Cependant, elles présentent le gros inconvénient de nécessiter le démontage de l'éprouvette. Parmi les plus couramment utilisées on trouve les méthodes basées sur l'émission acoustique [Laroche, 1980], [Valentin and Bunsell, 1982], [Valentin, 1983] qui consistent à analyser la libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques au sein du matériau lorsque ce dernier s'endommage. Toutefois, aucune étude ne démontre clairement que cette technique est capable de distinguer, ni de localiser les différents types d'endommagement dans le cas où plusieurs dégradations sont présentes simultanément. Enfin, les ondes acoustiques sont créées par l'apparition du dommage si bien que cette technique ne permet pas de détecter l'endommagement initialement présent au sein du matériau. Nous pouvons également citer les méthodes fondées sur la technologie des rayonnements X. L'inconvénient majeur de ce type de méthode réside dans l'impossibilité de faire des observations en cours d'essai. La micro-tomographie aux rayons X [Schilling et al., 2005] permet l'observation en cours d'essai et permet d'avoir accès à la géométrie en trois dimensions des défauts. Cependant, la petite taille de l'échantillon observé devient rapidement un facteur limitant. Il existe encore d'autres techniques telles que l'utilisation de fibres optiques [Wevers et al., 2006], les ultrasons [Scarponi and Briotti, 2000], les micro-ondes [Rossignol and Thionnet, 2006], les mesures de courant [Abry et al., 2001], la thermographie infrarouge [Miner et al., 2004]. Toutefois, la plupart des ces techniques sont lourdes à mettre en oeuvre. Aussi, nous préférons une technique plus légère basée sur une méthode optique de détection et de suivi de l'endommagement in-situ. Ce choix est motivé par le souhait que nous avons de capitaliser des informations à la fois qualitatives et quantitatives.

3.4.3 Montage d'observation optique in-situ

La technique consiste à observer et à photographier une zone de l'échantillon (dans notre cas le bord libre de l'éprouvette) à l'aide d'une caméra. Outre la simplicité de mise en oeuvre, l'avantage de cette méthode est d'éviter le démontage de l'éprouvette après chaque nouvelle sollicitation et ainsi de limiter le nombre d'opérations et par conséquent le risque d'erreur de positionnement lors du remontage. De plus, l'observation en cours d'essai facilite l'observation de l'endommagement puisqu'elle est faite sous charge, les fissures sont donc ouvertes ce qui simplifie grandement leur détection et leur observation. (FIG. 3.8).

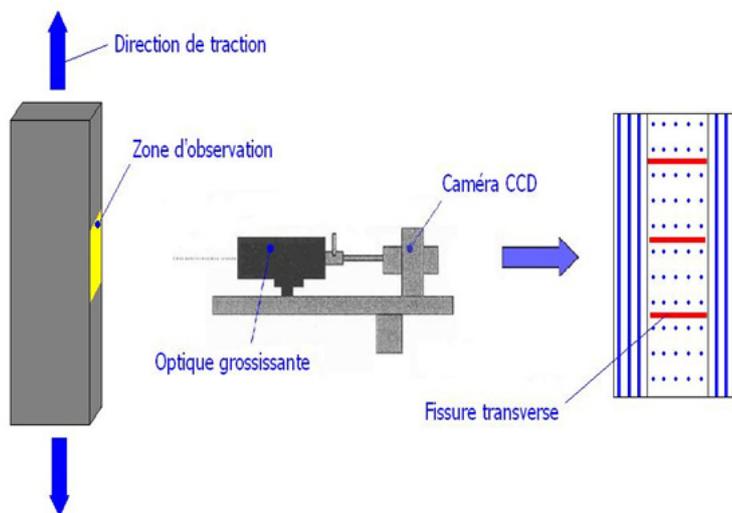


FIGURE 3.8 - Schéma du dispositif expérimental de suivi de la fissuration

Un montage spécifique d'observation a été mis au point (FIG. 3.9). Il est constitué d'une caméra numérique montée sur une colonne autorisant des déplacements dans les trois directions de l'espace permettant de balayer tout le champ de l'éprouvette. La caméra CCD couplée à un zoom optique grossissant jusqu'à 12 fois permet d'accéder aux détails de la micro-structure. Le bord libre de l'éprouvette doit être préalablement poli afin de faciliter l'observation. Ainsi nous avons réalisé un polissage mécanique au papier abrasif du grade 600 au grade 4000. Dans certains cas, afin de pouvoir faire des observations plus fines au microscope optique, nous avons réalisé un polissage jusqu'à $1 \mu m$.

Ce montage (FIG. 3.9) permet ainsi de photographier le bord libre de l'éprouvette en cours d'essai. Nous assemblons ensuite les images obtenues, qui doivent être prises avec un certain recouvrement, pour reconstruire le champ de l'éprouvette (FIG. 3.10).

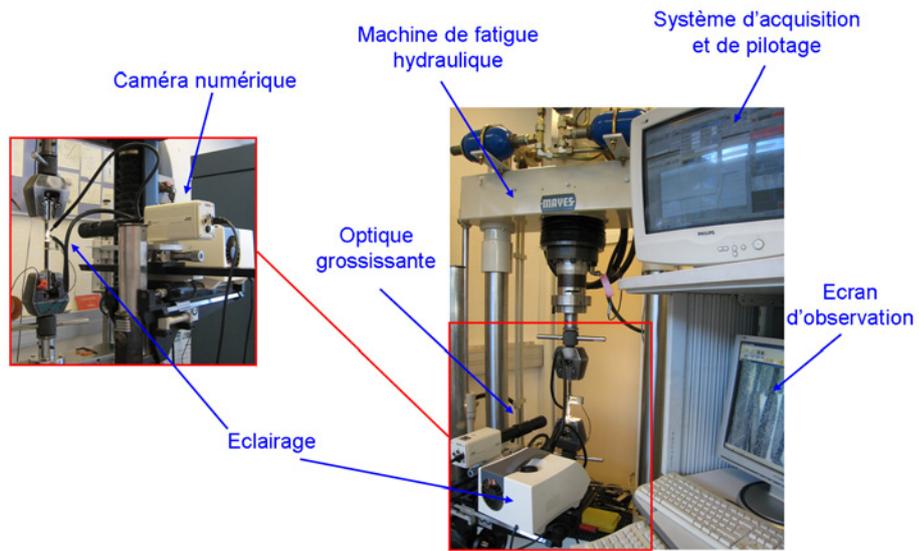


FIGURE 3.9 - *Montage expérimental pour l'observation de l'endommagement en fatigue*

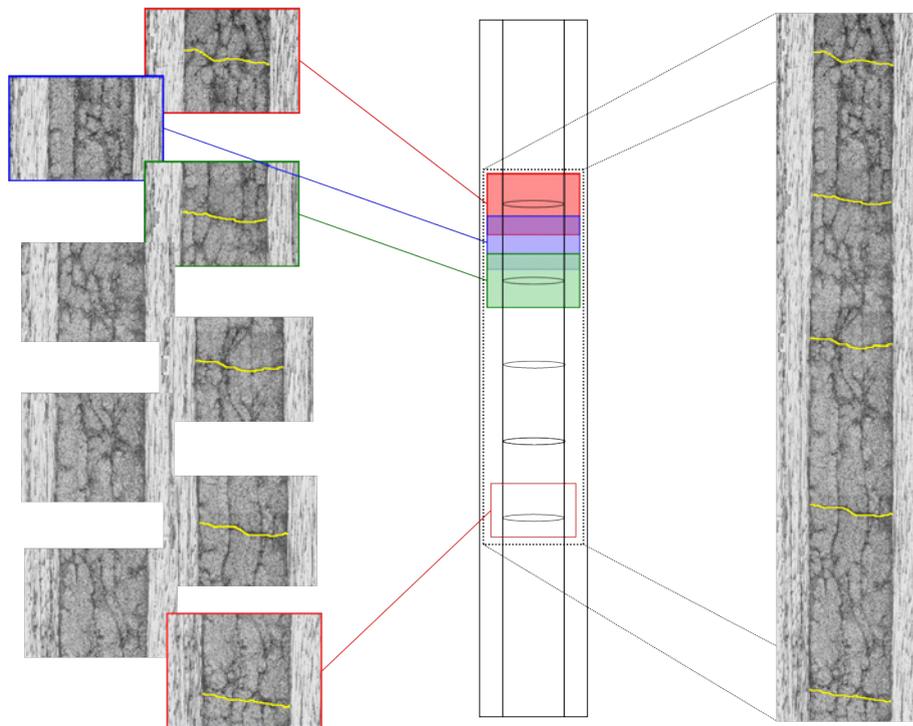


FIGURE 3.10 - *Reconstruction du champ d'une éprouvette*

3.5 Comportement mécanique du matériau unidirectionnel

3.5.1 Protocole expérimental

L'étude du comportement d'un matériau consiste, dans une première approche, à analyser sa réponse à des sollicitations simples dans le but d'identifier la forme de loi de comportement la mieux adaptée. Une fois le type de loi identifié, il s'agit d'en déterminer les différents paramètres. Pour ce faire, plusieurs types d'essais ont été réalisés :

- des essais de traction quasi-statique monotone uni-axiale, dans l'axe et hors-axe (FIG. 3.11), à différentes vitesses. Ces essais ont été menés jusqu'à rupture afin de déterminer les différents modules élastiques, les propriétés à rupture et leur évolution en fonction de la vitesse de sollicitation. Dès lors, pour plus de simplicité, nous désignerons respectivement par les indices « l » et « t » la direction des fibres et la direction transverse.

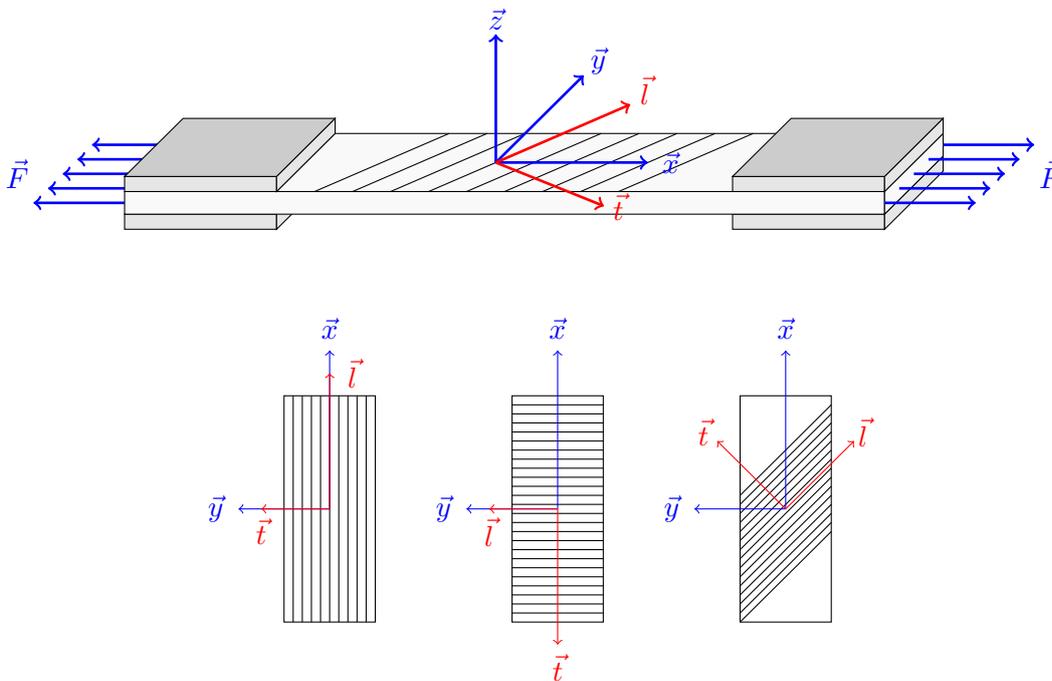


FIGURE 3.11 - Schéma d'une éprouvette d'essai hors-axes et des repères (global et local) qui lui sont associés

- des essais de charge-décharge en traction uni-axiale avec augmentation de la charge à chaque palier, un temps de maintien à contrainte nulle entre chaque palier et cela pour différentes vitesses (FIG. 3.12). L'objectif de ces essais est de mettre en évidence les phénomènes dissipatifs au sein du matériau (endommagement, phénomènes visqueux...).

Plusieurs essais de traction uni-axiale sont nécessaires pour déterminer les propriétés élastiques du pli unidirectionnel. Le module d'élasticité longitudinal E_{ll} et le coefficient de Poisson ν_{lt} sont déterminés à l'aide d'un essai de traction uni-axiale monotone sur la séquence (0_3°). Le module d'élasticité transversal E_{tt} est obtenu à partir d'un essai de traction uni-axiale monotone sur la séquence (90_3°). Enfin, le module de cisaillement G_{lt} est obtenu à l'aide d'un essai de traction uni-axiale monotone sur la séquence (45_3°).

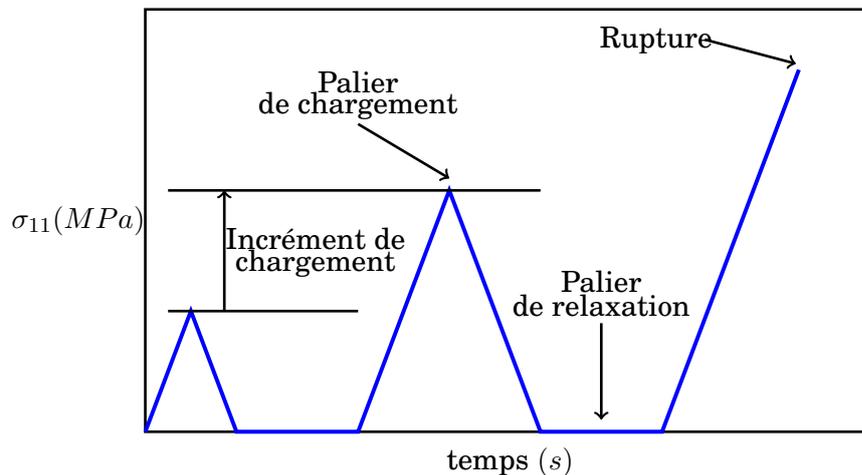


FIGURE 3.12 - Description du chargement appliqué lors d'un essai de charge-décharge

3.5.2 Essais de traction uni-axiale dans l'axe des fibres (0_3°)

Au regard des différents essais réalisés dans la direction longitudinale (axe des fibres), il apparaît que le comportement du pli dans l'axe des fibres est quasi-linéaire, caractéristique d'un comportement élastique. La rupture qui se produit de façon brutale témoigne du caractère fragile et entraîne la destruction totale de l'éprouvette (FIG. 3.14). D'autre part, les essais de traction monotone à différentes vitesses ainsi que les essais de charge-décharge montrent que le comportement longitudinal du pli est insensible aux effets de vitesse (Annexe 7.4 FIG. 7.4).

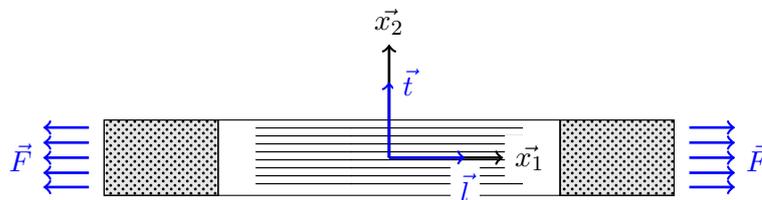


FIGURE 3.13 - Représentation d'une éprouvette de traction à 0° et de ses repères associés

Ce comportement, caractéristique des composites à fibres longues, est en fait prévisible. En effet, dans ce cas la grande majorité des efforts sont repris par les fibres, le

comportement du pli est donc guidé par le comportement élastique des fibres. Nous notons cependant un léger changement de pente sur les courbes de traction. Il est possible d'attribuer cette très légère augmentation de la rigidité au comportement des fibres. En effet, BLASSIAU [Blassiau, 2005] observe une augmentation de la rigidité des fibres en cours de déformation en réalisant des essais de traction sur des mèches de fibres de carbone T600s. HUCHETTE [Huchette, 2005] explique quant à lui ce changement de pente par le ré-alignement des fibres légèrement ondulées suite à la fabrication du stratifié. Il est tout à fait envisageable d'être ici en présence des deux phénomènes. La relation contrainte- déformation peut être représentée par deux segments linéaires de pentes voisines se raccordant à $\varepsilon_{11} \approx 0.6$ (FIG. 3.15). Pour le calcul du module d' YOUNG, du fait de la très faible variation de pente, considérerons que le comportement est quasi-linéaire dont le module est la moyenne pondérée des pentes des deux segments linéaires (EQ. 3.2).

$$E_{ll} = \frac{0.6}{1.5} E_{ll}^{(1)} + \frac{0.9}{1.5} E_{ll}^{(2)} \quad (3.2)$$

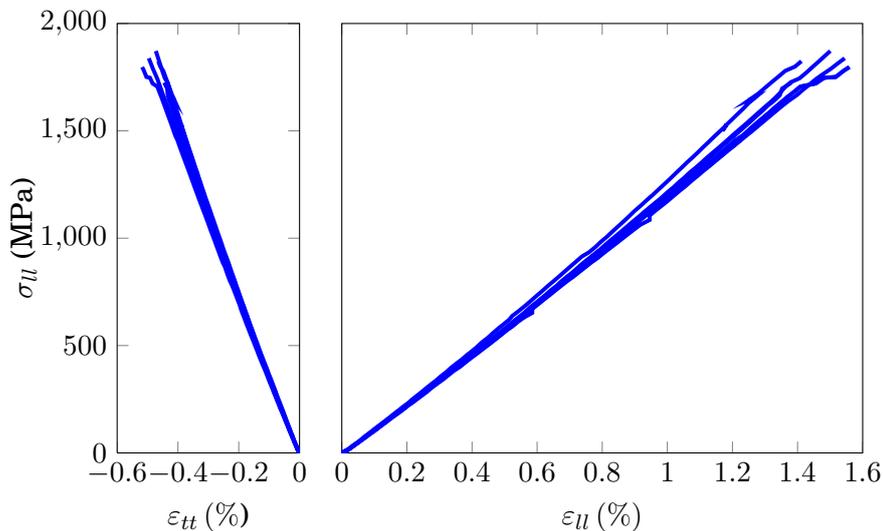


FIGURE 3.14 - Courbes contrainte-déformation obtenues par des essais de traction quasi-statique monotone sur la séquence (0_3^0)

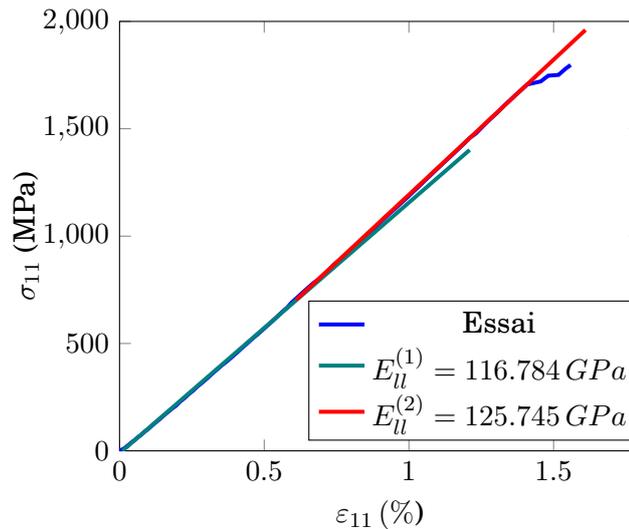


FIGURE 3.15 - Courbes contrainte-déformation obtenues par un essai de traction quasi-statique monotone sur la séquence (0_3°) et mise en évidence de la variation de pente

Le tableau (TAB. 3.4) présente les valeurs des modules déterminés pour chacun des essais. $E_{II}^{(1)}$ et $E_{II}^{(2)}$ représentent respectivement les valeurs des pentes déterminées sur les intervalles $\varepsilon_{II} \in [0; 0.6]$ et $\varepsilon_{II} \in]0.6; 1.5]$. $E_{II}^{(pond)}$ représente la moyenne pondérée de $E_{II}^{(1)}$ et $E_{II}^{(2)}$. Enfin $E_{II}^{(moy)}$ représente le module moyen déterminé sur la totalité de l'essai.

Essais	$E_{II}^{(1)}$	$E_{II}^{(2)}$	$E_{II}^{(pond)}$	$E_{II}^{(moy)}$
	0 → 0.6%	0.6 → 1.5%	0 → 1.5%	0 → 1.5%
1	112.399	131.237	123.701	120.729
2	123.577	138.817	132.721	131.643
3	116.784	125.745	122.161	121.948
4	117.887	130.392	125.391	125.394
5	113.592	123.469	119.518	120.108

TABLE 3.4 - Calcul du module sens fibres de la séquence (0_3°) , les valeurs sont exprimées en GPa

REMARQUE

L'ondulation des fibres évoquée précédemment pourrait être évitée en utilisant le procédé de pultrusion pour la fabrication du composite. En effet, avec ce procédé les fibres sont mises en tension lors de la fabrication ce qui empêche les ondulations.

Nous récapitulons dans le tableau (TAB. 3.5) les principales caractéristiques mécaniques dégagées des essais de traction sur la séquence (0_3°) (module élastique longitudinal E_{II} , coefficient de Poisson ν_{lt} , contrainte et déformation à rupture σ_{UR} et ε_{UR})).

Essais	E_{ll} (GPa)	σ_{llR} (MPa)	ε_{llR} (%)	ε_{ttR} (%)	ν_{lt} -
1	123.701	1724.99	1.382	-0.445	0.322
2	132.721	1824.35	1.412	-0.465	0.329
3	122.161	1797.06	1.559	-0.518	0.332
4	125.391	1871.97	1.500	-0.473	0.315
5	119.518	1838.16	1.545	-0.496	0.321
Moyenne	124.699 ± 64.4	1811.313 ± 55.28	1.480 ± 0.079	-0.479 ± 0.028	0.324 ± 0.007

TABLE 3.5 - Résultats des essais de traction sur (0_3°) : caractéristiques mécaniques obtenues par ces essais

3.5.3 Essais de traction uni-axiale dans le sens transverse (90_3°)

De la même façon, les essais réalisés sur la séquence (90_3°) ne laissent apparaître aucune influence de la vitesse de sollicitation. Les essais de charge-décharge (Annexe 7.4 FIG. 7.4) montrent, là encore, un comportement élastique, linéaire réversible totalement indépendant du temps. Dans ce cas, bien que les efforts soient repris par la résine dont le comportement massif est non-linéaire [Blassiau, 2005], le comportement du pli reste linéaire élastique. Cela peut se justifier par le fait que la rupture intervient à l'interface fibre/matrice avant d'atteindre la limite élastique de la résine.

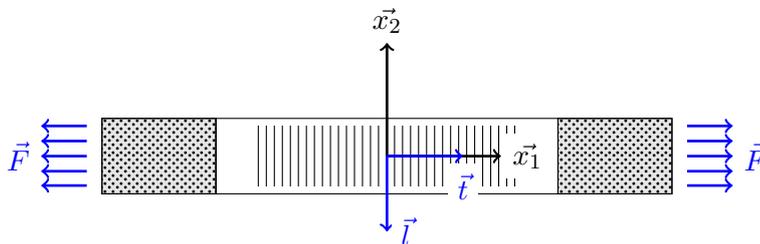


FIGURE 3.16 - Représentation d'une éprouvette de traction à 90° et ses repères associés

Le tableau (TAB. 3.6) présente les caractéristiques mécaniques dégagées des essais de traction sur la séquence (90_3°) (module élastique transverse E_{22} , coefficients de Poisson ν_{21} , contrainte et déformation à rupture σ_{22R} et ε_{22R}).

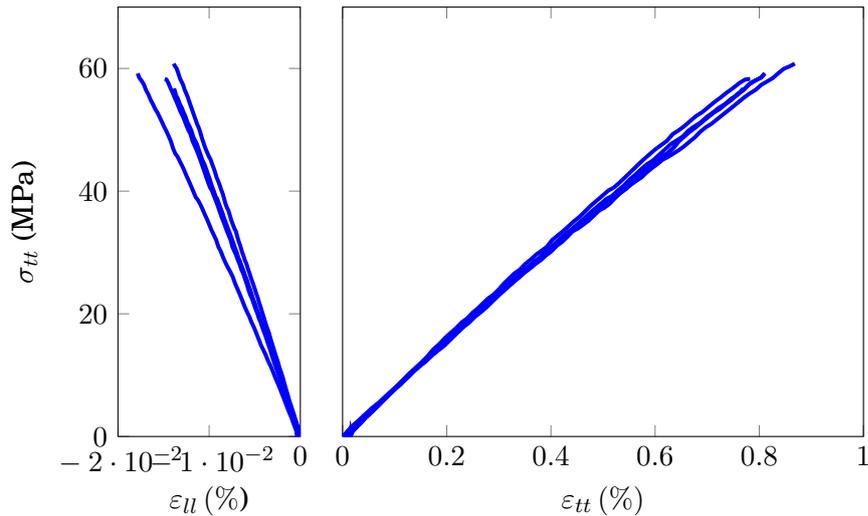


FIGURE 3.17 - Courbes contrainte-déformation obtenues par essais de traction quasi-statique monotone sur la séquence (90_3°)

Essais	E_{tt} (GPa)	σ_{ttR} (MPa)	ε_{ttR} (%)	ε_{llR} (%)	ν_{tl} -
1	7.584	58.292	0.782	-0.015	0.019
2	7.400	56.737	0.769	-0.014	0.018
3	7.464	59.192	0.811	-0.018	0.022
4	7.038	60.784	0.868	-0.014	0.016
Moyenne	7.372 ± 0.235	58.751 ± 55.28	0.808 ± 0.044	-0.015 ± 0.002	0.019 ± 0.003

TABLE 3.6 - Résultats des essais de traction sur (90_3°) : caractéristiques mécaniques obtenues par ces essais

3.5.4 Essais de traction uni-axiale hors-axe

Des essais de traction quasi-statique monotone ont été réalisés sur la séquence (45_3°) à différentes vitesses de sollicitations (FIG. 3.19). D'emblée, on note que le comportement du pli sollicité en cisaillement est non linéaire. De plus, on constate que le module $E_{45^{\circ}}$ est sensible à la vitesse de sollicitation. En outre, il augmente avec la vitesse de sollicitation. La formule (EQ. 3.3) permet de calculer le module de cisaillement G_{45} .

$$\frac{1}{G_{tt}} = \frac{4}{E_{45^{\circ}}} - \frac{1}{E_l} - \frac{1}{E_t} + 2\frac{\nu_{lt}}{E_l} \quad (3.3)$$

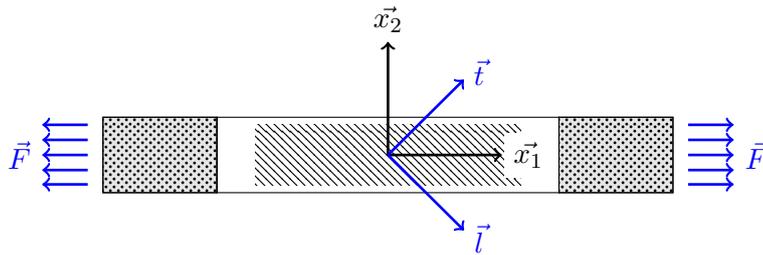


FIGURE 3.18 - Représentation d'une éprouvette de traction hors-axes et ses repères associés

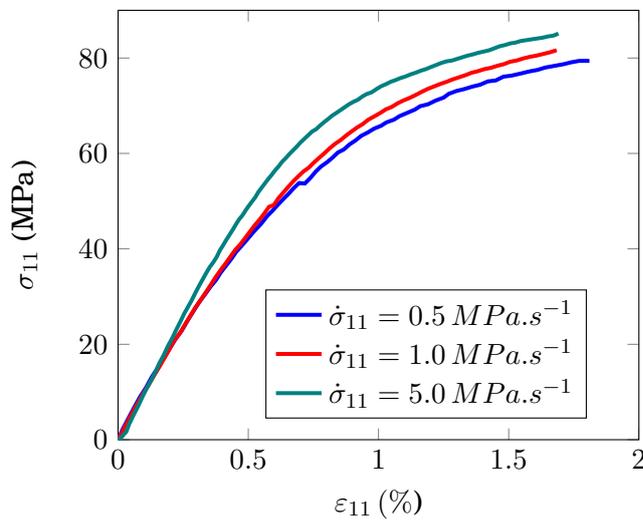


FIGURE 3.19 - Courbes contrainte - déformation d'un essai de traction à différentes vitesses de sollicitation sur la séquence (45°_3)

Vitesse de sollicitation (MPa.s ⁻¹)	E_{45} (GPa)	G_t (GPa)
0.5	8.69	3.12
1.0	9.05	3.29
5.0	10.49	4.12

TABLE 3.7 - Influence la vitesse de sollicitation sur le module de cisaillement au cours d'essais de traction sur la séquence (45°_3)

Nous avons testé quatre types de stratifiés dans le but d'identifier le comportement de pli sollicité en dehors de ses axes : (45_3°) , $(\pm 45_3^{\circ})_s$, $(\pm 20_3^{\circ})_s$ et $(\pm 30_3^{\circ})_s$. La figure 3.20 montre des éprouvettes rompues en traction quasi-statique monotone pour différentes orientations des fibres : 0° , 20° , 30° , 45° et 90° . Il apparaît clairement que la rupture totale du stratifié se produit le long des fibres.

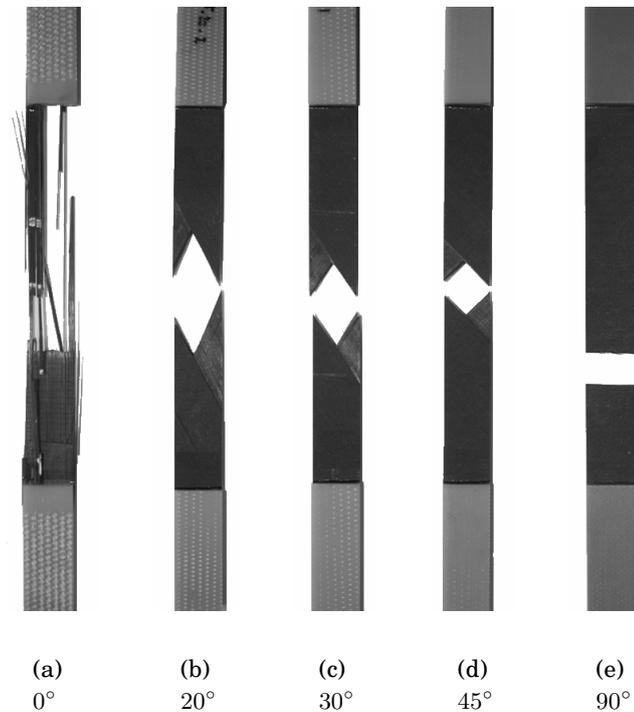


FIGURE 3.20 - Photographies des éprouvettes rompues en traction quasi-statique monotone pour différentes orientations des fibres : 0° , 20° , 30° , 45° et 90°

Au regard des essais menés sur les différentes orientations (FIG. 3.21), nous pouvons noter que la non linéarité de la réponse du matériau aux sollicitations de cisaillement augmente avec l'angle d'orientation des fibres pour atteindre un maximum pour un angle de 45° . Cette non linéarité peut avoir deux origines possibles : la viscosité de la résine et/ou de l'endommagement à l'échelle microscopique (micro-fissuration, dé-cohésion fibre/matrice). HUCHETTE [Huchette, 2005] montre, en utilisant la technique de l'émission acoustique, que la rupture des plis hors-axes n'est pas gouvernée par la rupture des fibres mais par la fissuration de la matrice.

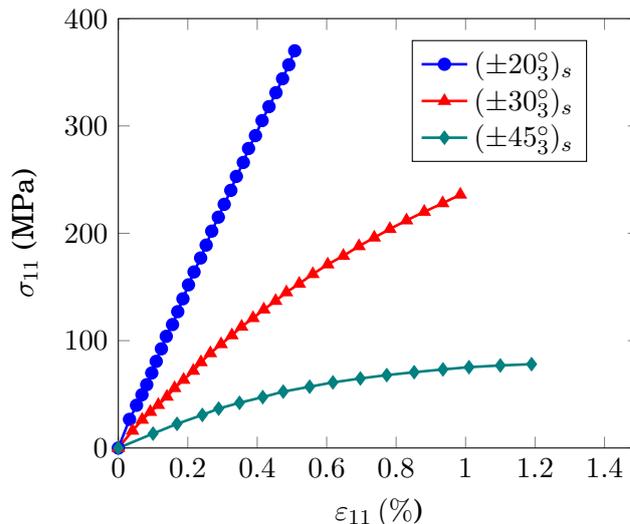


FIGURE 3.21 - Courbes contrainte vs déformation pour les essais de traction sur les séquences $(\pm 20^\circ)_s$, $(\pm 30^\circ)_s$ et $(\pm 45^\circ)_s$

Afin de mettre en évidence les phénomènes qui peuvent être à l'origine de la non-linéarité observée, nous proposons d'étudier la séquence $(45^\circ)_s$ qui est la séquence qui présente la plus forte non-linéarité (FIG. 3.23) en procédant à deux types d'essais :

1. des essais de traction quasi-statique monotone à différentes vitesses de sollicitations ;
2. des essais de charge-décharge qui consistent à imposer une succession de cycles par incrément de 10 MPa jusqu'à atteindre la rupture avec un temps de maintien à contrainte nulle entre chaque cycle permettant la relaxation du matériau (FIG. 3.12).

La figure 3.19 représente les courbes contrainte - déformation obtenues lors des essais de traction monotone à différentes vitesses de sollicitation (0.1, 0.5 et 1.0 MPa.s⁻¹). Il apparaît que le module de cisaillement apparent augmente avec la vitesse de sollicitation (TAB. 3.7). Ce résultat met en évidence que le comportement de l'unidirectionnel sollicité en cisaillement est gouverné par le comportement visco-élastique de la résine.

Les résultats des essais de charge-décharge sont présentés figure 3.22. Nous constatons la formation d'une boucle d'hystérésis qui s'ouvre de plus en plus alors que la contrainte imposée augmente. Nous observons également une diminution de la déformation résiduelle lors des phases de maintien à contrainte nulle. PETITPAS [Petitpas, 1993] montre que la déformation résiduelle est imputable, dans un premier temps à la plastification de la matrice puis, pour un état de contrainte proche de la rupture, à un endommagement des interfaces fibres-matrice.

La figure (FIG. 3.23) représente les courbes contrainte-déformation obtenues lors d'essais de traction sur la séquence $(45^\circ)_s$.

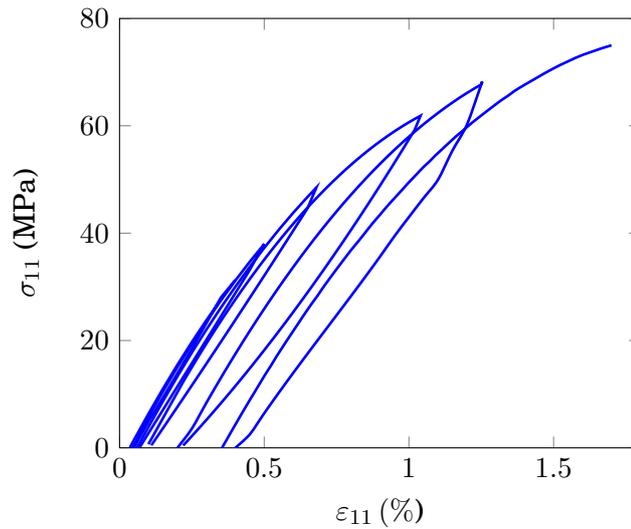


FIGURE 3.22 - Courbes contrainte-déformation d'un essai de charge-décharge sur la séquence (45_3°)

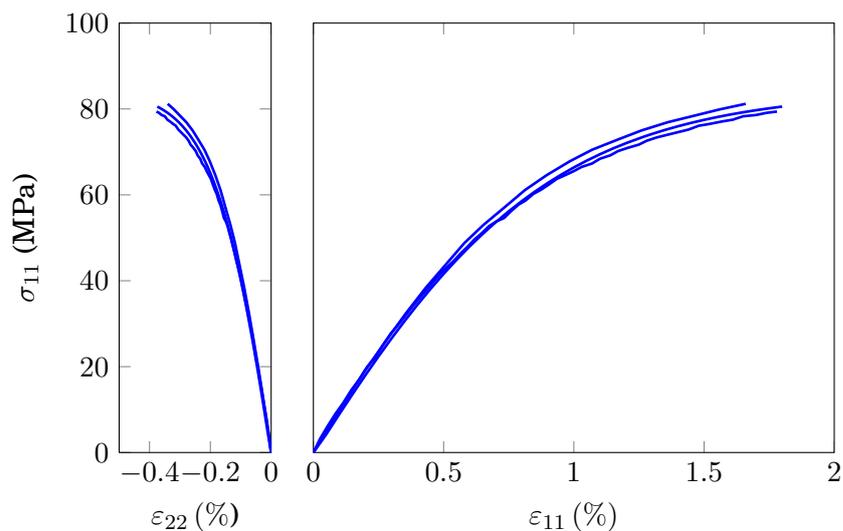


FIGURE 3.23 - Courbe contrainte - déformation d'un essai de traction sur la séquence (45_3°)

Essais	E_{11} (GPa)	σ_{11R} (MPa)	ε_{11R} (%)	ε_{22R} (%)
1	9.08	80.552	1.800	-0.374
2	8.89	80.200	1.660	-0.340
3	8.53	79.400	1.780	-0.377
Moyenne	8.836 ± 0.279	80.384 ± 0.912	1.747 ± 0.076	-0.364 ± 0.021

TABLE 3.8 - Résultats des essais de traction sur (45_3°) : caractéristiques mécaniques obtenues par ces essais

3.5.5 Conclusion

Le comportement de l'unidirectionnel est maintenant clairement identifié. Il est élastique linéaire dans les directions longitudinale et transverse. En revanche, dès lors qu'il est sollicité en cisaillement son comportement, guidé par celui de la résine, est non-linéaire et sensible aux effets de vitesse. Dans la suite nous travaillons à vitesse constante, aussi nous choisirons un module de cisaillement moyen et constant. Notre objectif est maintenant de caractériser les mécanismes d'endommagement au sein d'un stratifié.

3.6 La fissuration intra-laminaire : aspects qualitatifs

3.6.1 Des chargements spécifiques

Le but est ici d'étudier le mécanisme d'endommagement par fissuration dans un stratifié soumis à des chargements quasi-statiques ou cycliques et d'en suivre son évolution. Nous rappelons que le suivi de l'endommagement se fait par une analyse optique in-situ à l'aide d'une caméra munie d'un système de grossissement optique qui constituent un moyen simple et efficace qui permet de suivre l'endommagement sans interrompre l'essai. Le bord libre observé est préalablement poli. Une description détaillée du montage est donnée précédemment (§3.4.2). Outre l'analyse physique de la fissuration, les essais doivent permettre de mettre en évidence l'influence de l'endommagement sur les propriétés mécaniques. Ainsi, il est nécessaire d'avoir accès en cours d'essai à la rigidité du stratifié. On propose dans ce qui suit deux types de chargements qui ont été utilisés qui permettent de satisfaire les exigences que nous nous sommes fixées (FIG. 3.24 et 3.25).

L'analyse de la fissuration sous sollicitations quasi-statiques est réalisée au cours d'essais de charge-décharge avec augmentation de la charge à chaque palier (FIG. 3.24). Nous avons choisi d'effectuer un incrément de chargement de 50 MPa à chaque palier. Pour chaque niveau de chargement, le cycle d'analyse se décompose en deux étapes :

- (a) : l'évaluation de la rigidité du stratifié et création de l'endommagement ;
- (b) : observation de l'endommagement ;

La charge appliquée lors de l'étape (b) est plus faible que celle appliquée lors de la phase (a). Le but est d'ouvrir les fissures existantes sans en créer de nouvelles. Le temps de maintien correspond au temps nécessaire à l'observation (FIG. 3.24). Toutefois, il convient de minimiser cette durée au maximum afin d'éviter tout risque de création d'endommagement par fluage.

Suivant le même principe, on propose un chargement cyclique suivant (FIG. 3.25) :

- (a) : un cycle de charge-décharge permettant de déterminer la rigidité du stratifié ;
- (b) : une phase de sollicitation cyclique au cours de laquelle se créent les fissures de fatigue. Le chargement appliqué au cours de cette phase est sinusoïdal ;
- (c) : un palier pour l'observation de l'endommagement. L'observation est faite aux cycles 0, 10, 50, 100, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 10000, 15000, 20000, ...

Le principal avantage de cette technique réside dans le fait que l'observation se fait sous charge et donc fissures ouvertes ce qui simplifie la détection et l'observation des fissures.

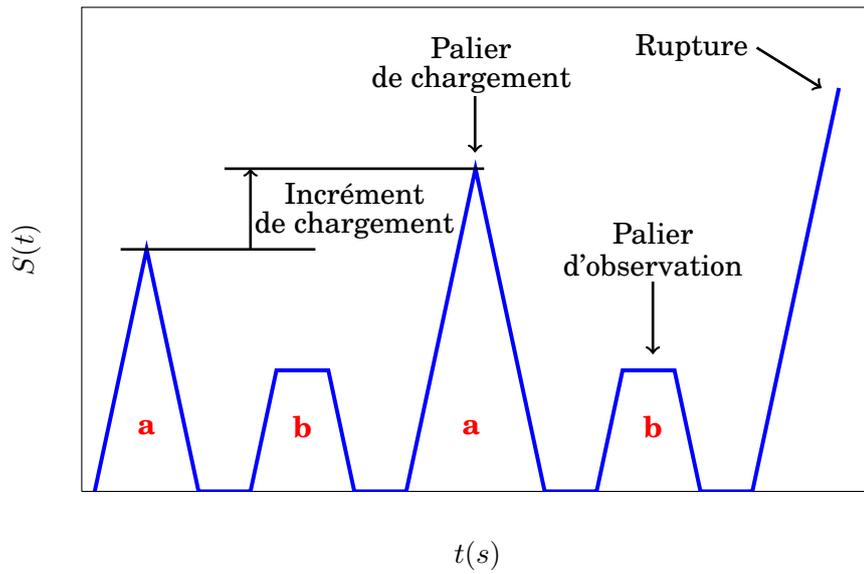


FIGURE 3.24 - Type de chargement appliqué lors d'un essai de charge-décharge avec suivi de l'endommagement

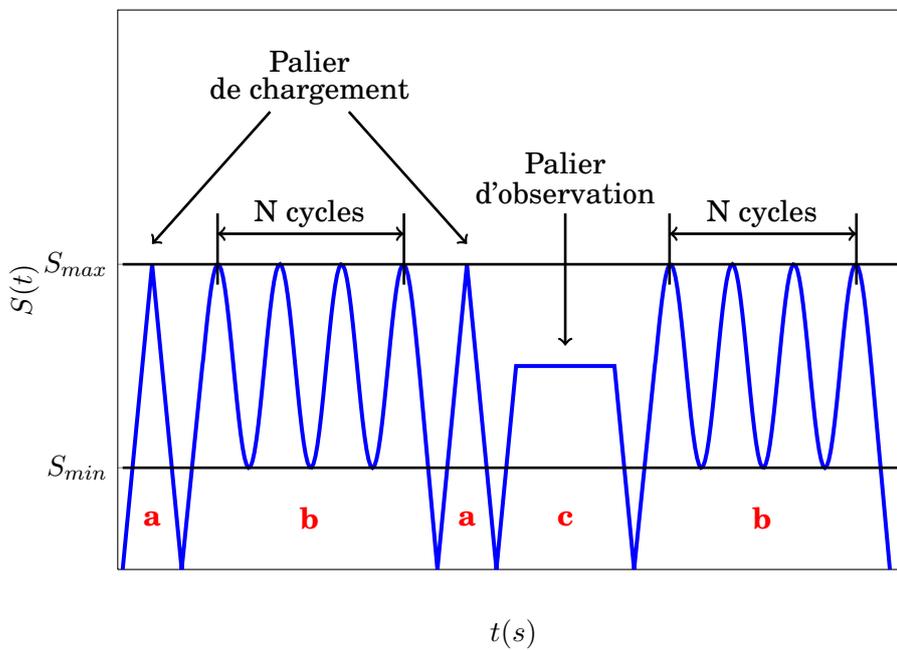


FIGURE 3.25 - Type de chargement appliqué lors d'un essai de fatigue avec suivi de l'endommagement

3.6.2 Caractéristiques physiques de la fissuration

3.6.2.1 Un réseau quasi-périodique

L'endommagement par fissuration intra-laminaire se présente sous la forme d'un réseau de fissures quasi-périodique (FIG. 3.26). Les fissures, qui s'initient sur le bord libre de l'éprouvette, sont parallèles entre elles et traversent la totalité de l'épaisseur de la couche fissurée (FIG. 3.26). Elles se propagent dans la largeur vers le centre de l'éprouvette parallèlement aux fibres qui leur servent de guide.

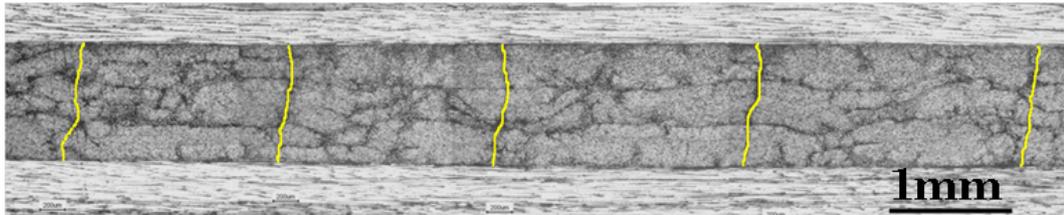


FIGURE 3.26 - Réseau de fissures transverses quasi-périodique dans la couche à 90° d'un stratifié $(0_3^\circ/90_3^\circ/0_3^\circ)$

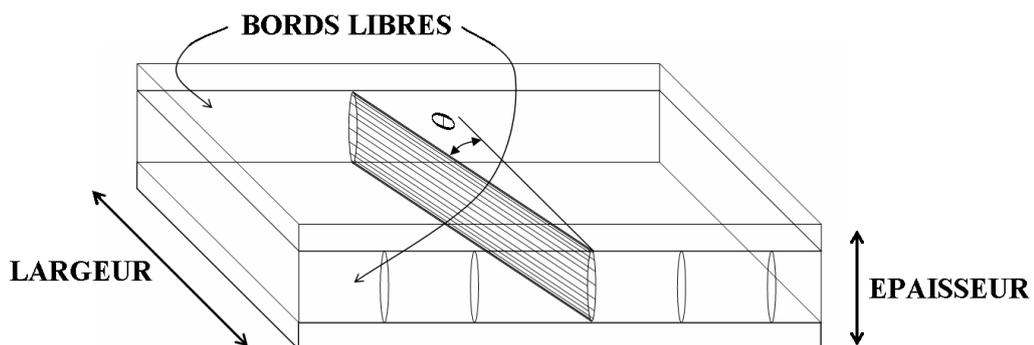


FIGURE 3.27 - Représentation schématique en trois dimensions d'un réseau de fissures transverses dans la couche à 90° d'un stratifié $(0_n^\circ/90_m^\circ/0_m^\circ)$

3.6.2.2 Influence de la micro-structure

L'analyse microscopique (FIG. 3.28) montre que les fissures se propagent au niveau des interfaces entre les fibres et la matrice par coalescence des décohésions fibres/matrice. Les figures (FIG. 3.29 et FIG. 3.30) montrent que les zones riches en résine semblent être des lieux privilégiés pour l'apparition de fissures. Les porosités initialement présentes dans le matériau semblent également favoriser l'apparition de fissures. En effet, le chemin emprunté par les fissures passe par des porosités et suit des zones riches en résine. Il est fort possible que les porosités soient les sites d'amorçage des fissures. Cependant, étant donné de la rapidité du phénomène de propagation, cette hypothèse, bien que tout à fait plausible, est difficilement vérifiable.

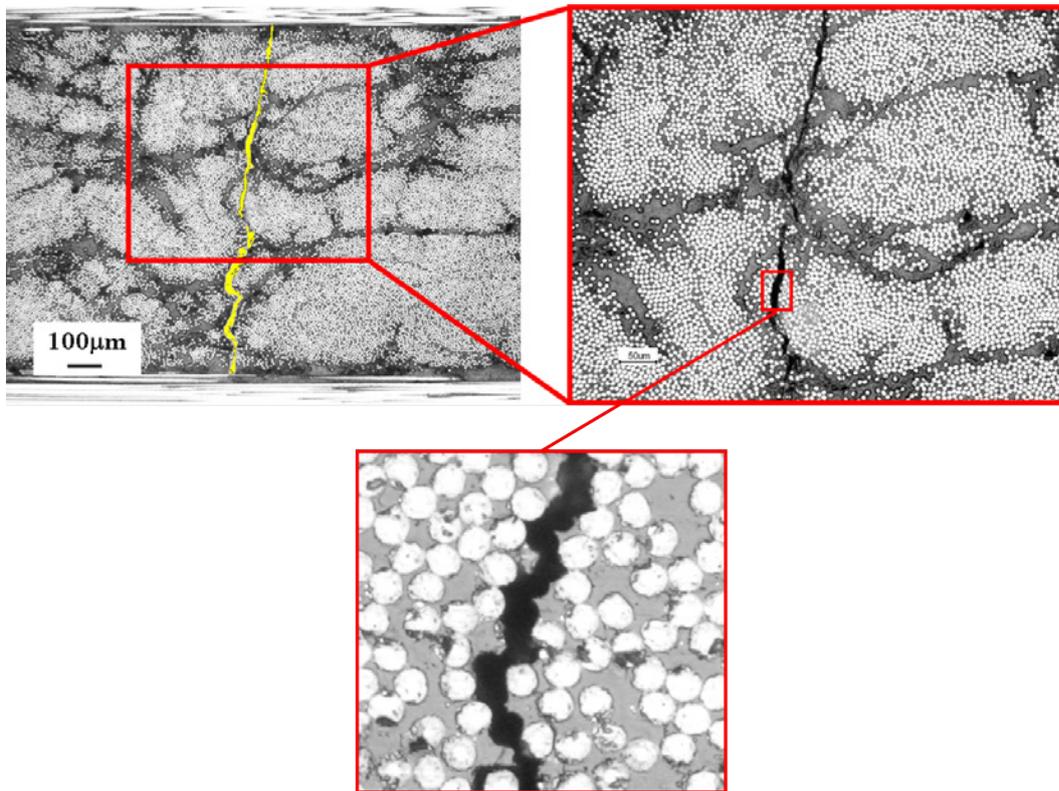


FIGURE 3.28 - Fissure transverse se propageant en suivant les interfaces entre les fibres et la matrice dans la couche à 90° d'un stratifié ($0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ}$) sollicité en traction uni-axiale

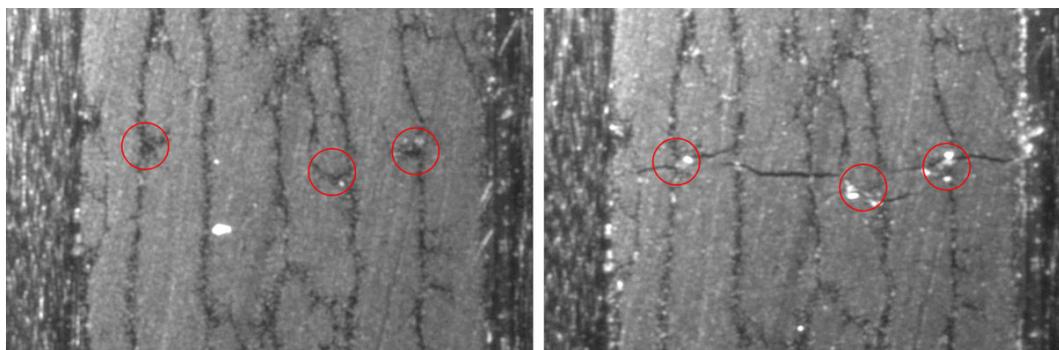


FIGURE 3.29 - Influence de la micro-structure (répartition des fibres, porosités...) sur le chemin suivi par les fissures

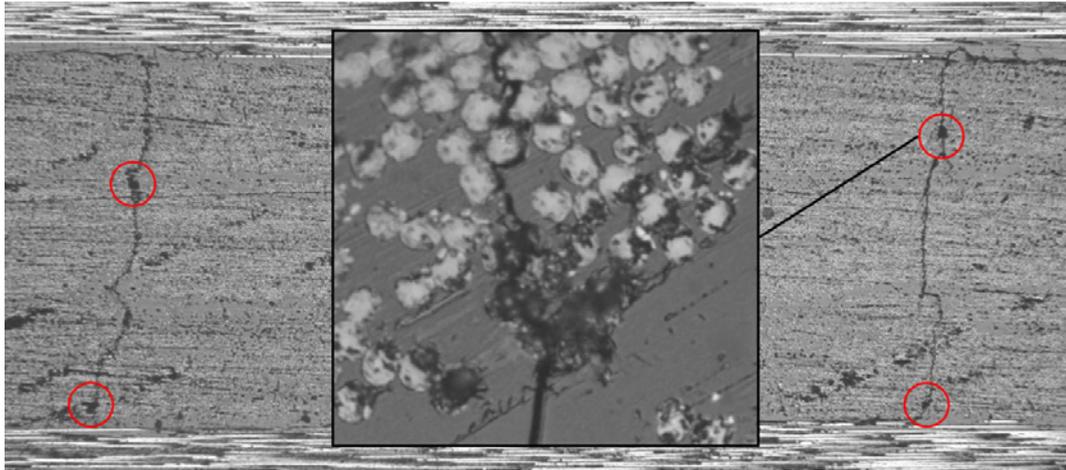


FIGURE 3.30 - *Influence de la micro-structure (répartition des fibres, porosités...) sur le chemin suivi par les fissures*

3.6.2.3 Propagation des fissures

Sous chargements quasi-statiques, les fissures se propagent de manière quasi-instantanée dans la largeur de l'éprouvette. La figure (FIG. 3.31) représente le réseau de fissures observé sur chacun des bords libres d'une éprouvette ($0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ}$). L'excellente superposition confirme que les fissures sont bien traversantes et guidées par les fibres.

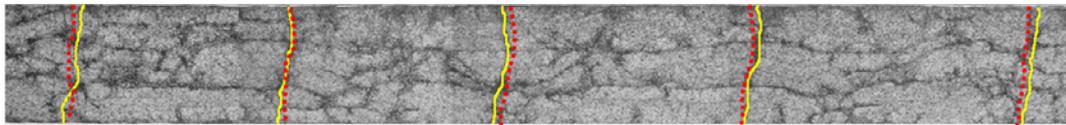
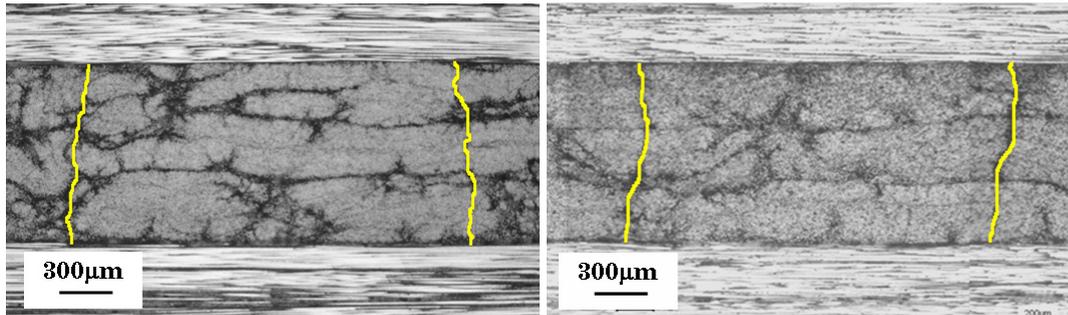


FIGURE 3.31 - *Superposition du réseau de fissures transverses dans la couche à 90° d'un stratifié ($0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ}$) observé sur les deux bords libres de l'éprouvette*

En revanche, dans un stratifié soumis à des sollicitations cycliques, la propagation des fissures est plus lente. Citons BONIFACE et OGIN [Boniface and Ogin, 1989] ou LAFARIE-FRENOT et HENAFF-GARDIN [Lafarie-Frenot and Henaff-Gardin, 1990] qui montrent que, dans les plis à 90° d'une éprouvette ($0^{\circ}/90^{\circ}$)_s sollicitée en traction cyclique, certaines fissures ne sont pas traversantes suivant la largeur de l'éprouvette mais s'initient sur le bord libre et se propagent vers le centre sous l'effet de l'accumulation des cycles de sollicitations. Ainsi, l'endommagement par fissuration sous sollicitations quasi-statiques se caractérise par la multiplication des fissures alors que sous chargement cycliques il y a simultanément multiplication et propagation des fissures. Quoi qu'il en soit, l'observation du bord libre de l'éprouvette montre que les fissures sont géométriquement identiques qu'elles soient créées par un chargement quasi-statique ou cyclique (FIG. 3.32).



(a) chargement quasi-statique

(b) chargement cyclique

FIGURE 3.32 - *Fissures transverses dans la couche à 90° d'un stratifié (0°₃/90°₃/0°₃) sollicité en traction (a) quasi-statique, (b) cyclique*

3.6.2.4 Fissuration des plis externes

Des essais de traction réalisés sur un stratifié (90°/0°)_s nous permettent d'étudier la fissuration dans les couches extérieures (FIG. 3.33). Les fissures se présentent sous la forme d'un réseau régulier dans chacune des couches. Nous notons cependant un déphasage de l'ordre de la moitié de la distance inter-fissures entre les réseaux de chacune des couches externes. Ces résultats sont en accord avec ceux de NAIRN, HU et BARK [Nairn et al., 1993]. Ce déphasage peut s'expliquer par la dissymétrie engendrée par l'apparition de la première fissure sur l'une ou l'autre des couches externes.

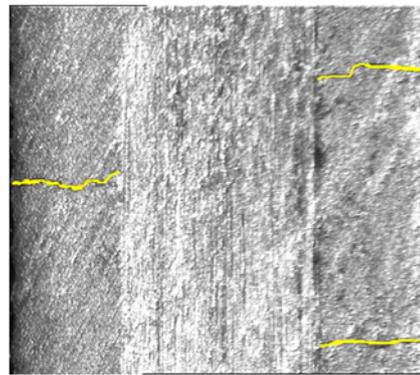


FIGURE 3.33 - *Réseau de fissures transverses dans les couches à 90° d'un stratifié (90°/0°₂/90°) sollicité en traction quasi-statique*

3.6.2.5 Ordre d'apparition des fissures

Les fissures apparaissent d'abord de façon aléatoire, formant un réseau irrégulier. Puis, avec l'augmentation du chargement (qui se traduit soit par l'augmentation de la contrainte appliquée soit par l'accumulation des cycles de sollicitation, respec-

tivement sous chargement quasi-statique ou cyclique), la distance inter-fissures diminue, jusqu'à créer un réseau de fissures qui devient rapidement quasi-périodique (FIG. 3.34). BERTHELOT et LE CORRE [Berthelot and Le Corre, 2000] proposent une approche statistique de ce phénomène dans laquelle ils considèrent une distribution statistique des contraintes à rupture dans la couche à 0° sur toute la longueur des éprouvettes.

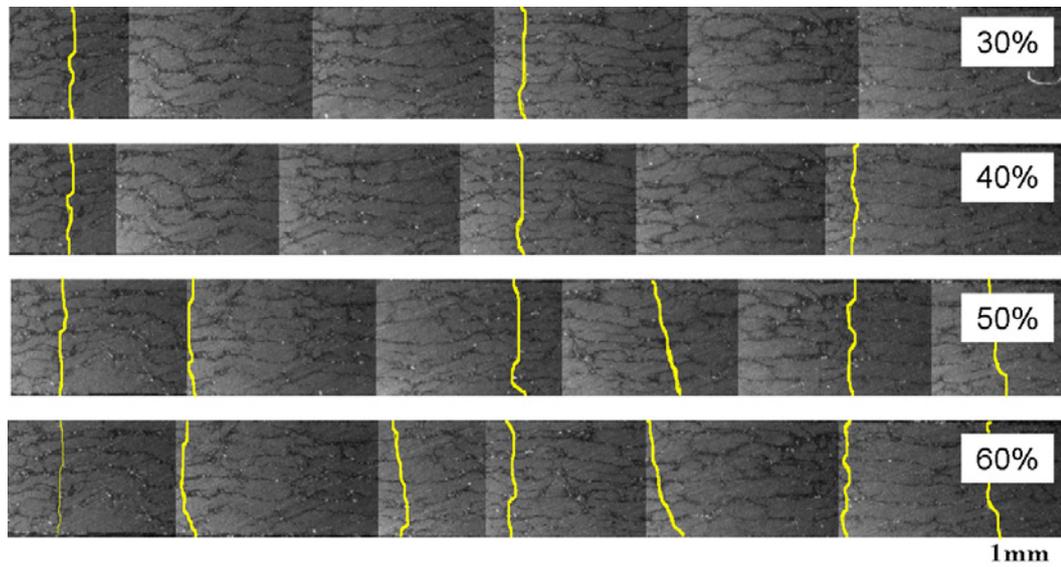


FIGURE 3.34 - Réseau de fissures transverses dans la couche à 90° d'un stratifié $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ sollicité en traction quasi-statique à 30%, 40%, 50% et 60% de la contrainte à rupture

3.6.3 Influence de l'épaisseur du pli fissuré

Les essais menés sur les séquences $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$, $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ et $(0^\circ/90^\circ_{12}/0^\circ)$ nous permettent d'étudier l'influence de l'épaisseur du pli fissuré sur les caractéristiques géométriques de la fissuration. Il apparaît clairement sur la figure 3.35 que la distance inter-fissures est d'autant plus grande que le pli fissuré est mince. On note en effet que la distance inter-fissures est proportionnelle à l'épaisseur du pli fissuré.

Le tableau 3.9 regroupe les valeurs des épaisseurs des plis fissurés, des densités de fissures et des distances inter-fissures pour les séquences $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$, $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ et $(0^\circ/90^\circ_{12}/0^\circ)$ sollicitées en fatigue. A ce stade il convient de préciser que nous définissons la densité de fissures comme le rapport entre le nombre de fissures comptabilisées sur le bord libre de l'éprouvette et la longueur de la zone observée.

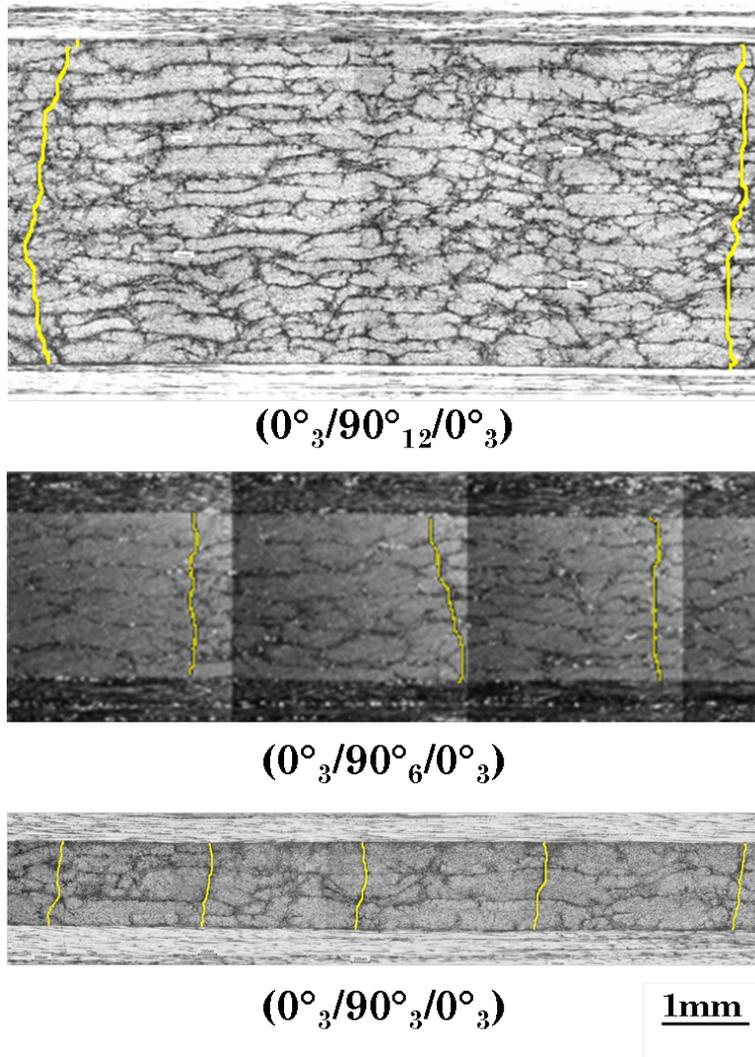


FIGURE 3.35 - Influence de l'épaisseur de la couche à 90° sur la densité de fissures pour les stratifiés $(0^\circ_3/90^\circ_3/0^\circ_3)$, $(0^\circ_3/90^\circ_6/0^\circ_3)$ et $(0^\circ_3/90^\circ_{12}/0^\circ_3)$ sollicités en traction cyclique

ep_{90° (mm)	d_{sat} (mm^{-1})	$dist_{fissures}$ (mm)
0.9	0.6	1.788
1.8	0.3	2.75
3.6	0.15	7.58

TABLE 3.9 - Synthèse des données caractéristiques obtenues par les essais sous sollicitations cycliques sur les séquences $(0^\circ_3/90^\circ_n/0^\circ_3)$ avec ep_{90° l'épaisseur de la couche fissurée, d_{sat} la densité de fissures à saturation et $dist_{fissures}$ la distance inter-fissures

On constate, dans le cas du stratifié le plus épais ($0_3^{\circ}/90_{12}^{\circ}/0_3^{\circ}$), l'apparition ponctuellement de fissures non traversantes à proximité des fissures totalement traversantes (FIG. 3.36). Ces fissures semblent s'initier à l'interface entre les plis à 0° et les plis à 90° et font un angle compris entre 40° et 60° par rapport aux fissures totalement traversantes. Contrairement aux fissures traversantes que nous qualifierons de fissures droites, ces fissures partielles se propagent progressivement dans l'épaisseur du pli. Ces fissures semblent indiquer l'existence de contraintes de cisaillement importantes dans la zone inter-plis [Bader and Boniface, 1985], [Ogihara et al., 1998]. Du fait de leur orientation, ces fissures peuvent faciliter l'apparition de délaminage et accélérer le processus de dégradation du stratifié. Précisons toutefois que ce phénomène reste très rare.

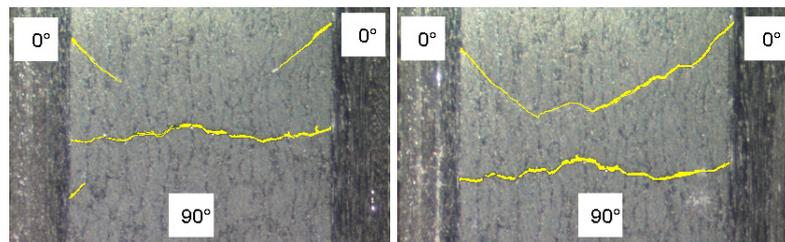


FIGURE 3.36 - Apparition de fissures partielles sous sollicitations de fatigue sur stratifié de type ($0_3^{\circ}/90_{12}^{\circ}/0_3^{\circ}$), (a) 1000 cycles, (b) 55000 cycles

3.6.4 Interaction fissuration/délaminage

On observe, après que l'état de saturation soit atteint, l'apparition de délaminage entre les plis à 0° et les plis à 90° (FIG. 3.37). Ce mécanisme d'endommagement s'initie principalement en tête des fissures transverses et se propagent progressivement en cours d'essai. En général, le délaminage croit symétriquement des deux cotés d'une fissure. Cependant, on observe, dans certains cas, que le délaminage ne se propage que dans une seule direction. GAMSTEDT et SJÖREN [Gamstedt and Sjören, 2002] expliquent que cette dissymétrie est due soit à des variations locales dans la microstructure le long de l'interface entre les plis à 0° et les plis à 90° , soit par la présence d'une autre fissure transverse à proximité qui peut créer une relaxation au sein du matériau pouvant bloquer la propagation du délaminage.

Si l'influence de l'apparition du délaminage en tête de fissure reste limitée dans le cas des stratifiés de type ($0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$), l'endommagement s'avère être beaucoup plus sévère dans le cas du $(\pm 45^{\circ})_s$ (FIG. 3.37). Ce résultat montre que la présence d'un pli fissuré sur la couche externe d'un stratifié peut s'avérer être très néfaste pour l'intégrité d'une structure.

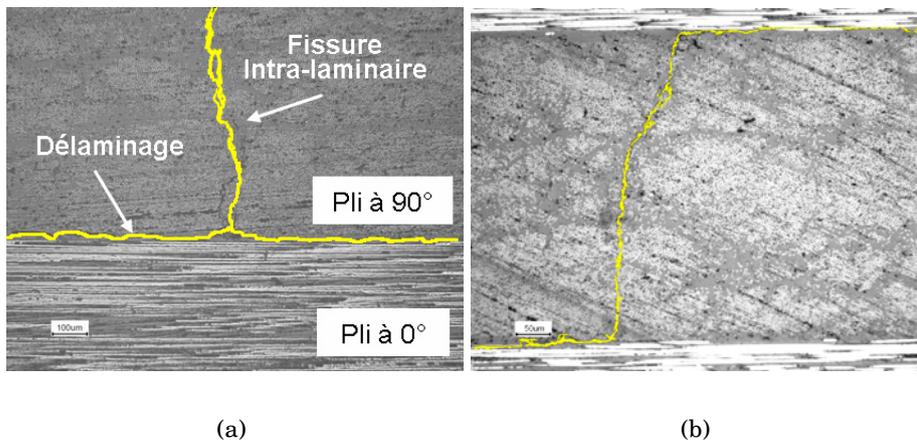


FIGURE 3.37 - *Délaminage en tête de fissure apparaissant après saturation de la densité de fissures dans un stratifié de type (0°/90°/0°) (a) délaminage symétrique, (b) délaminage dissymétrique*

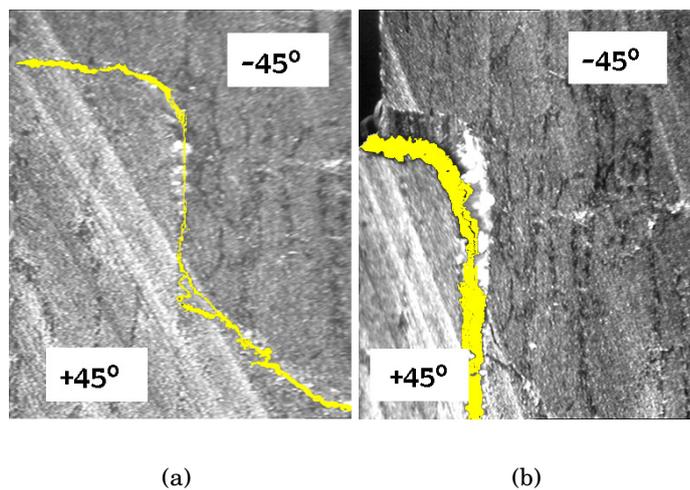


FIGURE 3.38 - *Délaminage en tête de fissure apparaissant après saturation de la densité de fissure dans un stratifié de type (±45°)_s, (a) $\sigma_{11} = 0.5\sigma_R$ et (b) $\sigma_{11} = 0.6\sigma_R$*

3.7 Comportement du stratifié et analyse de l'endommagement sous sollicitations quasi-statiques

3.7.1 Introduction

Dans la partie (§3.6.2) nous avons présenté des résultats purement qualitatifs issus d'une simple observation de l'endommagement. Si ces résultats nous ont renseigné sur les aspects physiques et géométriques des fissures, ils ne nous renseignent en aucun cas sur la quantité d'endommagement et l'influence de ce dernier sur les propriétés du matériaux. C'est là tout l'objet de la suite de ce chapitre. En effet, lorsqu'une structure est soumise à une sollicitation quelle qu'elle soit, la dégradation de ses propriétés mécaniques intervient bien avant la rupture et la fissuration en est une des premières causes. Ainsi, nous présentons dans cette partie les résultats de l'étude du comportement mécanique des différents empilements définis précédemment soumis à un chargement quasi-statique. L'objectif est de mettre en évidence les paramètres caractéristiques de l'endommagement par fissuration intra-laminaire et d'identifier l'influence de l'apparition des fissures sur le comportement mécanique du stratifié.

Dans un premier temps, il s'agit d'étudier le comportement mécanique des différents empilements, à savoir, les séquences $(0_3^\circ/90_3^\circ/0_3^\circ)$, $(0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ)$, $(0_3^\circ/90_{12}^\circ/0_3^\circ)$, $(0_3^\circ/\pm 45_3^\circ)_s$ et $(0_3^\circ/\pm 55_3^\circ)_s$. Une première série d'essais de traction quasi-statique monotone nous permet de caractériser le comportement macroscopique des stratifiés. Nous présenterons ensuite des essais de charge-décharge. Comme nous l'avons présenté en début de chapitre ces essais sont particulièrement indiqués pour l'analyse de l'endommagement. Ils nous permettent en outre de suivre parallèlement l'évolution des fissures et des propriétés mécaniques tout au long de l'essai.

3.7.2 Essais de traction quasi-statique monotone sur stratifiés

Nous présentons ici les résultats obtenus à partir des essais de traction longitudinale quasi-statique monotone sur les stratifiés $(0_3^\circ/90_{n=3,6,12}^\circ/0_3^\circ)$, $(0_3^\circ/\pm 45_3^\circ)_s$ et $(0_3^\circ/\pm 55_3^\circ)_s$. La figure 3.39 représente les relations contraintes-déformations (σ_{11} vs ε_{11}) obtenues pour les cinq séquences testées.

Linéaire sur la première partie de la courbe, le comportement des stratifiés présente ensuite une légère non-linéarité se traduisant par une diminution de la pente synonyme d'une chute du module longitudinal. Les essais de traction quasi-statique réalisés sur de l'unidirectionnel dans les directions longitudinale (0°) et transverse (90°) montrent que le comportement est quasi-linéaire ce qui nous amène à penser que la non-linéarité observée pour les stratifiés $(0_3^\circ/90_{n=3,6,12}^\circ/0_3^\circ)$ est une conséquence de l'apparition d'endommagement. En revanche, les essais de traction hors-axes, sur la séquence $(\pm 45_3^\circ)$ par exemple, montrent un comportement non-linéaire, à cause notamment du caractère visqueux de la matrice. À ce stade, il est donc difficile de dire si la non-linéarité observée pour les séquences $(0_3^\circ/\pm 45_3^\circ)_s$ et $(0_3^\circ/\pm 55_3^\circ)_s$ est due à l'apparition d'endommagement ou au comportement non linéaire du pli sollicité en

dehors de ses axes. Les résultats présentés dans la suite (§3.7.3) nous permettront de répondre à cette question. La rupture finale est quant à elle gouvernée par la rupture des plis à 0° . Les valeurs des contraintes et des déformations à rupture ainsi que les modules élastiques longitudinaux obtenus lors des essais de traction monotone quasi-statique sont présentés dans le tableau 3.10.

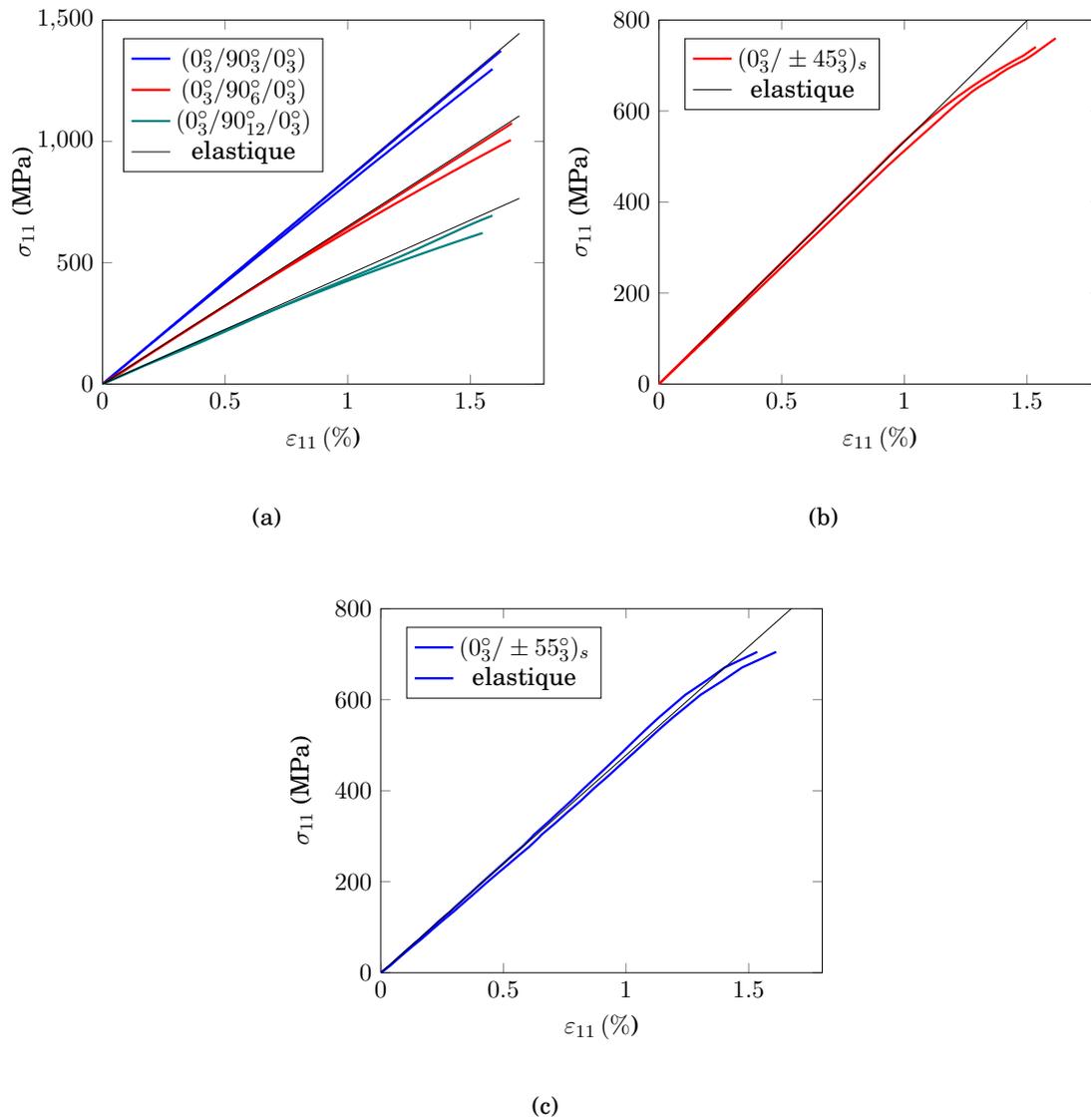


FIGURE 3.39 - Courbes contraintes/déformations (σ_{11} vs ε_{11}) obtenues au cours d'essais de traction quasi-statique monotone sur les séquences (a) $(0_3^0/90_{n=3,9,12}^0/0_3^0)$, (b) $(0_3^0/\pm 45_3^0)_s$ et (c) $(0_3^0/\pm 55_3^0)_s$

Séquences	σ_{11R} (MPa)	ε_{11R} (%)	E_{11} (GPa)
$(0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ})$	1353 ± 54.8	1.64 ± 0.030	804.67
$(0_3^{\circ}/90_6^{\circ}/0_3^{\circ})$	965.10 ± 12.11	1.73 ± 0.096	590.51
$(0_3^{\circ}/90_{12}^{\circ}/0_3^{\circ})$	703.22 ± 7.22	1.83 ± 0.006	391.57
$(0_3^{\circ}/\pm 45_3^{\circ})_s$	789.78 ± 33.6	1.57 ± 0.051	480.08
$(0_3^{\circ}/\pm 55_3^{\circ})_s$	682.19 ± 15.5	1.61 ± 0.003	475.05

TABLE 3.10 - Valeurs des contraintes σ_{11R} et déformations ε_{11R} à rupture et des modules d'élasticité longitudinaux macroscopiques (E_{11}) pour les séquences $(0_3^{\circ}/90_{n=3,9,12}^{\circ}/0_3^{\circ})$, $(0_3^{\circ}/\pm 45_3^{\circ})_s$ et $(0_3^{\circ}/\pm 55_3^{\circ})_s$

3.7.3 Analyse de la fissuration sous chargements quasi-statiques

Comme nous l'avons présenté précédemment, l'évolution de l'endommagement est suivie en cours d'essai en comptabilisant les fissures dans la couche à 90° apparaissant sur le bord libre de l'éprouvette pour différents niveaux de chargement. Dans ce qui suit nous proposons une analyse de la cinétique de fissuration et de l'évolution du module longitudinal pour chacun des stratifiés. Nous nous attacherons à mettre en évidence l'influence de l'apparition de l'endommagement sur la dégradation des propriétés mécaniques.

REMARQUE

Nous avons vu (§3.6) que la propagation d'une fissure est un phénomène quasi-instantané. Aussi, nous définissons « la cinétique de fissuration » non pas comme la vitesse de propagation d'une fissure mais comme la vitesse de multiplication des fissures.

3.7.3.1 Cinétiques de fissuration et chutes de rigidités

Les figures (FIG. 3.40 , FIG. 3.41 et FIG. 3.42) présentent les évolutions (FIG. 3.40a, FIG. 3.41a et FIG. 3.42a) de la densité de fissures d (mm^{-1})¹ et (FIG. 3.40b , FIG. 3.41b et FIG. 3.42b) des chutes de rigidité longitudinale macroscopique E_{11}/E_{11}^0 du stratifié en fonction de la contrainte longitudinale σ_{11} appliquée à l'éprouvette pour les séquences $(0_3^{\circ}/90_{n=3,6,12}^{\circ}/0_3^{\circ})$, $(0_3^{\circ}/\pm 45_3^{\circ})_s$ et $(0_3^{\circ}/\pm 55_3^{\circ})_s$.

✓ Séquences $(0_3^{\circ}/90_{n=3,6,12}^{\circ}/0_3^{\circ})$

Les courbes d'évolution de la densité de fissures (FIG. 3.40a) se présentent sous la forme d'une sigmoïde présentant un seuil d'amorçage, une phase d'augmentation continue jusqu'à atteindre un état qui semble tendre vers un état de saturation défini comme un État Caractéristique de l'Endommagement par REIFSNIDER

1. On rappelle que l'on définit la densité de fissures comme le nombre de fissures par unité de longueur

[Reifsnider, 1977]. La vitesse d'apparition des fissures tend à diminuer à l'approche de la contrainte à rupture du stratifié, toutefois on ne note pas de saturation franche, la rupture intervenant avant. Par ailleurs, on constate que la contrainte d'apparition des premières fissures et la densité de fissures à rupture sont d'autant plus faibles que l'épaisseur de la couche à 90° est importante. Ces résultats sont en accord avec les travaux de GARRET et BAILEY [Garret and Bailey, 1977]. Enfin l'analyse comparative des figures FIG. 3.40a et FIG. 3.40b permet de relier la chute de rigidité à l'apparition des fissures. En effet, on remarque que le niveau de contrainte pour lequel débute la dégradation des propriétés mécaniques correspond au seuil d'apparition des premières fissures et coïncide avec le seuil de changement de pente observé sur la figure (FIG. 3.39a). Cette dernière observation confirme que la non-linéarité constatée est causée par l'apparition d'endommagement.

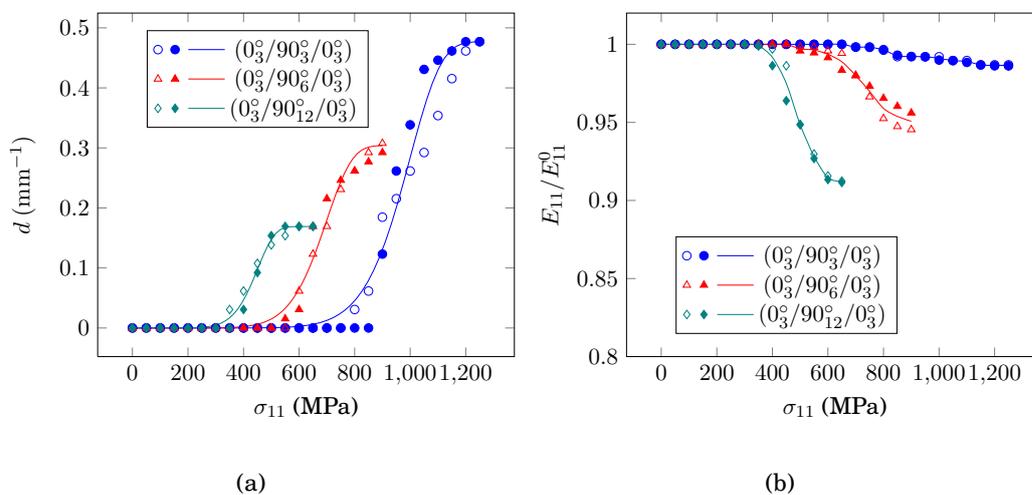


FIGURE 3.40 - Evolution (a) de la densité de fissures d (mm^{-1}) dans la couche à 90° et (b) de la chute de rigidité longitudinale macroscopique E_{11}/E_{11}^0 en fonction de la contrainte σ_{11} (MPa) appliquée au stratifié pour les séquences $(0_3^0/90_n^0/0_3^0)$ sollicitées en traction quasi-statique.

✓ **Séquences $(0_3^0/\pm 45_3^0)_s$ et $(0_3^0/\pm 55_3^0)_s$**

Contrairement aux séquences de type *cross-plyed*², dans le cas des séquences $(0_3^0/\pm 45_3^0)_s$ (FIG. 3.41) et $(0_3^0/\pm 55_3^0)_s$ (FIG. 3.42), la fissuration débute pour un niveau de contrainte très proche de la rupture. De ce fait, on n'observe aucune diminution ni saturation de la vitesse d'apparition des fissures. Malgré la faible densité de fissures observée, on constate que la chute de rigidité est relativement importante en comparaison avec celle observée pour les séquences de type *cross-plyed*. Ce phénomène peut s'expliquer, d'une part parce que les plis dans les directions hors-axes (ici à 45° et 55°) sollicités en cisaillement ont un comportement non-linéaire et d'autre part du fait de l'apparition de délaminage. En effet, ce type de séquence entraîne l'apparition de contraintes de cisaillement inter-plies qui sont à l'origine de l'apparition du

2. Comprendre ici les séquences de type $(0_m^0/90_n^0)_s$

délaminage. Enfin, les premières chutes de rigidité sont constatées avant l'apparition des premières fissures (FIG. 3.41 et 3.42). Ces constatations laissent penser que le changement de pente observé sur la figure FIG. 3.39 n'est pas dû essentiellement à l'endommagement mais peut être causé par le comportement non-linéaire des plis hors-axes.

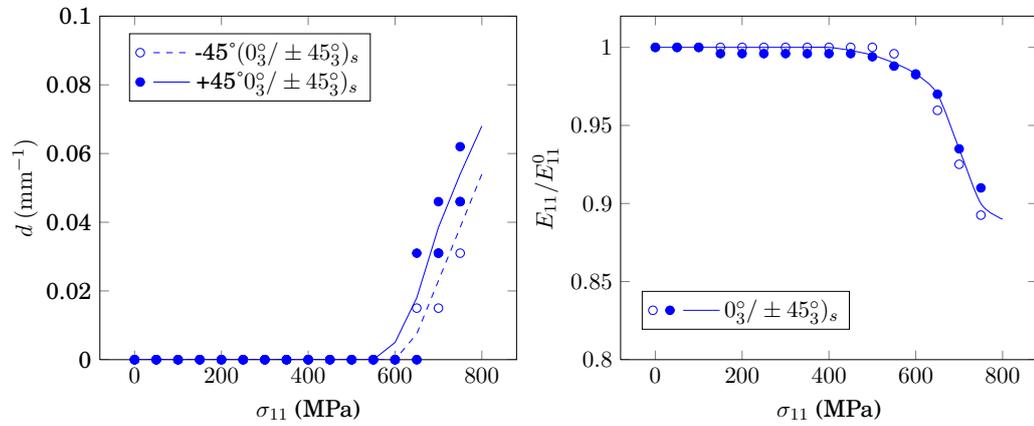


FIGURE 3.41 - Évolution (a) de la densité de fissures d (mm⁻¹) dans les couches à +45°, -45° et (b) de la chute de rigidité longitudinale macroscopique E_{11}/E_{11}^0 en fonction de la contrainte σ_{11} (MPa) appliquée au stratifié pour la séquence $(0_3 / \pm 45_3)_s$ sollicitée en traction quasi-statique.

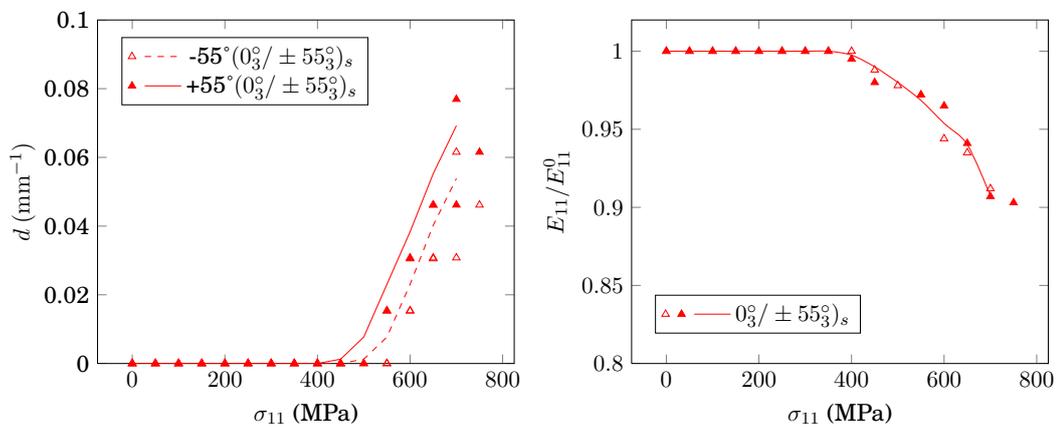


FIGURE 3.42 - Évolution (a) de la densité de fissures d (mm⁻¹) dans les couches à +55°, -55° et (b) de la chute de rigidité longitudinale macroscopique E_{11}/E_{11}^0 en fonction de la contrainte σ_{11} (MPa) appliquée au stratifié pour la séquence $(0_3 / \pm 55_3)_s$ sollicitée en traction quasi-statique.

3.7.3.2 Influence de l'épaisseur de la couche fissurée

Les essais réalisés sur les stratifiés *cross-plyed* ($0_3^{\circ}/90_{n=3,6,12}^{\circ}/0_3^{\circ}$) nous permettent d'étudier l'influence de l'épaisseur de la couche fissurée (respectivement 0.9, 1.8 et 3.6 mm) sur la cinétique de fissuration et la chute de rigidité longitudinale macroscopique.

La figure (FIG. 3.43) et le tableau (TAB. 3.11) mettent clairement en évidence l'influence de l'épaisseur sur la cinétique de fissuration et sur la détérioration de la rigidité des stratifiés. En outre, nous constatons que la fissuration est d'autant plus rapide et importante que la couche fissurée est mince (FIG. 3.43a). En revanche, la chute de rigidité croît avec l'épaisseur de la couche fissurée. Plus précisément, pour une densité de fissures donnée, la chute de rigidité est proportionnelle à l'épaisseur de la couche (FIG. 3.43b).

Afin de s'affranchir de l'effet d'épaisseur pour caractériser l'état d'endommagement, nous proposons d'introduire la variable adimensionnée α , qui fut initialement proposée par RENARD, FAVRE et JEGGY [Renard et al., 1990].

$$\alpha = d \text{ (mm}^{-1}\text{)} \times e \text{ (mm)} \quad (3.4)$$

où d représente la densité de fissures et e l'épaisseur du pli fissuré. Afin de justifier l'utilisation de cette variable nous retraçons les courbes présentées dans la figure (FIG. 3.43) en remplaçant la densité de fissure d par la variable α (FIG. 3.44). La figure (FIG. 3.44), qui représente l'évolution (a) de la variable adimensionnée α dans la couche à 90° en fonction de la contrainte normalisée et (b) de la chute de rigidité longitudinale macroscopique en fonction de α , pour les séquences ($0_3^{\circ}/90_{n=3,6,12}^{\circ}/0_3^{\circ}$) montre que chacun des deux réseaux de courbes peut se réduire à une courbe maîtresse indépendante de l'épaisseur de la couche fissurée.

Séquences	ep (mm)	d _R (mm ⁻¹)	1 - E _{11R} /E ₁₁ ⁰ (%)
(0 ₃ [°] /90 ₃ [°] /0 ₃ [°])	0.9	0.477	1.35
(0 ₃ [°] /90 ₆ [°] /0 ₃ [°])	1.8	0.300	4.92
(0 ₃ [°] /90 ₁₂ [°] /0 ₃ [°])	3.6	0.169	8.80
(0 ₃ [°] /+45 ₃ [°] /-45 ₃ [°]) _s	0.9/1.8	0.0385/0.059	9.90
(0 ₃ [°] /+55 ₃ [°] /-55 ₃ [°]) _s	0.9/1.8	0.0535/0.0689	9.25

TABLE 3.11 - Synthèse des données caractéristiques obtenues par les essais sous sollicitations quasi-statiques sur les séquences ($0_3^{\circ}/90_{n=3,6,12}^{\circ}/0_3^{\circ}$), ($0_3^{\circ}/+45_3^{\circ}/-45_3^{\circ}$)_s et ($0_3^{\circ}/+55_3^{\circ}/-55_3^{\circ}$)_s

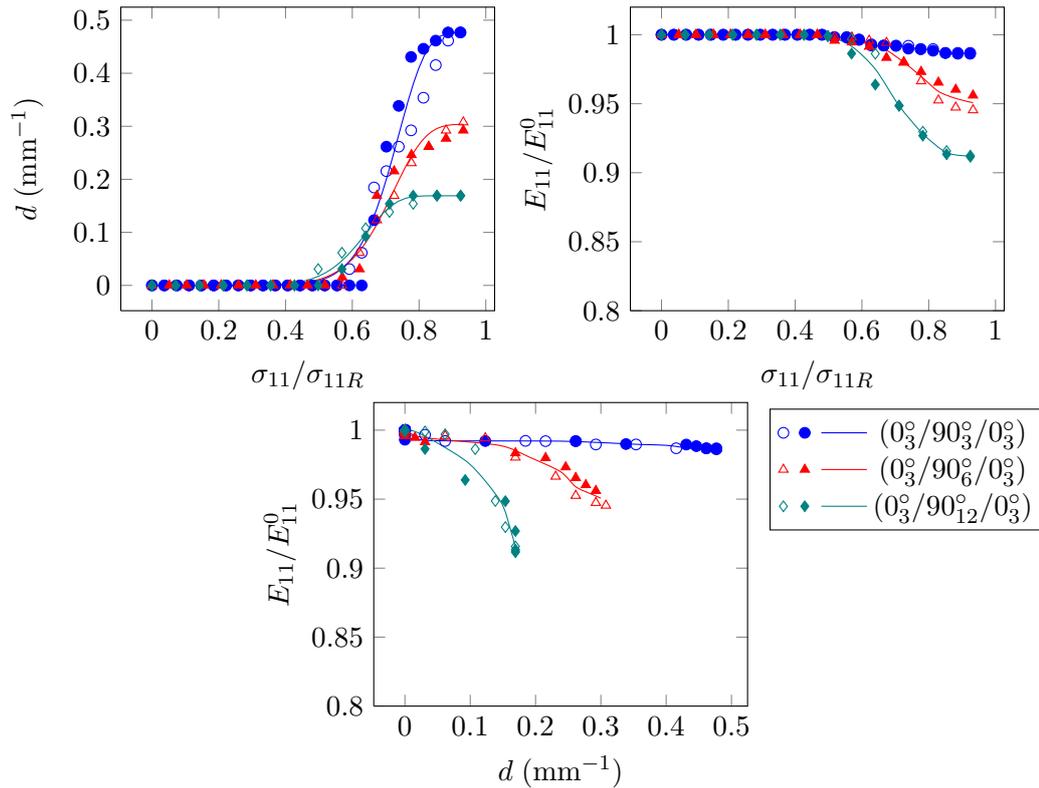


FIGURE 3.43 - Évolution (a) de la densité de fissures d (mm^{-1}) dans la couche à 90° , (b) de la rigidité résiduelle du stratifié en fonction de la contrainte σ_{11} appliquée, (c) de la rigidité résiduelle macroscopique R_{11}/R_{11}^0 en fonction de la densité de fissures d (mm^{-1}) dans la couche à 90° pour les séquences $(0_3^0/90_{n=3,6,12}^0/0_3^0)$ sollicitées en traction quasi-statique.

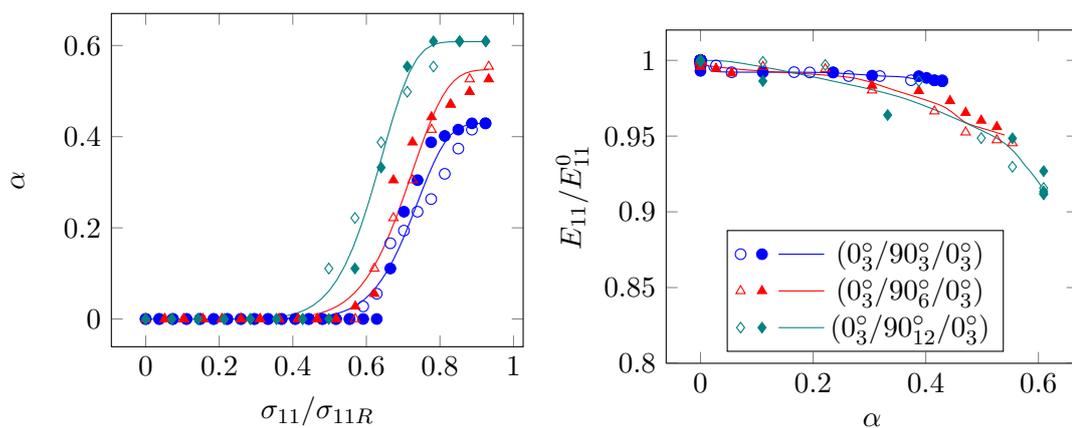


FIGURE 3.44 - Evolution de la variable α dans la couche à 90° en fonction de la contrainte normalisée σ_{11} et de la chute de rigidité macroscopique R_{11}/R_{11}^0 de α pour les séquences $(0_3^0/90_{n=3,6,12}^0/0_3^0)$ sollicitées en traction quasi-statique.

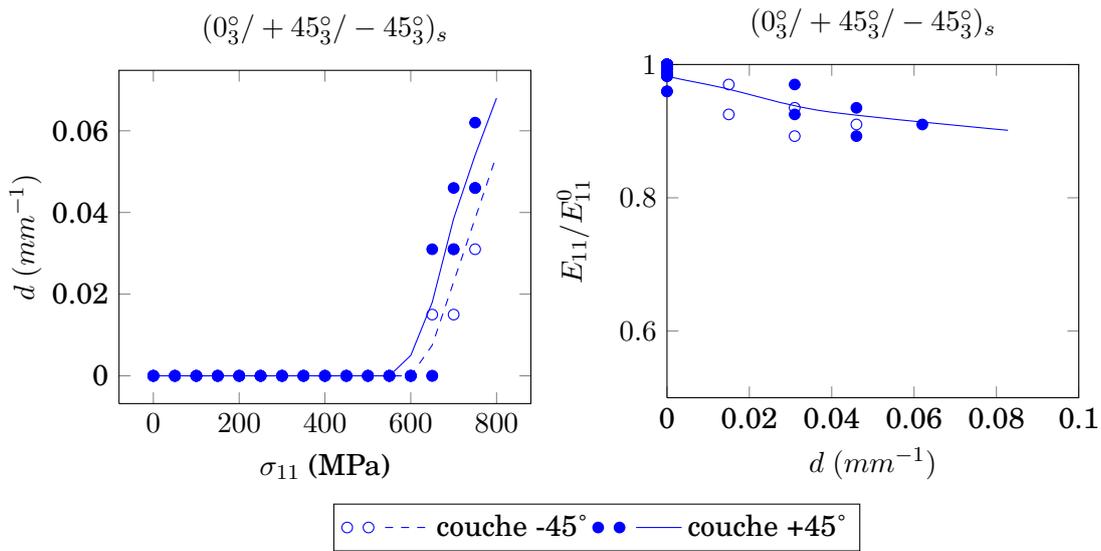


FIGURE 3.45 - Évolution (a) de la variable α dans les couches hors-axes en fonction de la contrainte σ_{11} appliquée au stratifié, (b) de la rigidité résiduelle macroscopique R_{11}/R_{11}^0 en fonction de α pour la séquence $(0_3^0 / +45_3^0 / -45_3^0)_s$ sollicitées en traction quasi-statique.

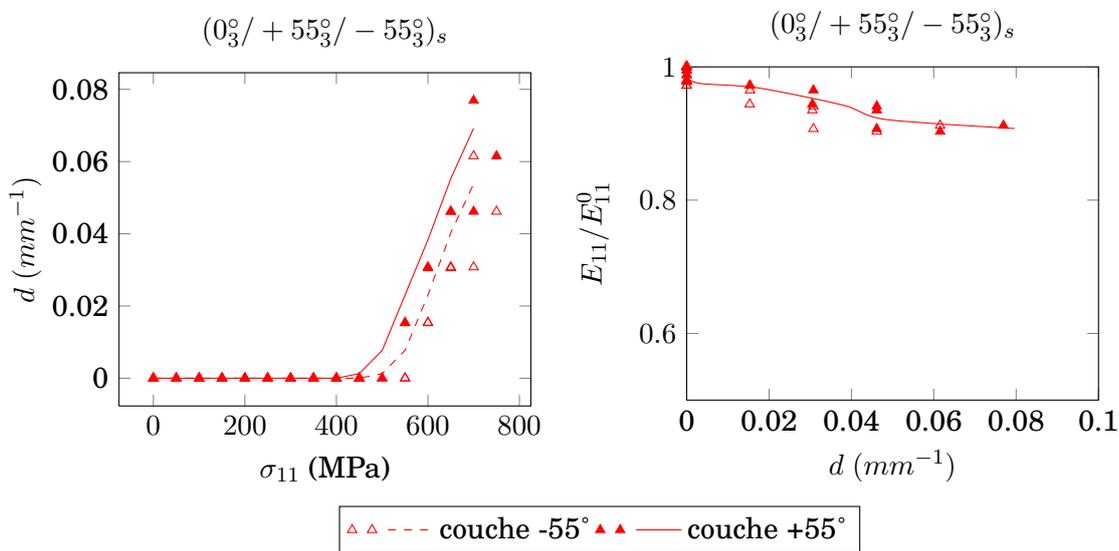


FIGURE 3.46 - Évolution (a) de la variable α dans les couches hors-axes en fonction de la contrainte σ_{11} appliquée au stratifié, (b) de la rigidité résiduelle macroscopique R_{11}/R_{11}^0 en fonction de α pour la séquence $(0_3^0 / +55_3^0 / -55_3^0)_s$ sollicitées en traction quasi-statique.

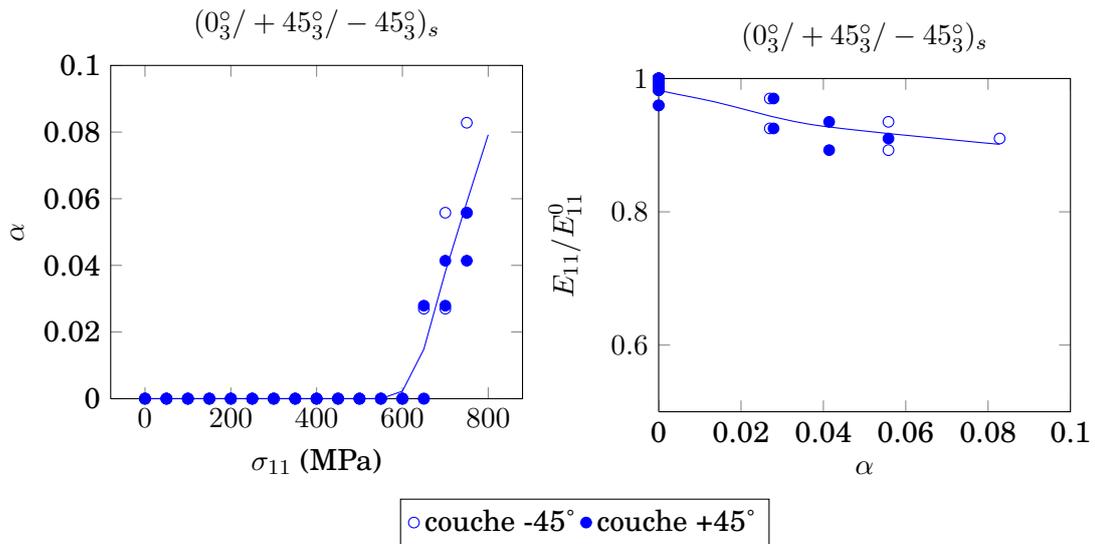


FIGURE 3.47 - Évolution (a) de la variable α dans les couches hors-axes en fonction de la contrainte σ_{11} appliquée au stratifié, (b) de la rigidité résiduelle macroscopique R_{11}/R_{11}^0 en fonction de α pour la séquence $(0_3^0 / +45_3^0 / -45_3^0)_s$ sollicitées en traction quasi-statique.

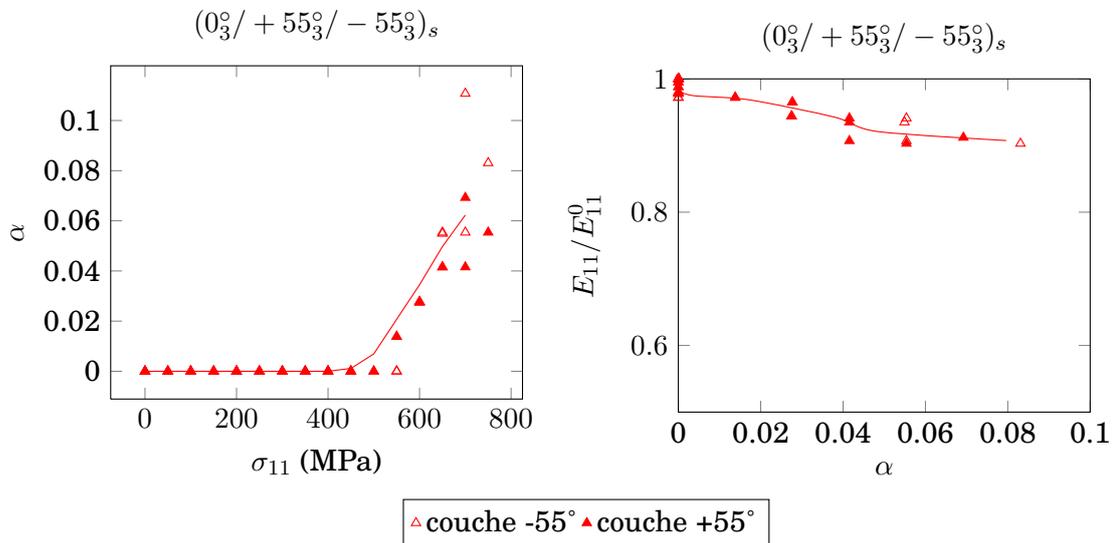


FIGURE 3.48 - Évolution (a) de la variable α dans les couches hors-axes en fonction de la contrainte σ_{11} appliquée au stratifié, (b) de la rigidité résiduelle macroscopique R_{11}/R_{11}^0 en fonction de α pour la séquence $(0_3^0 / +55_3^0 / -55_3^0)_s$ sollicitées en traction quasi-statique.

3.8 Comportement du stratifié et analyse de l'endommagement en fatigue

3.8.1 Introduction

Nous reprenons dans cette partie la même démarche que celle utilisée pour les chargements quasi-statiques (§3.7). Là encore notre objectif est d'étudier l'influence sur l'évolution de la fissuration intra-laminaire des différents paramètres (géométrie ou chargement) qui ont été mis en évidence dans les parties précédentes. Le couplage entre l'endommagement et le comportement mécanique est de nouveau déterminé par le suivi automatique du module longitudinal des stratifiés par extensométrie.

La fatigue est définie comme la réponse d'un matériau à une sollicitation cyclique en contrainte ou en déplacement. Pour les essais de fatigue la sollicitation est souvent prise sous la forme d'une sinusoïde décrite par l'équation EQ. 3.5.

$$S(t) = \Delta S \sin(\omega.t) \quad (3.5)$$

D'une manière générale, une sollicitation cyclique sinusoïdale $S(t)$ peut être décrite simplement à l'aide de trois paramètres caractéristiques (FIG. 3.49) :

- la période T ou la fréquence f ;
- l'amplitude ΔS ou le rapport de charge $R = \frac{S_{min}}{S_{max}}$;
- la valeur maximum S_{max} , la valeur minimum S_{min} ou la valeur moyenne S_{moy} .

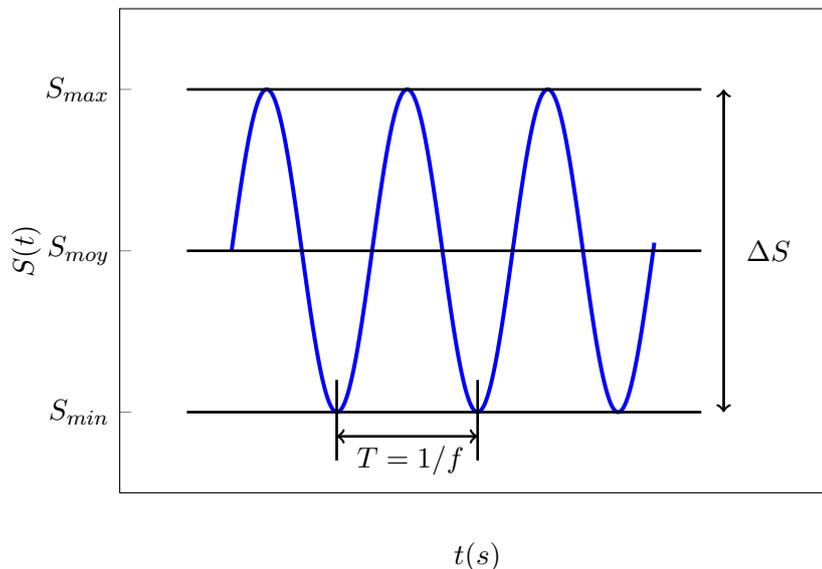


FIGURE 3.49 - *Grandeurs caractéristiques d'un chargement de fatigue*

REMARQUE

Nous rappelons que nous travaillons ici à contrainte imposée. La sollicitation $S(t)$ est donc la contrainte $\sigma_{11}(t)$ appliquée aux stratifiés testés. Dans la suite, σ_{11max} , σ_{11min} et σ_{11R} , σ_{11moy} et $\Delta\sigma_{11}$ sont respectivement la contrainte longitudinale maximale, minimale et moyenne appliquée au stratifié. $\Delta\sigma_{11}$ représente l'amplitude de la contrainte σ_{11} appliquée au stratifié et σ_{11R} la contrainte longitudinale à rupture. Le rapport de charge est défini par : $R = \sigma_{11min}/\sigma_{11max}$.

3.8.2 Analyse de l'évolution de l'endommagement

L'allure des courbes représentatives de la densité de fissures en fonction du nombre de cycles (FIG. 3.52, 3.53 et 3.54) est identique quel que soit le chargement ou la séquence. Comme dans le cas des chargements quasi-statiques, elle se présente sous la forme d'une sigmoïde et se décompose en trois phases :

1. une phase d'amorçage durant laquelle la cinétique de fissuration est relativement lente. Toutefois lorsque la contrainte maximale est élevée, cette phase a tendance à se réduire voire à disparaître totalement au profit de l'apparition directe de la seconde phase ;
2. une phase d'endommagement rapide ;
3. une dernière phase au cours de laquelle la vitesse de fissuration diminue jusqu'à atteindre un état de saturation ;

Contrairement aux résultats obtenus dans le cas des chargements quasi-statiques, l'état de saturation est clairement atteint et intervient bien avant la rupture qui n'a d'ailleurs jamais pu être atteinte au cours des essais de fatigue. Ces résultats sont en accord avec les travaux de REIFSINDER [Reifsnider, 1977] qui montrent que la densité de fissures dans les plis hors-axes d'un stratifié atteint un état asymptotique appelé l'état d'endommagement caractéristique (Characteristic Damage State CDS).

3.8.2.1 Influence du niveau de contrainte maximum

Parmi les paramètres qui affectent l'évolution de l'endommagement, le niveau de chargement maximum est sans doute celui qui a la plus grande influence. Afin de mettre en évidence et d'évaluer cette influence nous avons réalisé pour chacune des séquences une série d'essais pour plusieurs niveaux de contrainte maximum. Cependant, quelques essais réalisés à 70% de la contrainte à rupture montrent que la saturation est atteinte très rapidement (moins de 1000 cycles) ce qui n'a que peu d'intérêt dans le cadre de cette étude. Cependant, il est intéressant de remarquer que pour de tels niveaux de contraintes, la multiplication des fissures est continue dès les premiers cycles. On n'observe pas de palier à densité de fissures constante tel que cela peut-être le cas pour les niveaux de sollicitation inférieurs (FIG. 3.50). D'autre part, la durée des essais dans le cas d'une contrainte maximale égale à 30% de la

contrainte à rupture s'est avérée être beaucoup trop importante, aussi, nous avons fait le choix de nous focaliser sur trois niveaux : $0.4\sigma_R$, $0.5\sigma_R$, et $0.6\sigma_R$.

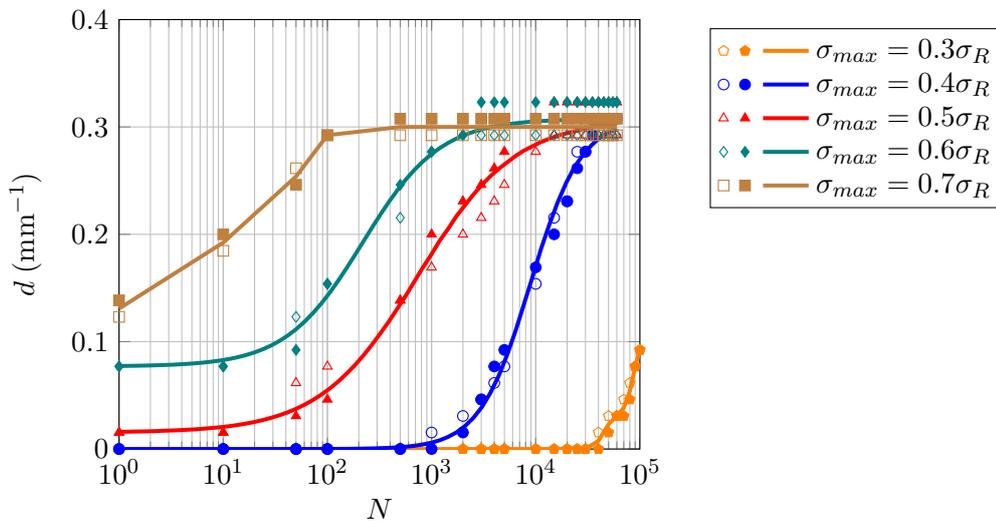


FIGURE 3.50 - Evolution de la densité de fissures dans la couche à 90° pour la séquence $(0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ)$ avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, et $\sigma_{max} = 0.6\sigma_R$

Le tableau 3.12 récapitule les valeurs des différentes grandeurs caractéristiques qui ont été retenues pour chacun des essais réalisés. Les valeurs σ_{11max} , σ_{11min} , σ_{11moy} , et $\Delta\sigma_{11}$ sont exprimées en pourcentage de la contrainte à rupture. L'ensemble des essais ont été réalisés sous sollicitations ondulées [Bathias and Bailon, 1980] en traction-traction, *i.e.* avec $0 \leq R < 1$ à la fréquence de 1 Hz .

σ_{11min} (%) $\cdot\sigma_{11R}$	σ_{11max} (%) $\cdot\sigma_{11R}$	R	f (Hz)
4	40	0.1	1
5	50	0.1	1
6	60	0.1	1

TABLE 3.12 - Tableau récapitulatif des essais de fatigue

Aux vues des résultats de ces essais, nous constatons d'emblée que le niveau de chargement influence fortement la cinétique de fissuration (FIG. 3.52). Il apparaît clairement que la multiplication des fissures est d'autant plus rapide que le chargement maximal est important. Par ailleurs, nous pouvons remarquer que lorsque la contrainte σ_{11max} est supérieure au seuil d'apparition de la première fissure sous chargement quasi-statique l'endommagement créé lors du premier cycle du chargement cyclique résulte en fait d'un chargement quasi-statique. En effet, il est toujours possible de supposer que le premier cycle est identique à une montée en charge quasi-statique. En revanche, la densité de fissure à saturation ne dépend pas du chargement et pour chaque séquence elle est sensiblement équivalente à celle observée

en quasi-statique (TAB. 3.13). Ce résultat confirme que la densité de fissure à saturation est une propriété intrinsèque au matériau et à la séquence d'empilement et donc indépendante du chargement appliqué pour atteindre cet état caractéristique. Dans le cas des séquences $(0_3^\circ/ + 45_3^\circ/ - 45_3^\circ)_s$ et $(0_3^\circ/ + 55_3^\circ/ - 55_3^\circ)_s$ qui sont plus sensibles à l'apparition de délaminage, on constate qu'une contrainte maximale élevée favorise l'apparition du délaminage qui tend à retarder ou ralentir le développement de la fissuration.

Séquences	$d_{\text{statique}} (mm^2)$	$d_{\text{fatigue}} (mm^2)$
$(0_3^\circ/90_3^\circ/0_3^\circ)$	0.477	0.6
$(0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ)$	0.3	0.307
$(0_3^\circ/90_{12}^\circ/0_3^\circ)$	0.169	0.169
$(0_3^\circ/ + 45_3^\circ/ - 45_3^\circ)_s$	–	$d_{\text{int}} = 0.289$ $d_{\text{ext}} = 0.505$
$(0_3^\circ/ + 55_3^\circ/ - 55_3^\circ)_s$	–	$d_{\text{int}} = 0.297$ $d_{\text{ext}} = 0.526$

TABLE 3.13 - Comparaisons des densités de fissures à saturation en statique et en fatigue pour les séquences $(0_3^\circ/90_{n=3,6,12}^\circ/0_3^\circ)$, $(0_3^\circ/ + 45_3^\circ/ - 45_3^\circ)_s$ et $(0_3^\circ/ + 55_3^\circ/ - 55_3^\circ)_s$

Afin de s'assurer que l'état atteint est effectivement la saturation et pas seulement un palier, certains essais ont été poursuivis jusqu'à atteindre 10^6 cycles. Comme le montre la figure 3.51 la densité de fissures atteint effectivement un état de saturation à partir duquel aucune nouvelle fissure n'apparaît. En revanche, d'autres types d'endommagement tels que le délaminage et les ruptures de fibres ont été observés.

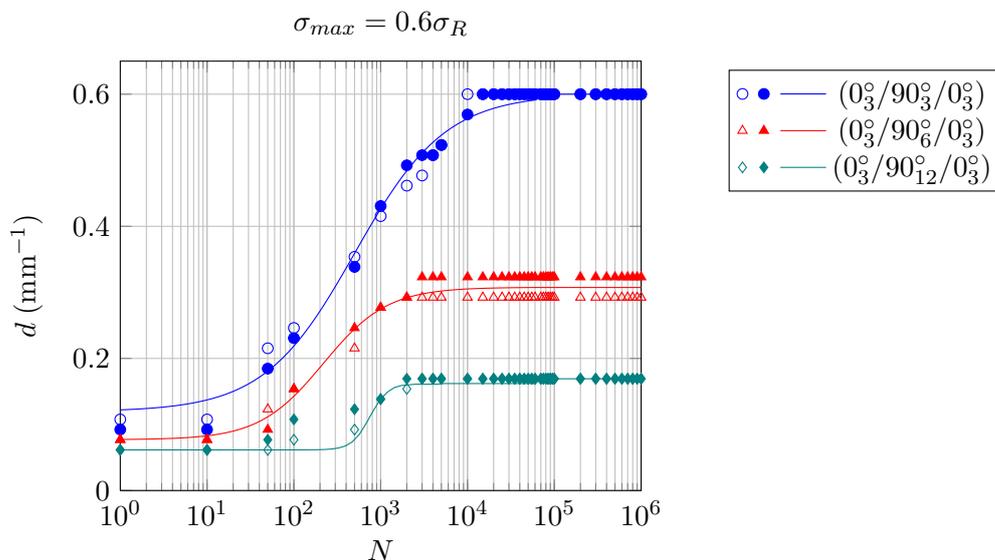


FIGURE 3.51 - Evolution de la densité de fissures dans la couche à 90° pour la séquence $(0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ)$ avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, et $\sigma_{\text{max}} = 0.6\sigma_R$

3.8.2.2 Analyse des chutes des rigidités longitudinales macroscopiques

Comme cela a été fait précédemment dans le cas des chargements quasi-statiques, nous avons suivi l'évolution de la rigidité longitudinale du stratifié en cours d'essai (FIG. 3.55). L'analyse des courbes montrant l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles montre que les propriétés mécaniques commencent à se dégrader dès l'apparition de la première fissure puis tend à se stabiliser lorsque l'on se rapproche de l'état de saturation. La chute de rigidité est proportionnelle à l'épaisseur de la couche fissurée, ici la couche à 90° . La chute de rigidité à saturation est d'environ 2% pour la séquence $(0_3^\circ/90_3^\circ/0_3^\circ)$, 4% pour la séquence $(0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ)$ et 8% pour la séquence $(0_3^\circ/90_{12}^\circ/0_3^\circ)$. Toutefois, la saturation des chutes de rigidité n'est pas aussi franche que celle observée pour la densité de fissures. Plus particulièrement, nous constatons que la stabilisation de la chute de rigidité est plus franche pour la séquence $(0_3^\circ/90_3^\circ/0_3^\circ)$ que pour la séquence $(0_3^\circ/90_{12}^\circ/0_3^\circ)$. Cela est bien mis en évidence par la figure (FIG. 3.60) qui représente l'évolution de la chute de rigidité en fonction de la densité de fissures. On constate, notamment pour le stratifié le plus épais que la chute de rigidité se poursuit alors même que la densité de fissures a cessé d'augmenter. Plusieurs mécanismes peuvent être à l'origine de ce phénomène :

- la densité de fissures est déterminée par une observation du bord libre des éprouvettes. Or, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent (CHAP. 2), dans le cas des sollicitations cycliques, les fissures, qui s'initient sur les bords libres, se propagent plus ou moins rapidement vers le centre de l'éprouvette [Lafarie-Frenot and Henaff-Gardin, 1990]. Ainsi, bien qu'il n'y ait plus d'apparition de nouvelles fissures, il est possible que certaines des fissures existantes ne soient pas totalement traversantes et continuent de se propager entraînant une diminution de la rigidité ;
- l'observation du bord libre des éprouvettes testées montre que le délaminage est plus important dans le $(0_3^\circ/90_{12}^\circ/0_3^\circ)$. En effet on rappelle que dans le cas de cette séquence, qui est la plus épaisse, nous avons constaté la présence de fissures partielles inclinées qui ont tendance à favoriser l'apparition du délaminage. La présence et la propagation de ce délaminage peuvent expliquer le fait que la dégradation de la rigidité du stratifié se poursuit alors que la densité de fissures n'évolue plus. La présence de délaminage est plus importante dans le cas des séquences $(0_3^\circ/ + 45_3^\circ/ - 45_3^\circ)_s$ et $(0_3^\circ/ + 55_3^\circ/ - 55_3^\circ)_s$ et là encore il accentue la chute de rigidité ;
- les ruptures de fibres.

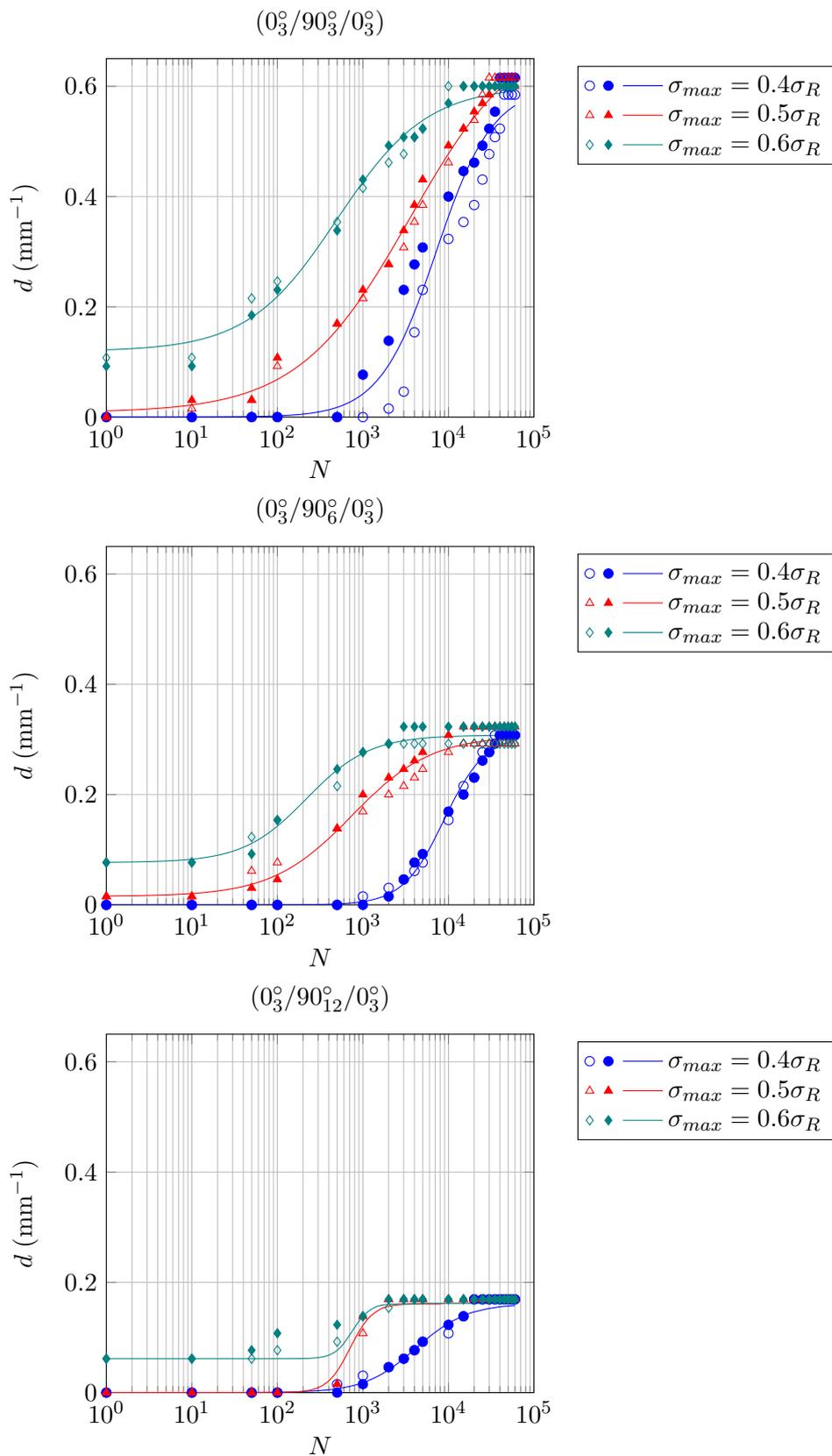


FIGURE 3.52 - Evolution de la densité de fissures d (mm^{-1}) dans la couche à 90° et en fonction du nombre de cycles pour les séquences $(0_3^\circ/90_{n=3,6,12}^\circ/0_3^\circ)$ sollicitées en traction cyclique avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, $\sigma_{max} = 0.4\sigma_R$, $0.5\sigma_R$, $0.6\sigma_R$.

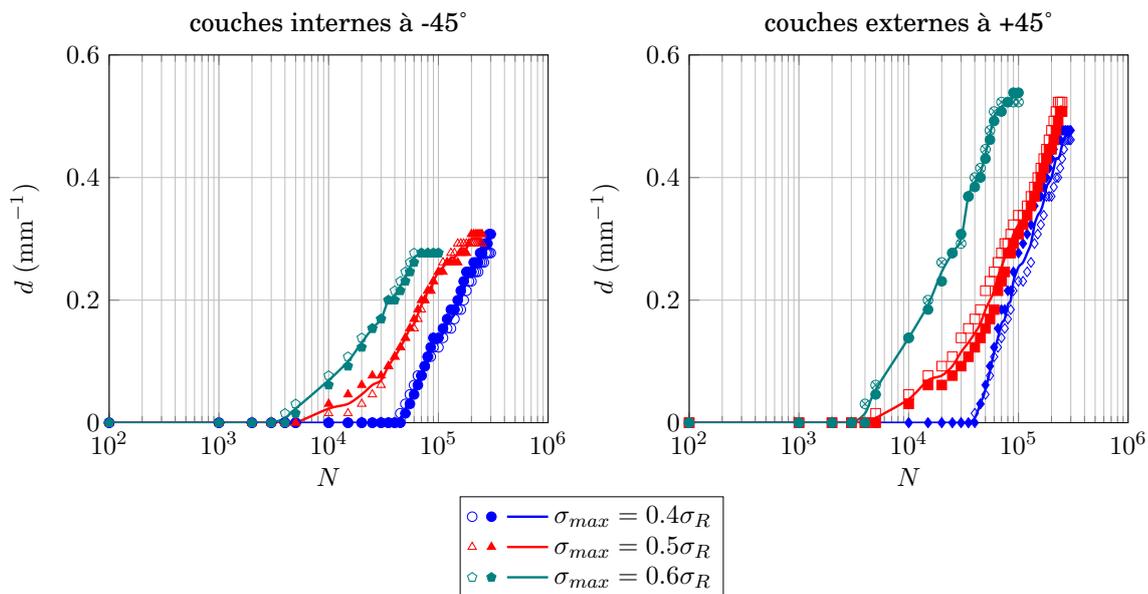


FIGURE 3.53 - Evolution de la densité de fissures d (mm^{-1}) dans les couches à $+45^\circ$ et -45° en fonction du nombre de cycles pour les séquences $(0_3^\circ / +45_3^\circ / -45_3^\circ)_s$ sollicitées en traction cyclique avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, $\sigma_{max} = 0.4\sigma_R$, $0.5\sigma_R$, $0.6\sigma_R$.

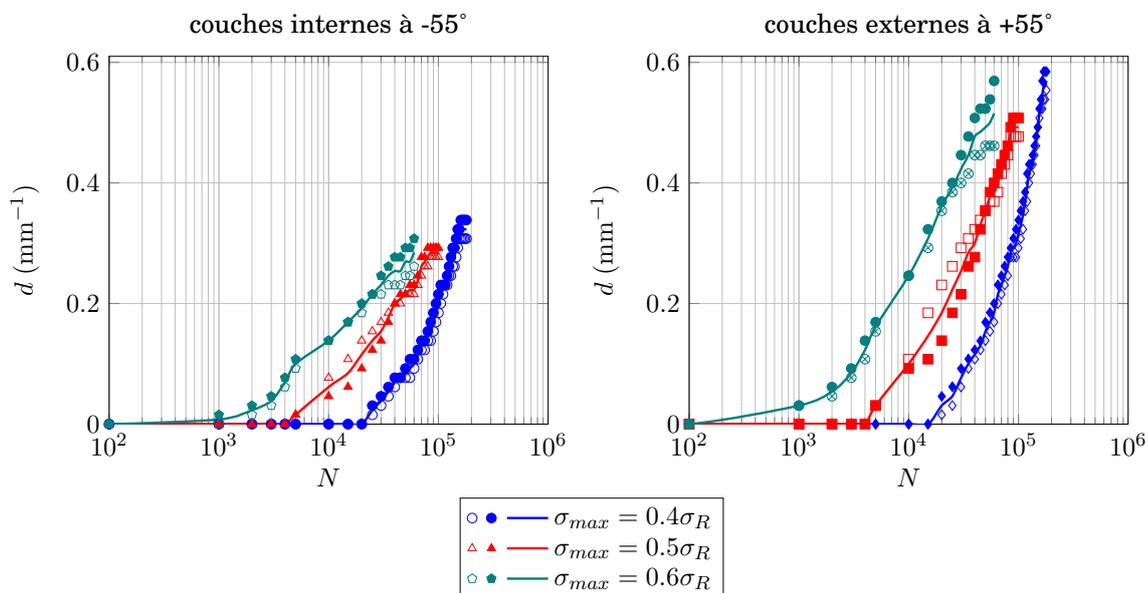


FIGURE 3.54 - Evolution de la densité de fissures d (mm^{-1}) dans les couches à $+55^\circ$ et -55° en fonction du nombre de cycles pour les séquences $(0_3^\circ / +55_3^\circ / -55_3^\circ)_s$ sollicitées en traction cyclique avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, $\sigma_{max} = 0.4\sigma_R$, $0.5\sigma_R$, $0.6\sigma_R$.

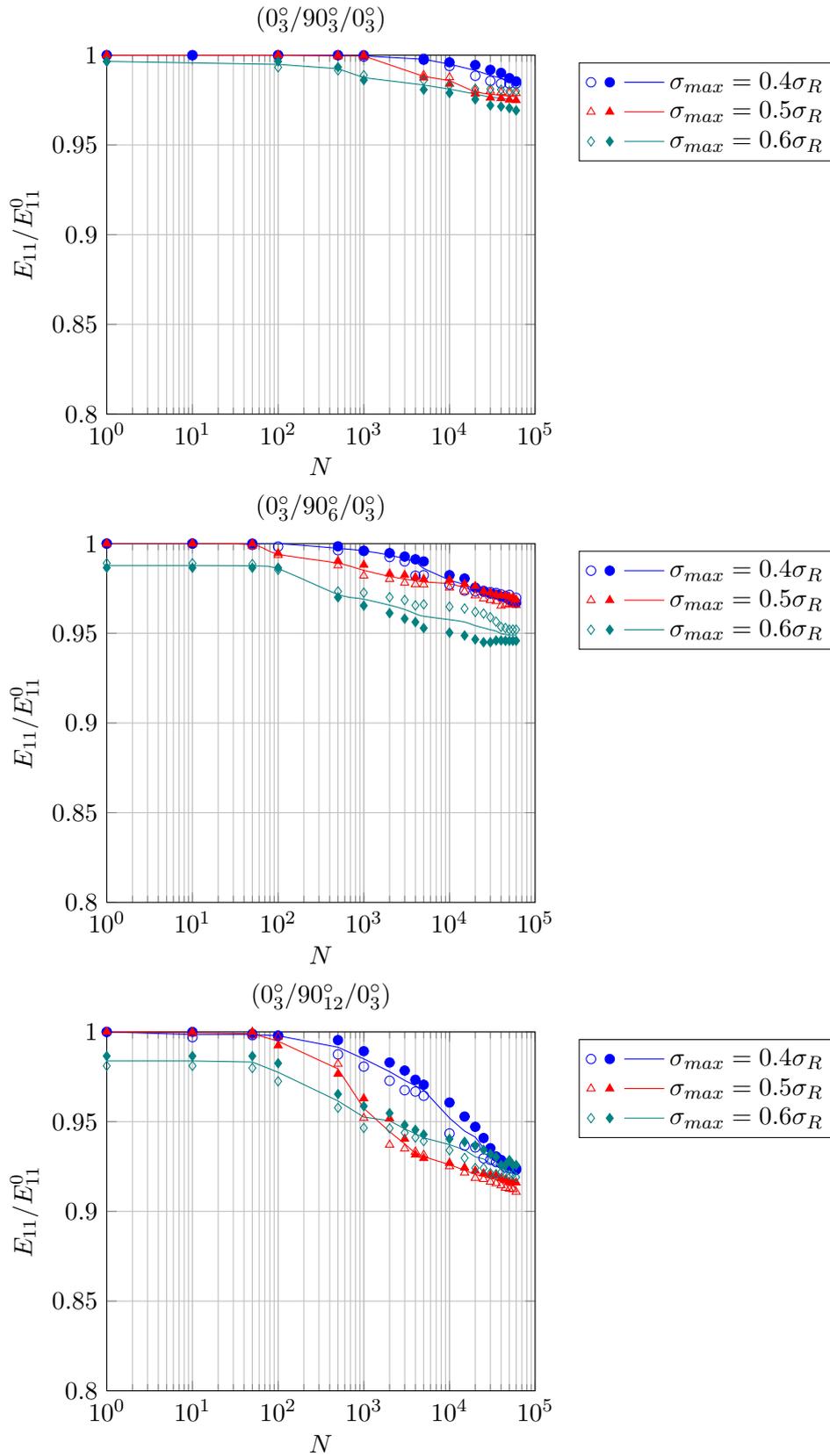


FIGURE 3.55 - Évolution de la chute de rigidité longitudinale macroscopique E_{11}/E_{11}^0 en fonction du nombre de cycles pour les séquences $(0_3^{\circ}/90_n^{\circ}/0_3^{\circ})$ sollicitées en traction cyclique avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, $\sigma_{max} = 0.4\sigma_R$, $0.5\sigma_R$, $0.6\sigma_R$.

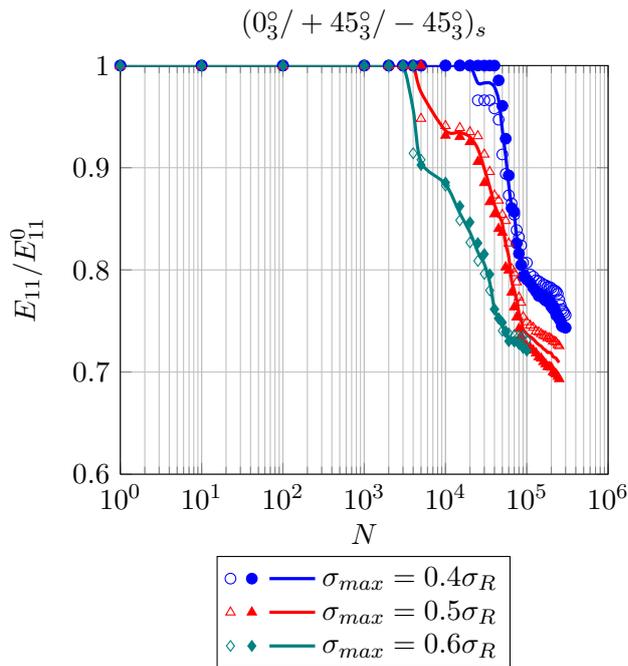


FIGURE 3.56 - Évolution de la rigidité résiduelle macroscopique du stratifié E_{11}/E_{11}^0 en fonction du nombre de cycles pour la séquence $(0_3^0 / +45_3^0 / -45_3^0)_s$ sollicitée en traction cyclique avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, $\sigma_{max} = 0.4\sigma_R$, $0.5\sigma_R$, $0.6\sigma_R$.

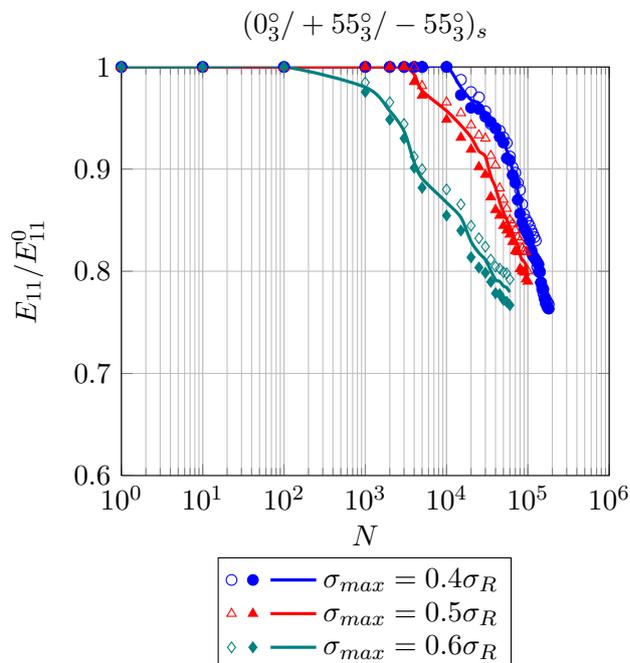


FIGURE 3.57 - Évolution de la rigidité résiduelle macroscopique du stratifié E_{11}/E_{11}^0 en fonction du nombre de cycles pour la séquence $(0_3^0 / +55_3^0 / -55_3^0)_s$ sollicitée en traction cyclique avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, $\sigma_{max} = 0.4\sigma_R$, $0.5\sigma_R$, $0.6\sigma_R$.

3.8.2.3 Influence de l'épaisseur du pli fissuré

La figure (FIG. 3.58) représente les courbes d'évolution de la densité de fissures en fonction du nombre de cycles pour les séquences $(0_3^{\circ}/90_{n=3,6,12}^{\circ}/0_3^{\circ})$ pour trois niveaux de chargements. Comme dans le cas d'un chargement quasi-statique, les courbes mettent en évidence une forte dépendance de la cinétique de fissuration vis à vis de l'épaisseur de la couche fissurée (ici la couche à 90°). En outre, la vitesse de fissuration comme la densité de fissures à saturation (donc le nombre de fissures) sont inversement proportionnelles à l'épaisseur de la couche fissurée. Bien évidemment, cet effet se retrouve sur les courbes de chutes de rigidité (FIG. 3.59) dans la mesure où ces dégradations sont directement liées à l'apparition de l'endommagement. Dans le cas des séquences $(0_3^{\circ}/+45_3^{\circ}/-45_3^{\circ})_s$ et $(0_3^{\circ}/+55_3^{\circ}/-55_3^{\circ})_s$ cet effet d'épaisseur se retrouve à l'intérieur même du stratifié. En effet, les plis à -45° , respectivement -55° , qui se trouvent au centre de l'éprouvette sont de fois plus épais que les plis à $+45^{\circ}$, respectivement $+55^{\circ}$. Aussi, la densité de fissures dans les plis intérieurs est environ deux fois plus importante que celle des plis externes (FIG. 3.53 et 3.54).

Afin de mettre en évidence ce phénomène, on se propose de tracer l'évolution de la variable α , que nous avons définie précédemment, en fonction du nombre de cycles. On rappelle que la variable α est définie comme le produit de la densité de fissures par l'épaisseur du pli fissuré $\alpha = d \times e$. Ainsi, les figures 3.61, 3.63 et 3.64 représentent l'évolution de α en fonction du nombre de cycles pour différentes épaisseurs et différents niveaux de chargement. On constate alors que l'utilisation de la grandeur α en lieu et place de la densité de fissures d permet de s'affranchir de l'effet d'épaisseur de la couche fissurée.

Nous avons suivi la même démarche, afin d'étudier l'influence de l'épaisseur du pli fissuré sur les chutes de rigidité. Nous nous intéressons alors à l'évolution de la chute de rigidité en fonction de la densité de fissures. La figure 3.60 met clairement en évidence que, comme dans le cas des chargements quasi-statiques, la chute de rigidité due à l'apparition d'une fissure est d'autant importante que le pli fissuré est épais. Aussi, nous avons, là encore, tracer l'évolution des chutes de rigidité en fonction de $\alpha = e \times d$ et on constate une nouvelle fois que l'utilisation de la variable α permet de s'affranchir des effets d'épaisseur (FIG. 3.62).

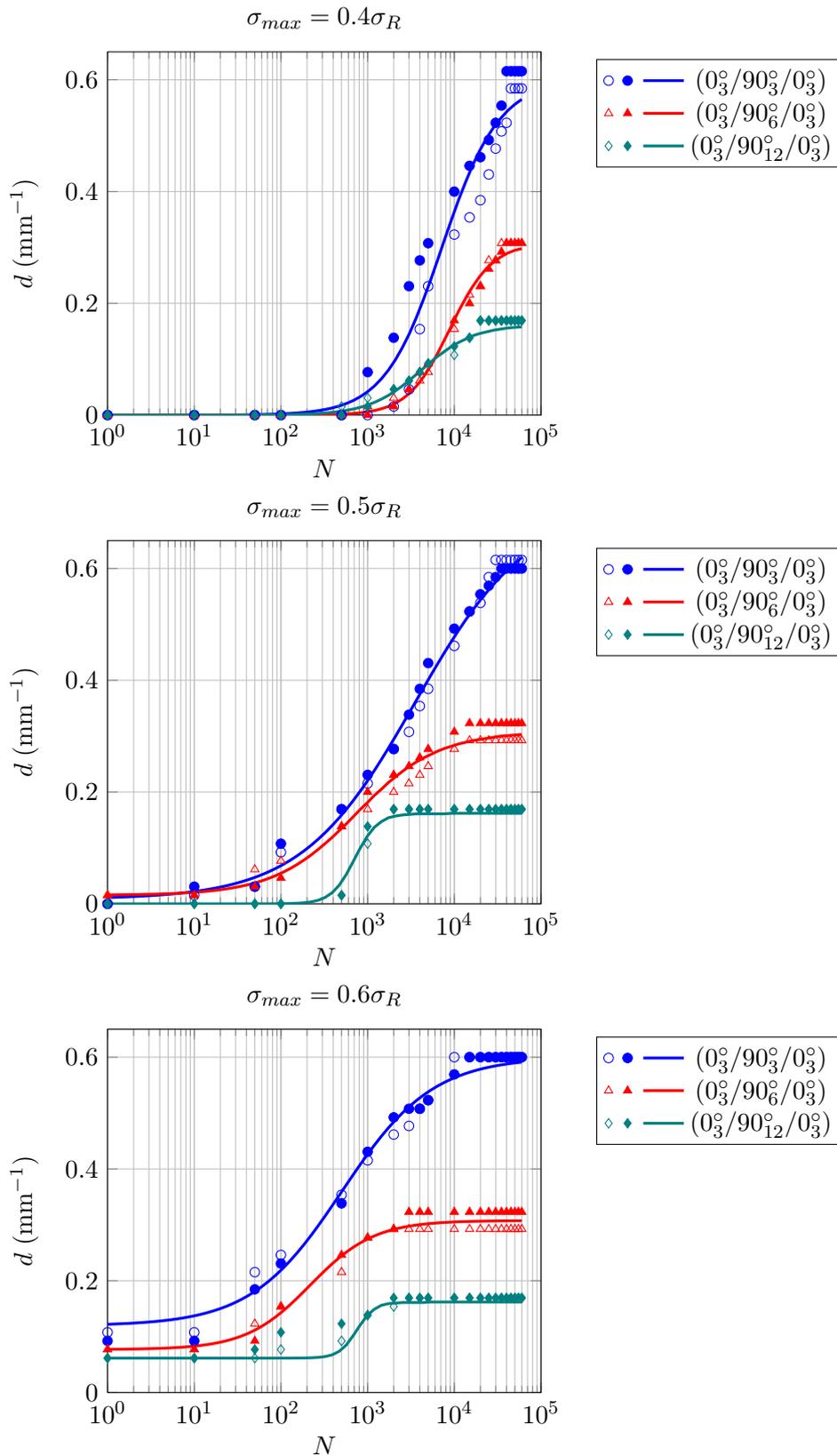


FIGURE 3.58 - Evolution (a) de la densité de fissures dans la couche à 90° et (b) de la chute de rigidité macroscopique en fonction du nombre de cycles pour les séquences $(0_3^\circ/90_{n=3,6,12}^\circ/0_3^\circ)$, avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$ et $\sigma_{11max} = 0.4\sigma_{11R}$

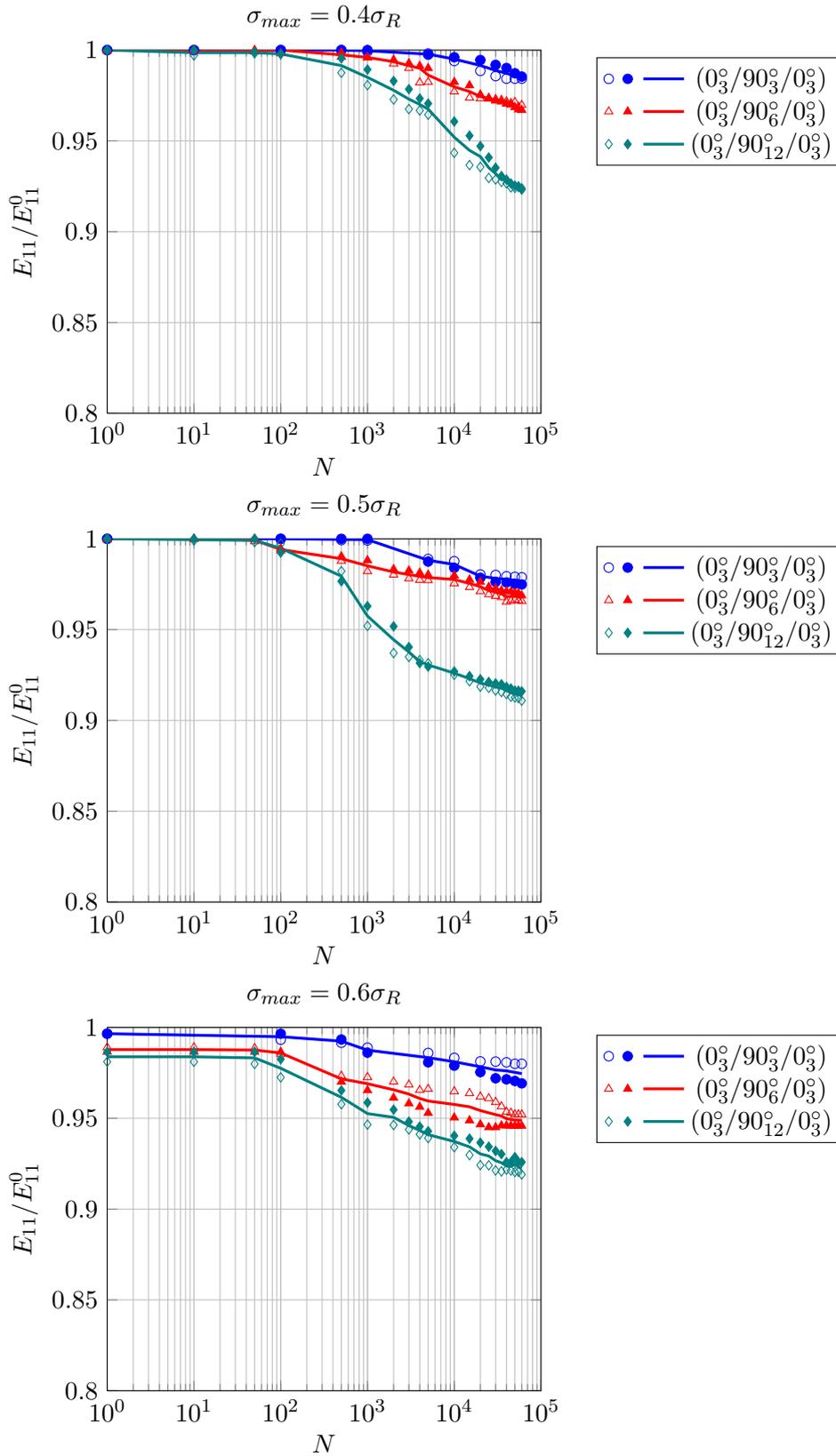


FIGURE 3.59 - Evolution (a) de la densité de fissures dans la couche à 90° et (b) de la chute de rigidité macroscopique en fonction du nombre de cycles pour les séquences $(0_3^0/90_n^0/0_3^0)$, avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$ et $\sigma_{11max} = 0.5\sigma_{11R}$

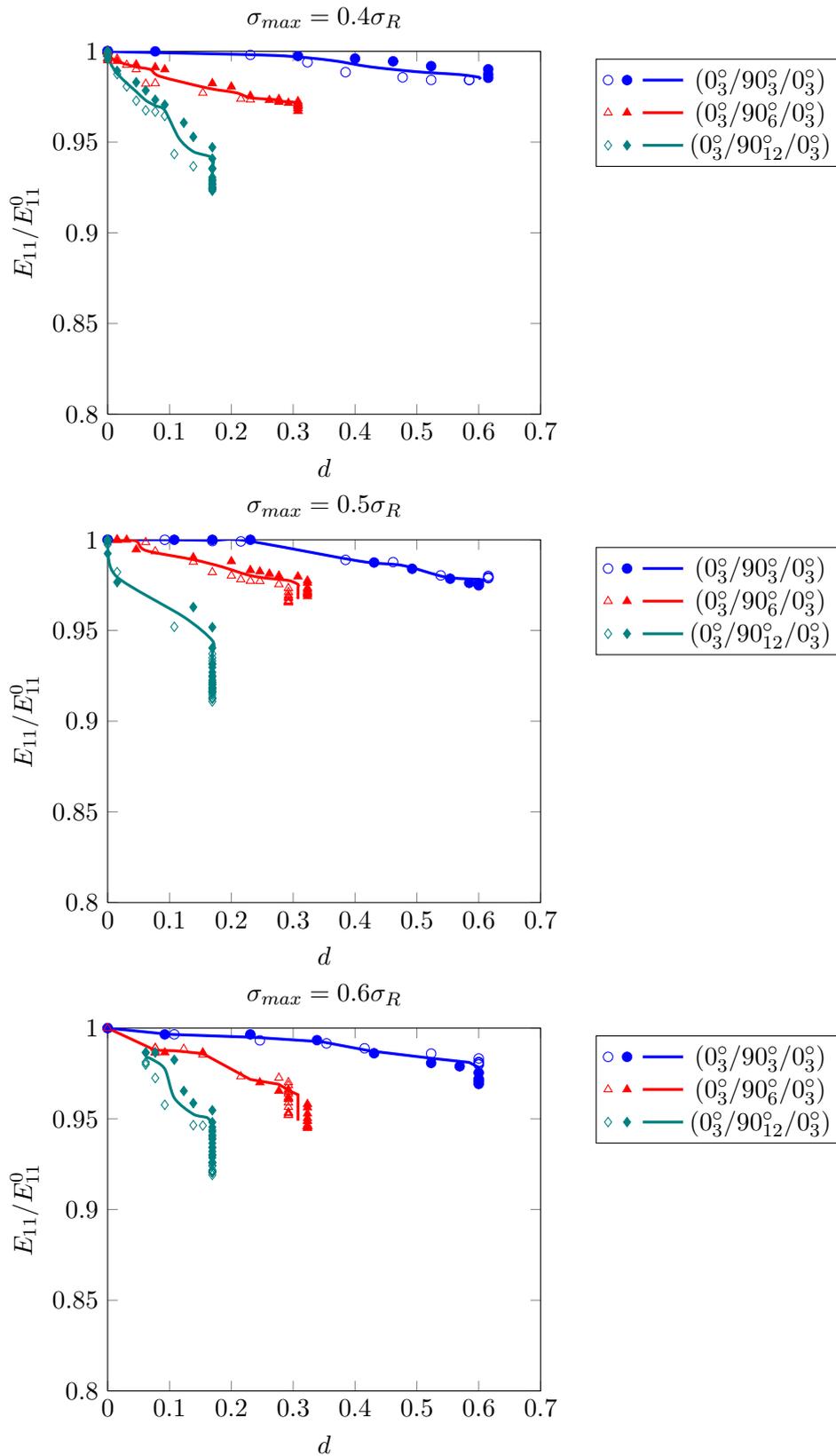


FIGURE 3.60 - Evolution (a) de la densité de fissures dans la couche à 90° et (b) de la chute de rigidité macroscopique en fonction du nombre de cycles pour les séquences $(0_3^0/90_{n=3,6,12}^0/0_3^0)$, avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$ et $\sigma_{11max} = 0.5\sigma_{11R}$

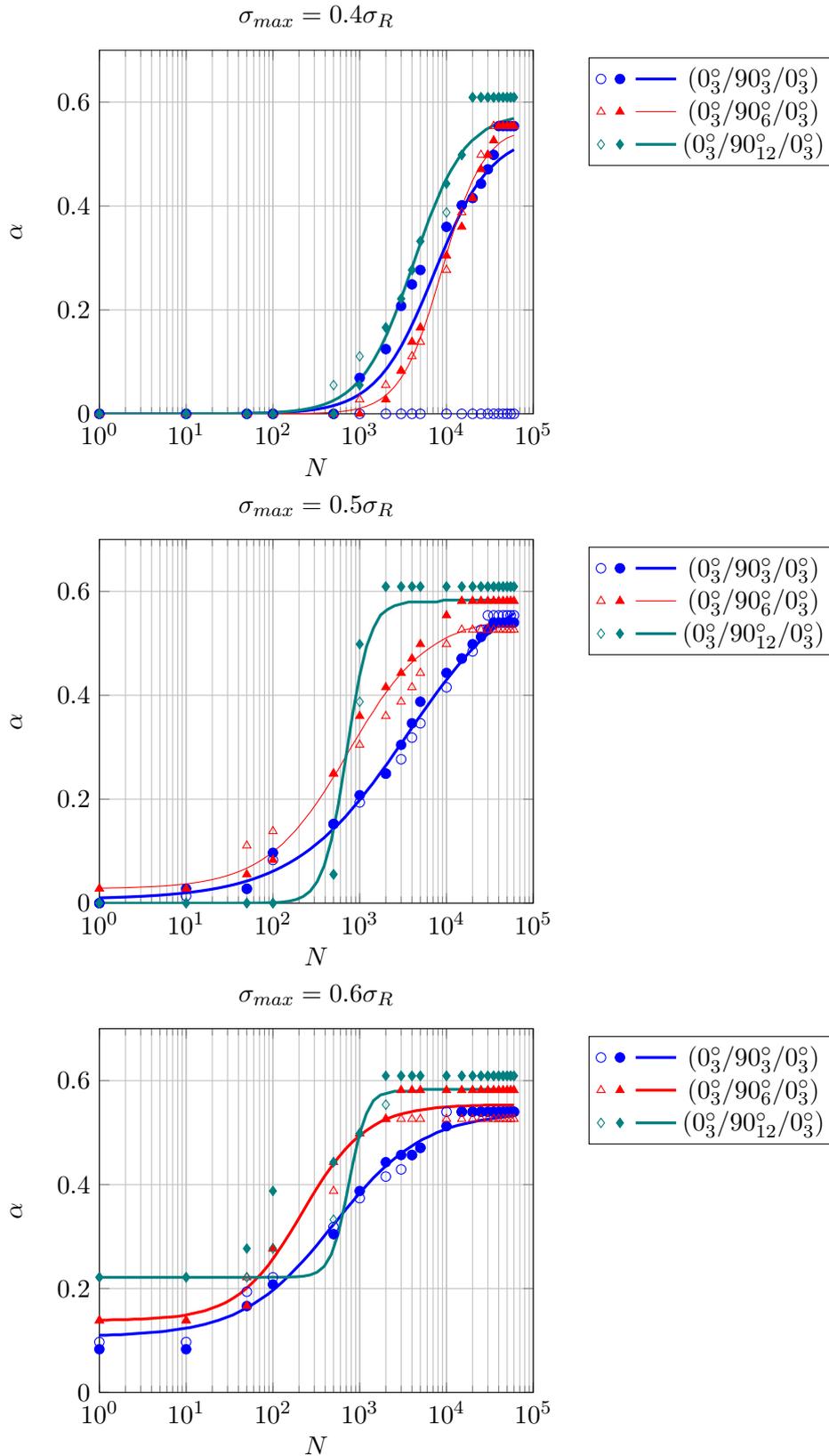


FIGURE 3.61 - Evolution (a) de $\alpha = d \times e$ dans la couche à 90° et (b) de la chute de rigidité macroscopique en fonction du nombre de cycles pour les séquences $(0_3^0/90_n^0/0_3^0)$, avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$ et $\sigma_{11max} = 0.4\sigma_{11R}$

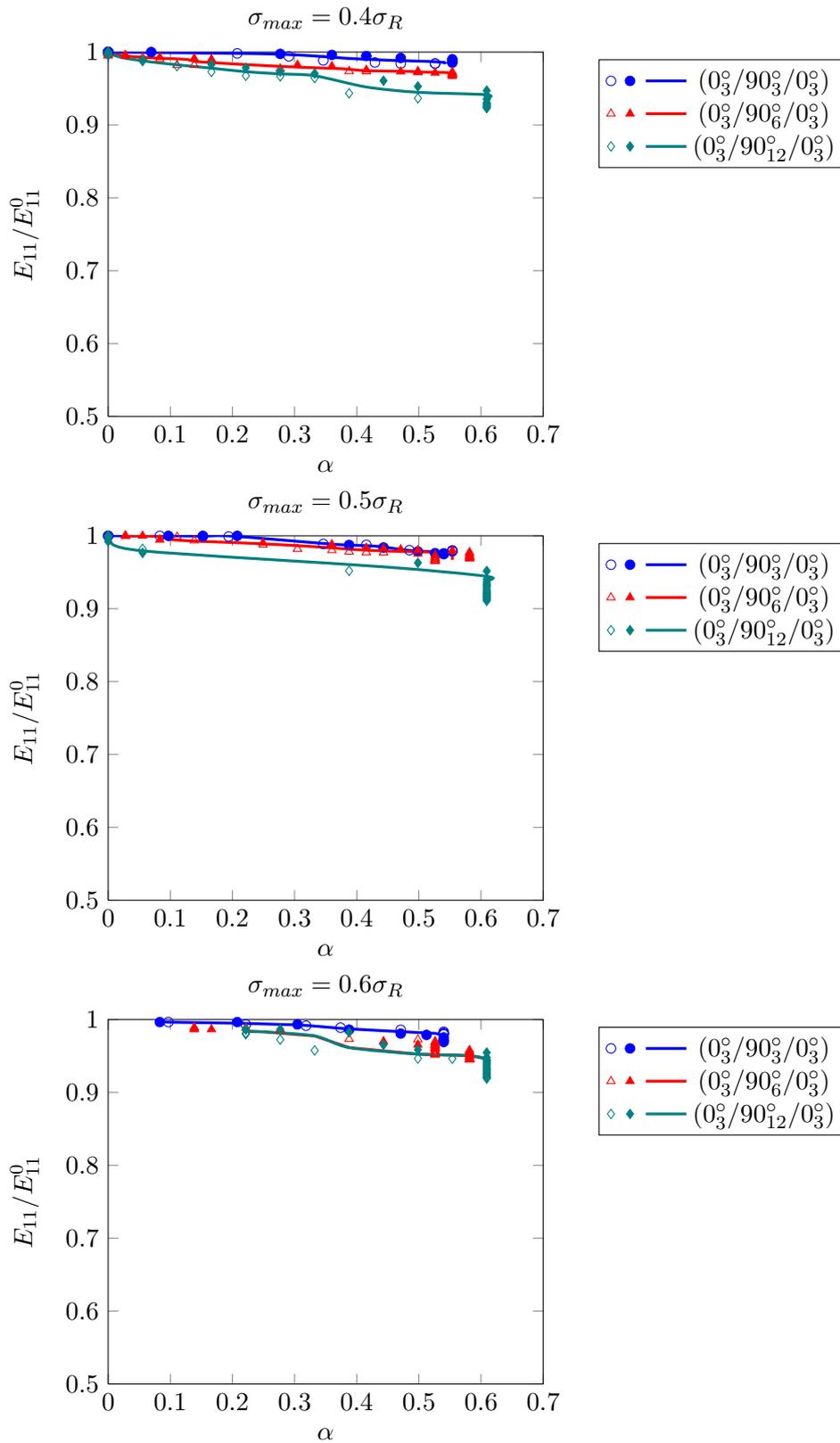


FIGURE 3.62 - Évolution (a) de la densité de fissures dans la couche à 90° et (b) de la chute de rigidité macroscopique en fonction du nombre de cycles pour les séquences $(0_3^{\circ}/90_n^{\circ}/0_3^{\circ})$, avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$ et $\sigma_{11max} = 0.5\sigma_{11R}$

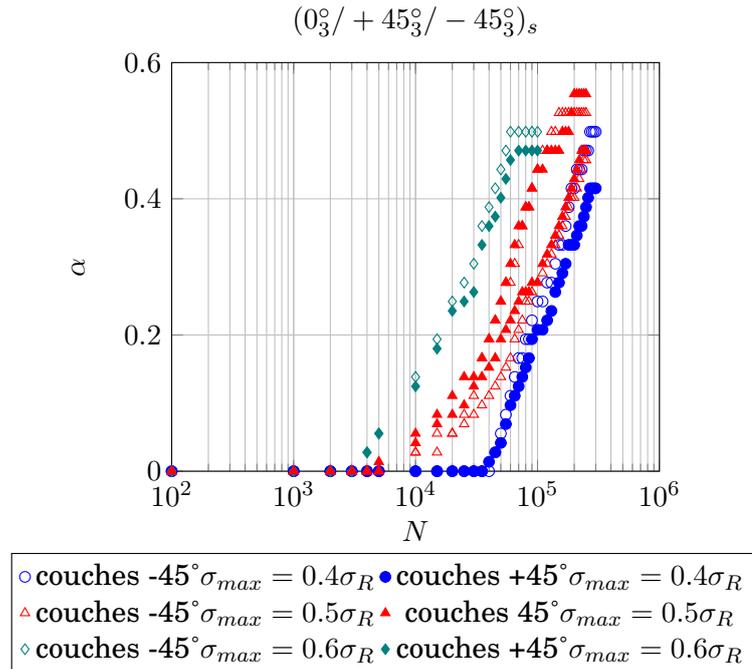


FIGURE 3.63 - Évolution de la variable $\alpha = d \text{ (mm}^{-1}) \times e \text{ (mm)}$ dans les couches à $+45^\circ$ et -45° en fonction du nombre de cycles pour la séquence $(0_3^\circ / +45_3^\circ / -45_3^\circ)_s$ sollicitées en traction cyclique avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, $\sigma_{max} = 0.4\sigma_R$, $0.5\sigma_R$, $0.6\sigma_R$.

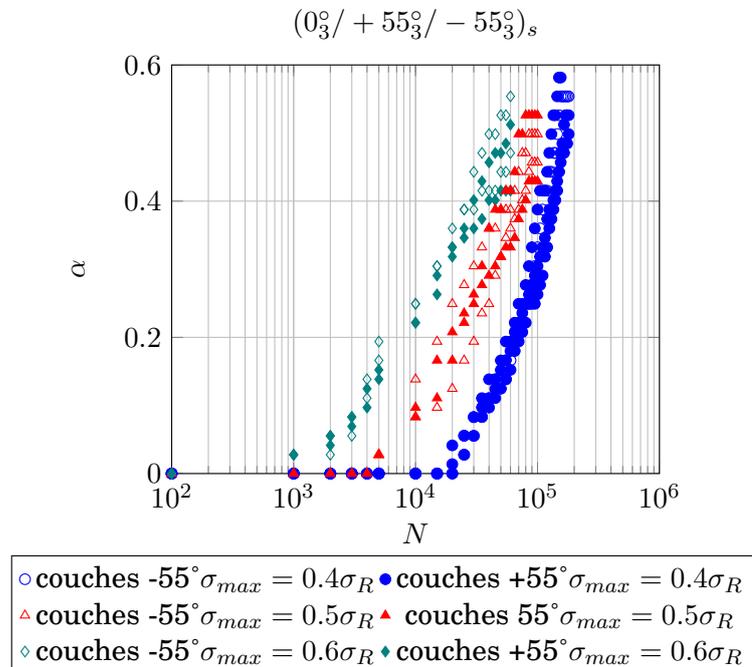


FIGURE 3.64 - Évolution de la variable $\alpha = d \text{ (mm}^{-1}) \times e \text{ (mm)}$ dans les couches à $+55^\circ$ et -55° en fonction du nombre de cycles pour les séquences $(0_3^\circ / +55_3^\circ / -55_3^\circ)_s$ sollicitées en traction cyclique avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, $\sigma_{max} = 0.4\sigma_R$, $0.5\sigma_R$, $0.6\sigma_R$.

3.8.3 Comparaison quasi-statique/fatigue

Nous l'avons montré, la densité de fissures à saturation, lorsqu'elle est représentée par la variable α , est une propriété intrinsèque au matériau et donc par définition indépendante du chargement. On propose maintenant de comparer les chutes de rigidité engendrées par un endommagement quasi-statique à celles dues à un endommagement dit de fatigue (FIG. 3.65, 3.66 et 3.67).

Ainsi pour chacune des stratifications on trace l'évolution de la rigidité résiduelle en fonction de la variable α et cela pour chaque niveau de chargement. Au regard de la figure FIG. 3.65, il apparaît clairement que la chute de rigidité ne dépend pas de l'histoire du chargement dans la mesure où le réseau des courbes représentant l'évolution de la rigidité en fonction de la densité de fissures peut se réduire à une courbe unique pour chacune des stratifications. Dans le cas des stratifications $(0_3^{\circ}/+45_3^{\circ}/-45_3^{\circ})_s$ et $(0_3^{\circ}/+55_3^{\circ}/-55_3^{\circ})_s$ ne peut se faire que pour de faibles densité de fissures dans la mesure où la rupture sous l'effet d'un chargement quasi-statique se produit pour de faibles densité de fissures.

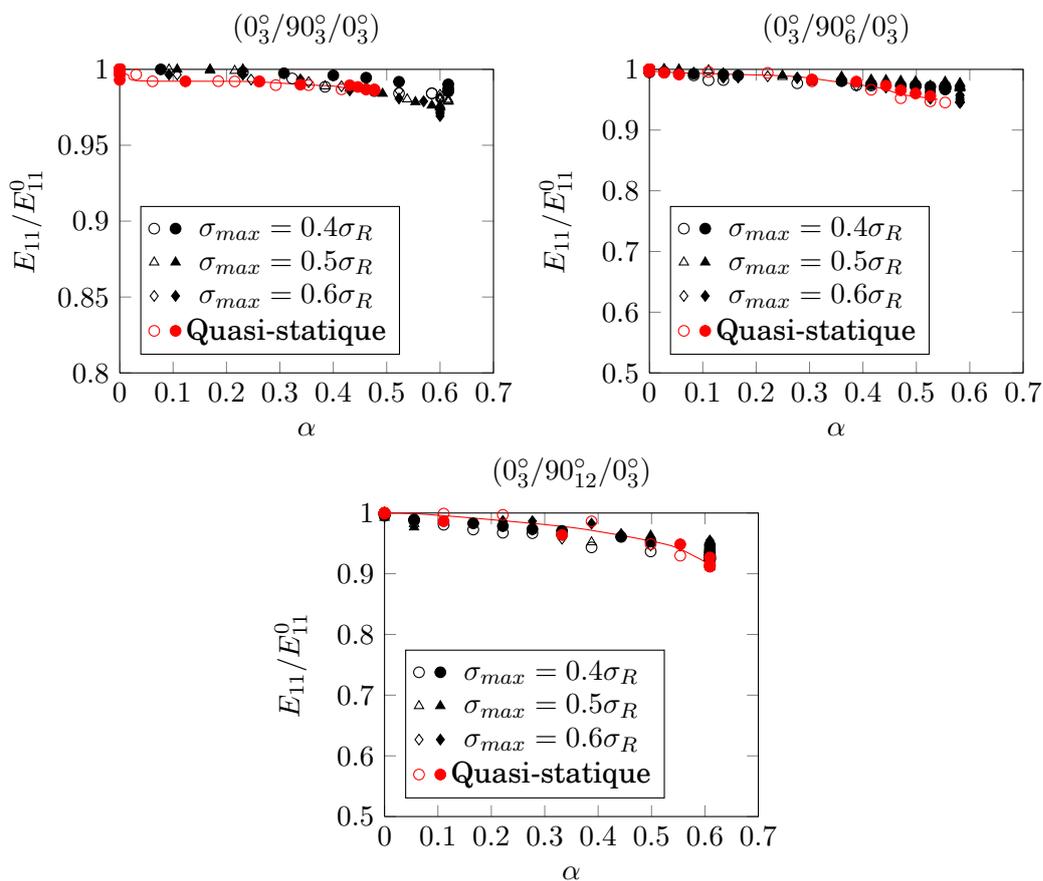


FIGURE 3.65 - *Évolution de la rigidité résiduelle du stratifié en fonction de la densité de fissures pour les séquences $(0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ})$, $(0_3^{\circ}/90_6^{\circ}/0_3^{\circ})$ et $(0_3^{\circ}/90_{12}^{\circ}/0_3^{\circ})$ avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, pour les trois niveaux de contraintes $\sigma_{max} = 0.4\sigma_R, 0.5\sigma_R, 0.6\sigma_R$ et comparaison avec le cas quasi-statique*

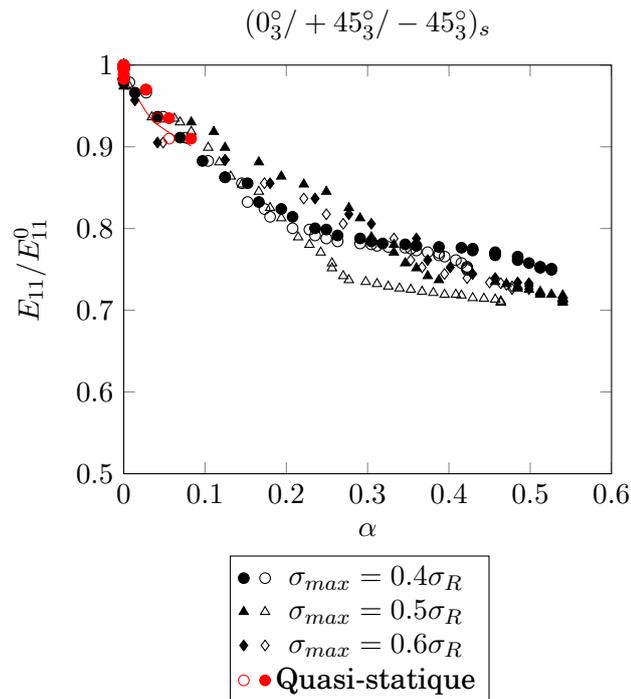


FIGURE 3.66 - Évolution de la chute de rigidité longitudinale en fonction de la densité de fissures pour la séquence $(0_3^\circ / +45_3^\circ / -45_3^\circ)_s$ avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, pour les trois niveaux de contraintes $\sigma_{max} = 0.4\sigma_R, 0.5\sigma_R, 0.6\sigma_R$ et comparaison avec le cas quasi-statique

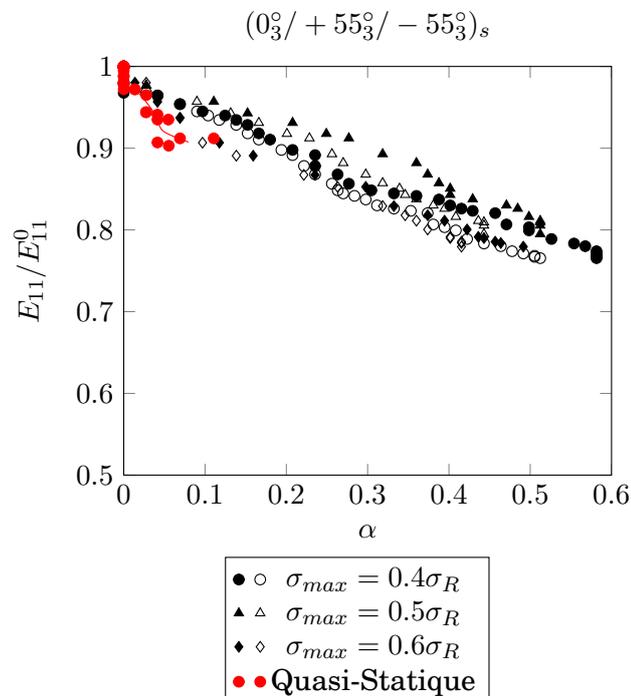


FIGURE 3.67 - Évolution de la chute de rigidité longitudinale en fonction de la densité de fissures pour la séquence $(0_3^\circ / +55_3^\circ / -55_3^\circ)_s$ avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$, pour les trois niveaux de contraintes $\sigma_{max} = 0.4\sigma_R, 0.5\sigma_R, 0.6\sigma_R$ et comparaison avec le cas quasi-statique

3.8.4 Essais à deux niveaux de chargement

Nous proposons de terminer l'étude de la fissuration par une analyse de l'évolution de l'endommagement au cours d'essais à plusieurs niveaux de chargement, l'objectif étant de déterminer de quelle manière se fait le cumul de l'endommagement. Nous avons montré que les niveaux de chargement influent sur la cinétique de fissuration. Pour illustrer cela on trace le réseau de courbes densité de fissures en fonction de N/N_f^s , N et N_f^s désignant respectivement le nombre de cycles et le nombre de cycles pour atteindre la saturation (FIG. 3.68). Il apparaît clairement sur cette figure que le réseau ne se réduit pas à une courbe unique, la relation entre le nombre de cycles et la densité de fissures n'est donc pas biunivoque, ce qui témoigne d'un cumul non-linéaire de l'endommagement.

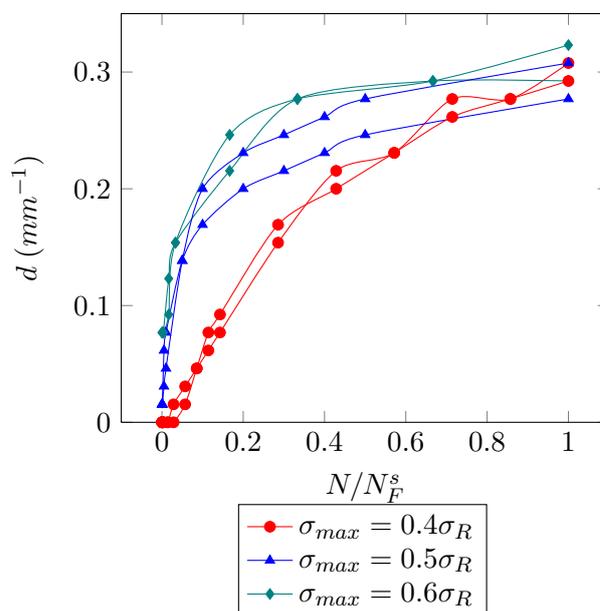


FIGURE 3.68 - Réseau de courbes densité de fissures en fonction de N/N_f^s pour la séquence $(0_3^0/90_6^0/0_3^0)$

Les essais de cumul de l'endommagement sont réalisés sur des éprouvettes de type *cross-ply* $(0_3^0/90_6^0/0_3^0)$ sollicitées avec deux niveaux de contrainte maximale longitudinale σ_{11MAX} . De la même façon que pour les essais déjà présentés jusque là, on suit en cours d'essai l'évolution de la fissuration par une méthode optique et le suivi de la rigidité longitudinale macroscopique en fonction du nombre de cycles se fait par extensométrie.

Pour les deux niveaux choisis nous avons effectué des essais avec le chargement faible suivi du chargement fort puis des essais avec le chargement fort suivi du chargement faible (FIG. 3.69). On note \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 les deux niveaux de chargement appliqués successivement pendant \mathcal{N}_1 et \mathcal{N}_2 cycles et on désigne par D_1^0 et D_2^0 les endommagements atteints si \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 étaient appliqués -de manière quasi-statique.

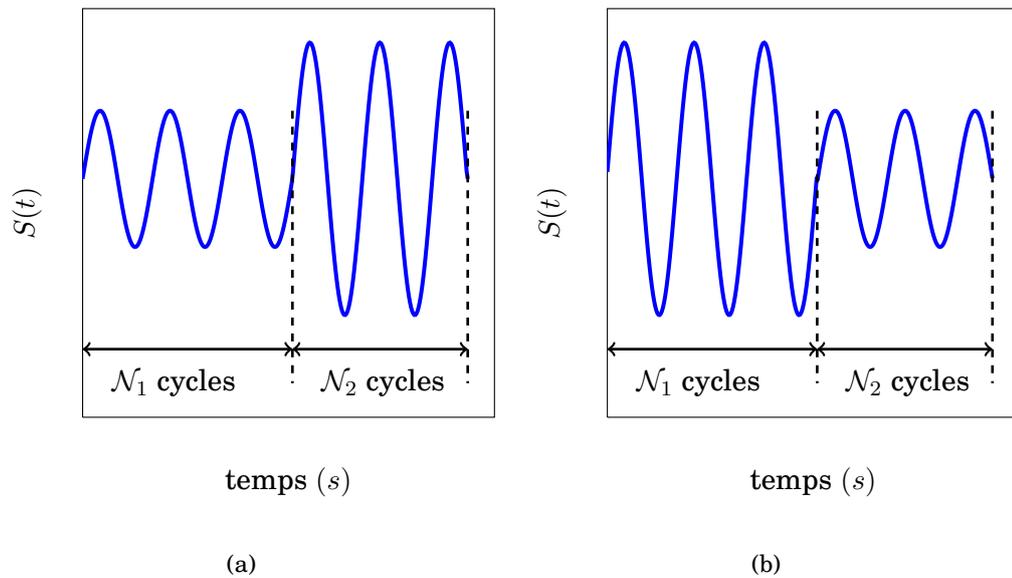


FIGURE 3.69 - *Forme de la sollicitation appliquée lors d'un essai de traction-cyclique à deux niveaux : (a) chargement faible - chargement fort , (b) chargement fort - chargement faible*

Les niveaux de chargements ont été choisis de manière à tester les trois cas possibles :

- cas 1 : chargement faible C_1 suivi du chargement fort C_2 de manière à ce que le niveau d'endommagement D_1 atteint à la fin de C_1 soit inférieur à D_2^0 celui de la mise en charge statique de C_2 . Au changement de niveau, il y a donc, d'abord un accroissement de l'endommagement de D_1 à D_2^0 dû au rechargement statique puis un endommagement de fatigue lors des cyclages à C_2 (FIG. 3.74a).
- cas 2 : chargement faible C_1 suivi du chargement fort C_2 de manière ce que le niveau d'endommagement D_1 atteint à la fin de C_1 soit supérieur à D_2^0 celui de la mise en charge statique de C_2 . Au changement de palier, il y a donc directement un endommagement de fatigue lors des cyclages à C_2 (FIG. 3.74b).
- cas 3 : chargement fort C_1 suivi du chargement faible C_2 . Au changement de palier l'endommagement est alors immédiatement dû au phénomène de fatigue lors des cyclages à C_2 (FIG. 3.74c).

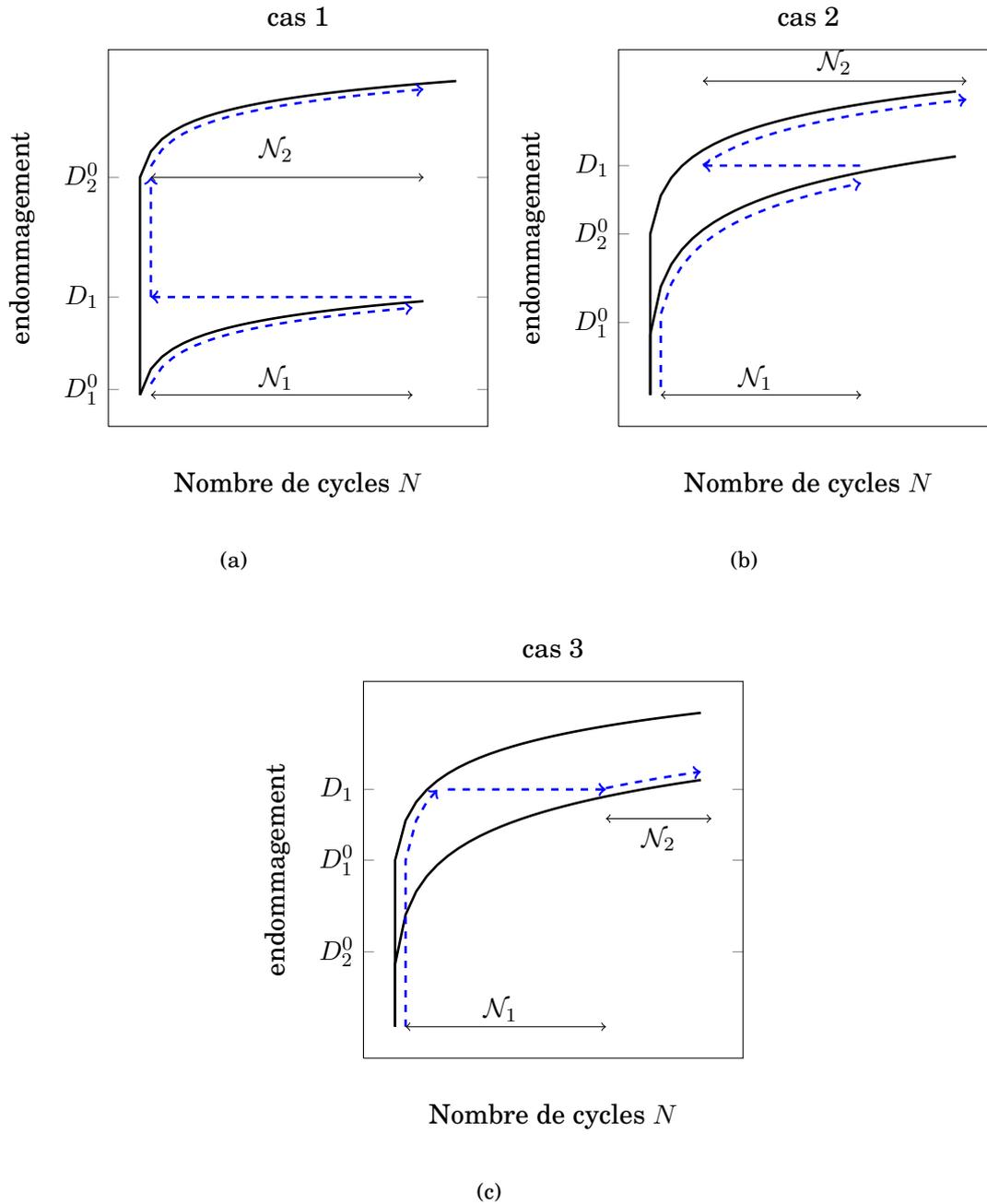


FIGURE 3.70 - Schématisation d'un essai de fatigue à deux niveaux : niveau faible puis niveau fort avec accroissement de l'endommagement dû au rechargement statique

Sur la base des essais précédents effectués à un seul niveau de chargement, nous pouvons définir les niveaux de contraintes et les nombres de cycles \mathcal{N}_1 à utiliser pour pouvoir tester les trois cas que nous venons d'évoquer. Les conditions de ces essais sont présentées dans le tableau TAB. 3.14. Tous les essais sont effectués avec un rapport de charge $R = 0.1$ à une fréquence de 1 Hz. Le nombre de cycles \mathcal{N}_2 n'est pas défini à l'avance mais il est conditionné par l'atteinte de l'état de saturation.

Paramètres	cas 1	cas 2	cas 3
$\sigma_{\mathcal{N}_1}^{MAX}$	$0.4\sigma_R$	$0.4\sigma_R$	$0.6\sigma_R$
$\sigma_{\mathcal{N}_2}^{MAX}$	$0.6\sigma_R$	$0.6\sigma_R$	$0.4\sigma_R$
\mathcal{N}_1	1000	10000	500
\mathcal{N}_1	3000	20000	1000
\mathcal{N}_1	5000	30000	2000

TABLE 3.14 - Récapitulatif des essais de traction cyclique à deux niveaux de chargement

Cas 1 : Chargement faible suivi d'un chargement fort avec accroissement quasi-statique de l'endommagement.

La figure (FIG. 3.72) illustre l'évolution de l'endommagement lors d'essais réalisés dans les conditions correspondant au cas 1 pour trois valeurs de \mathcal{N}_1 10000, 20000 et 30000 cycles. Dans les trois cas le cyclage \mathcal{C}_1 n'a pas endommagé le stratifié, ou à un faible niveau d'endommagement, loin du niveau d'endommagement qui aurait été créé par une montée en charge quasi-statique du même niveau que le chargement \mathcal{C}_2 . En revanche, dès le premier cycle du chargement \mathcal{C}_2 on constate une brusque augmentation de l'endommagement. Notons que la densité de fissures atteinte lors de ce premier cycle est comparable à celle atteinte lors du premier cycle d'un essai à un seul niveau de chargement (FIG. 3.72a). Cette remarque nous permet d'affirmer que l'endommagement créé lors de ce premier cycle est la conséquence de la montée en charge quasi-statique. En revanche les fissures créées dans les cycles suivant sont dues au phénomène de fatigue. Les courbes donnant l'évolution de la rigidité résiduelle (FIG. 3.72b) laisse apparaître une brusque variation lors du premier cycle du chargement \mathcal{C}_2 .

Paramètres	Essai 1	Essai 2	Essai 3
$\sigma_{\mathcal{N}_1}^{MAX} = 0.4\sigma_R$ (MPa)	386	386	386
$\sigma_{\mathcal{N}_2}^{MAX} = 0.6\sigma_R$ (MPa)	579	579	579
\mathcal{N}_1	1000	3000	5000
\mathcal{N}_2	3000	2000	1000

TABLE 3.15 - Récapitulatif des essais de traction cyclique à deux niveaux de chargement correspondants aux cas 1

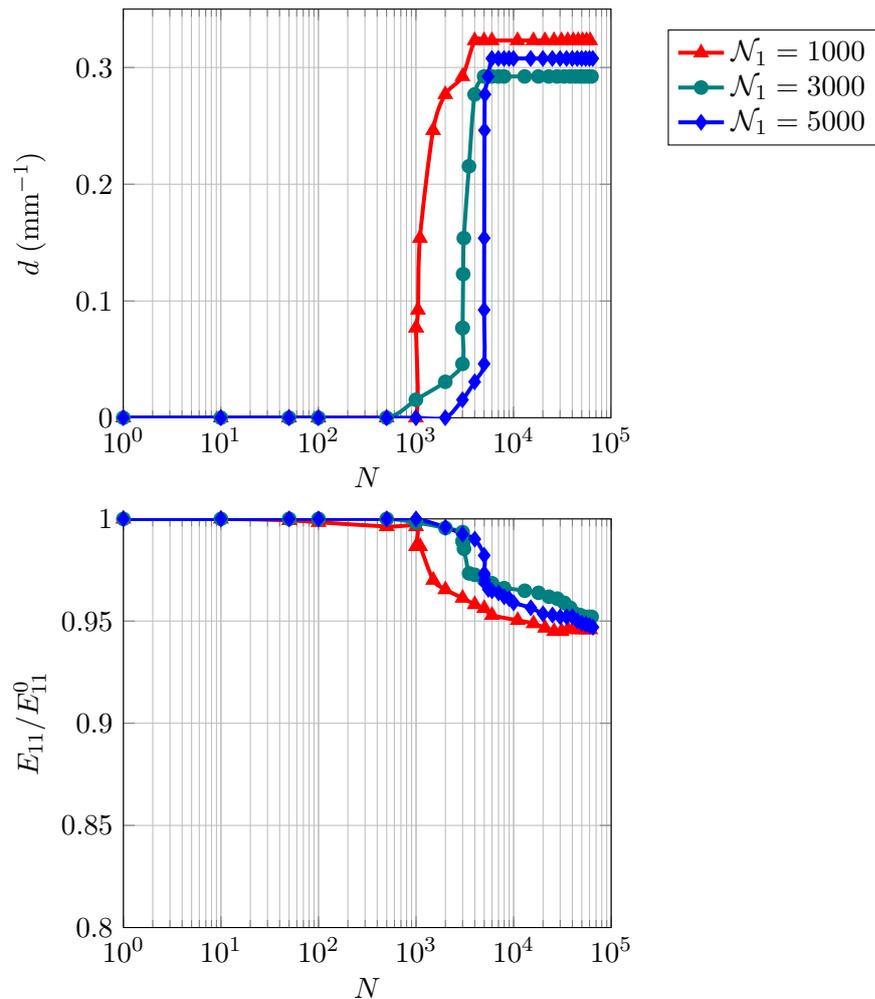


FIGURE 3.71 - Cas 1 : Évolution de la densité de fissures dans la couche à 90° en fonction du nombre de cycles pour la séquence $(0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ)$ avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$ soumise à 2 niveaux de chargements (chargement faible suivi d'un chargement fort avec accroissement quasi-statique de l'endommagement)

Cas 2 : Chargement faible suivi d'un chargement fort sans accroissement quasi-statique de l'endommagement.

Ce cas est comparable au cas 1 à la différence près que le niveau d'endommagement atteint à l'issue du cyclage \mathcal{C}_1 est supérieur au niveau d'endommagement qui serait créé par une montée en charge au niveau \mathcal{C}_2 et qui par conséquent empêche un accroissement quasi-statique de l'endommagement au changement de palier. Ainsi, même si la vitesse de fissuration s'accroît lors du passage au chargement fort, le changement n'est pas aussi brutal que celui observé dans le cas précédent.

Paramètres	Essai 1	Essai 2	Essai 3
$\sigma_{\mathcal{N}_1}^{MAX} = 0.4\sigma_R$ (MPa)	386	386	386
$\sigma_{\mathcal{N}_2}^{MAX} = 0.6\sigma_R$ (MPa)	579	579	579
\mathcal{N}_1	10000	20000	30000
\mathcal{N}_2	2500	2000	500

TABLE 3.16 - Récapitulatif des essais de traction cyclique à deux niveaux de chargement correspondants aux cas 2

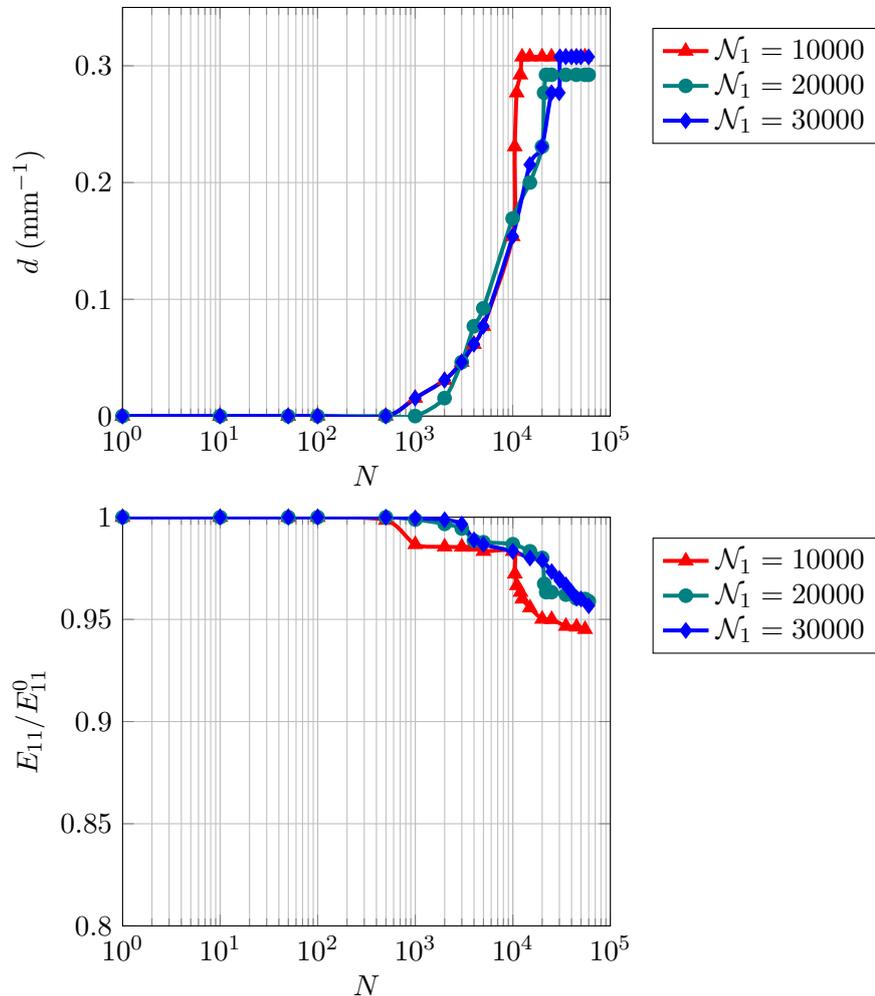


FIGURE 3.72 - Cas 2 : Évolution de la densité de fissures dans la couche à 90° en fonction du nombre de cycles pour la séquence $(0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ)$ avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$ soumise à 2 niveaux de chargements (chargement faible suivi d'un chargement fort)

Cas 3 : Chargement fort suivi d'un chargement faible (FIG. 3.73).

Bien évidemment dans ce cas il est impossible il n'y a pas d'accroissement quasi-statique de l'endommagement au passage du chargement C_1 au chargement C_2 . En revanche l'endommagement créé lors du premier cycle est une endommagement quasi-statique.

Paramètres	Essai 1	Essai 2	Essai 3
$\sigma_{N_1}^{MAX} = 0.6\sigma_R$ (MPa)	386	386	386
$\sigma_{N_2}^{MAX} = 0.4\sigma_R$ (MPa)	579	579	579
N_1	500	1000	2000
N_2	11000	4000	2000

TABLE 3.17 - Récapitulatif des essais de traction cyclique à deux niveaux de chargement correspondants aux cas 3

3.8.5 Cumul de l'endommagement

Nous venons d'étudier les courbes donnant l'évolution de la densité de fissures en fonction du nombre de cycles pour des essais à plusieurs niveaux de chargement (chargement faible puis chargement fort et chargement fort puis chargement faible). Ces essais mettent en évidence l'influence de la chronologie des évènements sur l'évolution de l'endommagement. Dans chacun des cas nous avons fixé plusieurs valeurs du nombre de cycles N du premier niveau puis le nombre de cycles du second niveau N_2 est conditionné par l'atteinte de l'état de saturation. Une manière d'illustrer le cumul de l'endommagement consiste à tracer les courbes N_f/N_f^s en fonction de N_F/N_F^s . N_f décrivant N_1 lorsque le chargement faible est appliqué en premier et N_F décrivant N_1 lorsque le chargement fort est appliqué en premier. N_f^s et N_F^s représentent le nombre de cycles nécessaires pour atteindre la saturation respectivement sous chargement faible et fort.

Il apparait clairement (FIG. 3.74) que le cumul n'est pas linéaire . Toutefois, on constate que la non linéarité est plus importante dans le cas où le chargement fort est appliqué en premier. La connaissance du mode de cumul de l'endommagement est nécessaire dans la mesure où nous souhaitons, dans la suite de cette étude donner une modélisation de l'endommagement. Il est important de comprendre que la façon dont se fait le cumul de l'endommagement impose une formulation de la loi d'évolution de l'endommagement dans où les variables représentatives de l'endommagement et du nombre de cycles N ne sont pas séparables.

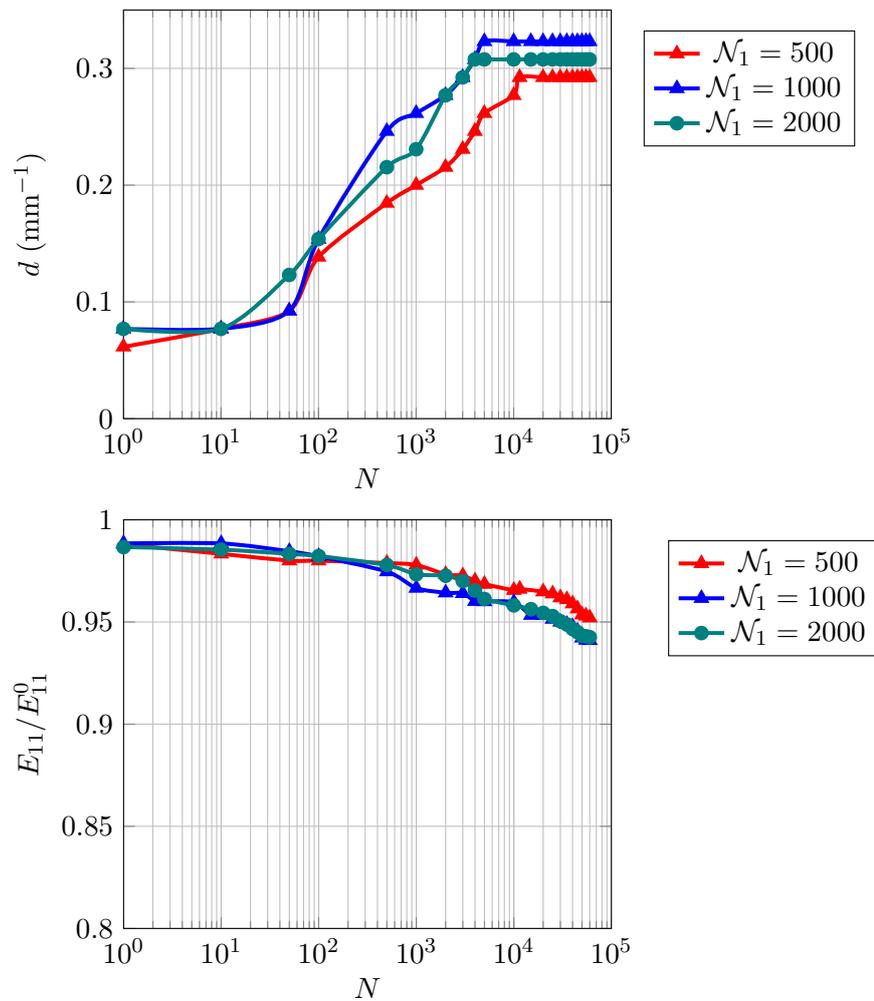


FIGURE 3.73 - Cas 3 : Évolution de la densité de fissures dans la couche à 90° en fonction du nombre de cycles pour la séquence $(0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ)$ avec $R=0.1$, $f=1\text{Hz}$ soumise à 2 niveaux de charge-ments (chargement fort suivi d'un chargement faible)

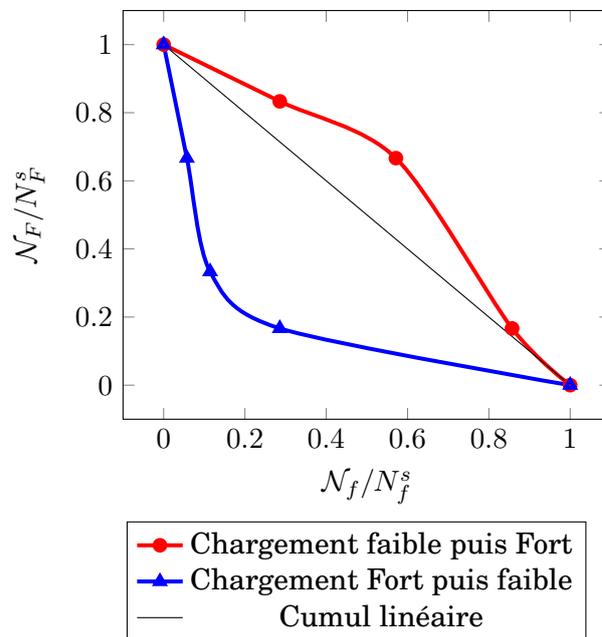


FIGURE 3.74 - *Cumul de l'endommagement lors d'essais de traction cyclique à deux niveaux*

3.9 Conclusion

Les résultats des essais expérimentaux présentés dans ce chapitre ont pour objectif de dégager des renseignements importants relatifs à l'endommagement par fissuration dû aussi bien à des sollicitations quasi-statiques que cycliques. Il est important de garder à l'esprit que ces résultats nous serviront de base pour l'écriture et l'identification d'un modèle d'endommagement. Ils nous ont permis de dégager les principales caractéristiques de la fissuration suivant les deux aspects qualitatif puis quantitatif.

Le premier point important dégagé de ces essais concerne la similitude que l'on peut observer entre l'endommagement créé par un chargement quasi-statique et celui créé par un chargement de fatigue.

D'abord, d'un point de vue géométrique, les fissures sont identiques dans les deux cas et se présentent sous la forme d'un réseau quasi-périodique de fissures qui se propagent dans la direction des fibres qui leur servent de guide. La principale différence réside dans la propagation. En effet, si dans le cas d'un chargement quasi-statique il est clair que les fissures apparaissent et se propagent quasi-instantanément dans l'épaisseur et la largeur de l'éprouvette la propagation semble plus lente dans le cas de la fatigue. Ces observations nous ont conduit à nous intéresser à la multiplication des fissures plus qu'à leur propagation.

Concernant, l'évolution de l'endommagement, dans notre cas nous avons considéré l'évolution de la densité de fissures, là encore on constate de forte similitude dans le comportement. La différence résidant dans le fait que l'évolution de la densité de fissures est pilotée par l'augmentation de la contrainte (ou déformation) appliquée dans le cas d'un chargement quasi-statique alors qu'elle est pilotée par l'accumulation du nombre de cycles de sollicitations à contrainte (ou déformation) constante en fatigue.

Les essais nous permettent également d'identifier les paramètres qui ont une influence sur l'évolution de la fissuration. D'abord il est clair que l'orientation des plis par rapport à la direction de chargement à une influence sur la cinétique de fissuration. Ensuite nous avons montré que la densité de fissure est inversement proportionnelle à l'épaisseur du pli fissuré. La principale conséquence de cette propriété est que la densité de fissures n'est pas une propriété intrinsèque au matériau mais qu'elle dépend de la géométrie de la structure. Cette observation nous a conduit à introduire une autre variable α qui est le produit de la densité de fissures par l'épaisseur du pli fissuré et nous avons montré que cette variable permet de s'affranchir des effets d'épaisseur. Enfin, dans le cas de chargement de fatigue, le niveau de contrainte maximal influence la cinétique de fissuration.

L'autre propriété importante mise en évidence est le phénomène de saturation de la densité de fissures c'est-à-dire que la densité de fissures croît de façon monotone jusqu'à atteindre une valeur critique à partir de laquelle plus aucune fissure ne peut être créée. Nous avons montré que cette valeur est une propriété qui dépend de la structure et du matériau mais qui est totalement indépendante du type de chargement.

3. Etude expérimentale de l'endommagement dans les stratifiés

En suivant l'évolution de la rigidité du stratifié parallèlement à celle de l'endommagement nous avons pu déterminer l'influence de la fissuration sur les propriétés mécaniques des différents stratifiés testés. On montre que la chute de rigidité est proportionnelle à l'épaisseur du pli fissuré. Ensuite la comparaison des chutes de rigidité dues à un endommagement quasi-statique aux chutes de rigidité dues à un endommagement de fatigue, montre que pour une densité de fissures donnée et une stratification donnée, la chute de rigidité ne dépend pas de l'histoire du chargement. En d'autres termes, pour une stratification donnée, la chute de rigidité dépend de la densité de fissure et non de la façon dont ont été créées les fissures.

Les tableaux TAB. 3.18 TAB. 3.19 présentent une synthèse des caractéristiques principales de l'endommagement qui ont été identifiés par les essais présentés précédemment.

séquence	ep_{90° (mm)	$d_{sat}^{statique}$ (mm^{-1})	$d_{sat}^{fatigue}$ (mm^{-1})	$1 - E_{11}^{sat}/E_{11}^0$ (%)
$(0_3^\circ/90_3^\circ/0_3^\circ)$	0.9	0.477	0.6	2.12
$(0_3^\circ/90_6^\circ/0_3^\circ)$	1.8	0.300	0.307	3.84
$(0_3^\circ/90_{12}^\circ/0_3^\circ)$	3.6	0.169	0.169	8.01

TABLE 3.18 - Synthèse des données caractéristiques obtenues par les essais sous sollicitations cycliques sur les séquences $(0_3^\circ/90_{n=3,6,12}^\circ/0_3^\circ)$ avec ep_{90° l'épaisseur de la couche fissurée, $d_{sat}^{statique}$ et $d_{sat}^{fatigue}$ les densités de fissures à saturation et E_{11}^{sat}/R_{11}^0 la chute de rigidité à saturation

séquence	d_{sat}^{int} (mm^{-1})	d_{sat}^{ext} (mm^{-1})	$1 - E_{11}^{sat}/E_{11}^0$ (%)
$(0_3^\circ/+45_3^\circ/-45_3^\circ)_s$	0.289	0.505	27.1
$(0_3^\circ/+55_3^\circ/-55_3^\circ)_s$	0.297	0.525	22.0

TABLE 3.19 - Synthèse des données caractéristiques obtenues par les essais sous sollicitations cycliques sur les séquences $(0_3^\circ/+45_3^\circ/-45_3^\circ)_s$ et $(0_3^\circ/+55_3^\circ/-55_3^\circ)_s$ avec $d_{sat}^{statique}$ et $d_{sat}^{fatigue}$ les densités de fissures à saturation et E_{11}^{sat}/R_{11}^0 la chute de rigidité à saturation

Nous avons vu que la fissuration, bien qu'elle ne soit pas catastrophique pour l'intégrité d'une structure peut être à l'origine d'autres types d'endommagement beaucoup plus néfastes tels que le délaminage ou les ruptures de fibres. Il est donc important de prévoir son évolution. Dans la mesure où la fissuration ne conduit pas à la rupture, nous considérerons que la durée de vie correspond au nombre de cycles nécessaires pour atteindre la saturation. On propose donc de construire des courbes que nous pouvons comparer à des courbes S-N qui représentent le nombre de cycles nécessaires pour atteindre l'état de saturation en fonction du niveau de contrainte

maximal (FIG. 3.75). Cependant, il est important de souligner que la réalisation de ce type de courbe nécessite en grand nombre d'essais afin de disposer d'un nombre significatif de points permettant de construire les courbes. Aussi, ces courbes ne sont données qu'à titre d'information.

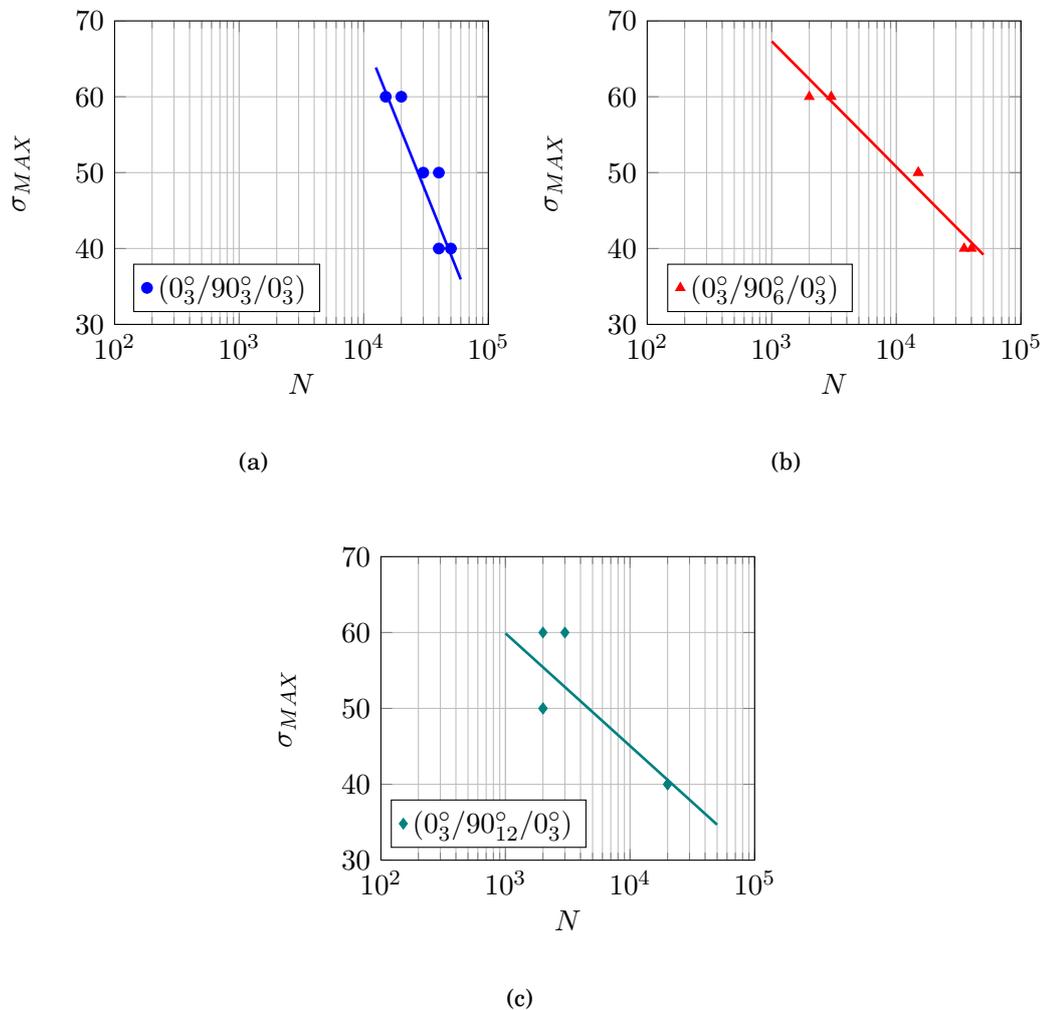


FIGURE 3.75 - Courbes S-N représentant le nombre de cycles à saturation en fonction de σ_{MAX} (exprimée en pourcentage de la contrainte à rupture) appliquée pour les séquences $(0_3^\circ/90_{n=3,6,12}^\circ/0_3^\circ)$

L'ensemble des résultats présenté dans ce chapitre vont servir de base à l'écriture d'un modèle d'endommagement et à son identification qui sont développés dans les chapitre qui suivent.

