



# La fatigue des composites: synthèse thématique

Vincent Manet

## ► To cite this version:

Vincent Manet. La fatigue des composites: synthèse thématique. [Rapport Technique] Ecole des Mines de Saint-Etienne. 1999. [hal-01342269](https://hal.science/hal-01342269)

**HAL Id: hal-01342269**

**<https://hal.science/hal-01342269v1>**

Submitted on 5 Jul 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Ce document synthétise, de façon thématique, la bibliographie portant à l'origine sur la fatigue des composites et qui s'est étendue aussi à l'endommagement, aux renforts 3D, aux méthodes expérimentales et de production...

Dans chaque section, les références sont classées dans l'ordre chronologique des années de publication puis, pour une même année, par ordre alphabétique du nom du premier auteur. La bibliographie, quant à elle, est classée par ordre alphabétique.

Dans un premier temps, un résumé thématique est proposé. Les conclusions sont reportées à la section 7.

## Table des matières

<b>1 Généralités</b>	<b>2</b>
<b>2 Vieillissement - tests accélérés</b>	<b>3</b>
<b>3 Modélisation et simulation numérique</b>	<b>4</b>
<b>4 Sollicitations</b>	<b>5</b>
4.1 Flexion « pure » . . . . .	5
4.2 Cisaillement . . . . .	5
4.3 Traction hors-axes . . . . .	5
4.4 Spectres . . . . .	6
<b>5 Autres effets</b>	<b>6</b>
5.1 Fréquence et température . . . . .	6
5.2 Humidité . . . . .	7
5.3 Ensimage, interphase, interface . . . . .	7
5.4 Effets de taille et d'échelle . . . . .	8
5.5 Autres aspects . . . . .	8
<b>6 Endommagement</b>	<b>9</b>
<b>7 Conclusions</b>	<b>9</b>
<b>Références</b>	<b>11</b>
<b>8 Article de référence de Liao et al. [73]</b>	<b>19</b>
8.1 Effet des fluides sur les propriétés matérielles . . . . .	19
8.2 Fluage et relaxation de contrainte pour les FRP . . . . .	19
8.3 Fatigue et fatigue environnementale . . . . .	21
8.4 Composites hybrides . . . . .	22
8.5 Remarques . . . . .	23
<b>9 Article de référence de Daniel [26]</b>	<b>23</b>
9.1 Comportement des composites à matrice fragile . . . . .	23
9.2 Comportement en fatigue des laminés . . . . .	23
9.3 Tests accélérés . . . . .	23
<b>10 Références supplémentaires</b>	<b>24</b>

# 1 Généralités

*Références :* [96, 73, 26]

Un résumé des articles [73, 26] est fait après les références bibliographiques, aux sections 8 et suivante, *i.e.* à partir de la page 19.

L'article de Liao et al. [73] comporte 38 pages et 402 références bibliographiques. C'est une revue bibliographique très complète sur la durabilité des composites. Cet article traite les points suivants :

- Effets des fluides sur les propriétés mécaniques :
  1. Processus de sorption ;
  2. Endommagement du à un fluides des FRP ;
  3. Effets des fluides sur la résistance, le module et la résistance à la rupture des FRP
- Fluage et relaxation des contraintes dans les FRP :
  1. Modèle en loi puissance de Findley ;
  2. Modèle de Boltzman-Volterra ;
  3. Modèle de Schapery ;
  4. Autres modèles de fluage ;
  5. Modèles de fluage pour les laminés ;
  6. Fluage des GFRP et CFRP ;
  7. Effet de l'humidité et de la température sur le fluage des FRP ;
  8. Effet du vieillissement physique sur le fluage ;
  9. Effet des UV sur le fluage
  10. Fluage des structures en FRP ;
  11. Méthodes de tests accélérés utilisant la superposition temps-température-contrainte ;
  12. Contrainte à rupture et Contrainte de corrosion des FRP ;
  13. Contrainte de corrosion des fibres ;
  14. Contrainte de corrosion de la matrice ;
  15. Contrainte de corrosion de la région d'interphase fibre/matrice ;
  16. Contrainte de corrosion des FRP ;
  17. Modèles prédictifs pour la contrainte à rupture des FRP
- Fatigue et fatigue environnementale :
  1. Mécanismes d'endommagement ;
  2. Effets des constituants (fibre, matrice, interphase) ;
  3. Comportement entaillé ;
  4. Courbes S-N et limite de fatigue ;
  5. Effets de la fréquence sur les tests de fatigue ;
  6. Fatigue des structures FRP ;
  7. Fatigue environnementale des FRP ;
  8. Méthodes de prédiction de la durée de vie
- Altération des FRP
- Durabilité des bétons FRP et des assemblages FRP/acier
- Composites hybrides
- Résumé et remarques.

Des conclusions de cet article, nous retiendrons les points suivants :

- La dégradation des GFRP à haute température n'est pas bien compris.
- Bien que la conception orientée par la rigidité pour les GFRP soit peu concernée par la contrainte de rupture, le fluage est un aspect fondamental de leur conception.
- Les effets de synergie entre le fluage et les autres types de chargement est un domaine à explorer.
- Peu de données de fatigue sont disponibles pour le domaine  $10^7 - 10^8$  cycles.
- Les composites hybrides doivent être étudiés.
- L'effet d'échelle sur les performance n'est pas clair. En particulier, il n'est toujours pas sûr qu'un tel effet existe.

L'article de Daniel [26] comporte 19 pages et 29 références bibliographiques. Le sommaire en est le suivant :

- Introduction :
  1. Théorie et expérimentation ;
  2. Utilisation des matériaux ;
  3. Matériaux composites
- Comportement des composites à matrice fragile :
  1. Observations expérimentales (macros et micros) ;
  2. Investigation ultrasonique ;
  3. Étude de l'émission acoustique ;
  4. Modélisation analytique
- Comportement des laminés cross-ply sous chargement monotone
- Comportement en fatigue des laminés cross-ply :
  1. Développement de l'endommagement ;
  2. Perte de rigidité ;
  3. Prédiction de la durée de vie ;
  4. Modélisation de l'endommagement et de la prédiction de durée de vie ;
  5. Tests accélérés

L'article de Reifsnider et al. [96] tente de répondre aux deux questions suivantes :

1. Comment l'endommagement réduit-il la résistance d'un laminé lors d'un essai de fatigue à long terme ?
2. Comment, lors de ces essais, l'endommagement se combine-t-il pour causer la rupture qui définit la vie d'un laminé ?

## 2 Vieillessement - tests accélérés

*Références :* [22, 19, 131, 134, 87, 91, 90, 124, 130, 21, 49, 80]

Tous les auteurs considèrent l'équivalence temps-température comme valide. De toutes façons, si ce n'était pas le cas, on se retrouverait dans une impasse.

De plus, Han et McKenna [49] mettent en évidence une correspondance entre humidité et température en montrant que l'historique de l'humidité a le même impact sur le comportement que celui de la température. De là, on peut tirer une **équivalence temps-température-humidité**.

La modélisation du comportement en fluage se fait généralement en utilisant le modèle linéaire de Struik [134, 87] ou non-linéaire de Schapery [87]. Wang et al. [134] étudient deux résines particulières, alors que Pasricha et al. [87] développent un modèle de fluage avec vieillissement pour les matériaux isotropes sous chargement uniaxial. L'extension aux composites n'est que mentionnée. Perreux et Surri [91] superposent un modèle de comportement mécanique à un modèle d'absorption pour l'étude de tubes en composites. Ils mentionnent que **le comportement à long terme des matrices époxydiques n'est envisageable qu'à des températures inférieures à 60°C, i.e. loin de la température de transition**. Cette remarque est appliquée par Vauthier et al. [131, 130]. À la fin de l'article [90], Perreux et Joseph mentionnent la possibilité d'utiliser le modèle qu'ils proposent pour faire des tests accélérés sur le comportement au fluage.

Tsotsis et Lee [124] notent que le comportement à long terme des composites soumis à des températures élevées est contrôlé par les dégradations d'oxydation et thermique. Dans [124], deux résines particulières sont étudiées. Colin et al. [21] mettent en avant la complémentarité de la mesure « globale » qu'est la perte de poids avec les observations locales. Miranda Guedes [80] commence une étude sur le comportement en fluage à différentes températures et fréquences d'excitation avant de se rendre compte que son éprouvette (flexion rapprochée) est essentiellement soumise à du cisaillement et que son comportement est essentiellement celui de la matrice en cisaillement.

Concernant le conditionnement d'éprouvettes en humidité, Collings et Copley [22] et Ciriscioli et al. [19] exposent deux méthodes (très proches) pour obtenir une humidité donnée en un temps le plus court possible. Ils utilisent un modèle fickien de diffusion. Ce même modèle est utilisé par Vauthier et al. [131, 130] qui étudient le rôle du conditionnement en humidité sur la tenue en fatigue. Ils notent toutefois que **le vieillissement hygrothermique peut changer les micromécanismes d'endommagement, surtout pour les fibres de verre, très sensibles à l'humidité**.

### 3 Modélisation et simulation numérique

*Références :* [7, 60, 59, 63, 93, 94, 141, 84, 34, 114, 121, 132, 8, 106, 25, 30, 52, 66, 83, 97, 99, 122]

Du point de vue de la modélisation numérique, la démarche est essentiellement la même pour tout le monde, même si les modèles deviennent de plus en plus complexes (non-linéarités matérielles et géométriques et éléments de contact [66, 83]).

Il s'agit de modèles mésoscopiques (niveau du pli), dans lesquels l'ensemble de la structure (chacun des plis (homogènes) et chaque interface) est modélisé. Le chargement est appliqué et les valeurs des déformations et/ou des contraintes sont utilisées pour savoir si un élément doit être dégradé ou non, et si une interface est rompue ou non.

Les lois d'endommagement choisies nécessitent généralement un certain nombre de tests afin de déterminer les valeurs de certains paramètres.

La durée de vie est obtenue soit par l'intermédiaire de courbes de Wölher [106], ou de courbes S-N [84], soit en poursuivant le calcul jusqu'à ce que le critère de rupture choisi soit atteint (Tsai-Hill [84], contrainte max [141], déformation max [34], Tsai-Wu et déformation max [83], Tsai-Wu et autres [97], taux de restitution d'énergie [52]).

Un maillage probabiliste peut être superposé au maillage EF [93, 132], ou des loi de répartition probabiliste pour les résistances introduites [141, 30] (loi de Weibull).

Notons l'approche plus « macroscopique » de Desrumaux et al. [30], qui, à partir de la contrainte macroscopique remontent aux contraintes dans les plis et dans la matrice (modèle de Mori et Tanaka) ainsi qu'aux contraintes aux interfaces (travaux de Mori et Chou). Il s'en suit qu'un modèle EF plus simple peut être utilisé : un simple élément de coque homogénéisé suffirait.

Tous les modes de ruptures ne sont pas toujours pris en compte, ni tous les modes de rupture. Une hypothèse fréquente est que **les caractéristiques géométriques des défauts sont les mêmes en quasi-statique et en fatigue**, ce qui permet d'étendre les modèles quasi-statiques au cas de la fatigue [121, 122, 83]. Sedrakian et al. [106] utilisent le modèle d'endommagement de Ladevèze (exprimé en contraintes) mais ré-exprimé en déplacements (travaux de Lihnone). Ce modèle prend en compte la rupture des fibres, les fissurations transverse de la matrice et la rupture fibre/matrice.

Rodríguez [97] expose un calcul de structure à l'aide d'éléments 2D et 3D. Toutes sortes de non-linéarités sont introduites (contact et contact « glue » de MARC, non-linéarités géométriques et matérielles, conditions de passage entre maillage 2D et 3D...). Le chargement correspond à l'action du vent, modélisé par un spectre de puissance de von Karman et une distribution à long terme de Weibull (1 an). Il utilise aussi le rainflow counting (généralement utilisé sur les matériaux isotropes et les métaux en particulier [114]). Toutefois, même si le modèle est extrêmement complexe, la rupture de la structure est déterminée à l'aide du critère de Tsai-Wu plus d'autres critères propres aux contraintes interlaminaire et de cisaillement.

Les approches plus purement statistiques [59, 94] mettent plutôt l'accent sur la possibilité de calculer la contrainte à rupture ou la probabilité de défaillance d'une structure. Il est toutefois nécessaire d'introduire les bonnes lois de répartitions des fissures, et de trouver un critère de rupture correct (ce qui n'est pas discuté).

Beheshty et Harris [8] s'intéressent à l'influence sur la tenue en fatigue d'un impact de faible vitesse et Johansen et Liholt [60] aux performances en terme de fluage, avec interprétation des courbes de fluage. D'un point de vue plus micromécanique, Battley [7] discute de la variation de la rigidité globale calculée lorsque les propriétés des constituants changent, et Krüger et al. [63] s'intéressent à la modélisation de la propagation des fissures.

Notons les travaux de Roy et Xu [99], qui donnent une forme spéciale du potentiel de Gibbs pour les matériaux orthotropes utilisant les **contraintes, température, dommage et humidité comme variables d'état**. Une forme faible est donnée qui peut être résolue par EF.

Enfin, Cuntze [25] propose une démarche générale de calcul baptisée Concept de Mode de Rupture (Failure Mode Concept).

## 4 Sollicitations

*Références :* [86, 95, 123, 35]

Papadopoulos et Panoskaltis [86] et Tipton et Nelson [123] s'intéressent aux matériaux isotropes (et plus particulièrement aux métaux) Ils proposent une revue et une discussion des critères multiaxiaux de fatigue. On retiendra simplement que **même pour les matériaux isotropes, un critère multiaxial de fatigue n'existe pas**. L'article de Qian et Fatemi [95] propose une revue bibliographique concernant la fatigue en mode mixte pour les matériaux isotropes.

Notons l'article de Ferry et al. [35] à paraître bientôt sur le comportement de barres en flexion plus torsion.

### 4.1 Flexion « pure »

*Références :* [103, 1]

Salvia et Vincent [103] s'intéressent à la face en tension d'une éprouvette soumise à de la flexion trois points ondulée (mais pas alternée), avec  $R = 0.1$ , à 25 Hz. Ils développent un modèle macroscopique basé sur l'hypothèse de Dorosh et Poursatip, selon laquelle la perte de rigidité (qui est l'indicateur d'endommagement choisi) est due à l'accroissement d'une zone d'endommagement superficielle parallépipédique sur la face en tension. Ils développent aussi un modèle statistique local basé sur l'hypothèse de Batdorff et Ghaffarian, *i.e.* sur une loi de Weibull associée à une théorie de maillon le plus faible. Les paramètres à déterminer pour les modèles ne sont pas intrinsèques au matériau.

Abeles Couillard et Schwartz [1] font de la fatigue en flexion trois points alternée (même légèrement plus chargée en compression qu'en tension). Il s'en suit que la rupture apparaît évidemment en compression et non plus en tension. Ils travaillent à 3 Hz sous une déformation proche de la déformation statique (90%) et mentionnent que **la limite en fatigue de l'époxyde est de 0.6% en déformation**. Ils présentent un montage original de flexion.

### 4.2 Cisaillement

*Références :* [110, 137, 65, 50, 98]

Sims et Brogdon [110] étudient le comportement en flexion trois points sur appuis rapprochés (cisaillement) et tension hors-axes. Ils utilisent des distributions de probabilité afin de définir des durées de vie pour une probabilité de survie donnée. Notons que cet article date de 1977.

Wisnom et al. [137] proposent une nouvelle géométrie d'éprouvette afin d'obtenir une rupture en tension interlaminaire plus cisaillement. La part de chaque composante peut être modifiée en modifiant la hauteur de l'éprouvette coudée. Les auteurs notent un **effet d'échelle**. Ils proposent une approche statistique de Weibull pour chacune des deux composantes (tension interlaminaire et cisaillement) plus un terme de correction pour tenir compte de leur interaction (critère quadratique simple plutôt que d'avoir recours aux probabilités croisées).

Kussmaul et von Alberti [65] s'intéressent aux modes I, II et I+II. Le comportement à l'initiation de fissures est donné par des courbes G-N, où G est le taux de restitution d'énergie de déformation. Enfin, ils notent **l'importance du mode II (cisaillement) sur le comportement en fatigue**.

Notons enfin que le laboratoire de mécanique de Lille s'intéresse au comportement en fatigue des verre-époxydes sous sollicitation de cisaillement, comme le montrent les thèses de Hassaini [50] et Roudet [98]. On y trouvera notamment une revue des essais adaptés à l'étude du cisaillement et des méthodes et critères numériques.

### 4.3 Traction hors-axes

*Références :* [110, 92, 137, 15]

Philippidis et Vassilopoulos [92] se servent du changement « du » module d'Young comme indicateur, car cela se révèle adapté pour le matériau utilisé. Ils travaillent en traction/compression hors-axes avec  $R = -1$  et à

10 Hz et développent un modèle de prédiction du module d'Young pour une perte de rigidité ou une probabilité de survie données.

Le point de départ de l'étude de Bulsara et al. [15] est que **la résistance, et donc la durabilité à long terme et la tolérance au dommage des composites sont sensibles aux irrégularités microscopiques**. C'est pourquoi ces auteurs s'intéressent aux composites unidirectionnels avec une distribution arbitraire des fibres, distribution qui n'est pas forcément décrite ni par une distribution aléatoire, ni par une distribution périodique. Les chargements étudiés sont la tension transverse aux fibres et les contraintes résiduelles induites par un refroidissement. Après une étude de la taille du volume élémentaire représentatif, ils concluent que le processus d'endommagement est peu sensible à la distribution radiale des fibres dans la section, cela sans doute à cause de la faible différence des modules d'Young entre les fibres et la matrice (coefficient 1.5), car ils étudient les **composites à matrice céramique**. Ce processus est sensible au chargement thermique car les coefficients thermiques sont très différents pour les fibres et la matrice. On peut sans doute avancer qu'il en serait de même pour le chargement mécanique (tension transverse) dans le cas de composites à matrice polymère où les modules d'Young des fibres et de la matrice sont très différents.

## 4.4 Spectres

*Références :* [110, 71, 114, 14, 97, 109]

Sims et Brogdon [110] notent que l'on peut étendre leurs travaux au cas des spectres de chargement par application de la loi de Miner. Une démarche similaire est adoptée dans Lee et al. [71], où le chargement (les fibres sont soumises à un chargement de tension d'amplitude donnée) est idéalisé puis décomposé en un certain nombre de blocs identiques selon une procédure donnée. Partant ensuite d'un modèle de dégradation de rigidité dans lequel ils insèrent certains paramètres aléatoires (lois log-normales), ils arrivent à une loi statistique de la durée de vie.

Bond [14] insiste sur le fait que **les décompositions en blocs similaires d'amplitude constante ou l'application de la loi de Miner ne sont pas acceptables et conduisent à une estimation erronée de la durée de vie**. Toutefois, il développe des modèles en modifiant assez peu la loi de Miner. Cet article est surtout un outil de promotion pour les logiciels Wisper et WisperX (qui contiennent un rainflow counting avec des bornes).

Stephens et al. [114] exposent, pour les aciers, des méthodes pour réduire les spectres d'entrée des efforts : technique de Smith, Watson et Topper et technique de l'étendue de déformation (strain range editing) qui est un rainflow counting avec seuil. Notons que Rodríguez [97] utilise une technique similaire sur les composites.

L'étude de Shyprykevich et al. [109] porte sur des éprouvettes ayant différentes orientations, avec trou ou non, impactées ou non. Elles sont chargées en traction-traction, traction-compression et compression-compression. Les auteurs déterminent le seuil de déformation en dessous duquel il n'y a pas d'accumulation d'endommagement sur des tests à amplitude constante de chargement (ce seuil diminue évidemment lorsque le nombre de cycles augmente) afin de réduire les spectres d'entrée. Sur une illustration, ils suppriment 98.69% du spectre d'entrée.

## 5 Autres effets

### 5.1 Fréquence et température

*Références :* [76, 90, 75, 81, 139, 138]

Le papier de Xiao et Al-Hmouz [139] (iccm12) est un résumé de l'article de Xiao [138]. Dans cet article [138], Xiao s'intéresse aux fréquences pour lesquelles l'élévation de température du matériau est significative. Il présente des courbes d'hystérésis en température ainsi que la construction de **courbes S-N non-isothermes** pour déterminer la durée de vie dans ces conditions.

Au contraire, Mandell et Meier [76] se placent dans le cas de fréquences basses (jusqu'à 1 Hz), pour lesquelles il n'y a pas d'échauffement. Leur étude, très complète, porte sur les effets de la fréquence, de la forme du chargement (signaux carrés, pics...), du rapport de chargement  $R$ , du temps effectif passé au chargement maximum. Les résultats peuvent généralement se classer en deux groupes : l'un pour le cas des charges faibles,

l'autre pour les charges élevées (par rapport à la charge statique). Ils notent une augmentation de la durée de vie avec la fréquence en traction uniaxiale, ce que notent aussi Perreux et Joseph [90] pour des sollicitations simples (traction ou pression interne : ils étudient des tubes). Sans effet d'élévation de température, l'effet sur la fatigue de la fréquence est relié aux interactions entre la fatigue et le fluage. Perreux et Joseph [90] se placent dans l'hypothèse que **l'endommagement est homogène selon l'épaisseur**. Dans ce cas, la variation du tenseur de rigidité est directement lié à celle du module axial, qui sert d'indicateur de l'endommagement. Ils présentent ensuite un modèle de fluage dépendant de la fréquence, dont les paramètres peuvent être déterminés sur des temps courts, ce qui conduit à un nouveau type de test accéléré.

Mahieux et Reifsnider [75] étudient l'effet de la température. Il s'agit de construire une relation entre le module et la température, basée sur une loi de Weibull, en fonctions des températures et modules caractéristiques du matériau. Cette relation est introduite dans un modèle analytique de flexion de Budiansky afin de prédire le temps à rupture en fonction de la température. Miyano [81] valide l'équivalence temps-température. On notera que la courbe donnant le décalage temps-température en fonction de la contrainte à rupture est bien décrite par **deux équations d'Arrhenius** avec des énergies d'activation différentes.

## 5.2 Humidité

*Références :* [129, 18, 135]

Chateauminois [18] fait une synthèse de ses travaux sur l'humidité. Il note que **le gain de masse n'est pas une paramètre d'endommagement correct car le comportement diffère selon la méthode pour atteindre une hygrométrie donnée** : les effets sont plus prononcés lorsqu'un taux d'humidité donné est atteint par immersion plutôt que par exposition environnementale. Les mêmes conclusions étaient déjà disponibles dans Vauthier et al. [129]. Weitsman [135] remarque lui aussi que le vieillissement par immersion (en eau de mer cette fois) est plus critique pour la tenue en fatigue que le vieillissement sous atmosphère.

## 5.3 Ensimage, interphase, interface

*Références :* [29, 67, 72, 77, 102, 125, 127, 128, 10, 41, 45, 79]

Benzarti et al. [10] traitent du rôle de l'ensimage sur la tenue en fatigue. Plus l'interface est forte, plus la rupture est liée à la rupture des fibres et plus la sensibilité aux défauts est importante. Plus l'ensimage est faible, plus la rupture est due au délaminage. Ces conclusions se retrouvent dans la thèse de Vauthier [128]. Ils notent aussi une influence significative sur le comportement dynamique et en fatigue du vieillissement physique et de la densité de réticulation.

Gassan [41] étudie le comportement en fatigue en fonction de la résistance de l'interface en se servant de la perte d'énergie comme traceur. Il note lui aussi une baisse des performances en fatigue lorsque l'interface est plus forte pour les matrices fragiles comme l'époxyde, et une amélioration de ces performances pour les interfaces plus fortes pour les autres matrices.

Lesko et al. [72] notent que la limite en fatigue et en fatigue compression peuvent être très significativement influencées (10% et un ordre de grandeur resp.) par des changements des caractéristiques inélastiques (pas seulement la résistance) de l'interphase, qui représente pourtant moins d'1% du volume du composite.

D'un point de vue micromécanique, Lankford et al. [67] étudient l'influence de l'interphase sur les micromécanismes de flambement des fibres et de vrillage (kinking). Tsujioka et al. [125] s'intéressent au cas des fibres de carbone (contenu en oxygène de l'interface) et Uenoya [127] discute des méthodes expérimentales concernant la détermination des phénomènes à l'interface fibre/matrice.

Marotzke et Hampe [77] étudient les tests du pull-out et de l'indentation à l'aide d'un modèle EF micromécanique afin d'en comprendre les détails. Ils s'intéressent notamment aux contraintes à l'interface. Saito et al. [102] s'intéressent à la modélisation d'une fissure entre deux milieux et définissent le facteur d'intensité de contrainte interfaciale. Ils utilisent la méthode globale-locale d'EF basée sur la méthode des EF (local) avec une solution analytique basée sur un principe énergétique (global).

Mendels et al. [79] montrent qu'il **ni a pas de variation des propriétés intrinsèque de l'interface fibre/matrice lors du vieillissement physique**. L'article de Goda [45] à paraître porterait sur le rôle du délaminage sur l'accroissement de la résistance des UD.

Une discussion sur les limitations des tests micromécaniques pour la détermination des propriétés de l'interface fibre/matrice est donnée dans le papier de Desaegeer et Verpoest [29].



## 5.4 Effets de taille et d'échelle

*Références :* [113, 27, 116, 117, 118]

L'article de Sutherland et al. [116] est non seulement une revue bibliographique sur le sujet, mais surtout une **présentation des méthodes et termes** employés.

Les méthodes d'analyse statistiques sont présentées en détail et sur un exemple dans l'article suivant [117] où le cas des UD est traité. Les laminés woven-roving sont traités dans l'article suivant [118], dans lequel les auteurs mettent en avant l'importance des facteurs de fabrication. Un effet de taille très supérieur à un effet d'échelle est trouvé dans ce cas. Les composites traités sont des composites pour la marine, ce que traitent aussi Davies et Petton [27] qui notent un effet d'échelle très supérieur à l'effet de taille escompté.

Dans [113], Spearing et al. proposent une **méthodologie générale de design des structures composites prenant en compte la fatigue**. Pour ces auteurs, le design doit commencer au niveau le plus bas (choix des fibres, de la matrice, de l'architecture, du process de fabrication). Le passage d'un niveau de design au suivant (les niveaux de design vont dans l'ordre croissant de la taille : constituants, pli, laminé, sous-structures, structure) se fait par le retour d'expériences et de simulations, notamment grâce à des modèles basés sur les mécanismes d'endommagement, aux **différentes échelles, avec interactions...**

Il semble toutefois que, si la méthodologie en elle-même est tout à fait intéressante et sans aucun doute parfaitement adaptée à la conception des structures composites complexes, les expériences et les modèles qu'elle nécessite (notamment avec la prise en compte du couplage entre les effets à différentes échelles) restent, pour certains, à inventer, ce dont les auteurs sont toutefois parfaitement conscients.

## 5.5 Autres aspects

D'autres aspects encore sont abordés. Nous ne les détaillerons pas tous.

**Méthodes de fabrication, Références :** [58]

L'étude de Jang et al. [58] porte sur la variation des caractéristiques des composites à matrice époxydique en fonction des variations dans leur constitution chimique dues aux techniques de mise en œuvre.

**Applications, Références :** [137, 104, 97]

L'exemple traité par Rodrigez [97] a déjà été mentionné. Il présente un calcul par EF très complexe d'une grosse pale d'héolienne. Sancaktar et Gratton [104] exposent la méthodologie suivie lors de la conception d'une suspension de véhicule. Il s'agit toutefois d'un véhicule extrêmement léger (véhicule solaire), pour lequel les sollicitations ne sont pas énormes (rigidité de 70 N/mm par exemple). L'article n'est pas convainquant. Enfin, mentionnons que l'éprouvette « spéciale » développée par Wisnom et al. [137] peut aussi constituer un exemple d'application. Il but cette fois est d'obtenir des zones de la structure soumises à un type de chargement précis (en l'occurrence, tension interlaminaire et cisaillement).

**Renfort 3D, Références :** [57, 78, 6, 24, 46, 100, 107, 3, 105, 13, 32, 51, 56, 112, 101, 17, 23, 55, 64, 88]

On peut noter l'intérêt grandissant pour les méthodes de renforcement des propriétés des composites selon l'épaisseur. Trois types d'approches sont possibles : soit ajouter un renfort à un composite « classique » (*i.e.* fabriqué de manière traditionnelle) [6, 101, 17, 64], soit ajouter une couture pour faire une structure 3D d'une superposition de plis 2D [57, 78, 24, 107, 105, 13, 32, 51, 56, 112, 23, 88], soit imprégner une structure 3D [46, 100, 3].

Alors que dans les trois approches les propriétés statiques sont grandement accrues, la première méthode conduit souvent à un affaiblissement de la tenue en fatigue, car le fait d'« injecter » un renfort 3D *a posteriori* conduit généralement à une dégradation de la structure 2D préexistante.

Une étude en fonction du process de fabrication est disponible dans Sohn et Hu [112]. Cox [23] et He et Cox [51] s'intéressent plus à la modélisation mécanique du renforcement suivant cette troisième direction. Dans des articles à paraître, Mouritz et Jain [82] discutent du modèle de Jain et Mai et Hwang et Shen [55] du délaminage.

**Méthodes expérimentales, Références :** [133, 137, 2, 4, 31, 40, 111, 115, 140]

Toutes les techniques présentées ne sont pas forcément nouvelles. Ainsi, Zhan et al. [140] exposent leurs tests au SEM (Scanning Electron Microscope), permettant de faire des observations des micromécanismes d'endommagement. Vogel et al. [133] et Soh [111] exposent des méthodes optiques, Abry et al. [2] se servent de la conductivité électrique (fibres de carbone). Arendt et al. [4] exposent la mise en place d'essais pour l'aéronautique et Wisnom et al. [137] une nouvelle géométrie d'éprouvette pour obtenir un chargement de tension interlaminaire avec cisaillement. Dong [31] et Gao et Kim [40] (à paraître) s'intéressent aux méthodes

de mesure par ultrasons. Le Mode III n'est examiné que depuis peu de temps. Suemasu [115] propose une méthode (torsion) pour l'étudier.

**Fibres courtes**, *Références* : [54, 68, 126]

**Polypropylène**, *Références* : [37, 89]

## 6 Endommagement

Les références concernant l'endommagement ne sont pas détaillées.

Tension-compression, *Références* : [38, 36]

Mode I, *Références* : [43, 42]

Mode II, *Références* : [48, 120, 28]

Combinaison de modes et chargements, *Références* : [5, 95, 33, 69, 70]

Délamination, *Références* : [63, 65, 108, 11, 137, 53]

Absorption, *Références* : [91, 124]

Température, *Références* : [21, 62]

## 7 Conclusions

On peut noter que les références sur la fatigue sont de plus en plus nombreuses, ce qui traduit bien **l'intérêt grandissant pour la fatigue des composites**. Toutefois, alors que quelques références plus anciennes évoquaient la fatigue de façon globale, la compréhension grandissante des phénomènes complexes menant à la rupture font que les références actuelles portent sur des points de plus en plus spécifiques. **Peu d'articles tentent une synthèse** ou une méthodologie applicable au sens de l'ingénieur, mais cela est peut-être encore trop tôt.

Les tests réalisés font intervenir, pour la majorité, des sollicitations simples : traction ou flexion.

Des références plus anciennes que celles proposées feraient apparaître un nombre important d'articles où la sollicitation est la traction, voire éventuellement la compression, dans le sens des fibres.

Dans les références présentées, un test fréquemment employé est celui de la flexion 3 points sur appuis éloignés pour limiter les effets du cisaillement. Dans ce cas, la face en traction (face opposée au plot par lequel la force est appliquée) est étudiée, ce qui donne une configuration d'essai simple et confortable.

Les références récentes montrent un intérêt grandissant pour le cas des chargements sollicitant plus la matrice que les fibres, tels que le cisaillement interlaminaire ou la traction hors-axes. Toutefois, la matrice ayant un comportement non-linéaire et étant sensible à de nombreux facteurs tels que la température, l'humidité, le vieillissement ou la fréquence, **les références se multiplient car elles ne se focalisent généralement que sur un seul de ces aspects**.

De nombreuses références portent sur l'étude, l'observation et le développement de modèles micromécaniques, propres à une configuration donnée donc à un ou des modes de rupture identifiés (voir références propres à l'endommagement). D'un autre côté, de nombreuses références « mesurent » la fatigue en terme d'indicateurs macroscopiques : cela à l'avantage de pouvoir proposer des critères applicables au sens de l'ingénieur, toutefois, ces critères sont malgré tout liés à la configuration testée, même si le lien avec la micromécanique ne peut généralement pas être fait. Notons quand même que des études récentes réalisent ce lien à l'aide d'**approches statistiques**, mais qu'il est nécessaire de se placer dans une hypothèse de comportement : soit dominé par les fibres, soit par la matrice...

Un **critère de rupture ou d'endommagement** satisfaisant tout le monde semble loin d'être trouvé, compte tenu du fait que chaque critère est plus ou moins adapté à une direction de chargement. Toutefois, on se rend compte que dans la pratique, des critères généralement simples (quadratiques...) sont retenus et semblent donner satisfaction au sens de l'ingénieur. Rappelons encore qu'un critère multiaxial de fatigue n'existe pas non plus pour les matériaux isotropes. Notons aussi, comme le soulignent Spearing et al. [113] qu'il est sans doute nécessaire de développer des modèles permettant la prise en compte **l'interaction des mécanismes d'endommagement à différentes échelles** (constituants, pli, laminé, sous-structures, structure).

Les **composites épais ne sont pas étudiés**, tout comme l'influence de l'épaisseur (voir peut-être l'article à paraître de Tai et al. [119], mais il s'agit de composites carbone «quasi-isotropes»). Pourtant, des mécanismes de ruptures suivant l'épaisseurs peuvent sans doute apparaître de manières différentes de celles des laminés plus fins : effet de taille ou interaction de mécanismes.

## Références

- [1] R.A. ABELES COUILLARD et P. SCHWARTZ. «Bending fatigue of carbon-fiber-reinforced epoxy composite strands». *Composites Science and Technology*, 57(2):229–235, 1997.
- [2] J.C. ABRY, S. BROCHARD, A. CHATEAUMINOIS, M. SALVIA, et G. GIRAUD. «In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurement». *Composites Science and Technology*, 59:925–935, 1999.
- [3] U. AKIVA, E. ITZHAK, et H.D. WAGNER. «Elastic constants of three-dimensional orthotropic composites with platelet/ribbon reinforcement». *Composites Science and Technology*, 57:173–184, 1997.
- [4] C. ARENDT, M. BRUNNER, J. WANG, et T. CEBECI. «Long term durability testing of polymer composite materials». Dans Thierry Massard et ALAIN VAUTRIN, éditeur, *Proc. ICCM-12 CD-ROM*, 1999.
- [5] L.E. ASP, L.A. BERGLUND, et R. TALREJA. «A criterion for crack initiation in glassy polymers subjected to a composite-like stress state». *Composites Science and Technology*, 56(11):1291–1301, 1996.
- [6] D.J. BARRETT. «The mechanics of z-fiber reinforcement». *Composite Structures*, 36:23–32, 1996.
- [7] M. BATTLE. «Reliability of stiffness predictions for fibre composites». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 4, pages 11–16, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [8] M.H. BEHESHTY et B. HARRIS. «A constant-life-model of fatigue behaviour for carbon-fibre composites : the effect of impact damage». *Composites Science and Technology*, 58(1):9–18, 1998.
- [9] S BENMEDAKHENE, M KENANE, et ML BENZEGGAGH. «A study of the initiation and growth of delamination glass/epoxy composites subjected to static and dynamic loading by acoustic emission monitoring». *Composites Science and Technology*, 59(2):201–208, 1999.
- [10] K. BENZARTI, J.J. MARTINEZ VEGA, N. ALBEROLA, M. SALVIA, et M.F. EL FASSI. «Comportement en fatigue d’une matrice époxyde et de composites unidirectionnels époxy/fibres de verre. Effet du vieillissement physique et de l’interface fibre/matrice». *Proc. Int. Conference on Fatigue of Composites*, pages 205–257, 1997.
- [11] M.L. BENZEGGAGH et M. KENANE. «Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus». *Composites Science and Technology*, 56(4):439–449, 1996.
- [12] M.L. BENZEGGAGH et M. KENANE. «Measurement of mixed mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus». *Composites Science and Technology*, 56:439–449, 1996.
- [13] G.A. BIBO et P.J. HOGG. «Influence of reinforcement architecture on damage mechanisms and residual strength of glass-fibre/epoxy composite systems». *Composites Science and Technology*, 58(8):803–813, 1998.
- [14] I.P. BOND. «Fatigue life prediction for GRP subjected to variable amplitude loading». *Composites part A*, 30:961–970, 1999.
- [15] V.N. BULSARA, R. TALREJA, et J. QU. «Damage initiation under transverse loading of unidirectional composites with arbitrary distributed fibers». *Composites Science and Technology*, 59:673–682, 1999.
- [16] A.R. BUNSELL, D. LAROCHE, et D. VALENTIN. «Damage and Failure in Carbon-Fiber-Reinforced Epoxy Resin». *ASTM STP 813*, pages 38–54, 1983.
- [17] D.D.R. CARTIÉ et I.K. PARTRIDGE. «Z-pinned composite laminates: Improvements in delamination resistance». Dans *Proc. DFC5 conference, I Mech E, London, 18-19 March 1999*, 1999.
- [18] A. CHATEAUMINOIS. «Interactions between moisture and fatigue damage in unidirectional glass/epoxy composites subjected to flexural loading». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.

- [19] P.R. CIRISCIOLI, W.I. LEE, D.G. PETERSON, G.S. SPRINGER, et J.-M. TANG. «Accelerated Environmental Testing of Composites». *J. Composite Materials*, 21:225–242, 1987.
- [20] SD CLARK, RA SHENOI, et HG ALLEN. «Modelling the fatigue behaviour of sandwich beams under monotonic 2-step and block-loading regimes». *Composites Science and Technology*, 59(4):471–486, 1999.
- [21] X. COLIN, C. MARAIS, et J.P. FAVRE. «Damage/weight loss relationship of polymer matrix composites under thermal ageing». Dans Thierry Massard et ALAIN VAUTRIN, éditeur, *Proc. ICCM-12 CD-ROM*, 1999.
- [22] T.A. COLLINGS et S.M. COPLEY. «On the accelerated ageing of CFRP». *Composites*, 14(3):180–188, 1983.
- [23] B.N. COX. «Constitutive model for a fiber tow bridging a delamination crack». *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 6:117–138, 1999.
- [24] B.N. COX, R. MASSABÒ, et K.T. KEDWARD. «Suppression of delaminations in curved structures by stitching». *Composites Part A*, 27:1133–1138, 1996.
- [25] R.G. CUNTZE. «Progressive failure of 3D-stressed laminates: multiple nonlinearity treated by the Failure Mode Concept (FMC)». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [26] I.M. DANIEL. «Experimentation and Modeling of Composite Materials». *Experimental Mechanics*, 39(1):1–19, 1999.
- [27] P. DAVIES et D. PETTON. «An experimental study of scale effects in marine composites». *Composites : Part A*, 30:267–275, 1999.
- [28] S. DENG, L. YE, et Y.W. MAI. «Influence of fibre cross-sectional aspect ratio on mechanical properties of glass-fibre/epoxy composites: II. Interlaminar fracture and impact behaviour». *Composites Science and Technology*, 59(11):1725–1734, 1999.
- [29] M. DESAEGER et I. VERPOEST. «Critical analysis of the possibilities and limitations of the micromechanical test techniques». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 6, pages 665–672, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [30] F. DESRUMAUX, F. MERAGHNI, et M.L. BENZEGGAH. «Self-consistent modelling of damaged elastic behaviour using reliability approach». Dans Thierry Massard et ALAIN VAUTRIN, éditeur, *Proc. ICCM-12 CD-ROM*, 1999.
- [31] Y. DONG, N. YE, et Y. BAI. «On-line observation of interlaminar damage by ultrasonic inspection». *Composites Science and Technology*, 59:957–961, 1999.
- [32] K.A. DRANSFIELD, L.K. JAIN, et Y.-W. MAI. «On the effects of stitching in CFRPs – I. Mode I delamination toughness». *Composites Science and Technology*, 58(8):815–827, 1998.
- [33] F. DUCEPT, D. GAMBY, et D. DAVIES. «A mixed-mode failure criterion derived from tests on symmetric and asymmetric specimens». *Composites Science and Technology*, 59(4):609–619, 1999.
- [34] X. FENG, D. GILCHRIST, A.J. KINLOCH, et F.L. MATTHEWS. «Development of a method for predicting the fatigue life of CFRP components». *Proc. Int. Conference on Fatigue of Composites*, pages 407–414, 1997.
- [35] L. FERRY, D. PERREUX, D. VARCHON, et N. SICOT. «Fatigue behaviour of composite bars subjected to bending and torsion». *Composites Science and Technology*, 59(4):575–582, 1999.
- [36] K.M. GAFFNEY et J. BOTSIS. «Deformation and fracture of a uniaxially reinforced composite material». *Composites Science and Technology*, 59(12):1847–1859, 1999.
- [37] EK GAMSTEDT, L.A. BERGLUND, et T. PEIJS. «Fatigue mechanisms in unidirectional glass-fibre-reinforced polypropylene». *Composites Science and Technology*, 59:759–768, 1999.
- [38] EK GAMSTEDT et BA SJOGREN. «Micromechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies». *Composites Science and Technology*, 59(2):167–178, 1999.

- [39] K. GAMSTEDT. «Fatigue in composite laminates – A qualitative link from micromechanisms to fatigue life performance». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [40] S.L. GAO et J.K. KIM. «Scanning acoustic microscopy as a tool for quantitative characterisation of damage in CFRPs». *Composites Science and Technology*, 59(3) :345–354, 1999.
- [41] J. GASSAN. «Influence of fiber-matrix adhesion on the fatigue behavior of cross-ply glass-fiber epoxy composites». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [42] M.D. GILCHRIST, A.J. FINLOCH, et F.L. MATTHEWS. «Mechanical performance of carbon-fibre- and glass-fibre-reinforced epoxy I-beam: II. Fractographic failure observations». *Composites Science and Technology*, 56(9) :1031–1045, 1996.
- [43] M.D. GILCHRIST, A.J. FINLOCH, F.L. MATTHEWS, et S.O. OSIYEMI. «Mechanical performance of carbon-fibre- and glass-fibre-reinforced epoxy I-beam: I. Mechanical behaviour». *Composites Science and Technology*, 56(1) :37–53, 1996.
- [44] MD GILCHRIST, AJ KINLOCH, et FL MATTHEWS. «Mechanical performance of carbon-fibre- and glass-fibre-reinforced epoxy I beams: III fatigue performance». *Composites Science and Technology*, 59(2) :179–200, 1999.
- [45] K. GODA. «The role of interfacial debonding in increasing the strength and reliability of unidirectional fibrous composites». *Composites Science and Technology*, 59(12) :1871–1879, 1999.
- [46] B. GOMMERS, I. VERPOEST, et P. van HOUTTE. «Modelling the elastic properties of knitted-fabric-reinforced composites». *Composites Science and Technology*, 56 :685–694, 1996.
- [47] X.L. GONG, A. LAKSIMI, D. LAI, et M.L. BENZEGGAGH. «Damage in Glass/Epoxy plates under combined tension-torsion loading». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 1, pages 351–358, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [48] H. HAMADA, M. KOTAKI, et Y. HIRAI. «Effect of surface treatment and weave structure on mode I interlaminar fracture behavior of glass woven fabric composites». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 6, pages 643–650, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [49] W.H. HAN et G.B. MCKENNA. «The influence of moisture on the physical aging response of epoxy : experimental results and modeling considerations». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [50] D. HASSAINI. «Étude numérique et expérimentale du comportement monotone et cyclique en cisaillement inter- et intralaminare de composites unidirectionnels verre-époxyde». PhD thesis, École centrale de Lille, 1998.
- [51] M. HE et B.N. COX. «Crack bridging by through-thickness reinforcement in delaminating curved structures». *Composites Part A*, 29 :377–393, 1998.
- [52] C. HENAFF-GARDIN, I. GOUPILLAUD, M.C. LAFARIE-FRENOT, et S. BUHR. «Modelling of transverse cracking under uniaxial fatigue loading in cross-ply composite laminates: experimental validation». Dans Thierry Massard et ALAIN VAUTRIN, éditeur, *Proc. ICCM-12 CD-ROM*, 1999.
- [53] J.W. HOOVER, D. DUJAWSKI, et F. ELLYING. «Transverse cracking of symmetric and unsymmetric glass-fibre/epoxy-resin laminates». *Composites Science and Technology*, 57(11) :1513–1526, 1997.
- [54] K. HUSSAIN. «Short fatigue crack behaviour and analytical models: a review». *Engineering Fracture Mechanics*, 58(4) :327–354, 1997.
- [55] S.F. HWANG et B.C. SHEN. «Opening-mode interlaminar fracture toughness of interply hybrid composite materials». *Composites Science and Technology*, 59(12) :1861–1869, 1999.
- [56] L.K. JAIN, K.A. DRANSFIELD, et Y.-W. MAI. «On the effects of stitching in CFRPs – II. Mode II delamination toughness». *Composites Science and Technology*, 58(8) :829–837, 1998.
- [57] L.K. JAIN et Y.-W. MAI. «Determination of Mode II delamination toughness of stitched laminated composites». *Composites Science and Technology*, 55 :241–253, 1995.

- [58] K. JANG, W.-J. CHO, et C.-S. HA. «Influence of processing method on the fracture toughness of thermoplastic-modified, carbon-fiber-reinforced epoxy composites». *Composites Science and Technology*, 59:995–1001, 1999.
- [59] D. JEULIN, C. BAXEVANAKIS, et J. RENARD. «Statistical modeling of the fracture of laminate composites». *Applications of Statistics and Probability ICASP 7*, 1:203–208, 1995.
- [60] B.S. JOHANSEN et H. LILHOLT. «Design for durability of polymeric composites». Dans Anoush POUR-SARTIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 1, pages 683–690, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [61] M. KENANE et M.L. BENZEGGAGH. «Mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites under fatigue loading». *Composites Science and Technology*, 57(5):597–605, 1997.
- [62] N. KHEMIRI, L. MICHEL, et E. RAMAHEFARISSON. «Temperature effect on the damage development of a CFRP laminate under cyclic loading». Dans Thierry Massard et ALAIN VAUTRIN, éditeur, *Proc. ICCM-12 CD-ROM*, 1999.
- [63] R. KRÜGER, M. KÖNIG, et M. GÄDKE. «Predicting delamination growth under cyclic loading: an approach using computational structural analysis and testing». Dans Anoush POURSARTIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 1, pages 561–568, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [64] W.S. KUO et K.B. CHENG. «Processing and microstructures of 3D woven fabric composites incorporating solid rods». *Composites Science and Technology*, 59(12):1833–1846, 1999.
- [65] K. KUSSMAUL et M. v. ALBERTI. «On the delamination behaviour of carbon fibre reinforced plastics under mixed-mode fatigue loading». Dans Anoush POURSARTIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 1, pages 125–132, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [66] P. LADEVÈZE. «Modelling and computations until final fracture of laminate composites». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [67] J. LANKFORD. «The role of the interphase in compressive damage development in polymeric composites». Dans Anoush POURSARTIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 6, pages 509–516, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [68] B. LAUKE et S.-Y. FU. «Strength anisotropy of mesaligned short-fibre-reinforced polymers». *Composites Science and Technology*, 59:699–708, 1999.
- [69] C.S. LEE, W. HWANG, H.C. PARK, et K.S. HAN. «Failure of carbon/epoxy composite tubes under combined axial and torsional loading: Part 1. Experimental results and prediction of biaxial strength by the use of neural networks». *Composites Science and Technology*, 59(12):1779–1788, 1999.
- [70] C.S. LEE, W. HWANG, H.C. PARK, et K.S. HAN. «Failure of carbon/epoxy composite tubes under combined axial and torsional loading: Part 2. Fracture morphology and failure mechanism». *Composites Science and Technology*, 59(12):1789–1804, 1999.
- [71] L.J. LEE, K.E. FU, et J.N. YANG. «Prediction of fatigue damage and life for composite laminates under service loading spectra». *Composites Science and Technology*, 56(6):635–648, 1996.
- [72] J.J. LESKO, S. SUBRAMANIAN, S.W. CASE, et K.L. REIFSNIDER. «The influence of interphase properties & microstructure on composite durability». Dans Anoush POURSARTIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 6, pages 525–532, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [73] K. LIAO, C.R. SCHULTHEISZ, D.L. HUNSTON, et L.C. BRINSON. «Long-term Durability of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite Materials for Infrastructure Applications: A Review». *Journal of Advanced Materials*, 30(4):3–40, 1998.
- [74] W. LIAO et C.T. SUN. «The Determination of Mode III Fracture Toughness in Thick Composite Laminates». Dans Anoush POURSARTIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 1, pages 197–204, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.

- [75] C.A. MAHIEUX et K.L. REIFSNIDER. «Influence of temperature on the durability of polymer composite systems». Dans Thierry Massard et ALAIN VAUTRIN, éditeur, *Proc. ICCM-12 CD-ROM*, 1999.
- [76] J.F. MANDELL et U. MEIER. «Effects of Stress Ratio, Frequency, and Loading Time on the Tensile Fatigue of a Glass-Reinforced Epoxy». *ASTM STP 813*, pages 55–77, 1983.
- [77] C. MAROTZKE et A. HAMPE. «Micromechanics of the interface in polymer composites - Capabilities and limitations of the common test methods». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 6, pages 517–524, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [78] H. MATSUI, M. NAKADA, M. MOHRI, et Y. MIYANO. «Flexural failure behavior of pitch/pan hybrid unidirectional CFRP». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 4, pages 147–154, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [79] D.-A. MENDELS, Y. LETERRIER, et J.-A. MÅNSON. «Modelling of composite interfaces subject to thermal stresses and physiscal aging». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [80] R. MIRANDA GUEDES. «Assessment of time-temperature superposition prnciple as a basis for a long term behaviour prediction of CFRP under bending loading». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [81] Y. MIYANO. «Long term prediction of fatigue life of unidirectional CFRP». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [82] A.P. MOURITZ et L.K. JAIN. «Further validation of the Jain and Mai models for interlaminar fracture of stitched composites». *Composites Science and Technology*, 59(11):1653–1662, 1999.
- [83] A. MUC. «Description of fatigue failure process for laminated composites structures». Dans Thierry Massard et ALAIN VAUTRIN, éditeur, *Proc. ICCM-12 CD-ROM*, 1999.
- [84] T. NYMAN. «Composite fatigue design methodology: a simplified approach». *Composite Structures*, 35:183–194, 1996.
- [85] S. OGIHARA, N. TAKEDA, S. KOBAYASHI, et A. KOBAYASHI. «Effects of stacking sequence on microscopic fatigue damage development in quasi-isotropic CFRP laminates with interlaminar-toughened layers». *Composites Science and Technology*, 59(9):1387–1398, 1999.
- [86] I.V. PAPADOPOULOS et V.P. PANOSKALTSIS. «Invariant formulation of a gradient dependant multiaxial high-cycle fatigue criterion». *Engineering Fracture Mechanics*, 55(4):513–528, 1996.
- [87] A. PASRICHA, D.A. DILLARD, et M.E. TUTTLE. «Effect of physical aging and variable stress history on the strain response of polymeric composites». *Composites Science and Technology*, 57:1271–1279, 1997.
- [88] H. PATTYN, I. VERPOEST, J. IVENS, et E. VILLALON. «Comparison of warp knitted and stitched non-crimp fabrics». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [89] A. PEGORETTI et T. RICCÒ. «Fatigue crack propagation in polypropylene reinforced with short glass fibres». *Composites Science and Technology*, 59:1055–1062, 1999.
- [90] D. PERREUX et E. JOSEPH. «The effect of frequency on the fatigue performance of filament-wound pipes under biaxial loading: experimental results and damage model». *Composites Science and Technology*, 57(3):353–364, 1997.
- [91] D. PERREUX et C. SURI. «A study of the coupling between the phenomena of water absorption and damage in glass/epoxy composite pipes». *Composites Science and Technology*, 57(9-10):1403–1413, 1997.
- [92] T.P. PHILIPPIDIS et A.P. VASSILOPOULOS. «Fatigue of composite laminates under off-axis loading». *Int. J. of Fatigue*, 21:253–262, 1999.
- [93] M. PILLING. «Probabilistic aspects of damage modelling in carbon fibre composite materials using a fully automated finite element methodology». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 1, pages 375–383, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.



- [94] S. PLICA et R. RACKWITZ. «Size effects in fibre reinforced laminated structures». *Applications of Statistics and Probability ICASP 7*, 1:217–223, 1995.
- [95] J. QIAN et A. FATEMI. «Mixed mode fatigue crack growth: a literature survey». *Engineering Fracture Mechanics*, 55(6):969–990, 1996.
- [96] K.L. REIFSNIDER, K. SCHULTE, et J.C. DUKE. «Long-Term Fatigue Behavior of Composite Materials». *ASTM STP 813*, pages 136–159, 1983.
- [97] J.S. RODRÌGEZ. «Design of large composite structures under dynamic loads with fatigue assessment». Dans Thierry Massard et ALAIN VAUTRIN, éditeur, *Proc. ICCM-12 CD-ROM*, 1999.
- [98] F. ROUDET. «Comportement en flexion trois points avec cisaillement prépondérant de composites verre/époxyde unidirectionnels sous chargement monotone et cyclique». PhD thesis, École Centrale de Lille.
- [99] S. ROY et W. XU. «Modelling of hygrothermal effects in composites and polymer adhesive systems». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [100] X. RUAN et T.-W. CHOU. «Experimental and theoretical studies of the elastic behavior of knitted-fabric composites». *Composites Science and Technology*, 56:1391–1403, 1996.
- [101] K.L. RUGG, B.N. COX, K.E. WARD, et G.O. SHERRICK. «Damage mechanisms for angled through-thickness rod reinforcement in carbon-epoxy laminates». *Composites Part A*, 29:1603–1613, 1998.
- [102] K. SAITO, S. ARAKI, T. KAWAKAMI, et I. MORIWAKI. «Global-local finite element analysis of stress intensity factor for a crack along the interface of two phase material». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 1, pages 261–268, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [103] M. SALVIA et L. VINCENT. «Modelling of flexural fatigue behaviour in UD glass-fibre-reinforced polymer». *Composites Science and Technology*, 56(7):797–802, 1996.
- [104] E. SANCAKTAR et M. GRATTON. «Design, analysis, and optimization of composite leaf springs for light vehicle applications». *Composite Structures*, 44:195–204, 1999.
- [105] B.V. SANKAR et S.K. SHARMA. «Mode II delamination toughness of stitched graphite/epoxy textile composites». *Composites Science and Technology*, 57:729–737, 1997.
- [106] A. SEDRAKIAN, T. BEN ZINEB, J.L. BILLOET, et V. BOBET. «Une approche itérative pour la simulation du comportement en fatigue des composites unidirectionnels verre/époxy». Dans *Proc. JNC 11*, pages 1303–1312, 1998.
- [107] M.Z. SHAH KHAN et A.P. MOURITZ. «Fatigue behaviour of stitched GRP laminates». *Composites Science and Technology*, 56:695–701, 1996.
- [108] M.M. SHOKRIEH, O.P. EILERS, P. KOTSIOPRIFTIS, et L.B. LESSARD. «Determination of interlaminar shear strength of graphite/epoxy composite materials in static and fatigue loading». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 4, pages 81–88, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [109] P. SHYPRYKEVICH, H.T. HAHN, et M. MITROVIC. «Damage accumulation in composite structure under repeated loads». Dans Thierry Massard et ALAIN VAUTRIN, éditeur, *Proc. ICCM-12 CD-ROM*, 1999.
- [110] D.F. SIMS et V.H. BROGDON. «Fatigue Behavior of Composites Under Different Loading Modes». *ASTM STP 636*, pages 185–205, 1977.
- [111] A.-K. SOH. «An improved photo-elastic technique for determining the mixed-mode stress-intensity factors for interfacial cracks in a bi-material». *Composites Science and Technology*, 59:1033–1039, 1999.
- [112] M.-S. SOHN et X.-Z. HU. «Processing of carbon-fibre/epoxy composites with cost-effective interlaminar reinforcement». *Composites Science and Technology*, 58:211–220, 1998.
- [113] S.M. SPEARING, P.A. LAGACE, et H.L.N. MCMANUS. «On the role of lengthscale in the prediction of failure of composite structures: assessment and needs». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 4, pages 49–56, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.

- [114] R.I. STEPHENS, P.M. DINDINGER, et J.E. GUNGER. «Fatigue damage editing for accelerated durability testing using strain range and SWT paramter criteria». *Int. J. Fatigue*, 19(8-9):599–606, 1997.
- [115] H. SUEMASU. «An experimental method to measure the mode-III interlaminar fracture toughness of composite laminates». *Composites Science and Technology*, 59:1015–1021, 1999.
- [116] LS SUTHERLAND, RA SHENOI, et SM LEWIS. «Size and scale effects in composites : I literature review». *Composites Science and Technology*, 59(2):209–220, 1999.
- [117] LS SUTHERLAND, RA SHENOI, et SM LEWIS. «Size and scale effects in composites : II Unidirectional laminates». *Composites Science and Technology*, 59(2):221–233, 1999.
- [118] LS SUTHERLAND, RA SHENOI, et SM LEWIS. «Size and scale effects in composites : III: Woven-roving laminates». *Composites Science and Technology*, 59(2):235–251, 1999.
- [119] N.H. TAI, C.C.M. MA, J.M. LIN, et G.Y. WU. «Effects of thickness on the fatigue behavior of quasi-isotropic carbon/epoxy composites before and after low-energy impacts». *Composites Science and Technology*, 59(11):1753–1762, 1999.
- [120] J.C. THESKEN et F. BRANDT. «Experimental Investigations of Mode I and Mixed-Mode Delamination Growth». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 1, pages 149–156, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [121] A. THIONNET et J. RENARD. «Modelling of the fatigue behaviour of laminated composite structures». *Proc. Int. Conference on Fatigue of Composites*, pages 363–369, 1997.
- [122] A. THIONNET et J. RENARD. «Modelling of fatigue behaviour in composite laminates». Dans Thierry Massard et ALAIN VAUTRIN, éditeur, *Proc. ICCM-12 CD-ROM*, 1999.
- [123] S.M. TIPTON et D.V. NELSON. «Advances inmultiaxial fatigue life prediction for components with stress concentrations». *Int. J. Fatigue*, 19(6):503–515, 1997.
- [124] T.K. TSOTSIS et S.M. LEE. «Long-term thermo-oxidative aging in composite materials : failure mechanisms». *Composites Science and Technology*, 58:355–368, 1998.
- [125] N. TSUJIOKA, M. KOTAKI, M. HOJO, et H. HAMADA. «Systematic studies on the relation between interfacial properties and fracture properties of CFRP». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 6, pages 501–507, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [126] C.L. TUCKER III et E. LIANG. «Stiffness predictions for unidirectional short-fiber composites : Review and evaluation». *Composites Science and Technology*, 59:655–671, 1999.
- [127] T. UENOYA. «Acoustic emission and the fiber/matrix interface failure progress and strength in glass fibre/epoxy laminates». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 6, pages 581–588, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [128] E. VAUTHIER. «Durabilité et vieillissement hygrothermique de composites verre-époxy soumis à des sollicitations de fatigue». PhD thesis, École centrale de Lyon, 1996.
- [129] E. VAUTHIER, J.C. ABRY, T. BAILLIEZ, et A. CHATEAUMINOIS. «Influence of hygrothermal aging on the fatigue behaviour of a unidirectional Glass-Epoxy composite». *Proc. Int. Conference on Fatigue of Composites*, pages 323–331, 1997.
- [130] E. VAUTHIER, J.C. ABRY, T. BAILLIEZ, et A. CHATEAUMINOIS. «Interactions between hygrothermal ageing and fatigue damage in unidirectional glass/epoxy composites». *Composites Science and Technology*, 58(5):687–692, 1998.
- [131] E. VAUTHIER, A. CHATEAUMINOIS, et T. BAILLIEZ. «Hygrothermal aging and durability of unidirectional glass - epoxy composites». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 6, pages 182–192, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [132] S. VIEILLEVIGNE, D. JEULIN, J. RENARD, et N. SICOT. «Modelling of the fatigue behaviour od a unidirectional Glass Epoxy composite submitted to fatigue loadings». *Proc. Int. Conference on Fatigue of Composites*, pages 424–430, 1997.

- [133] S.W. VOGEL, P BÉGUELIN, H.H. KAUSCH, et S.J. YOUNG. «Short and long-term damage characterisation: an optical and mechanical approach applied to CSM composites and rubber modified PMMA». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 4, pages 139–146, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.
- [134] J.Z. WANG, H. PARVATAREDDY, T. CHANG, N. IYENGAR, D.A. DILLARD, et K.L. REIFSNIDER. «Physical aging behavior of high-performance composites». *Composites Science and Technology*, 54(4):405–415, 1995.
- [135] Y.J. WEITSMAN. «Composites in the sea: sorption, strength and fatigue». Dans Thierry Massard et ALAIN VAUTRIN, éditeur, *Proc. ICCM-12 CD-ROM*, 1999.
- [136] J.M. WHITNEY et R.J. NUISMER. «Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentration». *J. Composite Materials*, 8:253–265, 1974.
- [137] M.R. WISNOM, Z.J. PETROSSIAN, et M.I. JONES. «Interlaminar failure of unidirectional glass/epoxy due to combined through thickness shear and tension». *Composites part A*, 27:921–929, 1996.
- [138] X.R. XIAO. «Modeling of load frequency effect on fatigue life of thermoplastic composites». *J. Composite Materials*, 33(12):1141–1158, 1999.
- [139] X.R. XIAO et I. AL-HMOUZ. «A model on thermal degradation of fatigue strength and its application of polymer composites with hysteretic heating». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [140] A.-C. ZHAN, Y.-Q. SUN, et J. TIAN. «In-situ investigation of time-dependent behavior of polymeric composite subject to shear loads». Dans *Proc. Duracosys 99, Brussel, 11-14 july 1999 (abstract)*, 1999.
- [141] C. ZWEBEN. «Simple, design-oriented composite failure criteria incorporating size effects». Dans Anoush POURSAITIP et Ken STREET, éditeurs, *Proc. ICCM-10*, volume 1, pages 675–682, Cambridge, 1995. Woodhead Publishing Limited.

## 8 Article de référence de Liao et al. [73]

### 8.1 Effet des fluides sur les propriétés matérielles

#### 8.1.1 Processus de sorption

De la diffusion de fluides aqueux dans un matériau composite peuvent résulter des changements réversibles ou non de ses constituants.

Le traitement théorique du problème de diffusion remonte aux travaux de Fick. Weitsman a identifié 5 types différents de comportement de sorption de fluide en plus de comportement linéaire fickien.

Le taux de sorption de fluide ainsi que la quantité absorbée sont gouvernés en grande partie par la structure chimique de la résine, du degré de cross-linking, du type de cross-linking, et de la présence de vides.

#### 8.1.2 Endommagement dû au fluide dans les FRP

Pour les fibres de verre, l'endommagement est initié par des réactions physiques et chimiques avec le fluide. L'endommagement dépend donc du type de fluide et de sa concentration ainsi que de la composition des fibres. C'est l'interphase fibre/matrice qui joue ici un rôle important.

#### 8.1.3 Effets des fluides sur les propriétés matérielles et le comportement des FRP

Les propriétés mécaniques sont généralement réduites. D'un autre côté, l'augmentation de la ductilité peut augmenter l'énergie de rupture.

### 8.2 Fluage et relaxation de contrainte pour les FRP

Les polymères ont un comportement viscoélastique sauf à très bas chargement, et montrent une grande variété de fluage et de relaxation de contrainte. Ce comportement non-linéaire apparaît entre 5 et 10 MPa, aussi bien pour les polymères que pour les composites polymères. Toutefois, la charge est sensée être principalement supportée par les fibres, qui se comportent de façon élastique.

La cause principale de fluage des FRP provient du fluage de la matrice, le fluage des fibre de verre étant insignifiant.

#### 8.2.1 Modèles de fluage pour les composites laminés

On considère généralement que les termes de souplesse  $S_{22}$  (associée à la contrainte transverse à l'axe des fibres) et  $S_{66}$  (associée au cisaillement) dépendent du temps car ce sont des propriétés dominées par celles de la matrice. En plus de ces termes, d'autres auteurs considèrent les souplesses  $S_{11}$  (associée à la contrainte dans la direction des fibres) et  $S_{12}$  (associée au cisaillement transverse à la direction des fibres) comme dépendant du temps pour les GFRP.

#### 8.2.2 Effet de l'humidité et de la température sur le fluage

L'humidité et le temps, comme la température et le temps, ont souvent des effets interchangeable dans le comportement en fluage des polymères.

Mais, le niveau d'absorption d'humidité est dépendant de l'historique, et par conséquent, le comportement de sorption sous des cycles de température n'est pas le même que sous humidité et température constantes.

#### 8.2.3 Effets du vieillissement physique sur le fluage

En général, les polymères âgés deviennent plus vitreux, plus cassants, plus rigides avec une contrainte de relaxation inférieure, ainsi qu'un retard croissant au fluage avec le vieillissement croissant, ce qui peut être désirable en un sens.

Les théories extrapolant les effets du vieillissement sur le comportement viscoélastique des polymères et composites ne sont pas encore validées pour les FRP.

#### 8.2.4 Fluage des structures FRP

Les études dans ce domaine sont très récentes. Toutefois, il est suggéré par certains résultats que les données (paramètres) de fluage obtenus par « coupon testing » peuvent être utilisées pour prédire la réponse en fluage à long terme des structures.

#### 8.2.5 Méthode de test accéléré utilisant la superposition temps-température-contrainte

L'hypothèse est que les effets d'un changement de température et/ou de contrainte sur le comportement dépendant du temps d'un matériau sont équivalents à un « déplacement temporel ». Toutefois, la superposition est toujours une approximation et à ce titre, l'extrapolation trop en dehors des conditions directement mesurées est dangereuse.

D'une manière similaire à l'influence de la température et du chargement, les fluides peuvent accélérer le comportement des composites polymères.

#### 8.2.6 Contrainte à rupture et contrainte de corrosion des FRP

La rupture sous charge (fatigue statique, rupture dépendante du temps, ou rupture retardée) est un processus où un matériau est maintenu à un chargement donné jusqu'à rupture. Si l'environnement est corrosif, le processus est appelé contrainte de corrosion.

Le phénomène de rupture en fluage et contrainte de corrosion ne peut être laissé de côté dans la conception de structures portantes utilisant des composites renforcés de fibres.

#### 8.2.7 Contrainte de corrosion des fibres

Comparées aux fibres de verre, les fibres de carbone font preuve d'une excellente résistance à la rupture du fait que la perte de rigidité en fatigue statique est insignifiante sur une longue période de temps.

#### 8.2.8 Contrainte de corrosion de la matrice

Un des rôles de la matrice est de retarder l'attaque des fibres. La post-cuisson de la matrice ne résulte pas en une amélioration de ses performances en terme de contrainte de corrosion. Une matrice plus dure avec une perméabilité faible est donc plus appropriée pour une résistance à la corrosion car elle permet aux microfissures de se produire à un taux d'humidité plus faible.

Les changements de dimension de la matrice dus à la sorption de fluide (gonflement) peuvent avoir des effets de deux sortes sur la contrainte de corrosion :

- d'une part, cela peut causer des contraintes internes conduisant au décollement de l'interphase fibre/matrice qui facilite la progression du fluide ;
- d'autre part, le gonflement peut réduire les contraintes dans les fibres dues à l'historique thermique.

#### 8.2.9 Contrainte de corrosion dans la région d'interphase fibre/matrice

Cette région joue un rôle critique dans la durabilité des composites.

#### 8.2.10 Contrainte de corrosion des FRP

Le mode de rupture pour les tests de contrainte de corrosion est similaire à celui de la déformation de corrosion, bien que le temps à rupture sous charge constante soit inférieur au cas des déformations constantes à cause de la relaxation de charge qui se produit dans ce dernier cas.

Le temps à rupture est fortement dépendant de la déformation initiale.

En général, une majorité d'études suggèrent l'existence d'une valeur limite de la contrainte de corrosion.

## 8.3 Fatigue et fatigue environnementale

### 8.3.1 Mécanismes d'endommagement

La plupart des études portent sur la fatigue en traction puisque les structures composites sont plus efficaces sous ce type de chargement.

D'une manière générale, l'endommagement en fatigue des composites renforcés de fibres est progressif et cumulatif par nature. Son développement est lié aux propriétés des fibres, de la matrice, de l'interphase, de l'orientation des plis, du chargement.

Pour les UD époxyde fibre de verre, le comportement en fatigue, présenté sous la forme de courbes S-N, comporte trois zones :

- Région 1 (jusqu'à  $10^2$  cycles) : microfissures des fibres ;
- Région 2 (jusqu'à  $10^6$  cycles) : microfissures des fibres, mais leur accumulation n'est pas dangereuse pour la vie de la structure ;
- Région 3 : les microfissures de la matrice transversales au chargement se développent et se propagent ;

Pour des composites non UD, de nombreuses études ont montré que l'endommagement en fatigue est initié par décollement entre fibre et matrice près des fibres orientées plus ou moins transversalement par rapport à l'axe du chargement. Le mécanisme dominant conduisant à la rupture est un endommagement de surface des fibres résultant de l'usure par contact.

Pour les composites laminés, l'endommagement comprend trois zones, comme décrit par Talreja et exposé, par exemple, dans l'article de Reifsnider et al. [96].

La perte de rigidité est souvent l'indicateur de l'endommagement. Toutefois, une perte de 10 à 20% de rigidité juste avant la rupture est une chose courante pour les UD GFRP, quelque soit le niveau de chargement.

### 8.3.2 Effets des constituants

Les verres S ont, par exemple, une meilleure tenue en fatigue que les verre E, tout comme les fibres de carbonées qui sont encore supérieures.

La rigidité en fatigue pour un faible nombre de cycles est grandement influencée par le type de résine, ce qui est moins vrai lorsque le nombre de cycles augmente.

Les performances dépendent aussi grandement de l'interphase fibre/matrice. Une finition en surface sur des fibres de verre conduit à une différence notable sur les performances en fatigue. En fait, en utilisant la résistance en cisaillement comme indicateur de la rigidité d'interface, on trouve que les composites ayant une rigidité d'interface élevée tiennent mieux en fatigue.

En torsion, les rigidités des fibres contribuent peu à la résistance à la fatigue et la rigidité de torsion décroît substantiellement au cours des cycles.

### 8.3.3 Comportement entaillé

L'endommagement de la matrice en fatigue est un phénomène universel en cas d'entaillement. De plus, la délamination contribue de façon significative à la ruine de structures entaillées. La rupture des fibres près de l'entaille peut elle-aussi survenir si le chargement est suffisant.

Toutefois, le rapport de la résistance en fatigue sur la résistance ultime (en traction) est la même pour les éprouvettes entaillées ou non.

### 8.3.4 Courbes S-N et limite de fatigue

La courbe SN de beaucoup de CFRP et GFRP peut être décrite (entre  $10^3$  et  $10^6$  cycles) par une équation de la forme :

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_u} = 1 - b \log N$$

où  $\sigma_a$  et  $\sigma_u$  sont la contrainte appliquée et la résistance ultime,  $N$  le nombre de cycle et  $b$  une constante.

La plupart des données disponibles en fatigue montrent une dispersion élevée pour les courbes SN. L'analyse statistique est alors inévitable.

D'après Talreja, il existe une limite de déformation en fatigue des composites, décrite comme la déformation minimale requise pour initier un mécanisme d'endommagement de faible énergie. Il suggère que pour les UD à base d'époxyde, cette limite est autour de 0.6%.

### 8.3.5 Effets de la fréquence sur les tests de fatigue

La tenue en fatigue est peu influencée par la fréquence d'excitation cyclique. Toutefois, elle diminue lorsque la fréquence augmente, et cet effet est d'autant plus prononcé que le niveau de chargement est bas.

### 8.3.6 Fatigue environnementale des FRP

Les performances en fatigue environnementale des FRP sont influencées par les constituants, mais c'est l'interphase fibre/matrice qui joue le rôle fondamental en fatigue environnementale. Un préconditionnement à température élevée dans l'eau ( $> 75^\circ$ ) a toujours un effet négatif. Les performances des CFRP sont toujours meilleurs que celles des GFRP et AFRP, même à température et humidité élevées. La sorption des fluides durant un test de fatigue est plus élevée que sous des conditions de trempage statique, et il y a couplage entre fatigue dynamique et environnementale.

### 8.3.7 Méthodes de prédiction de la durée de vie

Il existe plusieurs type de théories :

- *théories empiriques* : les courbes SN sont utilisées pour caractériser le comportement en fatigue du composite ;
- *théories de dégradation de résistance résiduelle* : elles sont basées sur l'hypothèse qu'un changement de la résistance résiduelle  $\sigma_r$  en fonction du nombre de cycles  $n$  est lié à la charge maximale appliquée  $\sigma_a$ . On a généralement une relation de la forme :

$$\frac{d\sigma_r}{dn} = -\frac{1}{\gamma} f \sigma_a^\gamma \sigma_r^{1-\gamma}$$

où  $\gamma$  et  $f$  sont des paramètres indépendants des contraintes mais qui peuvent dépendre de la température, de l'humidité, de la fréquence. Souvent, on suppose une distribution de Weibull de la résistance des composites.

- *théories de perte de rigidité* : ce sont des généralisations du cas précédent.
- *théories d'endommagement cumulatif* : elle sont basées sur une observation expérimentale soignée et sur une simulation de l'accumulation de l'endommagement du sous-lamina. Il manque toutefois un critère de rupture des laminés sous chargement de fatigue tension-tension pour ces théories.
- *théories d'endommagement continu* : l'endommagement est pris en compte par un paramètre  $D$  sous la forme :

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D}$$

où  $\sigma$  et  $\hat{\sigma}$  sont la contrainte imposée et la contrainte effective après endommagement. L'avantage de cette approche est d'éviter la prise en compte de l'endommagement microstructural parfois difficile à modéliser et mesurer.

## 8.4 Composites hybrides

Un composite hybride est composé de deux (ou plus) sortes de fibres et un (ou plus) type de résine.

Les composites combinant les fibres de carbone et de verre ont une meilleure rigidité en tension, compression, flexion, une meilleure résistance en flexion, et des tenues accrues en fatigue, impact et fatigue environnementale. Par exemple, un des mécanismes améliorant la tenue en fatigue environnementale est que la propagation des fissures dans les plis de verre est arrêtée par les plis de carbone. De même, les performances sont accrues lorsque les plis extérieurs sont des plis de carbone. L'addition de CFRP aux GFRP améliore les performances en fatigue dans les mêmes proportions que la quantité de CFRP ajoutée.

Les composites hybrides sont principalement obtenus en empilant des plis de verre et de carbone. Peu de travail a été réalisé sur des composites hybrides dans lesquels les fibres de verre et de carbone sont mixées dans un même pli.

## 8.5 Remarques

- La dégradation des GFRP à haute température n'est pas bien compris.
- Bien que la conception orientée par la rigidité pour les GFRP soit peu concernée par la contrainte de rupture, le fluage est un aspect fondamental de leur conception.
- Les effets de synergie entre le fluage et les autres types de chargement est un domaine à explorer.
- Peu de données de fatigue sont disponibles pour le domaine  $10^7 - 10^8$  cycles.
- Les composites hybrides doivent être étudiés.
- L'effet d'échelle sur les performance n'est pas clair. En particulier, il n'est toujours pas sûr qu'un tel effet existe.

## 9 Article de référence de Daniel [26]

Nous ne présentons que quelques remarques importantes de cet article.

### 9.1 Comportement des composites à matrice fragile

Bien que les mécanismes de rupture soient connus et compris, leurs amplitudes relatives, séquence exacte, interactions et effets quantitatifs sur le comportement macroscopique global varient d'un cas à l'autre.

L'émission acoustique permet de dire que le processus de charge/décharge n'introduit pas d'endommagement supplémentaire.

### 9.2 Comportement en fatigue des laminés

Le développement de l'endommagement et sa nature dépendent du niveau de la sollicitation cyclique.

Toutefois, dans tous les cas, le premier pas d'endommagement consiste en la rupture transverse de la matrice qui croît généralement avec le nombre de cycle de fatigue.

Le pas suivant consiste principalement en la multiplication de fissures transverses jusqu'à leur niveau de saturation (CDS) puis en l'initiation de fissures longitudinales de la matrice.

La dernière zone voit le développement des fissures longitudinales, des délaminations locales et la rupture des fibres (derniers 20% de la vie en échelle log).

En terme de dégradation de rigidité, la première zone correspond à une décroissance initiale prononcée; la seconde, à une décroissance linéaire relativement faible (plateau); la troisième à une chute brutale avant rupture.

### 9.3 Tests accélérés

Le développement et la validation de modèles de prédiction de la durée de vie demandent un moyen d'obtenir des propriétés à long terme à partir de données expérimentales sur des temps courts.

Le principe de superposition temps-température peut être appliqué avec succès afin de déterminer les propriétés viscoélastiques à long terme des composites à comportement dominé par celui de la matrice.

Dans le cas de tests à amplitude de charge réduite et grande durée de vie, l'endommagement est « dispersé » tout au long de la durée de vie. Dans le cas d charges plus sévères et de durée de vie plus courtes, l'endommagement tend à être localisé dans les premiers temps.

Ceci met en doute la possibilité d'obtenir des prédictions à long terme à partir de données à court terme. Afin de garantir la validité des prédictions sur le comportement à long terme, les modes de rupture doivent être les mêmes pour les tests à court et long termes.



## 10 Références supplémentaires

Les références suivantes sont extraites des e-mails envoyés chaque mois par le service Elsevier ContentsDirect et portant sur les journaux suivants: Composites Science and Technology, Composites Part A, Composites Part B, Polymer Testing, Computational Materials Science, Materials Science and Engineering A, Materials Science and Engineering B, Composite Structures, I. J. of Adhesion and Adhesives, I.J. of Fatigue, I.J. of Plasticity, Materials and Design, Computational and Theoretical Polymer Science, Mechanics of Materials, Progress in Polymer Science. Ce sont des **références que nous ne possédons pas**.

### Références

- [1] K.O. Ronold et A.T. Echtermeyer. «Estimation of fatigue curves for design of composite laminates». *Composites Part A*, 27(6):485–491, 1996.
- [2] A. Ozturk. «The influence of cyclic fatigue damage on the fracture toughness of carbon/carbon composites». *Composites Part A*, 27(8):641–646, 1996.
- [3] G. Marci. «The K eff-concept: A unique and complete description of fatigue crack propagation». *Engineering Fracture Mechanics*, 55(1):95–114, 1996.
- [4] M.A. Magill et F.J. Zwerneman. «Sustained mode I and mode II fatigue crack growth in flat plates». *Engineering Fracture Mechanics*, 55(6):883–899, 1996.
- [5] K. Saanouni et A. Abdul-Latif. «Micromechanical modeling of low cycle fatigue under complex loadings - part I: Theoretical fomulation». *International Journal of Plasticity*, 12(9):1111–1121, 1996.
- [6] A. Abdul-Latif et K. Saanouni. «Micromechanical modeling of low cycle fatigue under complex loadings - part II: Applications». *International Journal of Plasticity*, 12(9):1123–1149, 1996.
- [7] A.S. Hadi et J.N. Ashton. «Measurement and theoretical modelling of the damping properties of a unidirectional glass/epoxy composite». *Composite Structures*, 34(4):381–385, 1996.
- [8] S. Barre, T. Chotard, et M.L. Benzeggagh. «A comparative study of strain rate effects on mechanical properties of glass fiber reinforced thermoset matrix». *Composites Part A*, 27(12):1169–1181, 1996.
- [9] T.G. Eason et O.O. Ochoa. «Modeling progressive damage in composites: a shear deformable element for ABAQUS». *Composite Structures*, 34(2):119–128, 1996.
- [10] J. Lee, B. Harris, D.P. Almond, et F. Hammett. «Fibre-composite fatigue-life determination». *Composites Part A*, 28(1):5–15, 1997.
- [11] M.A. Magill et F.J. Zwerneman. «An analysis of sustained mixed mode fatigue crack growth». *Engineering Fracture Mechanics*, 56(1):9–24, 1997.
- [12] C.F. Qian, P.R. Charles, J.C.M. Li, et J.C.M. Li. «Effect of mode II fatigue loading on mode I fatigue growth». *Engineering Fracture Mechanics*, 56(4):593–602, 1997.
- [13] T. Goswami. «Low cycle fatigue life prediction - a new model». *International Journal of Fatigue*, 19(2):109–115, 1997.
- [14] T.-Y. Kam, S.Y. Tsai, et K.H. Chu. «Fatigue reliability analysis of composite laminates under spectrum stress». *International Journal of Solids and Structures*, 34(12):1441–1461, 1997.
- [15] J. Botsis et D. Zhao. «Fatigue fracture processes in a model composite». *Composites Part A*, 28(7):657–666, 1997.
- [16] M.M. Shokrieh et L.B. Lessard. «Multiaxial fatigue behaviour of unidirectional plies based on uniaxial fatigue experiments: I. Modeling». *International Journal of Fatigue*, 19(3):201–207, 1997.
- [17] M.M. Shokrieh et L.B. Lessart. «Multiaxial fatigue behaviour of unidirectional plies based on uniaxial fatigue experiments: II. Experimental evaluation». *International Journal of Fatigue*, 19(3):209–217, 1997.
- [18] M. Salvia, L. Fiore:Fournier, et L. Vincent. «Flexural fatigue behaviour of UD GFRP experimental approach». *International Journal of Fatigue*, 19(3):253–262, 1997.

- [19] N.E. Dowling et L.P. Pook. «Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue». *International Journal of Fatigue*, 19(3):269–270, 1997.
- [20] X. Diao, L. Ye, et Y.-W. Mai. «Fatigue behaviour of CR/PEEK composite laminates made from com-mingled prepreg - Part I: Experimental studies». *Composites Part A*, 28(8):739–747, 1997.
- [21] X. Diao, L. Ye, et Y.-W. Mai. «Fatigue behaviour of CF/PEEK composite laminates made from com-mingled prepreg - Part II: statistical simulations». *Composites Part A*, 28(8):749–755, 1997.
- [22] P.M. Mariano et G. Augusti. «Some axioms and theorems in damage mechanics and fatigue of materials». *International Journal of Solids and Structures*, 34(25):3337–3350, 1997.
- [23] J. Jahn et W.W. Maennig. «Safe evaluation of fatigue data in the range of finite endurance». *International Journal of Fatigue*, 19(4):335–344, 1997.
- [24] L. Pook. «Fatigue». *International Journal of Fatigue*, 19(4):351–355, 1997.
- [25] H.G. Halverson, W.A. Curtin, et K.L. Reifsnider. «Fatigue life of individual composite specimens based on intrinsic fatigue behavior». *International Journal of Fatigue*, 19(5):369–377, 1997.
- [26] L. Poop et L. Flanagan. «Fatigue». *International Journal of Fatigue*, 19(5):437–441, 1997.
- [27] S. Beretta et P. Clerici. «A novel test rig for narrow band random fatigue under rotating bending». *International Journal of Fatigue*, 19(6):457–460, 1997.
- [28] N. Hong et L. Shaobo. «Biaxial stress fatigue life prediction». *International Journal of Fatigue*, 19(6):517–522, 1997.
- [29] B. Benchekchou et R.G. White. «Acoustic fatigue and damping technology in FRP composites». *Com-posite Structures*, 37(3-4):299–309, 1997.
- [30] N.E. Bedewi et D.N. Kung. «Effect pf fatigue loading on the model properties of *Composite Structures* and its utilization for prediction of residual life». *Composite Structures*, 37(3-4):357–371, 1997.
- [31] A.J. Mcevily, M. Renauld, H. Bao, et R. Shover. «On fatigue fracture surface roughness the K-opening level». *International Journal of Fatigue*, 19(8-9):629–633, 1997.
- [32] W.T. Riddell, A.R. Ingraffea, et P.A. Warwzynek. «Experimental Observations and Numerical Predic-tions of Three-Dimensional Fatigue Crack Propagation». *Engineering Fracture Mechanics*, 58(4):293–310, 1997.
- [33] H.A. Whitworth. «A stiffness degradation model for composite laminates under fatigue loading». *Com-posite Structures*, 40(2):95–101, 1997.
- [34] J.A. Holmberg et L.A. Berglund. «Micromechanisms of delamination failure in RTM U-beams». *Com-posites Part A*, 28(8):709–717, 1997.
- [35] X. Wang et D.D.L. Chung. «Self-monitoring of fatigue damage and dynamic strain in carbon fiber polymer-matrix composite». *Composites Part B*, 29(1):63–73, 1998.
- [36] Y. Qiao et Y. Hong. «An analysis of collective damage for short fatigue cracks based on equilibrium of crack numerical density». *Engineering Fracture Mechanics*, 59(2):151–163, 1998.
- [37] T.Y. Kam, K.H. Chu, et S.Y. Tsai. «Fatigue reliability evaluation for composite laminates via a direct numerical integration technique». *International Journal of Solids and Structures*, 35(13):1411–1423, 1998.
- [38] A. Fatemi et L. Yang. «Cumulative fatigue damage and life prediction theories: A survey of the state of the art for homogeneous materials». *International Journal of Fatigue*, 20(1):9–34, 1998.
- [39] H. Bao et A.J. Mcevily. «On plane stress-plane strain interactions in fatigue crack growth». *International Journal of Fatigue*, 20(6):441–448, 1998.
- [40] J. Bryne. «Book Review: Fatigue under thermal and mechanical loading mechanisms - mechanics and modelling». *International Journal of Fatigue*, 20(6):491–491, 1998.

- [41] S. Keusch, H. Queck, et K. Gliesche. «Influence of glass fibre/epoxy resin interface on static mechanical properties of unidirectional composites and on fatigue performance of cross ply composites». *Composites Part A*, 29(5-6) :701–705, 1998.
- [42] D. Kujawski. «Width effects on the tensile strength and fatigue behavior of angle-ply laminates». *International Journal of Fatigue*, 20(8) :575–580, 1998.
- [43] M.H.R. Jen et C.H. Lee. «Strength and life in thermoplastic composite laminates under static and fatigue loads part 1 : Experiment». *International Journal of Fatigue*, 20(9) :605–615, 1998.
- [44] M.H.R. Jen et C.H. Lee. «Strength and life in thermoplastic composite laminates under static and fatigue loads part 2 : Formulation». *International Journal of Fatigue*, 20(9) :617–629, 1998.
- [45] M. Mahinfalah et R.A. Skordahl. «The effects of hail damage on the fatigue strength of a graphite/epoxy composite laminate». *Composite Structures*, 42(2) :101–106, 1998.
- [46] K.P. Dyer et D.H. Isaac. «Fatigue behaviour of continuous glass fibre reinforced composites». *Composites Part B*, 29(6) :725–733, 1998.
- [47] W.F. Pan, C.Y. Hung, et L.L. Chen. «Fatigue life estimation under multiaxial loadings». *International Journal of Fatigue*, 21(1) :3–10, 1998.
- [48] G. Wacker, A.K. Bledzki, et A. Chate. «Effect of interphase on the transverse Young's modulus of glass/epoxy composites». *Composites Part A*, 29(5-6) :619–626, 1998.
- [49] N.A. St John et J.R. Brown. «Flexural and interlaminar shear properties of glass-reinforced phenolic composites». *Composites Part A*, 29(8) :939–946, 1998.
- [50] R. Jones, J.P.G. Sawyer, et W.K. Chiu. «Studies in the matrix dominated failures of composite joints». *Composite Structures*, 44(1) :1–16, 1999.
- [51] N. Takeda, S. Kobayashi, S. Ogiwara, et A. Kobayashi. «Effects of toughened interlaminar layers on fatigue damage progress in quasi-isotropic CFRP laminates». *International Journal of Fatigue*, 21(3) :235–242, 1999.
- [52] G. Caprino et G. Giorleo. «Fatigue lifetime of glass fabric/epoxy composites». *Composites Part A*, 30(3) :299–304, 1999.
- [53] L.G. Melin et L.E. Asp. «Effects of strain rate on transverse tension properties of a carbon/epoxy composite : studied by Moire photography». *Composites Part A*, 30(3) :305–316, 1999.
- [54] Haoran Chen. «Fracture analysis for multi-material system with an interface crack». *Computational Materials Science*, 12(1) :1–8, 1999.
- [55] F. Jablonski. «Calculation of fatigue limits based on the weakest-link concept». *Computational Materials Science*, 13(1) :61–66, 1999.
- [56] E. James. «An extended BFM model for simulation of copolymers at an interface». *Computational Materials Science*, 10(1) :175–179, 1999.
- [57] J. Kallrath, V. Alstadt, J.P. Schloder, et H.G. Bock. «Analysis of fatigue crack growth behaviour in polymers and their composites based on ordinary differential equations parameter estimation». *Polymer Testing*, 18(1) :11–35, 1999.
- [58] W.B. Krätzig. «Elasto-plastic damage-theories and elasto-plastic fracturing-theories - a comparison». *Computational Materials Science*, 13(1) :117–131, 1999.
- [59] F. Reusch. «FE-analysis of mechanical response of simple structures with random non-uniformity of material properties». *Computational Materials Science*, 11(4) :294–308, 1999.
- [60] R. Rikards. «Numerical-experimental method for the identification of plastic properties of polymers from microhardness tests». *Computational Materials Science*, 11(3) :233–244, 1999.
- [61] J. Zhang et K.P. Herrmann. «Stiffness degradation induced by multilayer intralaminar cracking in composite laminates». *Composites Part A*, 30(5) :683–706, 1999.

- [62] E. Lorentz et S. Andrieux. «A variational formulation for nonlocal damage models». *International Journal of Plasticity*, 15(2) :119–138, 1999.
- [63] N. Ohno et T. Miyake. «Stress relaxation in broken fibers in unidirectional composites: modeling and application to creep rupture analysis». *International Journal of Plasticity*, 15(2) :167–189, 1999.
- [64] H.A. Toutanji. «Durability characteristics of concrete cylinders confined with FRP composite sheets». *Composite Structures*, 44(2-3) :155–161, 1999.
- [65] J.S. Huh et W. Hwang. «Fatigue life prediction of circular notched CFRP laminates». *Composite Structures*, 44(2-3) :163–168, 1999.
- [66] M. Ganapathi, B.P. Patel :Boisse, et O. Polit. «Flexural loss factors of sandwich and laminated composite beams using linear and nonlinear dynamic analysis». *Composites Part B*, 30(3) :245–256, 1999.
- [67] L. Daniel, P.J. Hogg, et P.T. Curtis. «The relative effects of through thickness properties and fibre orientation on energy absorption by continuous fibre composites». *Composites Part B*, 30(3) :257–266, 1999.
- [68] J.H. Chen, E. Schulz, J. Bohse, et G. Hinrichsen. «Effect of fibre content on the interlaminar fracture toughness of unidirectional glass-fibre/polyamide composite». *Composites Part A*, 30(6) :747–755, 1999.
- [69] N.J. Lee et Jyongsik Jang. «The effect of fibre content on the mechanical properties of glass fibre mat/polypropylene composites». *Composites Part A*, 30(6) :815–822, 1999.
- [70] M.H. Beheshty, B. Harris, et T. Adam. «An empirical fatigue-life model for high-performance fibre composites with and without impact damage». *Composites Part A*, 30(8) :971–987, 1999.
- [71] J.F.M. Wiggensraad, X. Zhang,, et GAO Davies. «Impact damage prediction and failure analysis of heavily loaded, blade-stiffened composite wing panels». *Composite Structures*, 45(2) :81–103, 1999.
- [72] S.C. Wooh et C. Wei. «A high-fidelity ultrasonic pulse-echo scheme for detecting delaminations in composite laminates». *Composites Part B*, 30(5) :433–441, 1999.
- [73] M. Metayer, M. Labbe, S. Marais, D. Langevin, C. Chappey, F. Dreux, M. Brainville, et P. Belliard. «Diffusion of water through various polymer films a new high performance method of characterization». *Polymer Testing*, 18(7) :533–549, 1999.
- [74] W.S. Kuo et L.C. Lee. «Elastic and damage behavior of 3-D woven composites incorporating solid rods». *Composites Part A*, 30(10) :1135–1148, 1999.
- [75] C.M. Pistor, M.A. Yardimci, et S.I. Guceri. «On-line consolidation of thermoplastic composites using laser scanning». *Composites Part A*, 30(10) :1149–1157, 1999.
- [76] J.A. Lee, D.P. Almond, et B. Harris. «The use of neural networks for the prediction of fatigue lives of composite materials». *Composites Part A*, 30(10) :1159–1169, 1999.
- [77] P.C. Gope. «Determination of sample size for estimation of fatigue life by using weibull or log-normal distribution». *International Journal of Fatigue*, 21(8) :745–752, 1999.
- [78] A. Plumtree et G.X. Cheng. «A fatigue damage parameter for off-axis unidirectional fibre-reinforced composites». *International Journal of Fatigue*, 21(8) :849–856, 1999.
- [79] L. Massaro et X.X. Zhu. «Physical models of diffusion for polymer solutions, gels and solids». *Progress in Polymer Science*, 24(5) :731–775, 1999.
- [80] E.P. Gellert et DM Turley. «Seawater immersion ageing of glass-fibre reinforced polymer laminates for marine applications». *Composites Part A*, 30(11) :1259–1265, 1999.