

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

Effet de la réparation par patches en composite sur la durée de vie d'une plaque présentant deux fissures latérales.

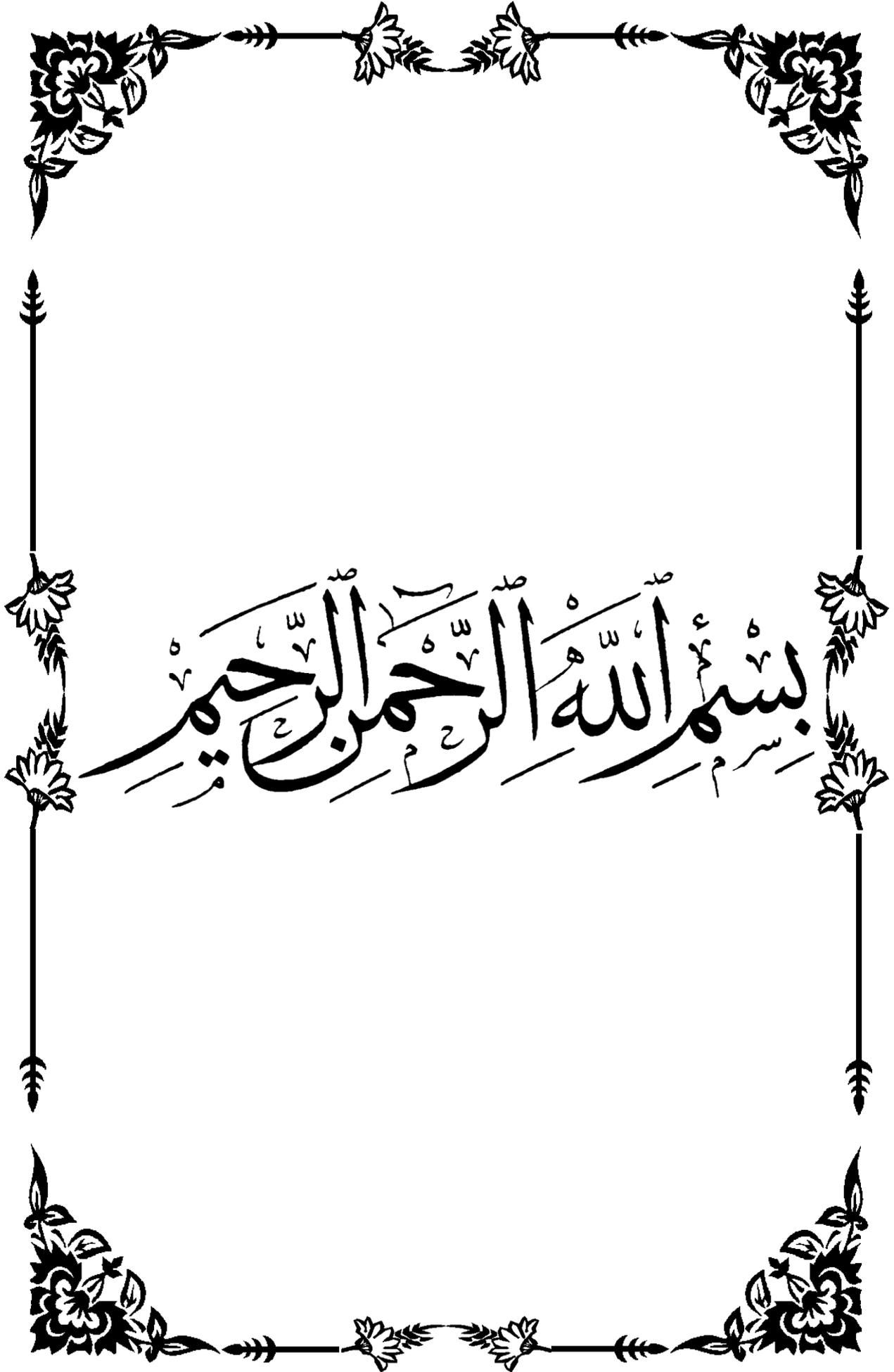
Préparé par :

- SEGHOUANE Mohamed Abdelssamed
- RAHO Modjib

Soutenu publiquement le : 19 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

M.AISSAT Sahraoui	Maître de Conférences "A"	(U I K) TIARET	Président
M. ZAGANE Mohammed El Sallah	Maître de Conférences "A"	(U I K) TIARET	Examineur
M. BALTACH Abdelghani	Maître de Conférences "A"	(U I K) TIARET	Examineur
M. MOULGADA Abdelmadjid	Maître de Conférences "A"	(U I K) TIARET	Encadrant

Année universitaire : 2022– 2023



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu qui m'a doté de la volonté, du courage et surtout de la patience pour produire ce modeste travail et qui m'a aidé à faire face à toutes les difficultés rencontrées lors des ont élaboration.

Je voudrais exprimer mes plus profonds remerciements à mes parents, à mes sœurs, à ma famille, pour leurs encouragements, leur patience et leur amour... Ils sont à l'origine de tout ce que j'ai accompli de bien.

Mes très sincères remerciements à mon directeur de mémoire Dr. Moulgada Abdelmadjid, de m'avoir encadré et dirigé attentivement mes travaux pendant ce travail.

Je tiens à remercier tous les membres du jury qui ont bien voulu consacrer une partie de leur temps précieux à examiner ce travail.

Tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant ces années d'études.

Enfin, plus que tous, Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce travail à Mes parents. Qui m'ont été d'un grand soutien autant matériel que moral et qui n'ont ménagé aucun effort pour me venir en aide. Et mes Sœurs. Qui, eux aussi du plus petit au plus grand m'ont soutenu tout au long du temps réservé à la conception de mon présent mémoire et qui m'ont souhaité bonne chance et bonne réussite. À toute la famille

Je dédie également ce travail

À

*Mon encadreur Dr. Moulgada
Abdelmadjid*

*À tous mes enseignants durant mon cycle d'étude
universitaire.*

À Tout mes cher amis (b.zineb,b koki)

*À Tout mes collègues de promotion de génie
mécanique sans exception*

Sommaire

Sommaire

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Nomenclature

Introduction générale : 1

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Introduction : 2

I.1 Définition : 2

I.2 Classification des matériaux composites : 3

I.2.1 Classification des matériaux composites selon leurs utilisations : 3

I.2.1.1 Les composites à grande diffusion (GD) : 3

I.2.1.2 Les composites à hautes performances (HP) : 3

I.2.2 Classification des matériaux composites selon la forme des constituants : 3

I.2.2.1 Composites à particules : 4

I.2.2.2 Composites à fibres : 4

I.3 Constituants des matériaux composites : 4

I.3.1 Matrices : 4

I.3.1.1 Les matrices organiques : 5

I.3.1.2 Les matrices carbonées : 5

I.3.1.3 Les matrices métalliques : 5

I.3.1.4 Les matrices céramiques : 5

I.3.2 Le renfort : 6

I.3.2.1 Fibres de carbone : 6

I.3.2.2 Fibres de kevlar (d'aramides) : 7

I.3.2.3 Fibres céramiques : 8

I.3.2.4 Les fibres naturelles : 8

I.3.3 Les résines : 9

I.3.3.1 Les divers types de résine : 9

I.3.3.2 Les résines thermodurcissables : 10

I.3.3.3 Les résines polyesters : 10

I.3.3.4 Les résines de condensation : 12

I.3.3.5. Les résines époxydes :	13
I.3.3.6 Les résines thermoplastiques :	14
I.3.3.7 Les résines thermostables :	15
I.4 Charges et additifs d'un matériau composite :	15
I.4.1 Charges d'un matériau composite :	15
I.4.2 Les additifs :	16
I.5 Domaines d'application des matériaux composites :	16
I.5.1 Construction aéronautique :	17
I.5.2 Construction automobile :	17
I.5.3 Secteur du bâtiment :	17
I.5.4 La construction des navires en matériaux composites :	18
I.6 Avantages et inconvénients des matériaux composites :	18
I.7 Mise en œuvre des matériaux composites :	19
I.7.1 Les technologies dites en moule ouvert :	20
I.7.1.1 Moulage au contact :	20
I.7.1.2 Moulage par projection simultanée :	21
I.7.2 Les technologies dites en moule fermé :	22
I.7.2.1 Injection thermodurcissable BC: (Bulk Molding Compound) :	22
I.7.2.2 Compression thermodurcissable SMC:(Sheet Molding Compound) :	22
I.7.2.3 Enroulement filamentaire (ou bobinage):	23
I.8 Architecture du composite :	23
I.8.1. Monocouches :	23
I.8.2. Stratifiés :	24
I.8.3. Structures sandwiches :	25
Conclusion :	25

Chapitre II : Etude détaillée sur la fatigue des matériaux

Introduction :	26
II.1 La fatigue des matériaux :	26
II.1.1 Présentation :	26
II.1.2 Définition d'un phénomène de fatigue :	26
II.1.3 Durée de vie :	27
II.2 Cycle de contrainte en fatigue :	28
II.3 Phase de propagation d'une fissure en fatigue :	29

II.3.1 L'initiation (ou amorçage) de la fissure :.....	29
II.3.2 La propagation stable :	30
II.3.3 La propagation rapide :	30
II.4 Fissuration par fatigue :	30
II.4.1 Courbes de propagation des fissures :.....	30
II.4.2 Expression de la vitesse de fissuration :	31
II.5 Faciès caractéristiques des ruptures par fatigue :	33
II.5.1 Faciès de fatigue à l'examen optique :.....	33
II.5.2 Faciès de fatigue à l'examen microscopique :	33
II.5.2.1 Rupture Brutale (finale) :	33
II.6 Diagramme représentatif :	35
II.6.1 Courbe de Wöhler :	36
II.6.2 Courbes d'équiprobabilité de rupture :	37
II.6.3 Diagramme de Haigh :	38
II.6.4 Diagramme de Goodman :	40
II.6.5 Diagramme de Rôts:	40
II.6.6 Diagramme de Moore-Kommers-Jaspers :	41
II.7 Facteurs influents sur de l'endurance des pièces :.....	41
II.7.1 Facteurs métallurgiques :	42
II.7.2 Facteurs géométriques :	42
II.7.3 Facteurs de surfaces :.....	42
II.7.4 Facteurs de sollicitation :	42
II.7.5 Facteur de l'environnement :	43
II.8 Modes de rupture :	45
II.9 Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture :	45
Conclusion.....	47

Chapitre III : Résultats et interprétations des résultats

III.1. Introduction	48
III.2. Modèle de Forman / Mettu (NASGRO) :.....	49
III.4 Résultats de la simulation.....	51
III.4.1 Plaque non réparée et réparée par patch en composite :.....	51
III.4.2 Effet de la variation du rapport de charge :	54
III.4.2.1 Effet du matériau 2024-T3 pour un rapport de charge fixe R=0.6	61

III.4.3 Effet du matériau 2024 T351 AL :	62
III.4.3.1 Effet du matériau 7075 T73AL :	63
III.4.4 la vitesse de fissuration en fonction de ΔK :	64
Conclusion :	67
Conclusion générale:	68
Références bibliographiques	

Liste des figures

N°	Figures	pages
I.1	Matériau composite	3
I.2	Les différents types de renfort de base	6
I.3	Classification des fibres naturelles	9
I.4	Construction des navires en matériaux composites	19
I.5	Diagramme les plus importants procédés de moulage	21
I.6	Procédé de moulage par contact	21
I.7	Méthode de projection simultanée	22
I.8	Injection thermodurcissable BMC	23
I.9	Compression thermodurcissable SMC)	23
I.10	Enroulement filamentaire (ou bobinage)	24
I.11	Matériau composite UD	24
I.12	Un matériau composite stratifié	25
I.13	Un matériau composite sandwich :.....	26
II.1	Cycle de contrainte de la fatigue :.....	27
II.2	Les différentes formes de cycle de contrainte au cours d'essai de fatigue :.....	29
II.3	Représentation schématique de la propagation d'une fissure	30
II.4	Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycles et le niveau de contrainte	31
II.5	Faciès de fatigue	34
II.6	Exemple de courbe de Wöhler	36
II.7	Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques)	37
II.8	Diagramme de Haigh	38
II.9	Diagramme de Goodman	39

II.10	Diagramme de Rôls	40
II.11	Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers	40
II.12	Types de rupture :.....	45
II.13	Différents cas d'éprouvettes avec fissure de bord	46
III.1	Interface des différents paramètres de l'équation de NASGRO	49
III.2	Présentation de notre modèle	50
III.3	Interface du rapport de charge R=0	51
III.4	Interface des différentes propriétés et les différentes orientations du Bore/Epoxy..	52
III.5	Interface des propriétés et les dimensions de l'adhésif FM-73	52
III.6	Représentation de la plaque réparée par patch en composite	52
III.7	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le composite Bore/Epoxy	53
III.8	Interface des propriétés et le nombre de plies et leurs orientations du patche Graphite/Epoxy	53
III.9	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le composite Graphite/Epoxy.....	54
III.10	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et le graphite/Epoxy	54
III.11	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy.....	55
III.12	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Graphite/Epoxy	55
III.13	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et le graphite/Epoxy.....	56
III.14	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy.....	56
III.15	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Graphite/Epoxy	57
III.16	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et le graphite/Epoxy pour R=0.6	57

III.17	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy.....	58
III.18	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Graphite/Epoxy.....	58
III.19	Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et le graphite/Epoxy pour R=0.7	59
III.20	Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue pour la plaque non réparée	59
III.21	Effet du rapport de charge sur la durée de vie pour la plaque réparée par le patch graphite/époxy	60
III.22	Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue pour la plaque réparée par le patch Bore/Epoxy	60
III.23	Interface des différentes propriétés de l'alliage 2024 T3 AL.....	61
III.24	Effet du matériau 2024-T3AL sur la variation de la durée de vie de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et graphite/Epoxy	61
III.25	Interface des différentes propriétés de l'alliage 2024 T351 AL	62
III.26	Effet du matériau 2024 T351 AL sur la variation de la durée de vie de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et graphite/Epoxy	62
III.27	Interface des différentes propriétés de l'alliage 7075 T73 AL	63
III.28	Effet du matériau 7075 T73 AL sur la variation de la durée de vie de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et graphite/Epoxy.....	63
III.29	Comparaison des différents matériaux pour la plaque sans réparation.....	64
III.30	Comparaison des différents rapports de charge R pour Le matériau 2024 T3 AL sans réparation	64
III.31	Comparaison des différents rapports de charge R pour Le matériau 2024 T3 AL réparée par le graphite/Epoxy.....	65
III.32	Comparaison des différents rapports de charge R pour Le matériau 2024 T3 AL réparée par le Bore/Epoxy	65

Liste des tableaux

N°	Tableau	Pages
I.1	Les caractéristiques des résines polyesters	11
I.2	Les caractéristiques des résines de condensation	12
I.3	Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes.....	13
I.4	Les caractéristiques des résines thermoplastiques	15
II.1	Faciès de rupture en fatigue	35
III.1	Différents paramètres de l'équation de NASGRO pour les différents matériaux utilisés.....	50
III.2	Interface des différentes propriétés de l'alliage d'aluminium 2024 T3.....	51

NOMENCLATURE

H : longueur.....	mm
W : largeur.....	mm
e : l'épaisseur.....	mm
D : diamètre.....	mm
A : fissure sur la largeur.....	mm
C : fissure sur la longueur.....	mm
N : nombre de cycles.....	cycles
R : rapport de charge.....	
σ_{min} : contrainte minimale.....	MPa
σ_{max} : contrainte maximale.....	MPa
U : coefficient de poisson.....	
E : module d'Young.....	MPa
W_p : largeur du patch en composite.....	mm
H_p : longueur du patch en composite.....	mm
E_p : l'épaisseur du patch en composite.....	mm
E_a : l'épaisseur de l'adhésif.....	mm
G : Module de cisaillement.....	MPa
da/dN : L'équation de paris.....	
ΔK : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte.....	MPa.√m

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les contraintes économiques actuelles poussent de plus en plus les industriels à optimiser leurs fabrications pour en réduire les coûts. Dans ce contexte, les bureaux d'études concevant des mécanismes produits en masse ou des systèmes pour lesquels un haut niveau de fiabilité est recherché ne peuvent ignorer le dimensionnement des pièces vis à vis de leur tenue en fatigue, en particulier à grande durée de vie.

Ces dernières années, l'industrie en matériaux composites ont attiré l'attention considérable dans des nombreuses applications dans l'ingénierie.

Ce un type de matériaux composites produit en change ont sans interruption les fractions de volume dans la direction d'épaisseur pour obtenir un profil bien défini, ont suscités beaucoup d'attention récemment en raison des avantages de légèreté, de résistance mécanique et thermique et en plus permettent grâce à leur comportement orthotrope d'adapter les rigidités à l'application souhaitée.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser les effets des paramètres du chargement à amplitude constante sur la propagation des fissures en fatigue, afin d'améliorer la compréhension de ce phénomène et de développer des outils de prédiction pour assurer l'intégrité mécanique des structures.

Notre mémoire est réparti en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une présentation des généralités sur les matériaux composites.
- Le deuxième chapitre porte sur étude détaillée sur la fatigue des matériaux.
- Le troisième chapitre est un ensemble de résultats avec des interprétations adéquates à notre étude de notre modèle.
- En fin une conclusion illustrant tous les résultats de notre recherche, ainsi les perspectives désirées.

Chapitre 1

Généralités sur matériaux

composites

Introduction :

Un matériau composite est défini comme étant un assemblage d'au moins deux constituants non miscibles, mais ayant une forte capacité d'adaptation. Les qualités respectives des constituants associés se complètent pour former un matériau aux performances mécaniques, thermiques, électriques et/ou physico-chimiques améliorées. Le développement des matériaux composites ayant une ou plusieurs de ces propriétés particulières répond généralement à un besoin spécifique. Il est ainsi possible de créer des matériaux hétérogènes permettant par exemple, de réduire la masse d'une pièce, tout en améliorant ses propriétés mécaniques, grâce à l'association d'un renfort fibreux et d'une résine organique. L'adaptabilité de ce matériau en fait un atout incontestable qui explique son utilisation de plus en plus répandue, notamment dans l'industrie du transport (aérien, maritime et ferroviaire), des sports et loisirs, et depuis peu dans l'industrie du bâtiment.

Le matériau composite est constitué d'un renfort, qui contribue aux propriétés mécaniques de la pièce, et d'un liant, appelé matrice. Le rôle de la matrice est d'assurer la cohésion entre les éléments du renfort, mais aussi de transférer les flux d'efforts entre les plis, de garantir la tenue à l'environnement (corrosion, vieillissement humide) et la tenue en température.

Le besoin des constructeurs est devenu nécessaire de penser de découvrir des nouveaux matériaux pour répondre aux besoins tel que plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. En réalité, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles manières de assembler de matériaux. Ainsi ces matériaux composites utilisés depuis l'antiquité, Par exemple les murs des anciennes maisons, et notre étude va donner une vue générale de cette dernière.

I.1 Définition :

Au sens large, le mot "composite" signifie littéralement "constitué de deux ou plusieurs matériaux non miscibles". Les matériaux composites se constituent d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue, appelée matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant [1]

Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres.

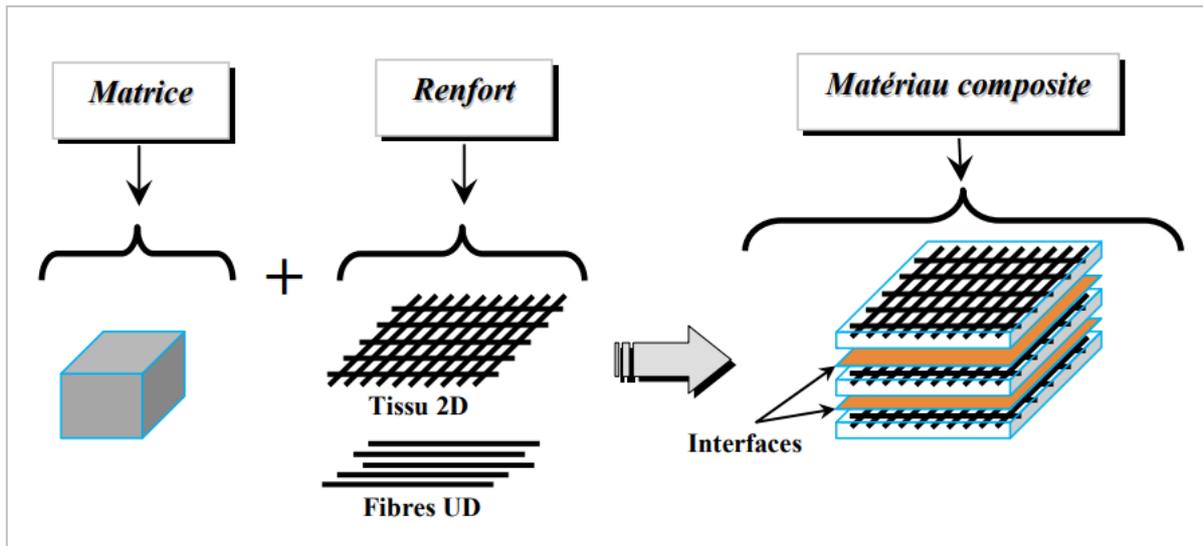


Figure I.1 : Matériau composite [2].

I.2 Classification des matériaux composites :[3]

Nous pouvons classer les matériaux composites selon plusieurs critères

I.2.1 Classification des matériaux composites selon leurs utilisations :

On distingue deux types de composites : les composites de grandes diffusions et les composites hautes performances

I.2.1.1 Les composites à grande diffusion (GD) :

Peu coûteux et largement utilisés dans l'industrie (près de 95% des CMO), souvent utilisées les résines polyesters renforcées les fibres de verre avec un taux de renfort avoisinant 30 % dans 90 % des cas.

I.2.1.2 Les composites à hautes performances (HP) :

Beaucoup plus onéreux, ont un emploi restreint mais d'excellentes propriétés mécaniques, les renforts utilisés sont plutôt des fibres longues, avec un taux de renfort supérieur à 50 % .

I.2.2 Classification des matériaux composites selon la forme des constituants :[4]

La classification des matériaux composites se fait selon la forme et la nature des constituants de ces matériaux. Suivant la forme des constituants, les composites sont classés en deux classes :

I.2.2.1 Composites à particules :

Un matériau composite est dit à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule par opposition aux fibres ne possède pas des dimensions privilégiées. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la teneur à la température, la résistance à l'abrasion ... etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût de matériau, sans en diminuer les caractéristiques

I.2.2.2 Composites à fibres :

Un matériau composite à fibre est un matériau renforcé de fibres (longues, courtes ou coupées) ; l'orientation et l'arrangement de ces fibres permettent de modéliser les propriétés mécaniques de ce composite, ces dernières sont modifiables et modulables selon la variation de la nature des constituants, la proportion des constituants et l'orientation des fibres.

I.2.2.2.1 Composites à fibres longues :

Représenté par un ensemble de fibres continues alignés et immergés dans une matrice qui assure leur cohésion.

I.2.2.2.2 Composites à fibres courtes :

Le renfort se trouve sous forme de fibres discontinues disposée de façon aléatoire non orientée.

I.2.2.3 Composites à renfort tissu :

Un tissu est constitué de fils tissés dans deux directions perpendiculaires, qui sont la direction de chaîne (associée à la direction longitudinale de la couche composite) et la direction de trame (associée à la direction transversale de la couche composite). Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés et par le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame.

I.3 Constituants des matériaux composites :

I.3.1 Matrices :[5]

La matrice incorpore les fibres ou les éléments de renfort, auxquels elle doit adhérer suffisamment bien pour que le transfert de charge soit optimal.

I.3.1.1 Les matrices organiques :

Sont faites de matière plastique. Il convient de distinguer les matrices thermoplastiques, à chaîne linéaire, très répandues, et les polymères thermodurcissables, ou résines, aux propriétés mécaniques plus élevées. Dans cette dernière catégorie se rangent les résines de polyester, les résines époxydes, qui peuvent être utilisées jusque vers 200°C, les résines phénoliques ou les résines polyamides, qui supportent des températures de 400°C.

I.3.1.2 Les matrices carbonées :

Sont fabriquées par décomposition d'une matière organique à haute température. La matière peut être un liquide (imprégnation en phase liquide), ou un hydrocarbure gazeux (décomposition chimique en phase vapeur). Le second procédé est plus rapide que le premier, qui peut durer plusieurs mois pour obtention d'une densification suffisante, mais moins reproductible. Le carbone se dépose en grains sur les fibres, assurant leur bonne liaison. Il est possible par exemple d'obtenir un composite carbone-carbone dont la densité est égale à celle du carbone massif.

I.3.1.3 Les matrices métalliques :

Présentent plusieurs avantages, comme une bonne ductilité, une bonne résistance à certains solvants, une meilleure tenue en température que les résines, une meilleure usinabilité. A l'inverse, elles sont plus difficiles à mettre en œuvre, de densité plus élevée, et des problèmes peuvent apparaître aux interfaces fibres-matrice du fait de la réactivité des matériaux. Comme pour le cas des matrices carbonées, la fabrication du composite peut s'effectuer par imprégnation en phase liquide, décomposition chimique en phase vapeur, mais encore par Co-extrusion ou Co-laminage.

I.3.1.4 Les matrices céramiques :

Sont particulièrement intéressantes en raison de leur caractère réfractaire. Elles sont utilisées dans des pièces qui doivent subir sans dommage de très hautes températures (tuiles de protection thermique, brûleurs). Le point faible des céramiques, à savoir leur très faible résistance à la rupture en traction, est partiellement masquée par l'insertion de fibres dans la matrice. Les techniques de fabrication les plus courantes sont l'imprégnation en phase liquide (SiC-SiC par exemple) ou le dépôt plasma (par exemple dépôt de silicium puis nitruration à l'aide d'un traitement sous azote à 1450°C, qui produit une augmentation de volume et favorise la densification).

I.3.2 Le renfort :

Le renfort définit comme la phase discontinue d'un matériau composite, il contribue à améliorer la résistance mécanique de ce dernier et peut se présenter sous forme de particules. Telle que les fibres de carbone, de verre, ainsi que les fibres végétales (lin, coton, farine de bois, jute, chanvre, grignon d'olive, luffa... etc.) [6].

Le but des renforts dans les matériaux composites est essentiellement d'accroître leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer des propriétés physiques, tels les comportements au feu et à l'abrasion, la tenue en température ou les propriétés électriques. Les caractéristiques recherchées dans les renforts sont une masse volumique faible, une compatibilité avec les matrices et une facilité de mise en œuvre.

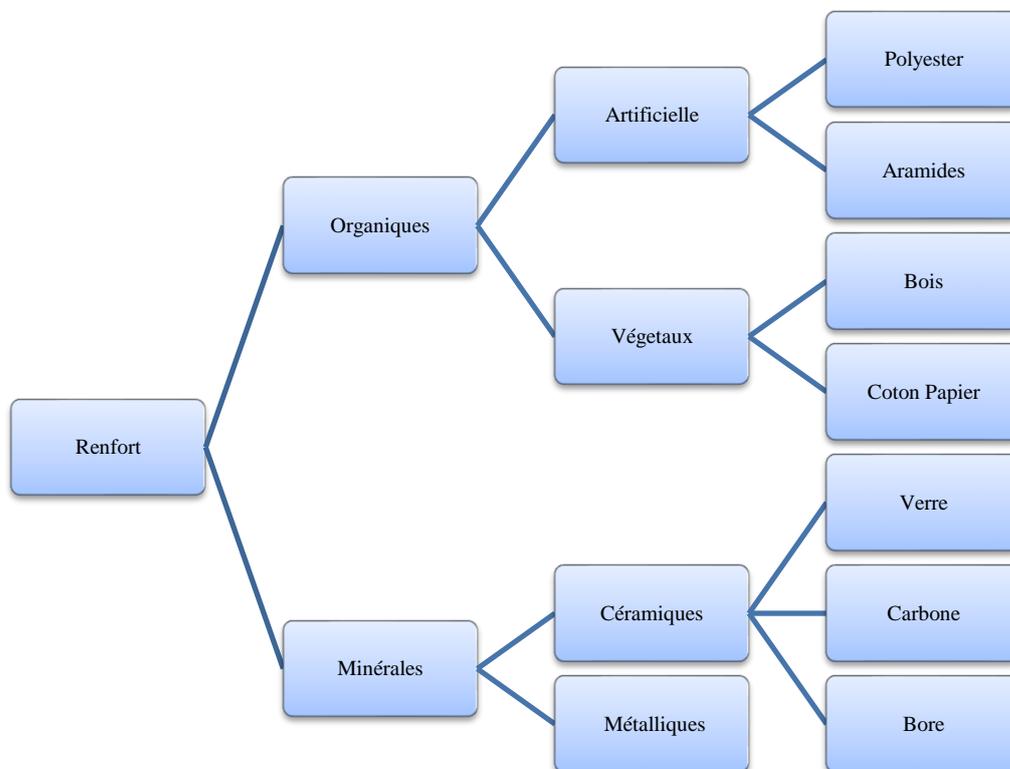


Figure I.2 : Les différents types de renfort de base [7].

Parmi les fibres les plus utilisées dans l'industrie on a :

I.3.2.1 Fibres de carbone :

Le carbone est le sixième du tableau des éléments périodiques. Des fibres de carbone de très hautes performances ont été produites dans les années soixante, quelques années après la fabrication des premières fibres de bore. Les fibres de carbone ont été rapidement acceptées

comme renforcement et adoptées au lieu des fibres de bore pour la plupart des applications, surtout pour les composites à matrice organique. Les fibres de carbone peuvent avoir presque les mêmes propriétés spécifiques que celles des fibres de bore, mais sont moins chères et plus fines.

La production actuelle de fibres de carbone destinées aux renforts de composites s'établit à 3.000 tonnes/an. Elles sont principalement utilisées pour les composites « Hautes Performances » en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs. La production de fibres de carbone repose sur la maîtrise de la production des fibres acryliques, précurseurs traditionnels des fibres de carbone, de formule générique. $(\text{CH}_2\text{-CHCN})_n\text{-}(\text{CH}_2\text{-CXY})_{n'}$ (acrylonitrile + comonomère) par la voie classique du solvant, dite ex-Pan (Figure I.5). On opère par carbonisation de la polyacrylonitrile (PAN) sous atmosphère neutre d'azote dans des fours à pyrolyse de façon à ne conserver que la chaîne carbonée. La technologie développée par Sumitomo (Dialead), dite ex-Bray, fondée sur la distillation du pétrole, donne des fibres de qualité variable ; elle a connu un développement rapide. En dehors des secteurs de l'aéronautique, des sports et loisirs, les fibres de carbone ont largement été utilisées dans les composites « Hautes performances ». [8]

I.3.2.2 Fibres de kevlar (d'aramides) :

La fibre aramide est obtenue à partir des polyamides aromatiques (ou polyaramide) par synthèse chimique à basse température ; ses propriétés diffèrent de celles des polyamides aliphatiques classiques (type PA 6-6, dit « Nylon ») ; on la nomme souvent « Kevlar », qui est la marque de son créateur Dupont de Nemours. Les composites renforcés de fibres d'aramide offrent une bonne stabilité en température (Jusqu'à 200°C en fonction de la matrice) mais souffrent :

- D'une adhérence moyenne entre matrice et fibres,
- D'un prix encore trop élevé : le prix de base est encore de l'ordre de 40 \$/kg et de 160 \$/kg pour la nouvelle fibre Zylon (PBO).

La production mondiale de fibres d'aramide atteint 40.000 tonnes/an, dont seulement 4.000 tonnes sont utilisées dans les composites.

Malgré leur résistance mécanique en traction, elles résistent mal en compression et dans le sens normal à l'axe de la fibre. De ce fait, elles sont noyées dans une matrice où sont mélangées d'autres fibres pour améliorer la tenue au choc d'une structure composite. [8]

I.3.2.3 Fibres céramiques :

Diverses fibres de matériaux réfractaires ou céramiques (carbures, borures, nitrures, etc.)
Peuvent être élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Actuellement, les fibres obtenues par ce procédé, et faisant l'objet d'une production, sont :

- les fibres de bore (B).
- les fibres de bore (B)
- carbure de bore (B₄C).
- les fibres de carbure de silicium (SiC).
- les fibres de bore-carbure de silicium, appelées BorSiC.

Les fibres sont en réalité de gros filaments (diamètre de l'ordre de 100 µm), formés d'une âme (le fil support) en tungstène ou en carbone d'un diamètre d'environ 10 µm, recouverts :

- d'une couche de bore d'épaisseur environ 40 µm (fibres de bore).
- d'une couche de bore d'épaisseur 40 µm et d'une couche de carbure de bore de 4µm d'épaisseur (fibres B-B₄C).
- d'une couche de carbure de silicium (fibres SiC).
- d'une couche de bore et d'une couche de carbure de silicium (fibres BorSiC). [9]

I.3.2.4 Les fibres naturelles :

Les fibres naturelles se présentent comme des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. Dans une expertise beaucoup plus faible elles comportent ainsi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques [10].

I.3.2.4.1 Classification des fibres naturelles :

La plupart des fibres naturelles sont d'origine végétale, animale ou minérale.

Végétale : extraite de plantes, de fruits et d'arbres comme le coton, le lin, le jute, le chanvre, etc.

Animale : extraites de poils d'animaux comme le mouton, la chèvre, le lama, ... etc.

Minérale : on trouve dans la nature des minéraux dont la texture fibreuse s'agit d'une matière toxique, comme l'amiante.[11]

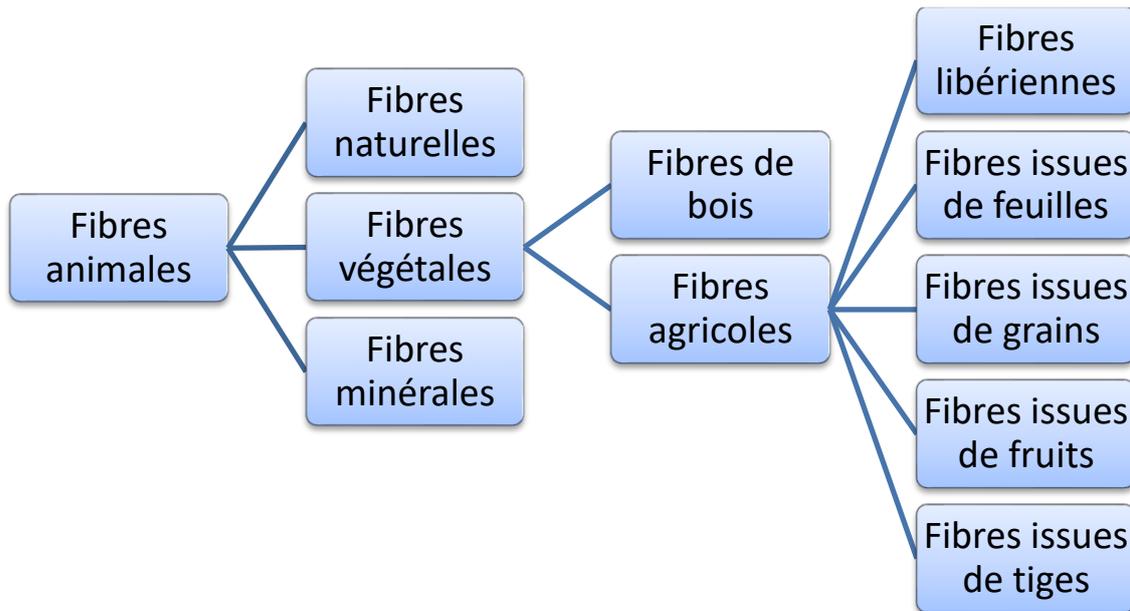


Figure I.3: Classification des fibres naturelles [12].

I.3.3 Les résines [13].

I.3.3.1 Les divers types de résine :

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Les résines doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

Compte tenu de ces contraintes, les résines utilisées sont des polymères, modifiés par différents adjuvants et additifs : agents de démoulage, stabilisants, pigments, etc.

Les résines sont livrées en solution, sous forme de polymères non réticulés en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules prépolymérisées. Sous l'action de la chaleur, des liaisons se développent entre les chaînes du prépolymère pour constituer un polymère réticulé suivant une structure tridimensionnelle. Deux grandes familles de résines polymères existent : les résines thermoplastiques et les résines thermo-durcissables. Ces deux types de résine possèdent la faculté de pouvoir être moulés ou mis en forme, pour donner soit un produit fini, soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée.

Les résines thermoplastiques, dont la fabrication atteint de loin le plus gros tonnage du fait d'un faible coût, possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par

Chauffages et refroidissements successifs. Ces résines peuvent donc être récupérées et facilement recyclées.

Par contre, les résines thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. En effet, après polymérisation par apport de chaleur en présence d'un catalyseur, ces résines conduisent à une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport important d'énergie thermique. Ainsi, les résines thermodurcissables possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermo- mécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques.

Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites. Cependant, l'amélioration des caractéristiques des résines thermoplastiques conduit à une utilisation qui ne cesse de croître.

Deux autres classes de résines à usages spécifiques sont également utilisées, ce sont :

- les résines thermoplastiques qui peuvent résister en service continu à des températures de l'ordre de 200 °C et plus,
- les élastomères dont le renforcement par différentes fibres conduit à diverses applications dans le domaine de l'automobile.

I.3.3.2 Les résines thermodurcissables :

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage :

- les résines polyesters insaturées : polyesters condensés, vinylesters, dérivés allyliques, etc.,
- les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, furaniques (peu utilisées en France), etc.,
- les résines époxydes.

I.3.3.3 Les résines polyesters :

Les résines polyesters insaturées viennent de très loin en tête dans la mise en œuvre des matériaux composites. Leur développement est le résultat :

- d'un faible coût de production,
- de leur diversité offrant de multiples possibilités,
- d'une adaptation à des procédés de fabrication faciles à mettre en œuvre et à automatiser.

D'où un développement industriel sans cesse croissant.

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont du type rigide, et nous retiendrons pour ces résines durcies les caractéristiques suivantes :

Tableau I.1 : les caractéristiques des résines polyesters [13].

Masse Volumique	1200 Kg/m ³
Module d'élasticité en traction	2.8 à 3.5 GPa
Module d'élasticité en flexion	3 à 4.5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	50 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	90 à 130 MPa
Allongement à la rupture en traction	2 à 5 %
Allongement à la rupture en flexion	7 à 9 %
Résistance en compression	90 à 200 MPa
Résistance au cisaillement	10 à 20 MPa
Température de fléchissement sous charge (1.8 MPa)	60 à 100 °c

Parmi les avantages des polyesters insaturés, nous retiendrons :

- une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé,
- une bonne stabilité dimensionnelle,
- une bonne mouillabilité des fibres et des tissus,
- la facilité de mise en œuvre,
- une bonne tenue chimique,
- un faible coût de production,
- une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.) à température

ambiante, etc.

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- une tenue médiocre en température : inférieure à 120 °C en service continu,
- une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs,
- un retrait important de l'ordre de 8 à 10%,
- un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où

la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résines polyesters d'une couche de "gel-coat" de manière à les rendre étanches,

- une dégradation à la lumière par les rayons ultraviolets,
- une inflammabilité.

I.3.3.4 Les résines de condensation :

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les Résines furaniques.

Les résines phénoliques sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite. Les caractéristiques de ces résines sont les suivantes :

Tableau I.2: Les caractéristiques des résines de condensation [13].

Masse Volumique	1200 MPa
Module d'élasticité en flexion	3 MPa
Contrainte à la rupture en traction	40 MPa
Allongement à la rupture en traction	2.5%
Contrainte à la rupture en flexion	90 MPa
Résistance à la compression	250 MPa
Température de fléchissement sous charge	120°C

Parmi les avantages, nous citerons :

- une excellente stabilité dimensionnelle,
- une bonne tenue à la chaleur et au fluage,
- une bonne résistance aux agents chimiques,
- un faible retrait,
- de bonnes caractéristiques mécaniques,
- un faible coût.

1. Parmi les inconvénients, nous noterons :

- une mise en œuvre sous pression, donc à faibles cadences,
- les couleurs foncées des résines,
- une non adaptation à des utilisations alimentaires.
- Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance aux agents chimiques.

2. Les caractéristiques des résines aminoplastes sont voisines de celles des résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter :

- la possibilité d'utilisations alimentaires,
- la possibilité de colorer les résines.

3. Les résines furaniques sont assez peu utilisées en France à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyesters. Parmi leurs avantages:

- un durcissement plus rapide que les résines phénoliques,

— une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs.

Cette dernière caractéristique conduit à utiliser les résines furaniques dans le cas de matériaux devant résister aux produits chimiques : citernes, tuyaux, bacs, etc.

13.3.5. Les résines époxydes :

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters).

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.). Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

Tableau I.3: Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes [13].

Masse Volumique	1100 à 1500 Kg
Module d'élasticité en traction	3 à 5 MPa
Contrainte à la rupture en traction	60 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	100 à 150 MPa
Allongement à la rupture	2 à 5 %
Résistance au cisaillement	30 à 50 MPa
Température de fléchissement sous charge	290 °C

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toute fois, pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de cuisson très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100 °C).

Parmi les avantages des résines époxydes, nous retiendrons :

— de bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters,

— une bonne tenue aux températures élevées : jusqu'à 150 °C à 190 °C en continu;

— une excellente résistance chimique,

— un faible retrait au moulage (de 0,5 à 1%),

— une très bonne mouillabilité des renforts,

— une excellente adhérence aux matériaux métalliques.

Parmi les inconvénients, nous citerons :

- un temps de polymérisation long,
- un coût élevé,
- la nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre,
- une sensibilité à la fissuration.

I.3.3.6 Les résines thermoplastiques :

La famille des résines thermoplastiques (on parle de “plastiques”) est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (outechnopolymères).

Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc. Les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection.

Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide, le polycarbonate, etc. L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication (injection, extrusion). Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. Nous donnons ci-après quelques caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide.

Tableau I.4 les caractéristiques des résines thermoplastiques [13].

	Polypropylène	Polyamide
Masse Volumique(Kg/m ³)	900	1140
Contrainte à la rupture (MPa)	20-35	20-35
Module d'élasticité (GPa)	1.1-1.4	1.2-2.5
Température de fléchissement		
Sous charge (°C)	50-60	65-100

Les divers thermoplastiques peuvent être renforcés par des fibres et font partie alors des matériaux composites. Cependant, dans le domaine des composites, les résines thermoplastiques ont un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à hautes températures de produits solides.

I.3.3.7 Les résines thermostables :

Les résines thermostables se distinguent des autres résines, précédemment considérées, essentiellement par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200°C. Dans la pratique nous retrouvons pour ces résines les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables.

Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines. Parmi les résines thermostables, les résines bismalyamides et polyamides sont les plus utilisées.

Les résines bismalyamides sont des résines dont le réseau est élaboré à des températures de 180 à 200°C. Les procédés de moulage sont identiques à ceux des composites à matrice thermodurcissable de type polyester ou époxyde.

Les résines polyamides sont apparues sur le marché vers 1970. Ce sont des résines à haute résistance thermique, mais de prix très élevé. Ces résines permettent d'obtenir des composites de résistance supérieure, à 250 °C, à la résistance de l'aluminium.

I.4 Charges et additifs d'un matériau composite [14]

En plus de la matrice et du renfort, le matériau composite peut avoir des charges et des additifs.

I.4.1 Charges d'un matériau composite

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui est ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

A l'inverse des matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables ont toujours contenu des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse, dépassant ce pourcentage le composite arrive à saturation. Pour un matériau donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Compatibilité avec la résine de base ;

- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;
- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient.

I.4.2 Les additifs :

Un additif désigne une substance qui est introduite dans un mélange pour apporter une propriété spécifique, ils se trouvent en faible quantité (quelque % et moins) et interviennent comme :

- Adjuvants ;
- Lubrifiants et agents de démoulage ;
- Pigments et colorants ;
- Agents anti-retrait ;
- Agents anti-ultraviolets ;

I.5 Domaines d'application des matériaux composites [15]

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer ! D'où leurs domaines d'application :

- Electricité et électronique ;
- Bâtiment et travaux publics ;
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire) ;
- Santé (instrumentation médicale) ;
- Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf ...) ;
- Construction navale

Ainsi, on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial.

I.5.1 Construction aéronautique :

Le choix des matériaux, tel que l'industrie aéronautique, aérospatiale, automobile, ferroviaire, sports et loisirs, bâtiment, génie civil est toujours un problème complexe où le comportement coût/performance règne en maître.

Les composites de haute performance ont été longtemps confinés dans l'aéronautique civile à des pièces de structure secondaire (habillage intérieur, volets), plus rarement primaire et jamais à la voilure, car il se posait deux difficultés :

- Coûts élevés par rapport à l'aluminium ;
- Risques de délaminage interdisant le vol sur les structures aérodynamiques chargées. Les premières pièces composites ont été introduites sur les satellites à la fin des années 1970. Les matériaux utilisés sont essentiellement des fibres de carbone à haut module d'Young avec résine d'époxyde. Les premiers matériaux composites ont été introduits sur les missiles balistiques dans le milieu des années 1960 par l'utilisation de structures bobinées fibres de verre/résine époxyde, les structures bobinées fibres d'aramide/époxyde ayant été introduites dans la fin des années 1970. Les fibres de carbone pour la réalisation de structures bobinées ont été introduites dans le milieu des années 1970.

L'utilisation des matériaux composites dans les constructions aéronautiques entraîne un gain de poids substantiel. Leur emploi permet, à performances égales, des gains de masse variant de 10% à 20%.

I.5.2 Construction automobile :

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, chez les grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) pour développer des coffres et hayons.

I.5.3 Secteur du bâtiment :

-Hormis le béton, les composites ont relativement peu pénétré le secteur du BTP, notamment du fait :

- d'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels (6 €/kg contre 3 €/kg pour l'acier et 1€/kg pour le bois) ;
- d'une relative méconnaissance des architectes et bureaux d'études vis-à-vis des composites ;

- d'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclabilité, durabilité).

Les qualités des composites (légèreté, résistance au feu, résistance mécanique et chimique), permettent de prévoir un développement prometteur. Les fournisseurs de solutions composite sont développés de nombreux produits : Fenêtres, Portes, Substituts d'ardoise, Renforts de poutres, ...etc.

I.5.4 La construction des navires en matériaux composites :

Les matériaux composites modernes permettent la construction en série de bateaux, et donc l'abaissement des coûts de production. Ce type de construction actuelle est réalisé à partir d'un moule sur lequel on superpose des couches de fibre de verre et de résine. Ils comprennent le ferrociment, le polyester stratifié, les plastiques, les sandwichs. Pour les bateaux de course, on remplace la fibre de verre par de la fibre de carbone, plus résistante



Figure I.4 : Construction des navires en matériaux composites

I.6 Avantages et inconvénients des matériaux composites :

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté ;
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue ;
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants ;
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- les coûts des matières premières et des procédés de fabrication ;

- la gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que :

- la maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène ;

• La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous-entend une très bonne connaissance des constituants mis en place ;

• La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites.

De plus, dans ce dernier point, le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage ou les autres procédés sont très coûteux et fournissent une matière de faible qualité.

Ces quelques inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs et les pouvoirs publics à investir et orienter les recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables [16]

I.7 Mise en œuvre des matériaux composites :

Généralement le choix d'un procédé de moulage se fait en fonction de certains paramètres à savoir :

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
 - Mise en forme à la géométrie de la pièce.
 - Durcissement du système :
- Soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
 - Soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.
- Les procédés les plus importants sont :
 - Moulage par contact
 - Moulage par projection simultanée ;
 - Injection thermodurcissable BMC ;
 - Compression thermodurcissable SMC ;
 - Enroulement filamentaire (ou bobinage).

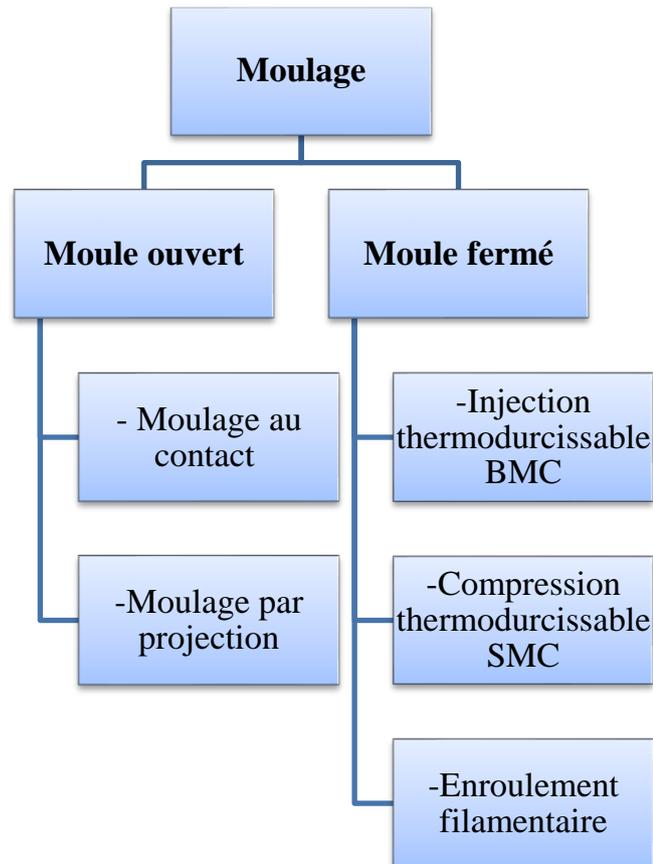


Figure I.5: Diagramme les plus importants procédés de moulage.

I.7.1 Les technologies dites en moule ouvert

I.7.1.1 Moulage au contact :[17]

Le principe consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu) imprégnés manuellement d'une matrice thermodurcissable. Les pièces de formes quelconques peuvent être réalisées avec une cadence très faible.

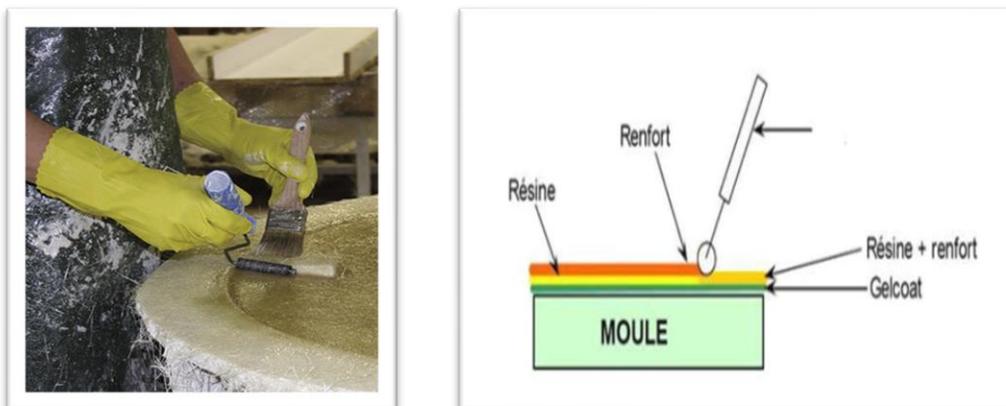


Figure I.6: Procédé de moulage par contact.

I.7.1.2 Moulage par projection simultanée :[17]

Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- un dispositif de coupe
- projection du renfort (roving).
- un ou deux pistolets projetant simultanément la résine.

Les fils coupés et la résine sont projetés sur la surface du moule puis compactés et éboulés à l'aide de rouleaux et d'ébulleurs. La résine pré accélérée est catalysée en continu lors de sa projection. Parmi les avantages associés à ce type de moulage on retrouve :

1. Très larges possibilités de forme et dimensions ;
2. Travail simplifié, suppression de la mise en forme obtenue directement par la projection ;
3. Investissements très modérés ;
4. Moule simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne. En plus des limites rencontrées par le moulage au contact, celui-ci se limite à des propriétés mécaniques moyennes.

En plus des limites rencontrées par le moulage au contact, celui-ci se limite à des propriétés mécaniques moyennes

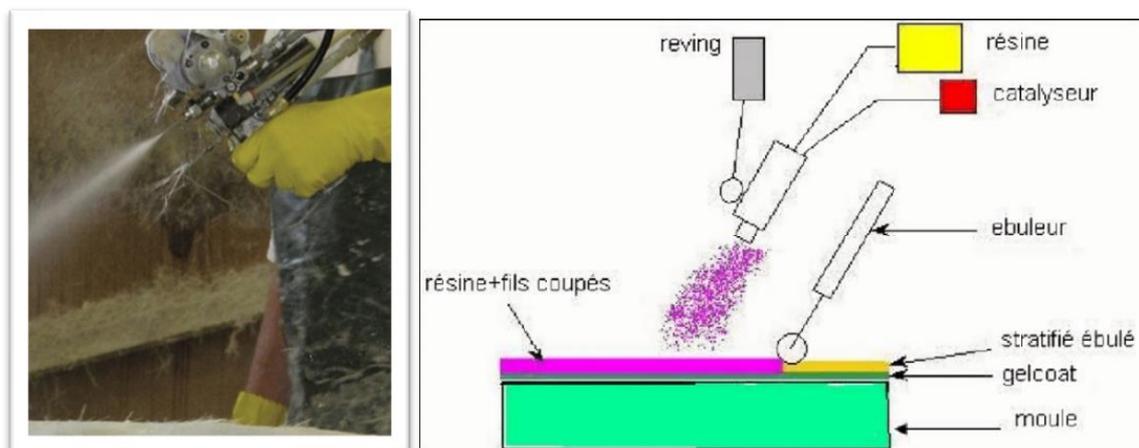


Figure I.7: Méthode de projection simultanée [18].

I.7.2 Les technologies dites en moule fermé :

I.7.2.1 Injection thermodurcissable BC: (Bulk Molding Compound):[19]

Le moulage du compound est réalisé entre moule et contre moule chauffé à température entre 140 à 170°C sous une pression de 50 à 100 bars. Les avantages : réalisation de grandes séries, peu de finition. Le compound : c'est de la résine, de la fibre coupée et de la charge

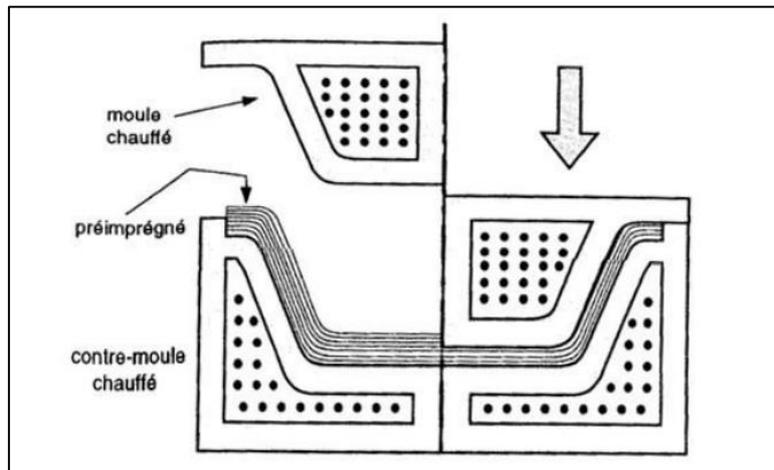


Figure I.8: Injection thermodurcissable BMC

I.7.2.2 Compression thermodurcissable SMC:(Sheet Molding Compound):[19]

Le principe consiste à déposer des feuilles de pré imprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce. Les avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques. Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition.

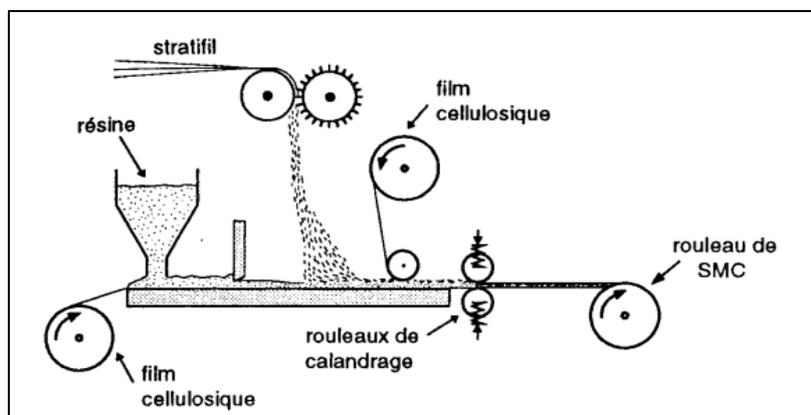


Figure I.9 : Compression thermodurcissable (SMC).

I.7.2.3 Enroulement filamentaire (ou bobinage) : [19]

Technologie pour les HP. Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant. Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses.

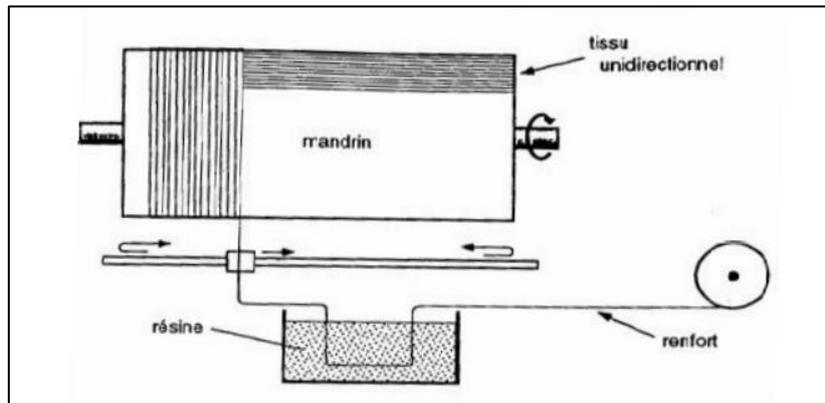


Figure I.10: Enroulement filamentaire (ou bobinage).

I.8 Architecture du composite :

- Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :
- Les monocouches ;
- Les stratifiées ;

Les sandwiches.

I.8.1 Monocouches :

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes

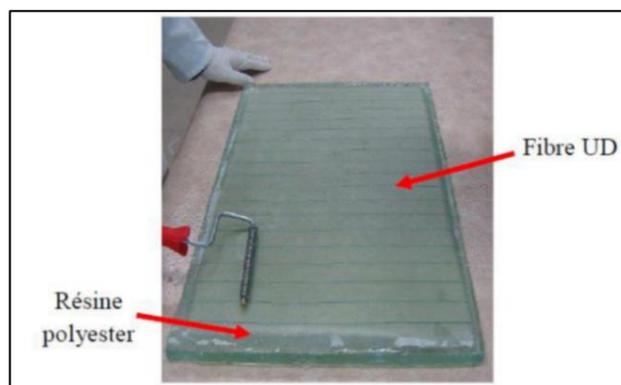


Figure I.11 : Matériau composite UD [20]

I.8.2 Stratifiés :

Le matériau composite stratifié est composé d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.[21].

La figure ci-après représente un matériau composite stratifié.

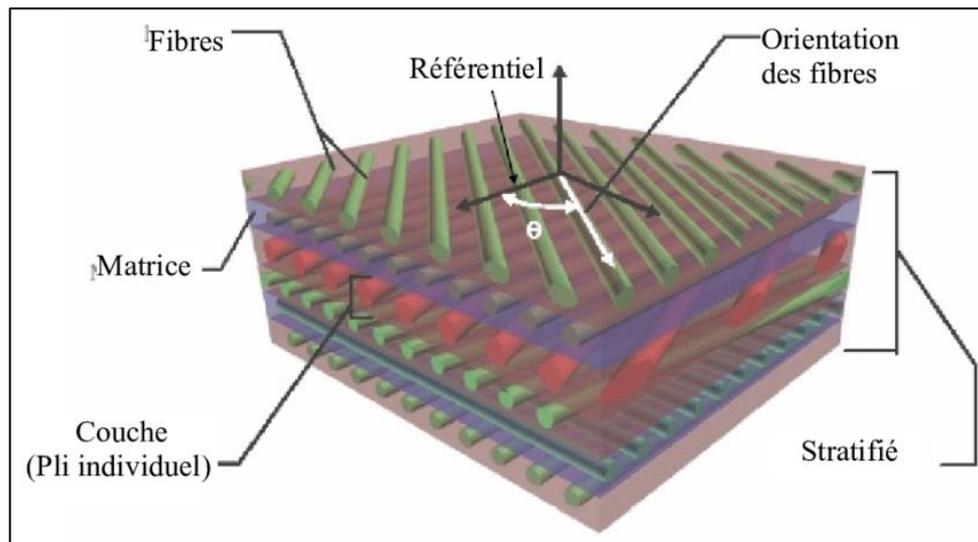


Figure I.12: Un matériau composite stratifié [22]

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations, permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. Un stratifié possédant l'empilement $(0, +45, +90, -45)_2s$ est un stratifié avec quatre couches dans les directions 0° , -45° , 90° et $+45^\circ$, l'orientation 0° coïncidant avec la direction une du repère principal du composite. Ces plans seront répartis symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié.

On pourra avoir des stratifiés de type :

1. Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction $+\theta$ que de couches orientées suivant la direction $-\theta$.
2. Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
3. Orthogonal : stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches 90° .

I.8.3 Structures sandwiches :

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique. La figure ci-après représente un matériau composite sandwich [22].

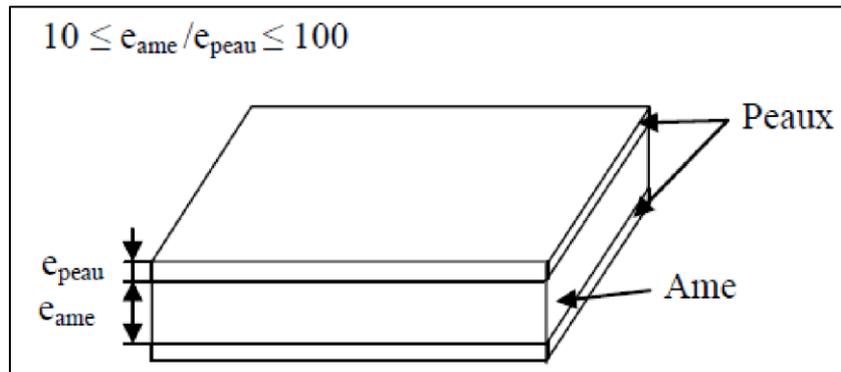


Figure I.13 : Un matériau composite sandwich [23]

Conclusion :

Les composites sont des matériaux idéaux pour la fabrication et la conception de très nombreux d'articles de sport et de loisirs, que les skis et les bâtons, les raquettes de tennis, les cannes à pêche et de hockey, les planches à voiles et leurs mats, les voiliers de plaisance, les arcs, les cadres de vélos, des instruments de musique, au lieu du bois qui ne pouvait plus faire face à la demande créée par la civilisation des loisirs, ou l'aluminium qui ne correspondait plus aux critères modernes de performance et d'endurance.

De nombreux résultats d'études confirment le haut degré d'amortissement des vibrations des skis sur neige qui confère au skieur le confort tout en conservant au produit ses caractéristiques essentielles. De plus, les matériaux composites permettent de concevoir des raquettes légères, très rigides et excellentes en fatigue dynamique qui confèrent au joueur une moindre sollicitation des muscles du bras et de moindre fatigue et plus de confort.

Chapitre 11

Etude détaillée sur la fatigue

des matériaux

Introduction :

Nous définissons les matériaux composites comme les solides utilisés par les constructeurs pour la fabrication d'objets qui constituent le support de leur cadre de vie, mais dans ce processus il y a plusieurs des problèmes qui sont face.

Parmi les plus problèmes connus c'est le phénomène de fatigue. Ce dernier est de plus en plus crucial avec le développement, lié aux progrès technologiques, de structures complexes.

Le procédé global de la rupture dans les composites est souvent considéré comme un processus d'accumulation de différents types d'endommagements.

Ce problème est directement lié aux coûts élevés de fabrication. Alors les constructeurs font de leur mieux pour éviter ce problème. En menant des études approfondies avant de commencer la fabrication,

II.1 La fatigue des matériaux :

II.1.1 Présentation :

Les contraintes économiques actuelles poussent de plus en plus les industriels à optimiser leurs fabrications pour en réduire les coûts. Dans ce contexte, les bureaux d'études concevant des mécanismes produits en masse ou des systèmes pour lesquels un haut niveau de fiabilité est recherché ne peuvent ignorer le dimensionnement des pièces vis à vis de leur tenue en fatigue, en particulier à grande durée de vie [23].

II.1.2 Définition d'un phénomène de fatigue : [24]

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés du matériau suite à l'application de cycles d'efforts, dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces

Les contraintes sont définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle σ_{\max} par la valeur moyenne de la contrainte σ_{\min} par le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (\text{II.1})$$

En générale, la fatigue se produit sans déformation, plastique d'ensemble, mais avec une déformation plastique très localisée, d'abord autour des défauts à fond d'entaille ou en surface, ensuite à l'extrémité de la fissure une fois que celle-ci s'est formée. Il en résulte que la mesure de cette déformation est extrêmement difficile.

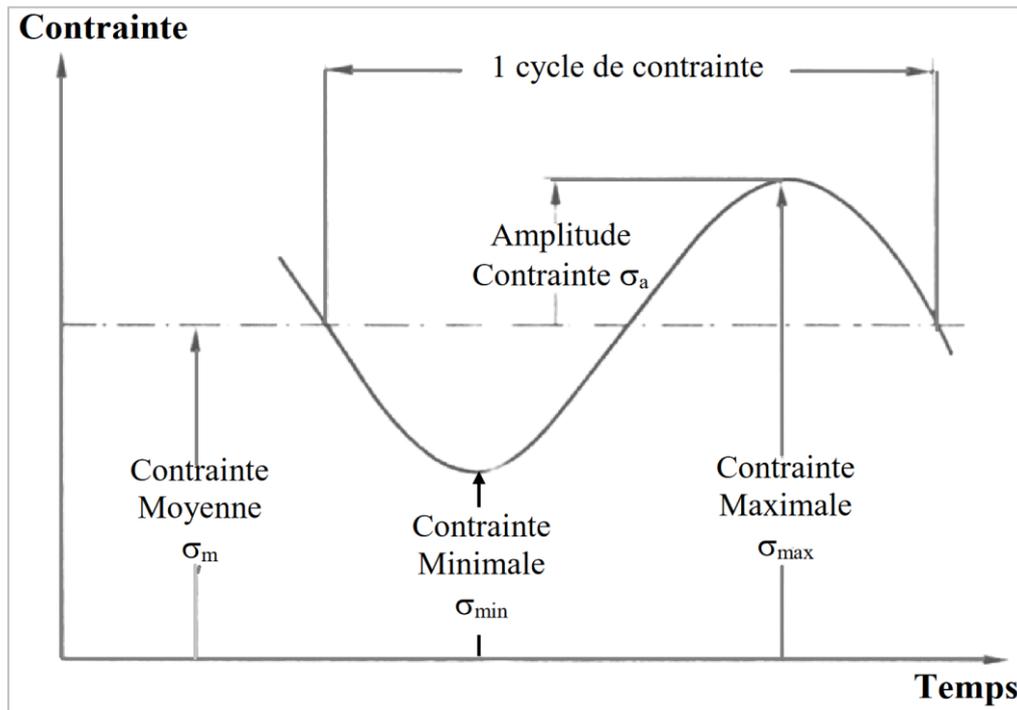


Figure II.1 : Cycle de contrainte de la fatigue [25].

En général, la fatigue a lieu lorsqu'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue et qui en fait le danger, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent bien inférieures à la traction et même à la limite d'élasticité du métal, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois [25].

II.1.3 Durée de vie :

La durée de vie est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture N . L'exécution de n cycles ($n < N$) entraîne un certain endommagement de la pièce qu'il est important de chiffrer car il détermine sa capacité de vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer la pièce pour éviter un accident [25].

II.2 Cycle de contrainte en fatigue : [26]

Les essais de fatigue sont définis par des normes et ils sont de plusieurs types :

- Sollicitations axiales (Traction/Compression)
- Flexion
 - ✓ Flexion ondulée
 - ✓ Flexion alternée
 - ✓ Flexion rotative
- Torsion
 - ✓ Torsion ondulée
 - ✓ Torsion alternative
- Sollicitation combinée
- Fatigue en contact

Dans le cadre de ce travail, nous étudions les sollicitations de types sinusoïdales. Il existe plusieurs termes et symboles pour décrire le cycle de contrainte, la **Figure II.1** représente cycle de contraintes appliquées.

- La contrainte maximale (σ_{max}) : valeur maximale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte.

- La contrainte minimale (σ_{min}) : valeur minimale algébrique de la contrainte au cours d'un cycle de contrainte.

- La contrainte moyenne (σ_m) : qui est définie par la valeur algébrique :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (\text{II.2})$$

- L'amplitude de contrainte (σ_a) : appelée aussi contrainte alternée, définie par la valeur algébrique

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (\text{II.3})$$

- L'étendue de variation de la contrainte :

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (\text{II.4})$$

- Rapport de charge R : c'est le rapport de la contrainte minimale sur la contrainte

$$\text{Maximale } R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Les formes possibles de cycle de contrainte sont présentées dans la **figure II.2**.

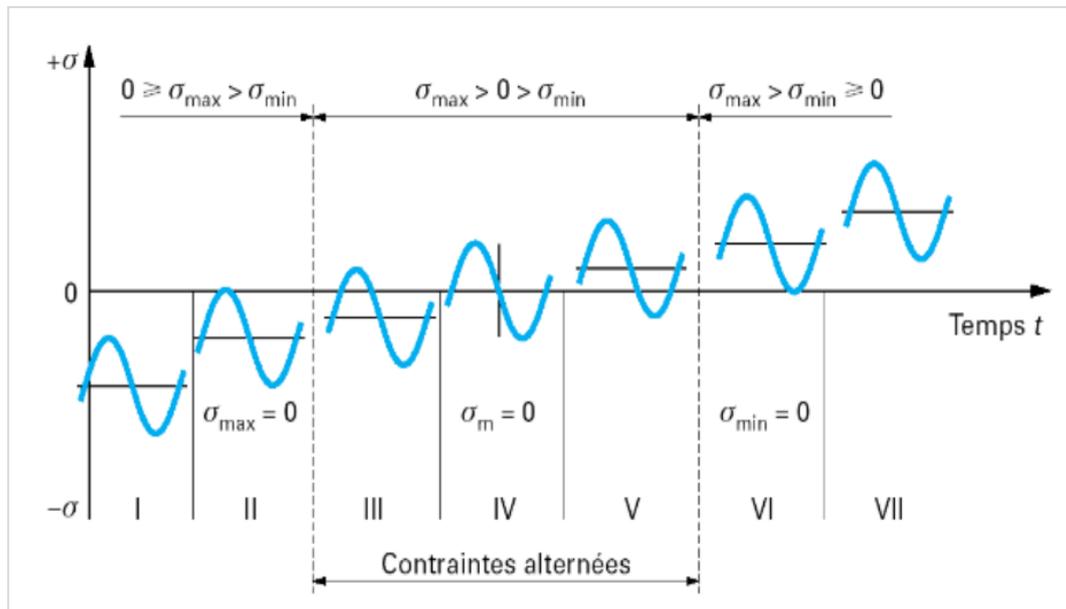


Figure II.2 : différentes formes de cycle de contrainte au cours d'essai de fatigue [27]

- I. Contrainte ondulée de compression : $1 < R\sigma < +\infty$.
- II. Contrainte répétée de compression : $R\sigma \rightarrow +\infty$.
- III. Contrainte alternée dissymétrique : $-\infty < R\sigma < -1$.
- IV. Contrainte purement alternée : $R\sigma = -1$
- V. Contrainte alternée dissymétrique : $-1 < R\sigma < 0$.
- VI. Contrainte répétée de traction : $R\sigma = 0$.
- VII. Contrainte ondulée de traction : $0 < R\sigma < 1$.

II.3 Phase de propagation d'une fissure en fatigue :

L'évolution d'une fissure de fatigue peut être divisée en trois phases [28] :

II.3.1 L'initiation (ou amorçage) de la fissure :(phase A dans la figure 1.11)

Elle est l'influencée principalement par la différence de contraintes, $\Delta\sigma$ par le facteur concentration des contraintes (facteur « normalisant » la géométrie du détail), par la microstructure du matériau, par la contrainte moyenne et par l'environnement, on admet que la phase d'initiation est terminée lorsque la fissure atteint une certaine dimension, souvent prise entre 0,1 mm et 0,25 mm. Pendant longtemps la dimension observable de la fissure minimale a été de 0,1mm.

II.3.2 La propagation stable : (phase B dans la figure II.3)

Elle est influencée principalement par la différence de contraintes $\Delta\sigma$, par la géométrie σ du détail (pointe de la fissure), et par la géométrie de la fissure. Alors que la microstructure du matériau la contrainte moyenne et l'environnement ont une influence moindre

II.3.3 La propagation rapide : (phase C dans la figure II.3)

Qui conduit à la rupture de l'élément. Le nombre de cycles est ici très faible et la propagation très rapide. Mentionnons encore que la rupture fragile peut intervenir à n'importe quel moment, alors qu'une rupture ductile a lieu après la phase de propagation rapide. Ce qui ne peut pas être décrite par la mécanique de la rupture linéaire élastique traditionnelle

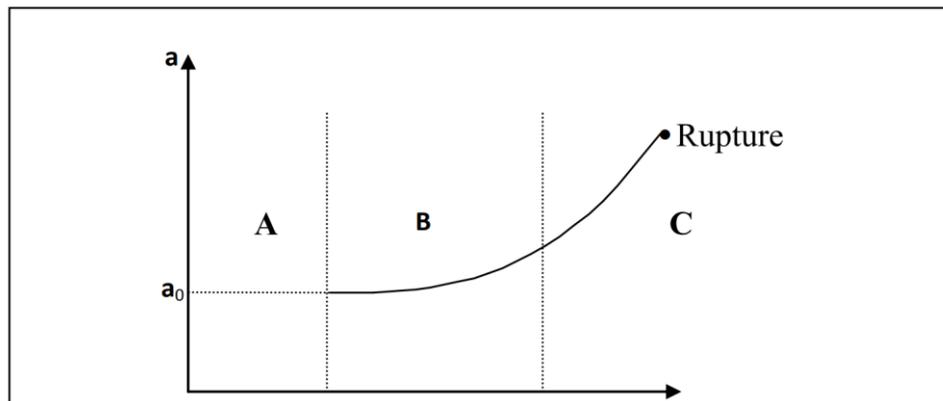


Figure II.3 : Représentation schématique de la propagation d'une fissure [28].

II.4 Fissuration par fatigue :

II.4.1 Courbes de propagation des fissures :

L'interprétation de la courbe de dommage, repose sur l'existence d'une taille critique de la fissure, qui dépend de la contrainte maximale des cycles [29], et au-dessus de laquelle leur propagation serait irréversible (endommagement) et conduirait à la rupture. On a donc cherché à suivre la progression des fissures au cours de la fatigue.

On peut reporter les longueurs mesurées en fonction du nombre de cycle sous les différents niveaux de fissure (**Figure II.4**). Ces courbes indiquent que l'importance relative des différentes étapes, amorçage et propagation, dépend de la contrainte maximale

On peut également reporter la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle et tracer la courbe de fissuration de l'éprouvette ou des pièces considérées, soumise à la contrainte périodique maximales.

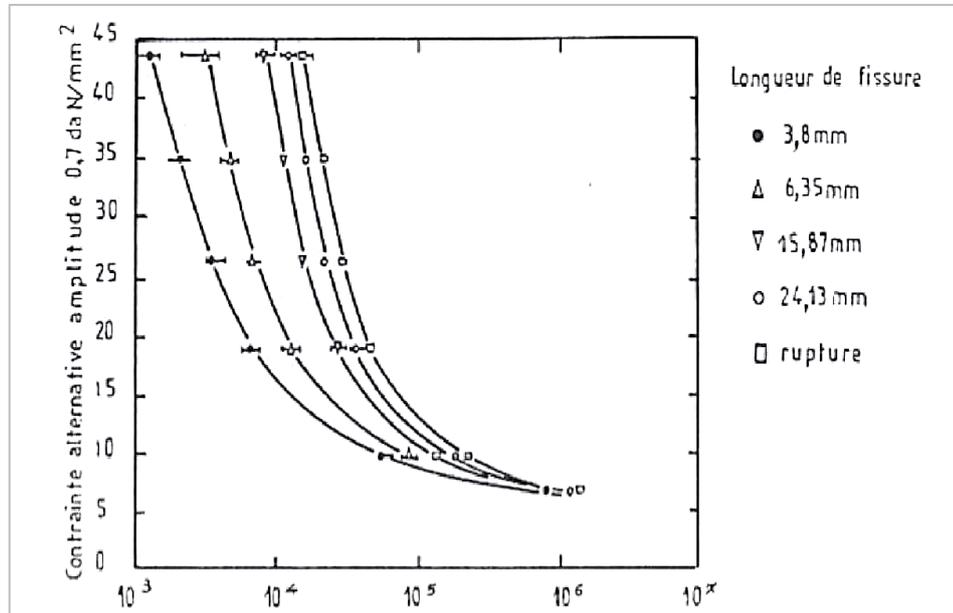


Figure II.4 : Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycles et le niveau de contrainte [29]

Les différents stades observés correspondent à :

- Un stade de croissance rapide des fissures, qui atteignent des longueurs de l'ordre de quelques microns en surface après quelques millions de cycles.
- Un stade de progression plus lente de la fissure en surface, dont la durée dépend de l'amplitude de la contrainte.
- Un stade de progression rapide, qui précède de peu la rupture finale brutale

II.4.2 Expression de la vitesse de fissuration :

A partir de la mesure des longueurs de fissures observées sur des éprouvettes en cours de fatigue, différentes formules ont été proposées pour la vitesse de propagation. Si a est la longueur de la fissure, N le nombre de cycle et s la contrainte maximale des cycles, on peut citer, chronologiquement :

1) Formule de Frost et Dugdale :

$$\frac{da}{dN} = A\sigma_a^3 \quad (\text{II.4})$$

Où : A est une contrainte qui dépend du matériau et de la contrainte moyenne. Cette formule est valable pour les fissures petites par rapport aux dimensions de l'éprouvette.

2) Formule de McEvelly et Illg :

$$\frac{da}{dN} = f(K_t, \sigma_n) \quad (\text{II.5})$$

Où : K_t est le facteur de concentration de contrainte élastique théorique de Neuber et σ_n la contrainte normale dans la section fissurée.

3) Dans le domaine de la fatigue plastique oligocyclique, Boettner, Laird et McEvelly ont proposé la formule :

$$\frac{da}{dN} = a(\epsilon_t, \sqrt{a})^n \quad (\text{II.6})$$

Où : A est une contrainte, et la déformation plastique totale par cycle et n'a été trouvé voisin de quelque soit le matériau.

4) La mécanique de la rupture permet d'étudier quantitativement les stades de propagation lente et de propagation brutale des fissures de fatigue mentionnées à l'occasion des courbes de fissuration. On a pu, en particulier, traiter de cette façon de nombreux cas pratiques où l'on a observé des fissurations préexistantes dans une structure.

Expérimentalement, de nombreux auteurs ont trouvé que la vitesse de fissuration pouvait s'écrire selon la relation de Paris :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (\text{II.7})$$

Où : ΔK est l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte K et C et m des constantes qui dépendent du matériau [30].

II.5 Faciès caractéristiques des ruptures par fatigue :

L'examen attentif de toute rupture de pièces est une opération d'une grande importance dans le développement d'un produit. Afin de montrer les causes de rupture, donc envisager les remèdes à appliquer pour que cet état de fait soit supprimé [31]

II.5.1 Faciès de fatigue à l'examen optique :

Sur la section de la rupture, on observe à l'œil nu et à la loupe, un nombre de caractéristiques ou est cette figure.

➤ Présence de deux zones distinctes d'importance variable selon l'amplitude des contraintes et la nature du matériau :

1- La rupture brutale avec faciès à grains ou à nerfs.

2- La fissure de surface avec une surface lisse.

➤ L'examen permet de déterminer aussi la nature des sollicitations (**Tableau II.1**).

II.5.2 Faciès de fatigue à l'examen microscopique :

Le microscope électronique à balayage (MEB) présente l'avantage de permettre un examen direct avec une gamme large et continue de grossissements et sous des orientations qui peuvent varier dans de larges limites, l'observation est complètement différente de celle observée optiquement :

II.5.2.1 Rupture Brutale (finale) :

II.5.2.1.1 Fragile :

Montre les clivages trans-granulaires lisses avec réamorçages par rivières lors des passages des joints de grains ou des clivages à languettes suivant des plans cristallographiques proches à forte densité, le sens de propagation de la rupture est indiqué par le sens des rivières.

II.5.2.1.2 Ductile :

Montre des cupules (creux amorcés sur des précipitations) les deux faces de la rupture présentant ces cupules qui se produisent après une déformation plastique importante, lorsque les cupules ne sont pas équiaxes (ce qui généralement le cas sauf en traction pure), le sens de propagation est donné par le grand axe des cupules. (Figure II.5)

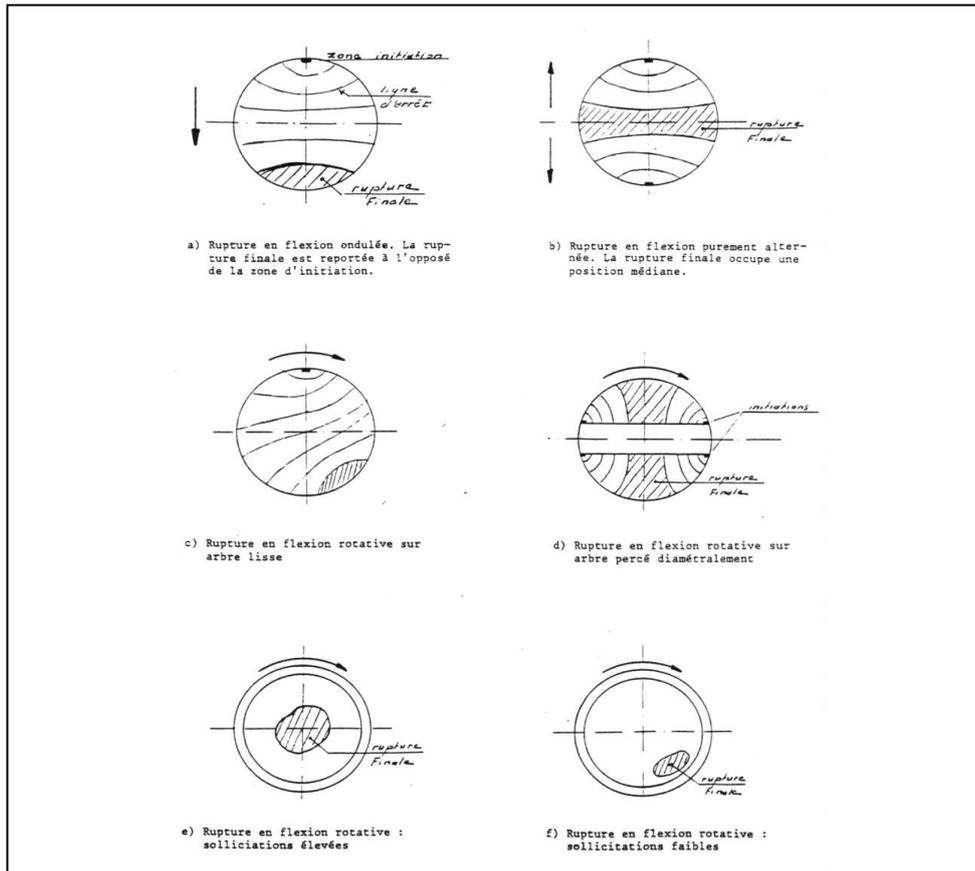


Figure II.5: Faciès de fatigue [32].

Tableau II.1: Faciès de rupture en fatigue [32]

Type de sollicitation	Contrainte nom. élevée			Contrainte nom. Faible		
	Concentration de contrainte					
	Nulle	Faible	élevée	Nulle	Faible	elevée
Traction-traction Ou Traction-compression						
Flexion plane Ondulée						
Flexion plane Alternée						
Flexion rotative						
Torsion						

II.6 Diagramme représentatif :

Pour présenter de manière facilement utilisable les résultats d’essais de fatigue, il existe un assez grand nombre de méthodes ou arrangement possibles, des paramètres utilisés en fatigue :

- Temps : sous la forme d’un nombre de cycles N ;
- Contraintes :

- statiques (R_e, R_m) ;

- dynamiques ($\sigma_m, \sigma_m, \sigma_a, \sigma_{max}, \sigma_{min}, \sigma_D$) ;

Parmi toutes les méthodes existantes, nous développerons les plus utilisées et les plus riches en renseignements [32]

II.6.1 Courbe de Wöhler :[33]

Cette courbe est appelée courbe S-N (Stress-number of cycles) dans les pays anglosaxons.

Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule qui permet de visualiser la tenue de la pièce où des matériaux dans tout le domaine de la fatigue.

Chaque pièce est soumise à des cycles d'efforts périodiques, NR est le nombre de cycles

Au bout duquel la rupture se produit. Pour plus de commodité, ce nombre NR est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique et la contrainte est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire.

Pour tracer une telle courbe, on réalise généralement des essais à contrainte moyenne constante et on fait varier l'amplitude du cycle de contrainte appliquée.

Ainsi, à chaque pièce essayée correspond donc un point du plan (T, N) et à partir d'un certain nombre d'essais à contraintes généralement décroissantes, on peut tracer une courbe qui a l'allure donnée sur la **Figure II.6**

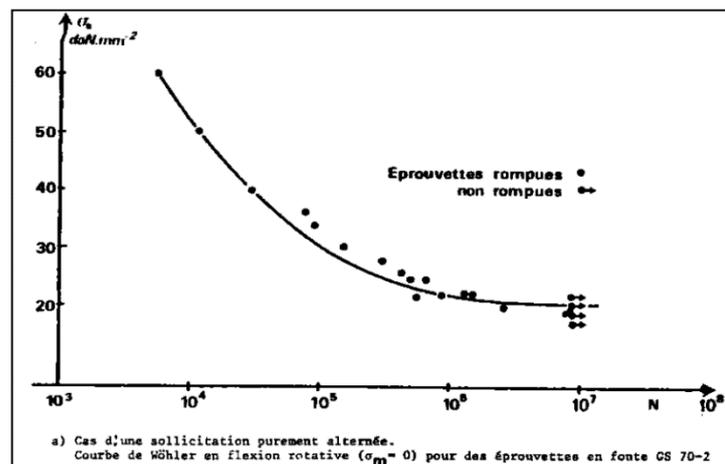


Figure II.6: Exemple de courbe de Wöhler [33].

Dans le cas des aciers, la courbe de Wöhler présente en général une asymptote horizontale correspondant à une contrainte dont la valeur est, par définition, la limite de fatigue.

En revanche, pour certains alliages d'aluminium, de cuivre, ou titane et dans le cas d'essais de fatigue sous corrosion, la courbe de Wöhler ne prend pas d'asymptote pour les grands nombres de cycles et il n'est pas sûr que la limite de fatigue existe. Une courbe de Wöhler comprend trois domaines :

Le domaine de la fatigue oligocyclique où les ruptures, précédées d'une déformation plastique globale notable, surviennent après un petit nombre de cycles ($NR < 10^5$) ;

Le domaine d'endurance limitée ($NR > 10^5$ cycles) où les ruptures surviennent systématiquement après un nombre limité de cycles croissant, avec la décroissance de la contrainte.

Entre ces deux derniers domaines, la courbe de Wöhler présente un coude plus ou moins prononcé, compris entre 10^6 et 10^7 cycles. Pour certains alliages d'aluminium, ce coude est beaucoup moins net

II.6.2 Courbes d'équiprobabilité de rupture [34].

(Courbes (P.S.N) dans les pays anglo-saxon)

La courbe de Wöhler dont nous venons de parler étant une courbe moyenne, son utilisation peut s'avérer délicate du fait que les valeurs relevées indiquent seulement que la pièce a « autant de chances de se rompre que de ne pas se rompre ».

Les courbes d'équiprobabilité de rupture, dont la courbe de Wöhler constitue un cas particulier ($p=50\%$ de rupture) sont alors tracées en sous trayant à la valeur moyenne une certaine valeur fonction de la probabilité de rupture recherchée

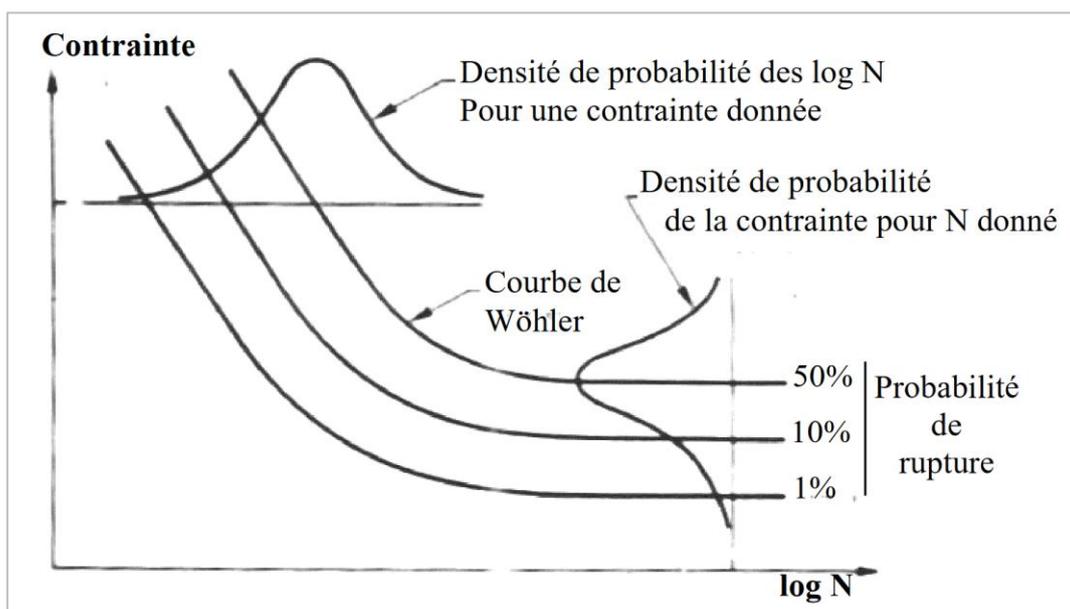


Figure II.7 : Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques) [34]

II.6.3 Diagramme de Haigh : [35].

Ce diagramme représente la variation de l'amplitude de la contrainte σ_a en fonction de la contrainte moyenne σ_m un nombre de cycles à rupture.

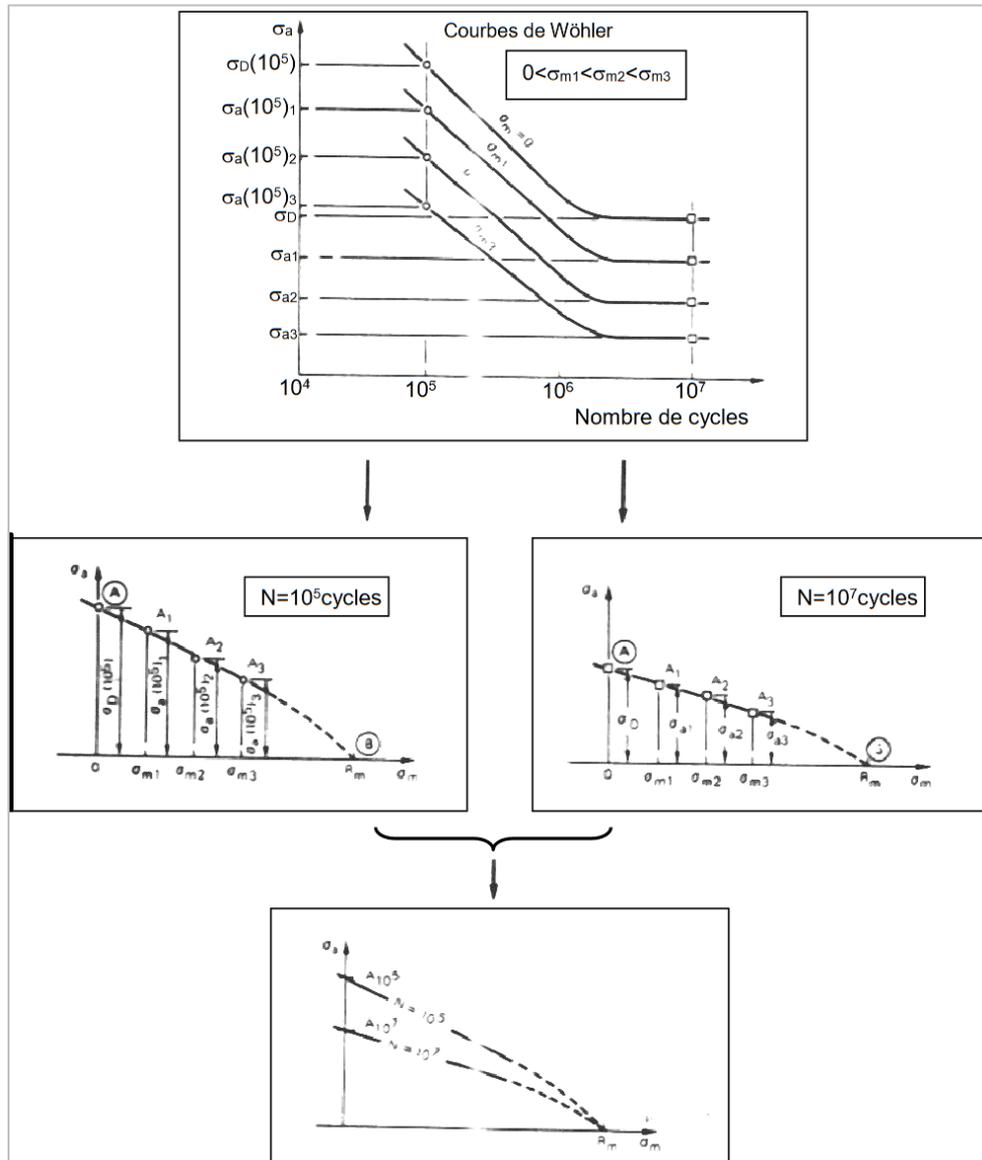


Figure II.8: Diagramme de Haigh[35]

II.6.5 Diagramme de Rôts : [35]

Essentiellement utilisé dans les pays anglo-saxon ce diagramme représente la variation de la contrainte maximale σ_{max} en fonction de la contrainte minimale σ_{min} **Figure II.10**

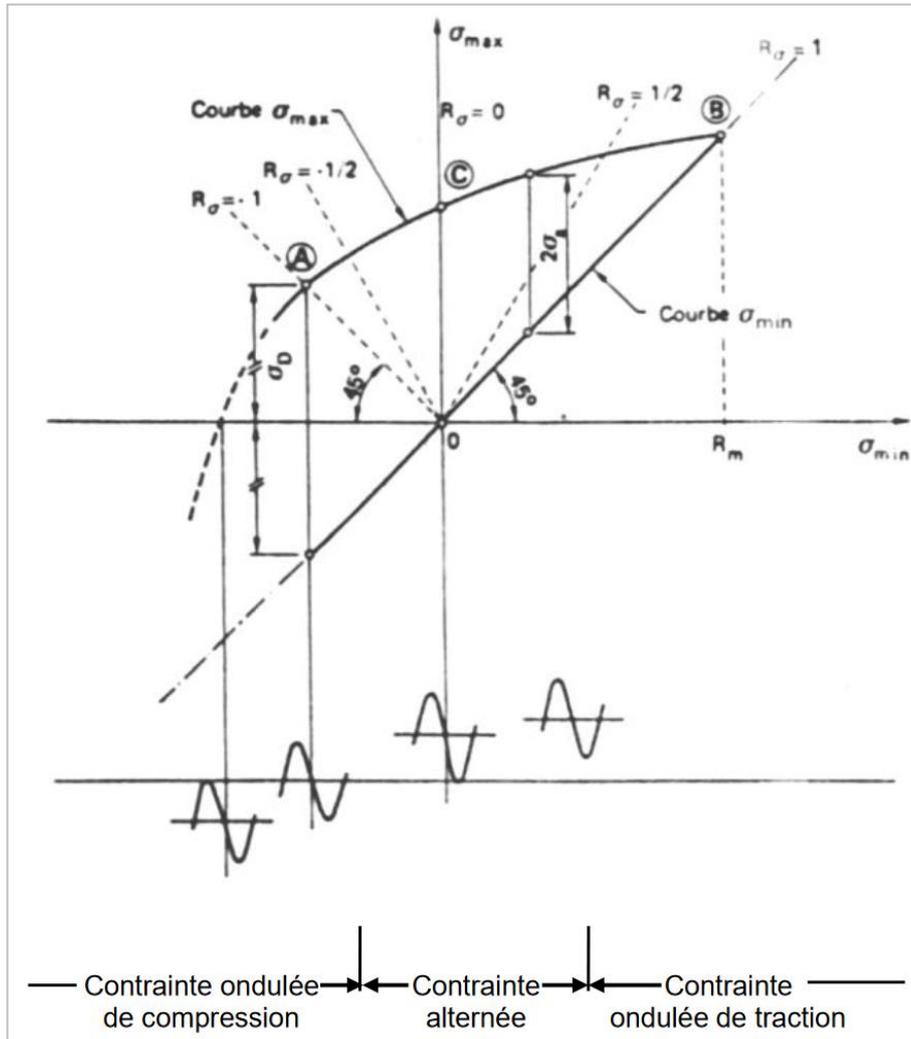


Figure II.10 : Diagramme de Rôts

II.6.6 Diagramme de Moore-Kommers-Jaspers : [35]

Relativement peu connu, essentiellement utilisé dans les pays germaniques, ce diagramme présente la variation de la contrainte maximale σ_{max} en fonction du rapport de charges R .

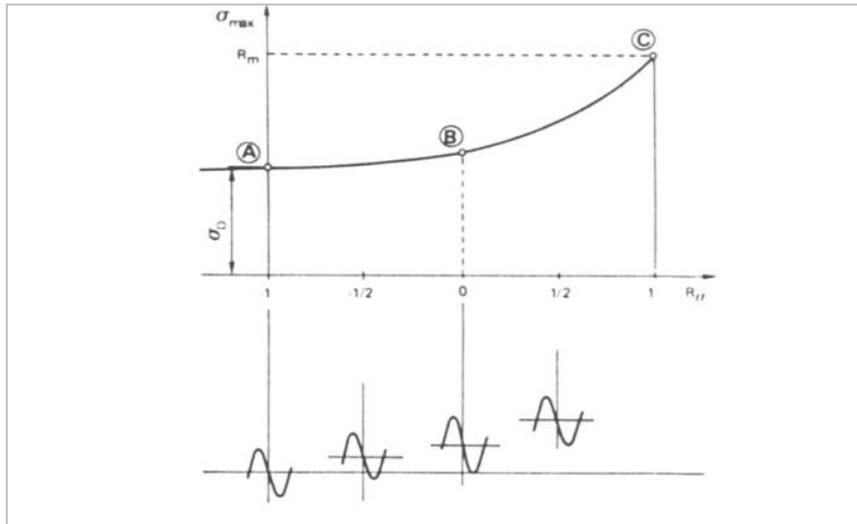


Figure II.11 : Diagramme de Moore- Kommers- Jaspers [35].

II.7 Facteurs influents sur de l'endurance des pièces :

On peut dire, pour simplifier, que l'endurance d'une pièce ou d'un élément de structure est la résultante de plusieurs phénomènes compétitifs :

D'une part, l'endommagement progressif du métal par suite de l'existence des concentrations des contraintes, qui entraîne des déformations plastiques.

D'autre part, l'adaptation, c'est à dire la modification du régime des contraintes internes par relaxation consécutive à la déformation plastique localisée. Il y a un grand nombre de paramètres susceptibles d'affecter la résistance à la fatigue et donc de modifier la courbe S-N. Ces facteurs peuvent être classés comme suit :

Facteurs d'ordre métallurgiques ;

- Facteurs géométriques (effet d'échelle, forme, ...) ;
- Facteurs dépendant des conditions de surface ;
- Facteurs dépendants des conditions de sollicitation (nature des charges : traction/compression, flexion alternée, flexion rotative, torsion alternée, ...) ;
- Facteurs d'environnement (température, corrosion, ...)

II.7.1 Facteurs métallurgiques :

On peut classer dans cette catégorie tous les facteurs liés à la nature du métal qui constitue la pièce (composition chimique et structure cristallographique), à son élaboration et à sa mise en forme (inclusions, défauts...), ainsi qu'aux traitements thermiques (structure métallographique et caractéristiques mécaniques) subis par les pièces [36].

II.7.2 Facteurs géométriques :

L'influence de ces facteurs intervient par la dimension des pièces (effet d'échelle) et surtout par leurs formes (effet d'entaille et coefficient de concentration des contraintes) [36].

II.7.3 Facteurs de surfaces :

Les fissures de fatigue prennent le plus souvent naissance dans les couches superficielles. Il convient donc, pour améliorer l'endurance des pièces, de relever dans la mesure du possible celle des couches superficielles, on peut y arriver en jouant soit sur la nature du métal, soit sur la résistance des couches superficielles par des traitements de durcissement et le développement de précontraintes [36].

II.7.4 Facteurs de sollicitation :

- **Nature des efforts** : Pour une même éprouvette, essayée sous une même amplitude de la contrainte périodique, à la même fréquence et à la même température, les gradients de contraintes à travers la section la plus chargée seront différents selon la nature des efforts appliqués. Pour des efforts axiaux, traction ou compression les contraintes sont uniformes dans la section, tandis qu'en flexion ou en torsion elles sont maximales en surface et nulles au centre, sur la fibre neutre [37].

-**Effet de surcharge et de sous-charge** : Une surcharge temporaire peut conduire à dépasser localement la charge de rupture du matériau et produire un endommagement irréversible sous forme d'une fissure.

Inversement, si l'on soumet le matériau à des contraintes périodiques inférieures à sa limite d'endurance, on peut avoir localement des microdéformation plastiques, qui relâcheront les concentrations des contraintes et écrouiront le matériau, le rendant apte.

À supporter des contraintes plus élevées : c'est l'effet de sous-charge qui, pour les matériaux très adaptables, permet de relever la limite d'endurance de façon sensible (10 à 20%).

- **Contraintes résiduelles** : les contraintes résiduelles peuvent aggraver dangereusement les valeurs des contraintes, inversement des précontraintes de compression permettent d'augmenter le taux de travail admissible. Les contraintes résiduelles ne peuvent être déterminées de façon directe, elles sont toujours à déduire grâce à la mesure des quantités physiques ou mécaniques distinctes qu'elles produisent.

Et qui sont les suivantes :[34].

- Les déformations macroscopiques qui se relâchent quand une partie du matériau est enlevé de la partie soumise aux contraintes résiduelles.

- La distribution des déformations résiduelles homogène dans le réseau cristallographique. C'est la base des méthodes des diffractions de rayon X.

- La vitesse de propagation des ondes ultrasonores qui sont influencées par les contraintes résiduelles.

- Les caractéristiques magnétiques du matériau.

- **Influence de la fréquence** : Dans le cas des contraintes périodiques, on voit apparaître alors un cycle d'hystérésis de la déformation en fonction de la contrainte dont l'inclinaison varie avec la fréquence des cycles. Si cette fréquence augmente, la déformation plastique maximale atteinte pour une même amplitude de la contrainte diminue et, par suite, l'endurance se trouve augmentée, tout au moins tant que cette augmentation de fréquence n'entraîne par un échauffement de l'éprouvette. Inversement, si la fréquence diminue, il en sera de même de l'endurance, principalement à cause de l'effet d'environnement.

II.7.5 Facteur de l'environnement :

- **Influence de la température** : La limite d'élastique et la résistance à la traction diminuant lorsque la température s'élève, il en sera de même de la limite d'endurance.

- **Fatigue sous corrosion** : On rencontre très fréquemment la fatigue-corrosion sur des pièces travaillant dans des conditions assez peu agressives en apparence, à titre d'exemple, les eaux saumâtres ou salées, les divers milieux acides.[36].

-**Effet d'entaille** : [38]

D'une manière générale, on appelle entaille une discontinuité imposée ou accidentelle de la forme de la pièce ou une inhomogénéité du matériau qui la constitue. Les entailles peuvent être de quatre types :

Métallurgiques

- Chimique (corrosion)
- Mécaniques
- De service.

Ces discontinuités (trou, clavetage...) conduisent à la modification du champ de contrainte. C'est à dire à la création de zones dans lesquelles les contraintes sont nettement supérieures à la contrainte nominale ou à la contrainte globale résultante des efforts appliqués.

On appelle cette localisation élevée de la contrainte "concentration de contrainte", qui associées aux discontinuités géométriques, réduisent les résistances statiques et cycliques des structures. Dans le domaine élastique, Peterson définit le facteur de concentration de contrainte de deux manières différentes :

Le rapport de la contrainte maximale au fond d'entaille et la contrainte nominale est :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (\text{II.8})$$

Le rapport de la contrainte maximale au fond d'entaille et la contrainte globale est :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_g} \quad (\text{II.9})$$

On constate que ce facteur dépend de la géométrie locale de la pièce et du type de sollicitation.

Dans le domaine élastoplastique, le facteur de concentration de contrainte K est défini par deux manières :

- a. Par rapport à la contrainte nominale :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_L}{\sigma_{nom}} \quad (\text{II.10})$$

- b. Ou par rapport à la contrainte globale

$$K_\sigma = \frac{\sigma_L}{\sigma_g} \quad (\text{II.11})$$

Où σ_L est la contrainte locale.

On constate que ce facteur ne dépend pas seulement de la géométrie locale de la pièce et du type de sollicitation, mais aussi de la nature du matériau

II.8 Modes de rupture : [39]

La fissuration se manifeste par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties, appelées lèvres de la fissure, ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants :

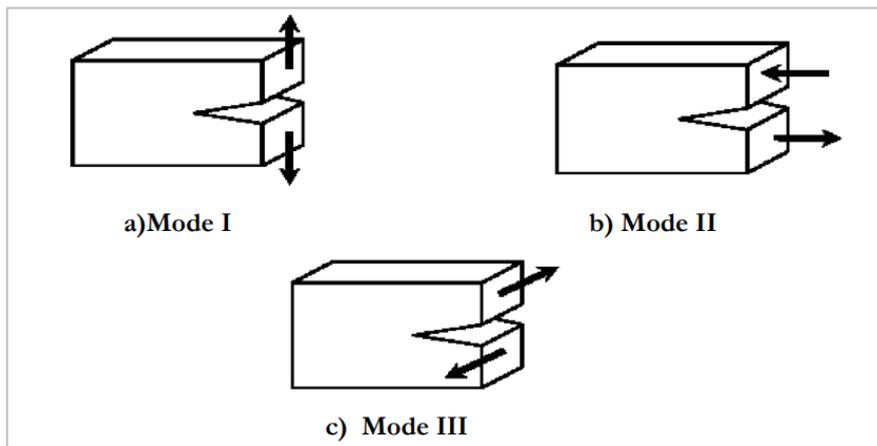


Figure II.12 : Types de rupture.

- Mode I ouverture : La sollicitation est perpendiculaire au plan de la fissure (**figure II.12 a**). Ce mode est souvent le plus dangereux.
- Mode II cisaillement plan : La sollicitation est un cisaillement dans le plan de la fissure dont l'action est perpendiculaire au front de la fissure (**figure II.12 b**).
- Mode III cisaillement anti-plan : La sollicitation est un cisaillement dans le plan de la fissure et parallèle au front de la fissure (**figure II.12 c**).

II.9 Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture :[40]

L'analyse dimensionnelle est un outil important pour l'étude de la mécanique de la rupture. Pour décrire cette approche, nous considérons les configurations de chargement représentées sur la **Figure II.13**, où les différentes géométries de structures fissurées sont soumises à la même contrainte σ^∞ loin de la fissure. Comme il s'agit de problèmes plans, l'épaisseur des structures n'intervient pas.

- La **Figure II.13 a**) représente une fissure de bord de très petite dimension par rapport à celles de la plaque : le problème est donc traité comme un problème en milieu infini. La plaque est

conçue dans un matériau dont le comportement est linéaire élastique, de module d'Young E et de coefficient de Poisson ν .

- La taille a de la fissure de la **Figure II.13 b**) n'est plus négligeable : la largeur L de l'éprouvette devient une variable additionnelle.

- Le cas de la **Figure II.13 c**) se présente sous la même configuration de chargement que le cas **Figure II.13 b**) mais cette fois-ci, avec un matériau élastoplastique (élastique plastique parfait). Deux autres variables doivent être considérées : la limite d'élasticité σ_E du matériau et la taille r_p de la zone plastifiée qui se forme à l'extrémité de la fissure

Dans le cas le plus général, les contraintes σ_{ij} en un point de coordonnées polaires (r, θ) par rapport à l'extrémité de la fissure, seront représentées par une fonction de type :

$$\sigma_{ij} = f (\sigma^\infty, \sigma_E, E, \nu, a, r, L, r_p, \theta) \quad (\text{II.12})$$

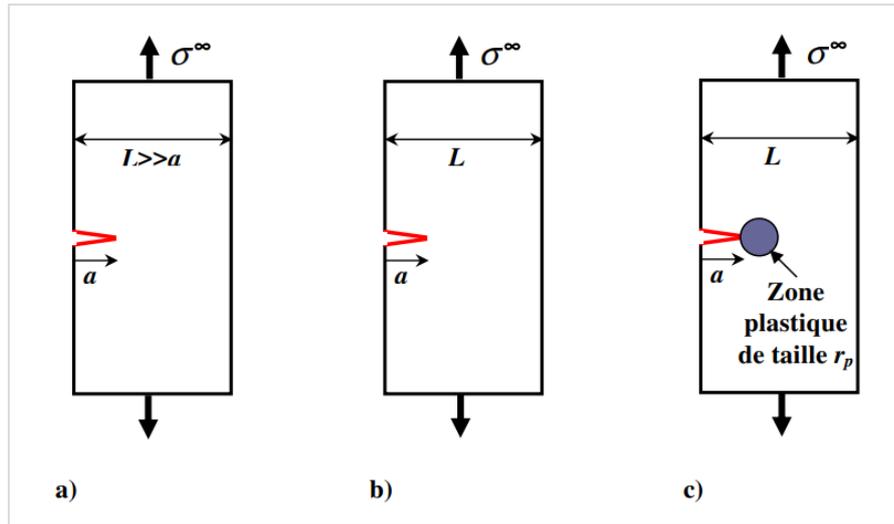


Figure II.13: Différents cas d'éprouvettes avec fissure de bord

Dans le cas de la **Figure II.13 a**) par exemple, cette fonction se réduit à :

$$\sigma_{ij} = f_1 (\sigma^\infty, E, \nu, a, r, \theta) \quad (\text{II.13})$$

L'analyse dimensionnelle (théorème de Buckingham) permet alors d'écrire :

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma^\infty} = F_1 \left(\frac{E}{\sigma^\infty}, \frac{r}{a}, \nu, \theta \right) \quad (\text{II.14})$$

Pour le cas de la **Figure II.13 b**) l'analyse dimensionnelle donne la formule :

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma^\infty} = F_2 \left(\frac{E}{\sigma^\infty}, \frac{r}{a}, \frac{L}{a}, \nu, \theta \right) \quad (\text{II.15})$$

Où la largeur L de la plaque est la variable additionnelle. Dans le cas de la **Figure II.11 c**), il vient la relation :

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma^\infty} = F_3 \left(\frac{E}{\sigma^\infty}, \frac{\sigma_E}{\sigma^\infty}, \frac{r}{a}, \frac{L}{a}, \frac{r_p}{a}, \nu, \theta \right) \quad (\text{II.16})$$

Où σ_E et r_p sont les deux autres variables additionnelles.

La relation **(I.15)** correspond à un comportement élastique linéaire du matériau pour lequel la MLR s'applique. Si $L \gg a$, autrement dit si la taille de la fissure est faible par rapport à la largeur L de l'éprouvette, il n'y a plus d'effet de bord et L n'est plus considérée comme une dimension caractéristique : on retrouve alors la relation **(I.13)**.

La relation **(I.16)** correspond à un comportement élastique plastique parfait décrit par la MLNR. Lorsque la taille de la zone plastifiée est négligeable par rapport à la longueur de la fissure

($r_p \ll a$) et que la contrainte appliquée est faible par rapport à la limite d'élasticité du matériau ($\sigma_E \gg \sigma^\infty$) on retrouve la relation **(I.15)**. Ce qui était prévisible puisque c'est précisément dans ces conditions ($r_p \ll a$, $\sigma^\infty \ll \sigma_E$) que la MLR s'applique.

Conclusion

Ce que l'on peut conclure dans ce chapitre est la différence entre les types de contraintes appliquées à deux types de matériaux et la connaissance des facteurs associés à chacun d'eux. Pour les matériaux à comportement fragile, la contrainte moyenne de rupture dépend de plusieurs facteurs et doit être associée à une probabilité de rupture de plus, il faut tenir compte du fait que les fissures qui apparaissent en début sont très importantes pour ce type de matériau, mais les matériaux à comportement ductile, la contrainte moyenne de rupture est la contrainte de rupture car il y a peu de dispersion et elle ne dépend pas du type de chargement.

Chapitre III

Résultats et interprétations

des résultats.

III.1. Introduction

AFGROW est un cadre d'analyse de la tolérance aux dommages (DTA) qui permet aux utilisateurs d'analyser l'initiation des fissures, la croissance des fissures de fatigue et la fracture pour prédire la durée de vie des structures métalliques. AFGROW (Air Force Grow), a été développé à l'origine par le laboratoire de recherche de l'Air Force. Il est maintenant développé et maintenu commercialement par LexTech, Inc.

AFGROW est l'un des outils de prévision de la durée de vie de la croissance des fissures les plus efficaces et les plus largement utilisés disponibles aujourd'hui. AFGROW est principalement utilisé pour les applications aérospatiales ; cependant, il peut être appliqué à tout type de structure métallique qui subit une fissuration par fatigue. AFGROW est également un programme informatique très flexible et convivial.

La bibliothèque classique de facteurs d'intensité de contrainte fournit des solutions pour plus de 30 géométries de fissures/conditions de charge différentes (y compris les charges axiales, de flexion et de roulement dans de nombreux cas). De plus, une capacité avancée de fissures multiples permet à AFGROW d'analyser deux fissures indépendantes dans une plaque (y compris les effets de trou), des trous fissurés en coin non symétriques et une solution de dommages continus. Des solutions basées sur les éléments finis (FE) sont disponibles pour deux fissures d'angle non symétriques au niveau des trous ainsi que pour les fissures se développant vers les trous. Cette capacité permet à AFGROW de gérer les cas avec plus d'une fissure se développant à partir d'une rangée de trous de fixation.

AFGROW met en œuvre cinq modèles différents de taux de croissance des fissures (équation de Forman, équation de Walker, recherche tabulaire, méthode Harter-T et équation NASGRO) pour déterminer la croissance des fissures par cycle de chargement appliqué. Les autres options utilisateur AFGROW incluent cinq modèles d'interaction de charge (retard) (Closure, FASTRAN, Hsu, Wheeler et Generalized Willenborg), un modèle d'initiation de fissure de fatigue basé sur la durée de vie et la possibilité d'effectuer une analyse de croissance de fissure pour les structures avec un collé réparer. AFGROW comprend également d'autres options utiles telles que : des solutions d'intensité de stress définies par l'utilisateur, des facteurs de modification bêta définis par l'utilisateur (capacité à estimer les facteurs d'intensité de stress pour les cas, qui peuvent ne pas correspondre exactement à l'une des solutions d'intensité de stress dans la bibliothèque AFGROW),

Une solution de dommages continus et une capacité d'analyse des contraintes résiduelles. Des outils sont inclus pour permettre le filtrage de spectre, le filtrage de solution K, le comptage de cycles de spectre et la possibilité de transférer automatiquement les données de sortie vers Microsoft Excel. AFGROW permet de transférer des données (par copier-coller) entre les applications Windows.

L'interface graphique standard comprend une animation de croissance des fissures en temps réel, la longueur des fissures par rapport à la longueur des fissures. Tracé du cycle et tracés du modèle de taux de croissance des fissures avec capacité de superposition de données. Les unités anglaises et métriques peuvent être converties à la volée. [41]

III.2. Modèle de Forman / Mettu (NASGRO) :

Le modèle NASGRO utilisé dans la prédiction de la vitesse de propagation de fissuration de fatigue et implémenté dans plusieurs codes de calcul de fatigue, a été développé par Forman et Mettu [42]. Le modèle de NASGRO prédit la vitesse de fissuration pour les trois domaines et est sous la forme : les coefficients C, n, p, q sont des paramètres empiriques K_{max} et K_{crit} sont respectivement le facteur d'intensité de contrainte maximale et le facteur d'intensité de contrainte critique.

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{eh}}{\Delta K} \right)^F}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (\text{III.1})$$

Les matériaux choisis pour cette simulation sont des alliages d'aluminium tels que : **2024-T3**, **2024-T351 AL** et **7075 T73 AL**

The parameters required for the NASGRO equation are given below. AFGROW requires additional parameters (Rhi and Rlo) to provide limits for the curve shifting. It has been demonstrated that these limits may be necessary for the NASGRO equation.

Paris crack growth rate constant, C:	2.5389e-011
Paris exponent in NASGRO Equation, n:	2.95
Exponent in NASGRO Equation, p:	0.5
Exponent in NASGRO Equation, q:	0.5
Threshold stress intensity factor range at R = 0, DK0:	7.692
Threshold coefficient, Cth:	1.506
Plane stress/strain constraint factor, Alpha:	2.5
Ratio of the maximum applied stress to the flow stress, Smax/S0:	0.3
Upper limit on R shift, RHI (Max: 1.0):	0.7
Lower limit on R shift, RLO (0... -2.0):	-0.3

Figure III.1: Interface des différents paramètres de l'équation de NASGRO.

Tableau III.1 : Différents paramètres de l'équation de NASGRO pour les différents matériaux utilisés.

Alliage d'aluminium	C	n	p	q
2024 T3 AL	2.5389-e011	2.95	0.5	0.5
2024 T351 AL	3.9386e-010	2.7	0.5	1
7075 T73 AL	2.7674e-010	3.321	0.5	1

III.3 Présentation du modèle :

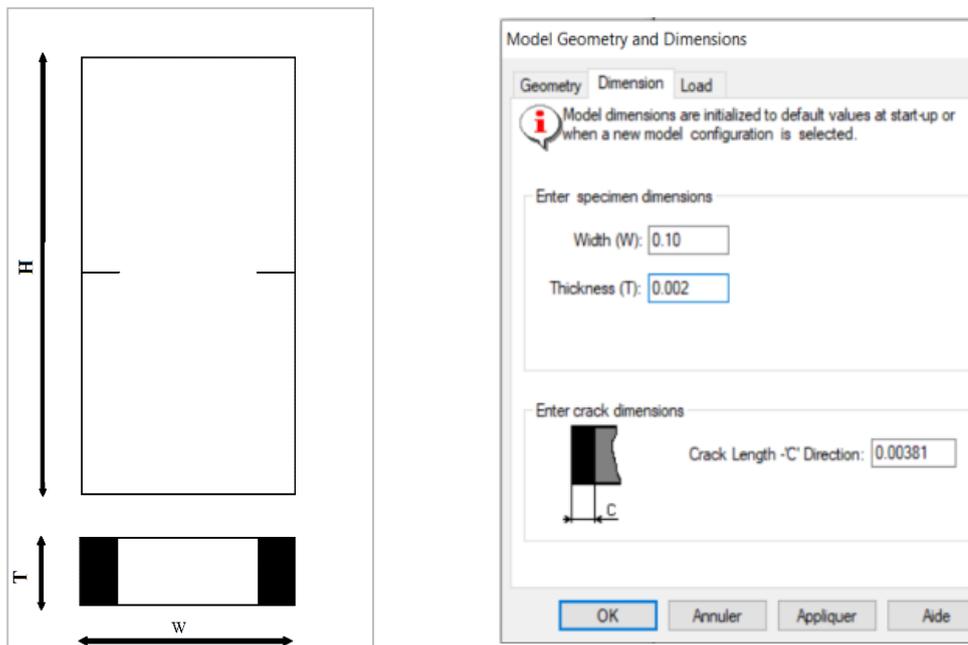


Figure III.2: Présentation de notre modèle

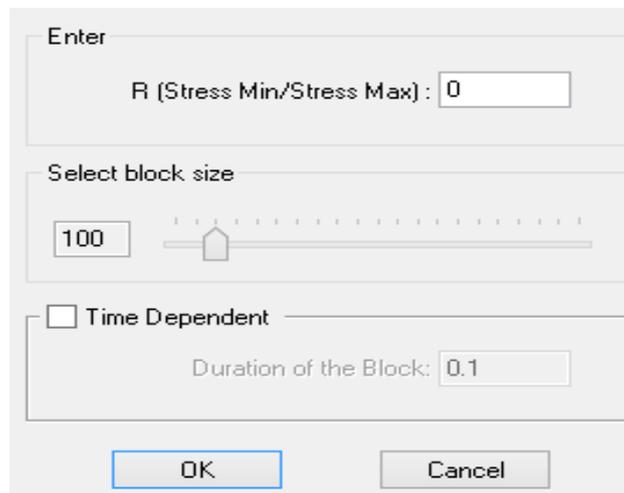
Notre modèle est une plaque en alliage d'aluminium de longueur **L=200mm**, de largeur **W= 100mm**, et d'épaisseur **T=2mm**, présentant deux fissures latérales sollicitée en traction sur sa partie supérieure et inférieure, par des chargements cycliques pour pouvoir solliciter cette plaque en fatigue. Plusieurs paramètres ont été mis en évidence, tels que le rapport de charge entre la contrainte minimale et maximale, le matériau de la plaque et voir parmi ces matériaux proposés celui qui est le plus résistant à ces sollicitations, sans oublier que cette plaque a été sollicitée sans réparation et avec réparation par deux composites différents, tels que, le bore/époxy et le graphite /époxy.

Tableau III.2: Interface des différentes propriétés de l'alliage d'aluminium 2024 T3

Le coefficient de dilation thermique	2,32 e-005
Le module d'Young	73084,4 MPa
Le coefficient de Poisson	0,33
La limite d'élasticité	365,422 MPa

III.4 Résultats de la simulation

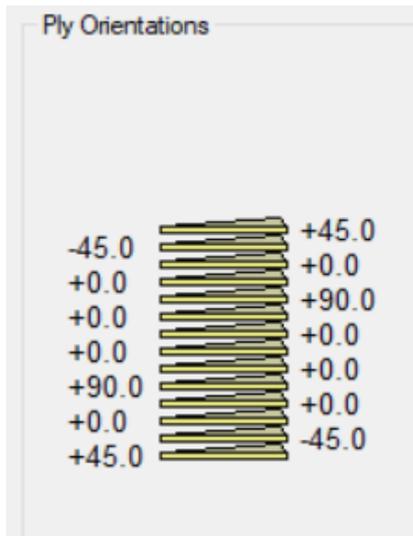
III.4.1 Plaque non réparée et réparée par patch en composite :

**Figure III.3:** Interface du rapport de charge R=0

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0 \quad (III.2)$$

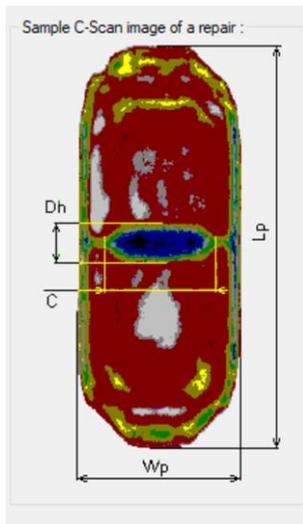
Nous avons réparé notre plaque fissurée par deux patches en composite, tels que le Bore/Epoxy et le Graphite/Epoxy pour distinguer l'effet de la réparation sur la durée de vie de la plaque fissurée.

Nous avons procédé à un composite de six (06) plis, symétriques pour des orientations des fibres de 45°, -45°, 0°, 90° (Voir figure III.5).



Le module d'Young (EX) :	134122.93 MPa
Le module d'Young (EY) :	56642.6 MPa
Le module de cisaillement	19354 MPa
L'épaisseur	0.0018 m
La largeur	0.0508 m
La longueur	0.0508 m

Figure III.4 :Interface des différentes propriétés et les différentes orientations du Bore/Epoxy.



Le nom	FM-73
Le module de cisaillement	413.68 MPa
L'épaisseur	0.00015 m
La largeur	0.04 m
La longueur	0.04 m

Figure III.5 : Interface des propriétés et les dimensions de l'adhésif FM-73.

Pour l'adhésif utilisé est le FM 73 avec ses paramètres, tels que la contrainte de cisaillement l'épaisseur et les autres dimensions pour le collage.

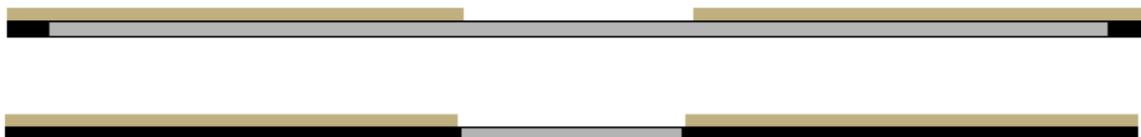


Figure III.6 : Représentation de la plaque réparée par patch en composite.

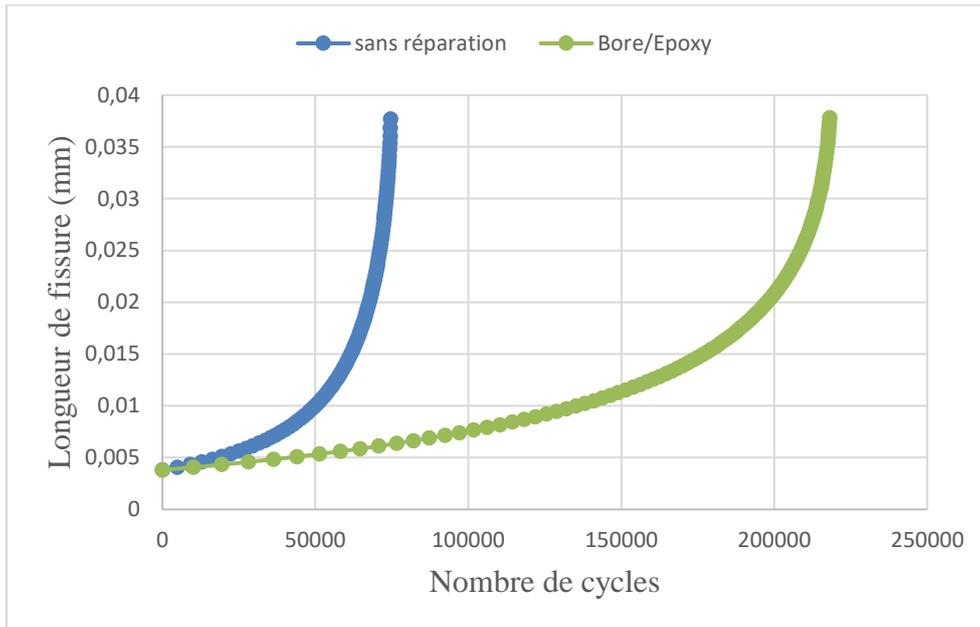


Figure III.7: Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le composite Bore/Epoxy.

Pour la plaque réparée, on remarque bien que l'effet de la réparation par le composite Bore/Epoxy a fait preuve dont il a augmenté la durée de vie de cette plaque et a atteint environ plus que trois fois la durée de vie de la même plaque sans réparation et elle est de l'ordre de 2.10^6 cycles.

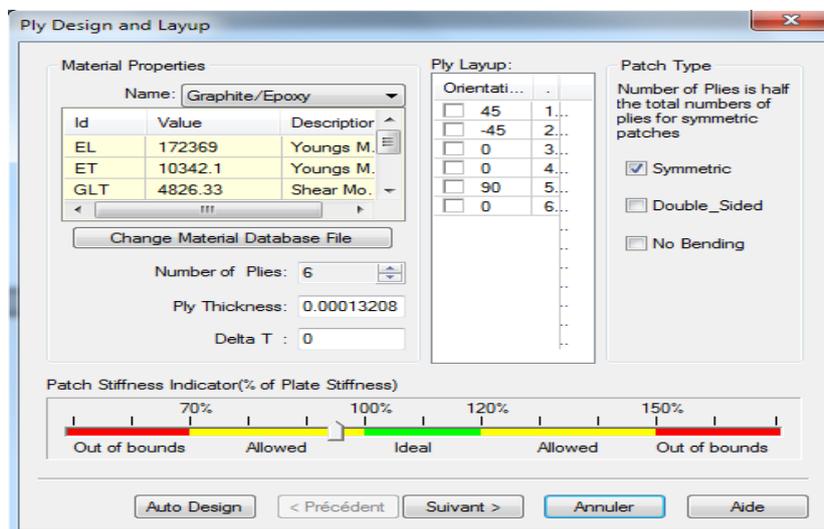


Figure III.8: Interface des propriétés et le nombre de plies et leurs orientations du patche Graphite/Epoxy.

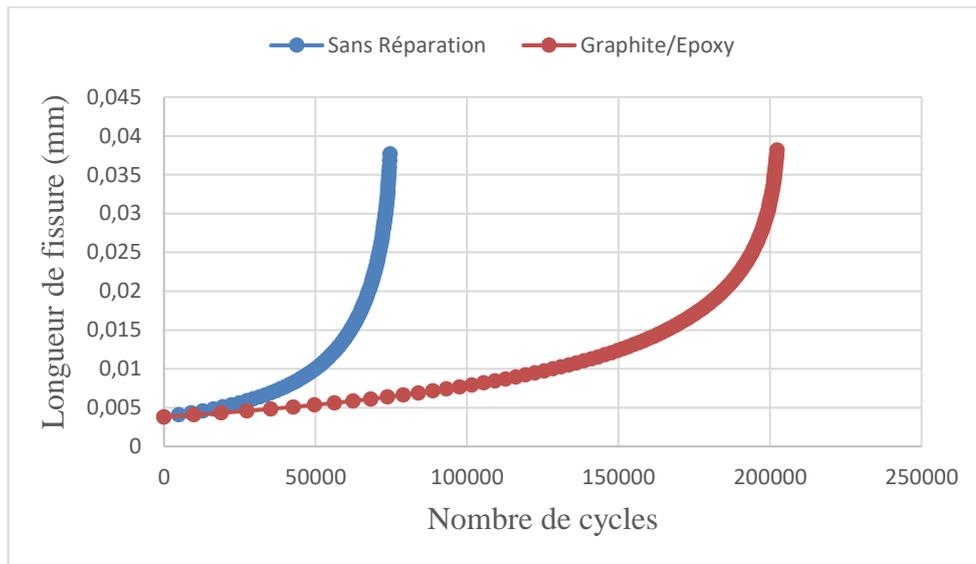


Figure III.9: Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le composite Graphite/Epoxy.

La même chose pour la réparation par le composite graphite/Epoxy, la durée de cette plaque a été prolongée jusqu'à environ **2.10⁶ cycles**, d'où l'effet de la réparation par patch fait augmenter la durée de vie de la plaque et absorbe les contraintes induites en tête de fissure et freine sa propagation.

III.4.2 Effet de la variation du rapport de charge :

Pour R=0

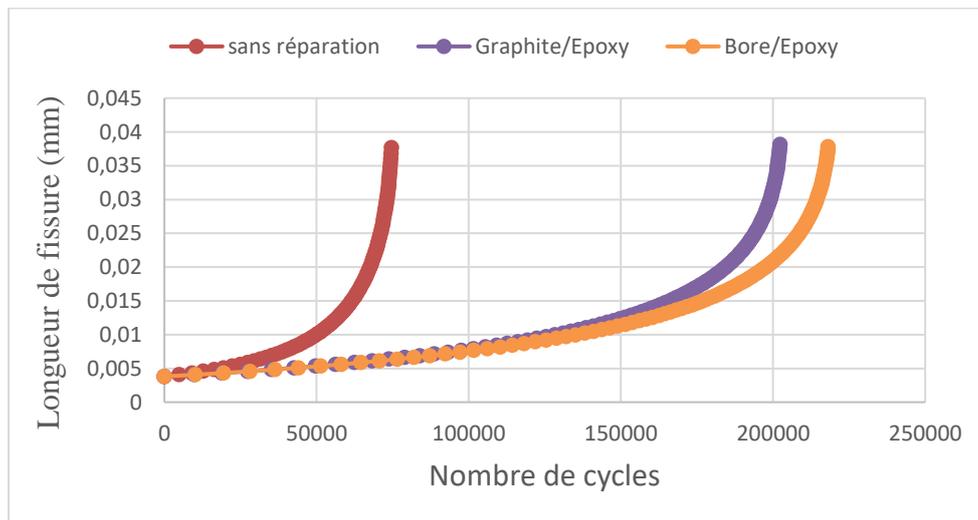


Figure III.10: Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et le graphite/Epoxy.

Pour ce rapport de charge, la durée de vie de la plaque réparée dépasse les **2.10⁶cycles** pour le graphite/Epoxy et atteint environ les **2.1 .10⁶ cycles** pour le Bore/Epoxy, pourtant la

plaque non réparée n'exède même pas les 7.10^5 cycles, cela confirme l'importance et la fiabilité de la réparation par patches en composite.

Pour : $R=0.3$

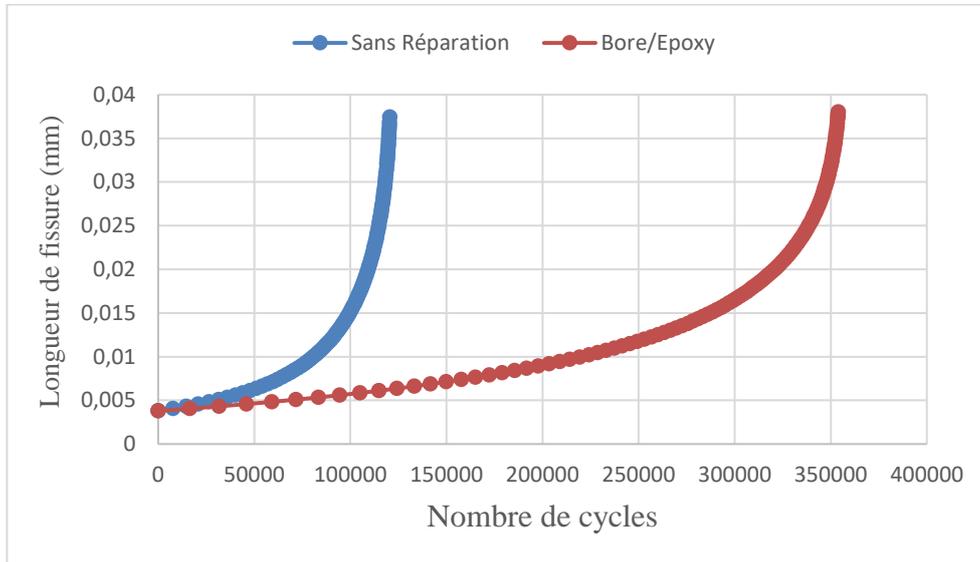


Figure III.11 :Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy.

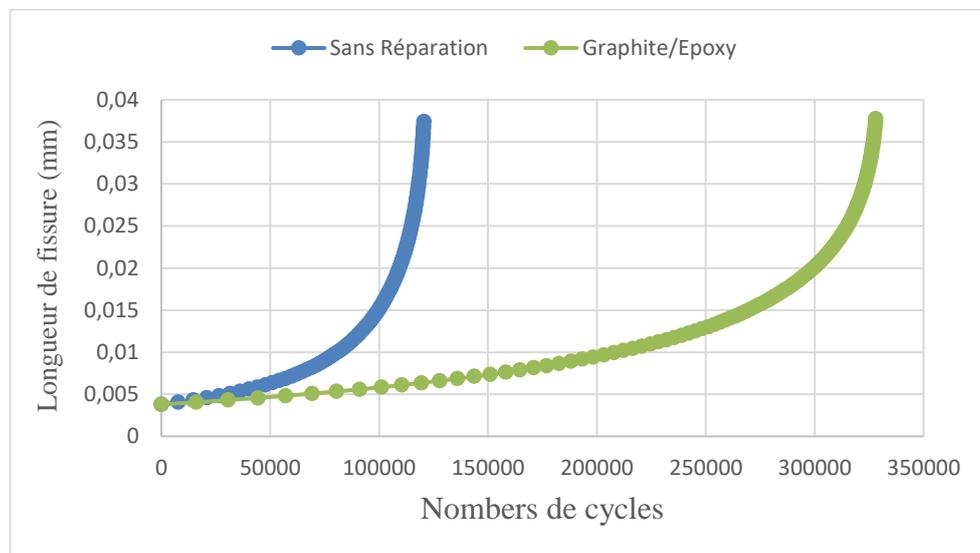


Figure III.12 :Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Graphite/Epoxy.

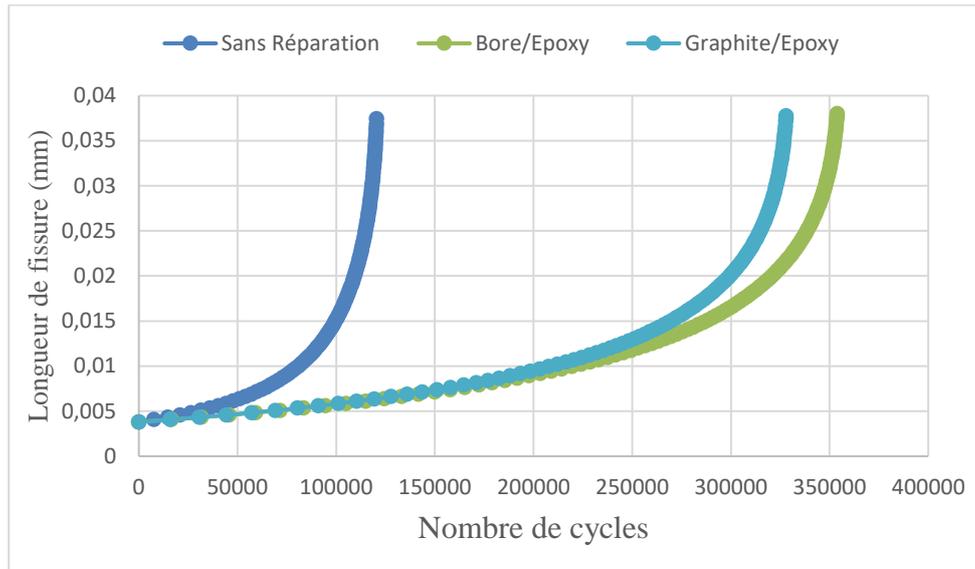


Figure III.13 : Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et le graphite/Epoxy.

Pour un rapport de charge $R=0.3$, on constate que la durée de vie de la plaque réparée connaît une certaine augmentation pour le graphite/époxy qui atteint les $3.2.10^6$ cycles et environ $3.5.10^6$ cycles pour le Bore/Epoxy, cela s'explique par l'augmentation du rapport de charge qui influe directement sur la durée de vie de la plaque réparée.

Pour : $R=0.6$

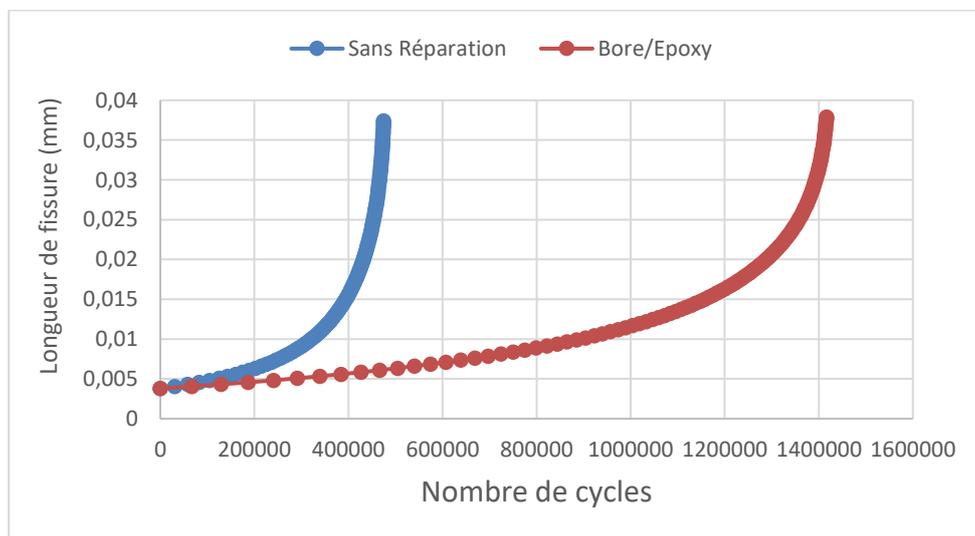


Figure III.14 : Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy.

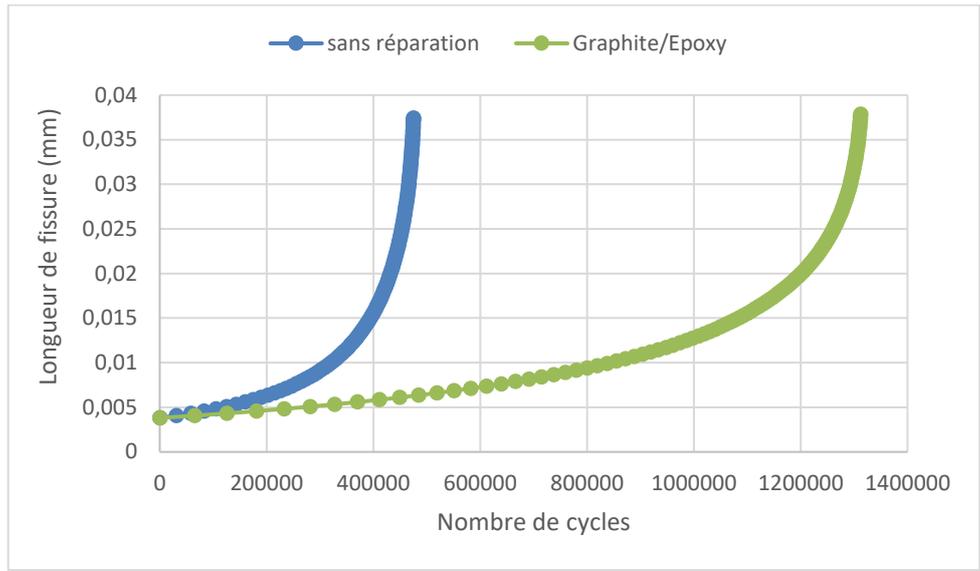


Figure III.15 : Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Graphite/Epoxy.

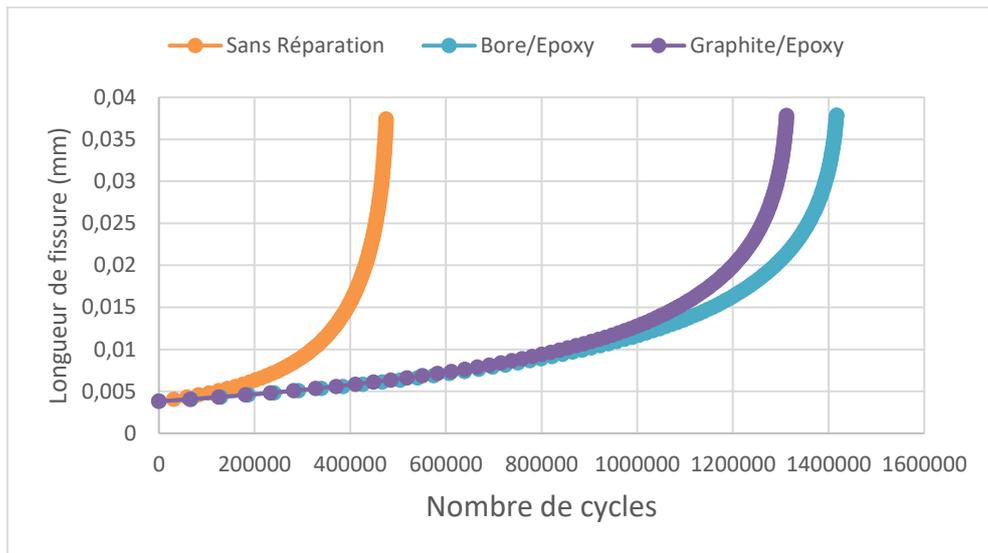


Figure III.16 : Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et le graphite/Epoxy pour $R=0.6$.

Pour ce rapport de charge $R=0.6$, l'augmentation du nombre de cycles est très remarquable, et dépasse les 10^7 cycles que ce soit pour le composite Graphite/Epoxy ou pour le Bore/Epoxy, cela prouve que le rapport de charge croit proportionnellement avec le nombre de cycles de vie de la plaque et dépasse les $1.4 \cdot 10^7$ cycles pour le Bore/Epoxy.

Pour : $R=0.7$

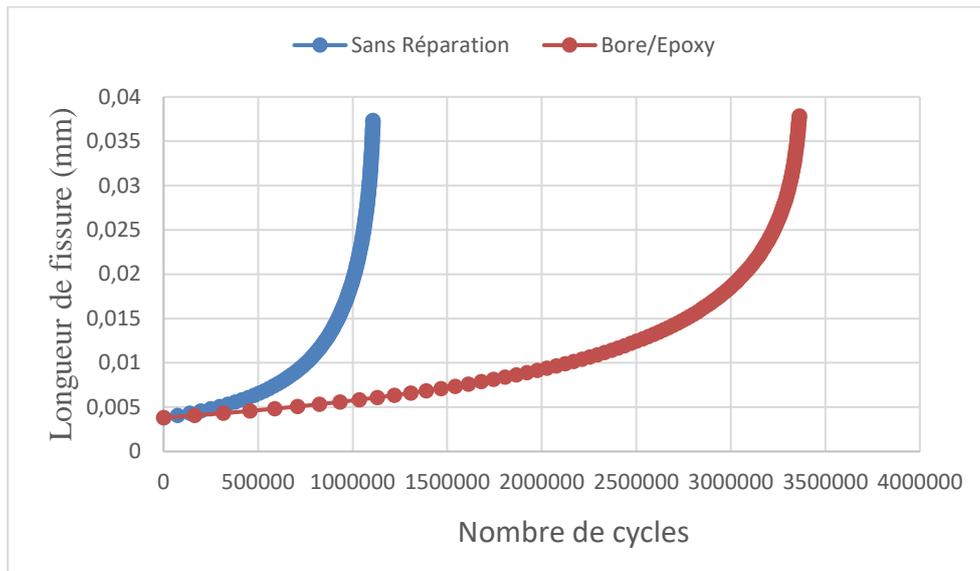


Figure III.17 : Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy.

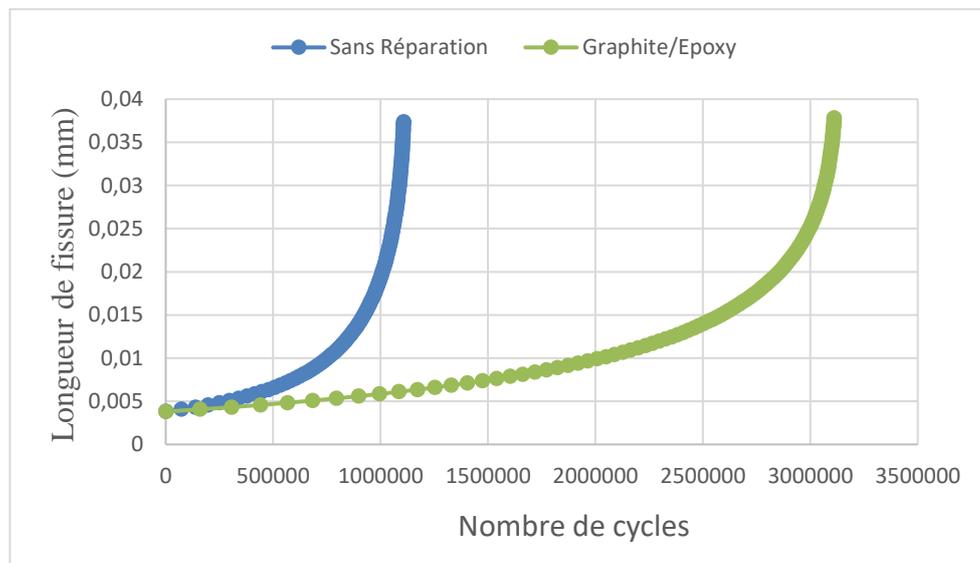


Figure III.18 : Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Graphite/Epoxy.

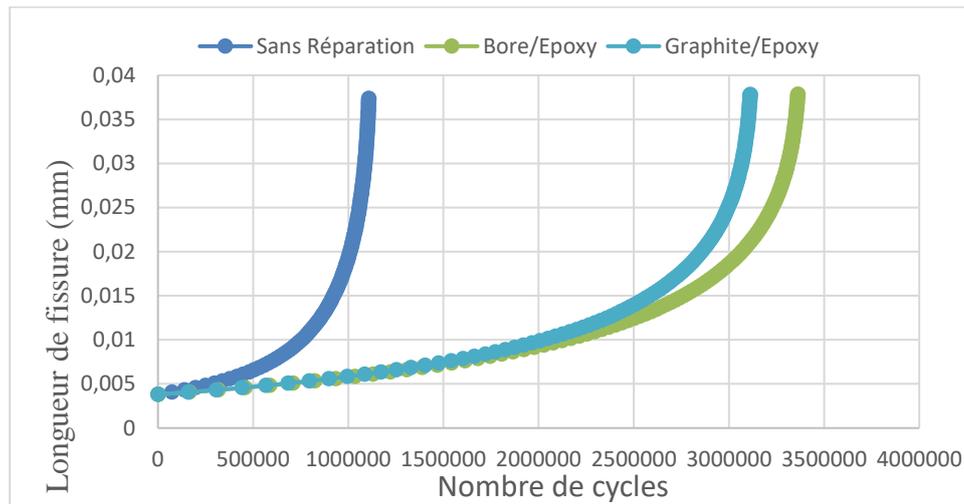


Figure III.19 : Variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et le graphite/Epoxy pour $R=0.7$.

Pour les figures (17, 18, et 19), on remarque que le nombre de cycle connaît une progression ascendante rapide qui dépasse les $3.1 \cdot 10^7$ cycles pour le Graphite/Epoxy, et environ $3.3 \cdot 10^7$ cycles pour le Bore/Epoxy, cela se traduit par l'augmentation du rapport de charge $R=0.7$.

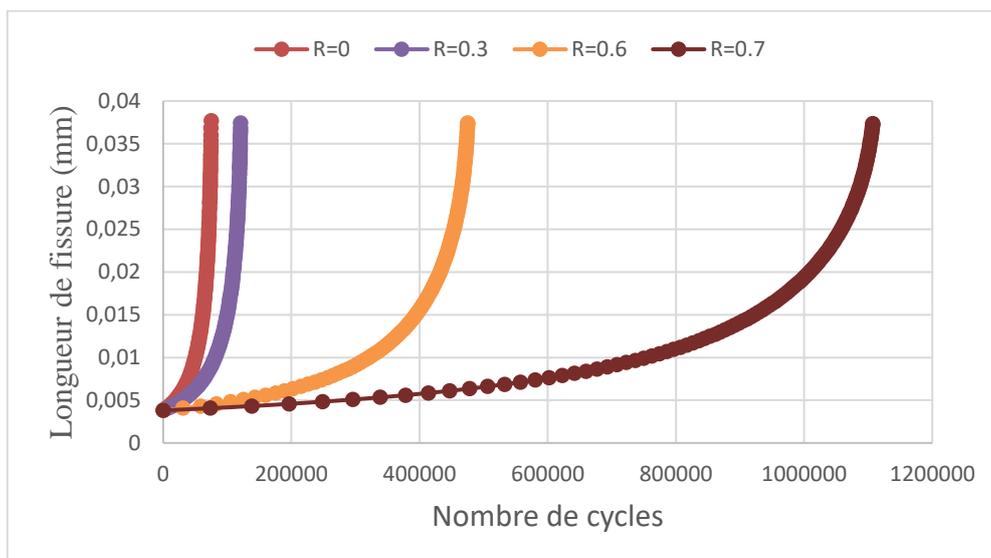


Figure III.20 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue pour la plaque non réparée.

Pour les différents rapports de charges pour la plaque non réparée, on remarque que l'augmentation de la durée de vie d'un matériau est strictement proportionnelle avec l'augmentation du rapport de charge, c'est-à-dire qu'au fur et à mesure que le rapport de charge augmente, la plaque résiste mieux qu'un rapport de charge inférieur, cela s'explique prouve que, plus que la contrainte minimale s'approche de la contrainte maximale, cela donne une durée de vie de la plaque plus.

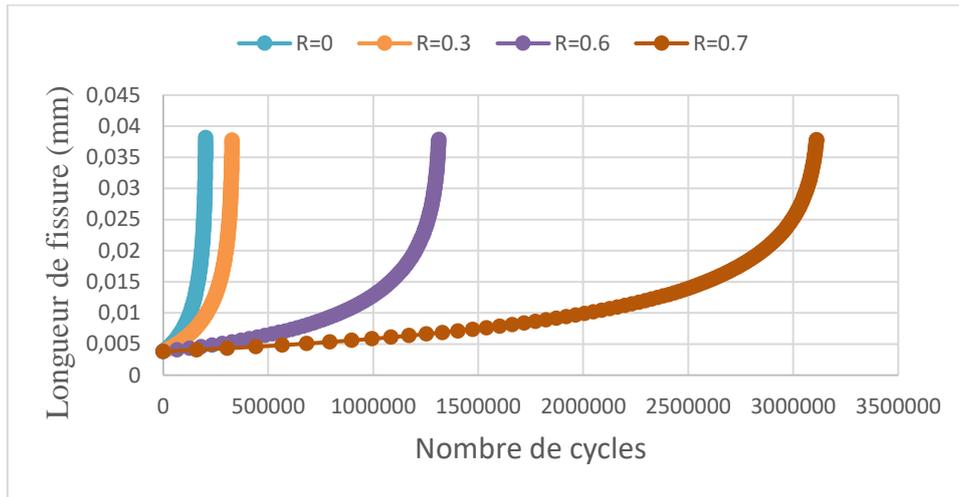


Figure III.21 : Effet du rapport de charge sur la durée de vie pour la plaque réparée par le patch graphite/époxy.

Pour l'effet du rapport de charge sur la plaque sur la durée de vie en fatigue pour la plaque réparée par le patch graphite/époxy est très remarquable, vue augmentation de cette durée de vie qui atteint environ

$3.1 \cdot 10^6$ cycles pour $R=0.7$;

$1.3 \cdot 10^6$ cycles pour $R=0.6$;

$0.3 \cdot 10^5$ cycles pour $R=0.3$;

Et $0.2 \cdot 10^5$ cycles pour $R=0$;

Donc toujours, le nombre de cycle est strictement proportionnel au rapport de charge.

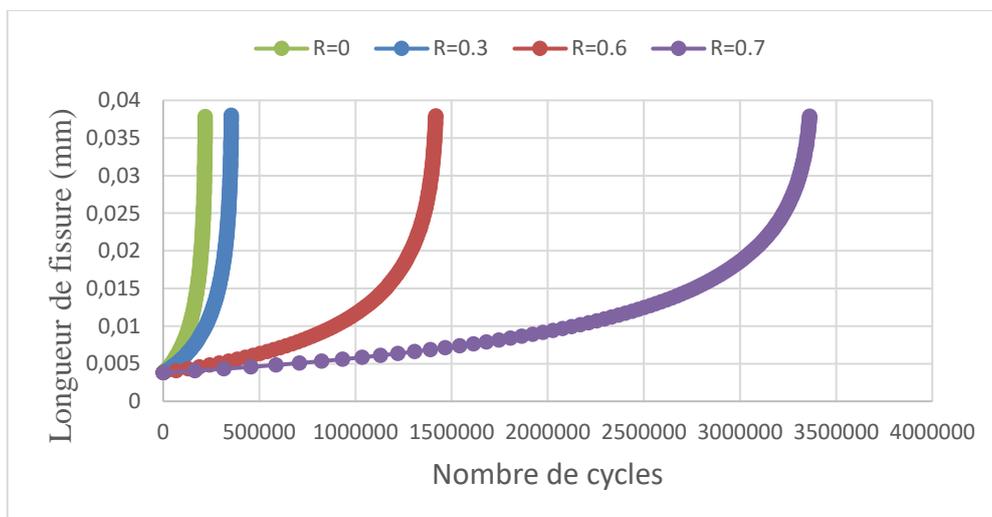


Figure III.22: Effet du rapport de charge sur la durée de vie en fatigue pour la plaque réparée par le patch Bore/Epoxy.

Pour l'effet du rapport de charge sur la plaque sur la durée de vie en fatigue pour la plaque réparée par le patch bore/époxy qui entraîne une meilleure durée de vie par ses propriétés mécaniques, et atteint un nombre de cycle très important pour un rapport de charge $R=0.7$ qui atteint environ les $3.3.10^6$ cycles.

III.4.2.1 Effet du matériau 2024-T3 pour un rapport de charge fixe $R=0.6$

Material Properties NASGRO Equation Constants

The NASGRO equation was developed by Foman and Newman at NASA, de Koning at NLR and Henriksen at ESA. It is an attempt to use a closed-form equation to model the da/dN vs. Stress Intensity behavior of engineering materials.

Enter

Material name: 1000-9000 series aluminum, 2024-T3 AL, [Clad: pt & sht: L-T]

Coefficient of Thermal Expansion:	2.32e-005
Young's Modulus:	73084.4
Poisson's Ratio:	0.33
Yield Strength, YLD:	365.422
Plane Strain Fracture Toughness, KIC:	36.262
Plane Stress Fracture Toughness, KC:	72.524
Effective Fracture Toughness for part-through-the-thickness cracks:	50.547
Fit parameter in KC versus Thickness Equation, Ak:	1
Fit parameter in KC versus Thickness Equation, Bk:	1

Figure III.23 : Interface des différentes propriétés de l'alliage 2024 T3 AL

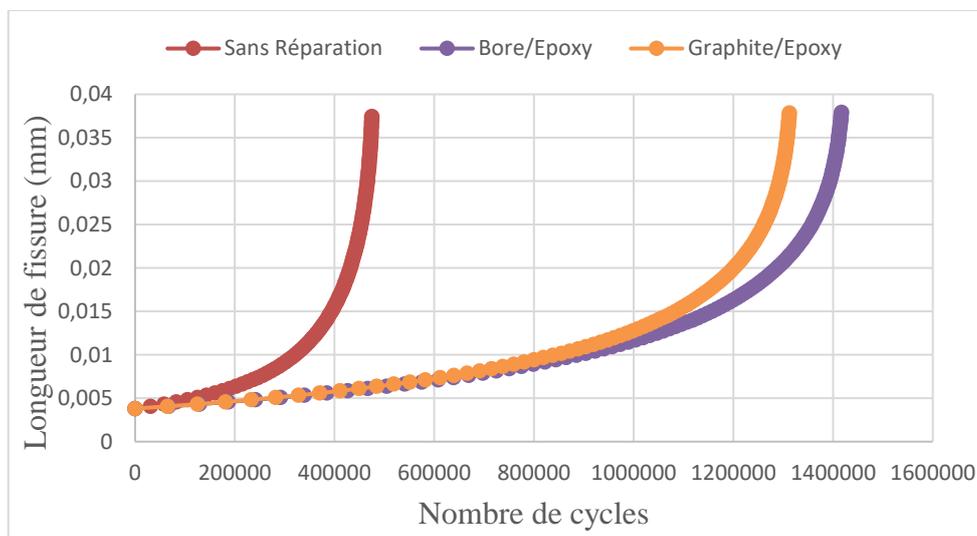


Figure III.24 : Effet du matériau 2024-T3 AL sur la variation de la durée de vie de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et graphite/Epoxy.

Pour l'effet de l'alliage d'aluminium **2024-T3 AL** sur la variation de la durée de vie sur la propagation de fissure, pour la plaque non réparée et réparée par le bore/époxy et graphite/époxy, pour le rapport de charge $R=0.6$ est très distinct, vue les meilleurs propriétés des patches en composite pour la réparation et l'absorption des contraintes qui sollicitent la tête de fissure, puisque ces patches améliorent et augmentent la durée de vie de cette plaque, qui

peut atteindre pour le bore/époxy environ 14.10^5 cycles et pour le graphite /époxy environ 13.10^5 cycles.

III.4.3 Effet du matériau 2024 T351 AL :

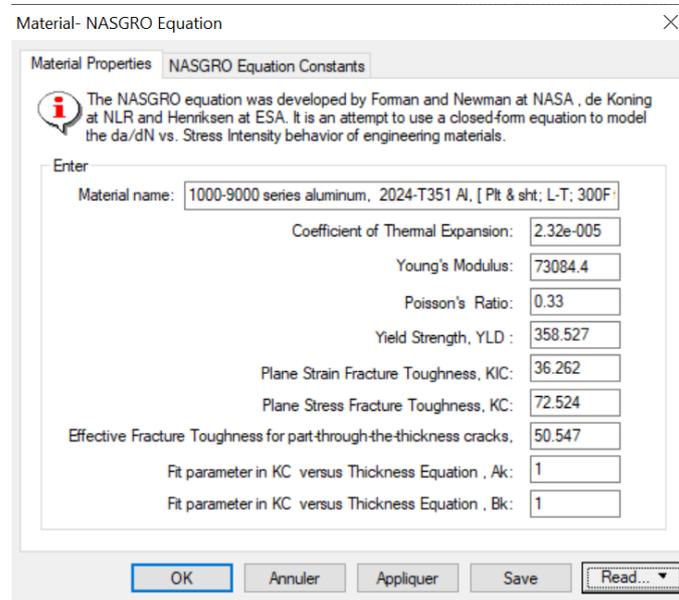


Figure III.25 : Interface des différentes propriétés de l'alliage 2024 T351 AL

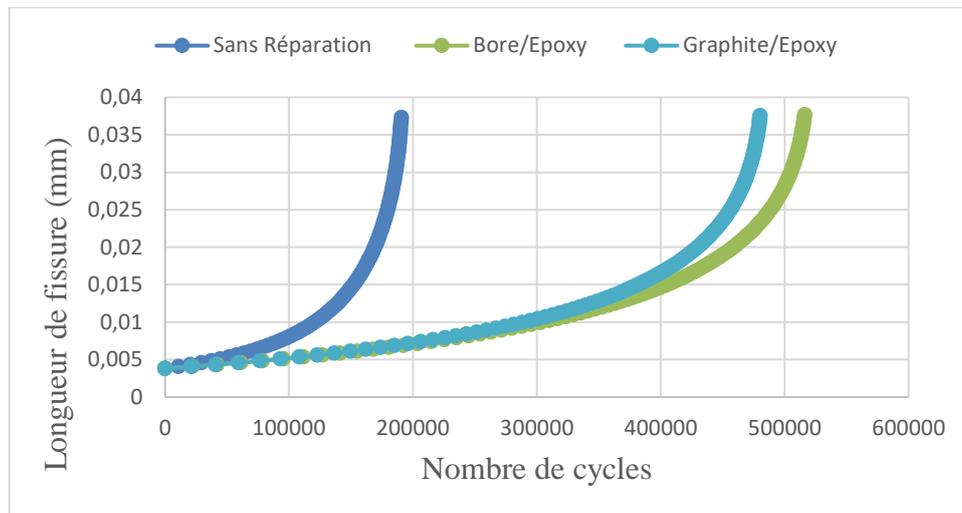


Figure III.26: Effet du matériau 2024 T351 AL sur la variation de la durée de vie de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et graphite/Epoxy.

Pour le matériau **2024 T351 AL** sur la variation de la durée de vie sur la propagation de fissure pour la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et graphite/Epoxy, pour la plaque non réparée le nombre de cycles est de $1.8.10^4$ cycles, pour le patch bore/époxy est environ $5.1.10^4$ cycles et enfin, pour le graphite /époxy est environ $4.8.10^4$ cycles, on remarque bien que, toujours la réparation en patch en composite prolonge la durée de vie des structures, et le bore/époxy est plus performant que le graphite/époxy.

III.4.3.1 Effet du matériau 7075 T73AL :

Material- NASGRO Equation

Material Properties | **NASGRO Equation Constants**

The NASGRO equation was developed by Forman and Newman at NASA . de Koning at NLR and Henriksen at ESA. It is an attempt to use a closed-form equation to model the da/dN vs. Stress Intensity behavior of engineering materials.

Enter

Material name: **1000-9000 series aluminum, 7075-T73 Al, (Plt & sht; L-T, LA, DA)**

Coefficient of Thermal Expansion: **2.36e-005**

Young's Modulus: **71705.5**

Poisson's Ratio: **0.33**

Yield Strength, YLD : **413.685**

Plane Strain Fracture Toughness, KIC: **30.768**

Plane Stress Fracture Toughness, KC: **61.536**

Effective Fracture Toughness for part-through-the-thickness cracks, **54.942**

Fit parameter in KC versus Thickness Equation , Ak: **1**

Fit parameter in KC versus Thickness Equation , Bk: **1**

OK Annuler Appliquer Save Read...

Figure III.27: Interface des différentes propriétés de l'alliage 7075 T73 AL

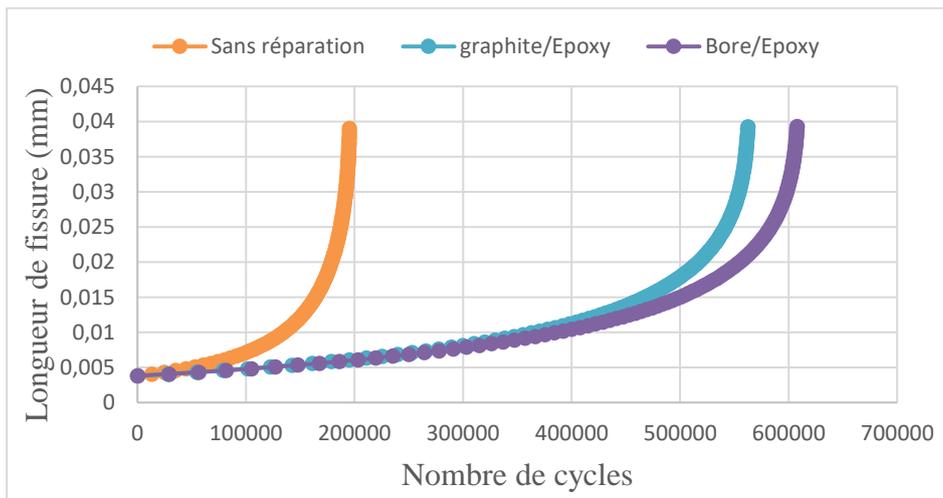


Figure III.28: Effet du matériau 7075 T73 AL sur la variation de la durée de vie de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et graphite/Epoxy.

Concernant l'effet du matériau **7075 T73 AL** sur la variation de la durée de vie sur la propagation de fissure pour la plaque non réparée et réparée par le bore/époxy et graphite/époxy, toujours le bore/époxy présente une meilleure réparation vue son augmentation de la durée de vie de la plaque fissurée et réparée dont un nombre de cycles très important qui atteint **$6 \cdot 10^5$ cycles**, puis le graphite/époxy avec un nombre de cycles d'environ **$5.6 \cdot 10^5$ cycles**.

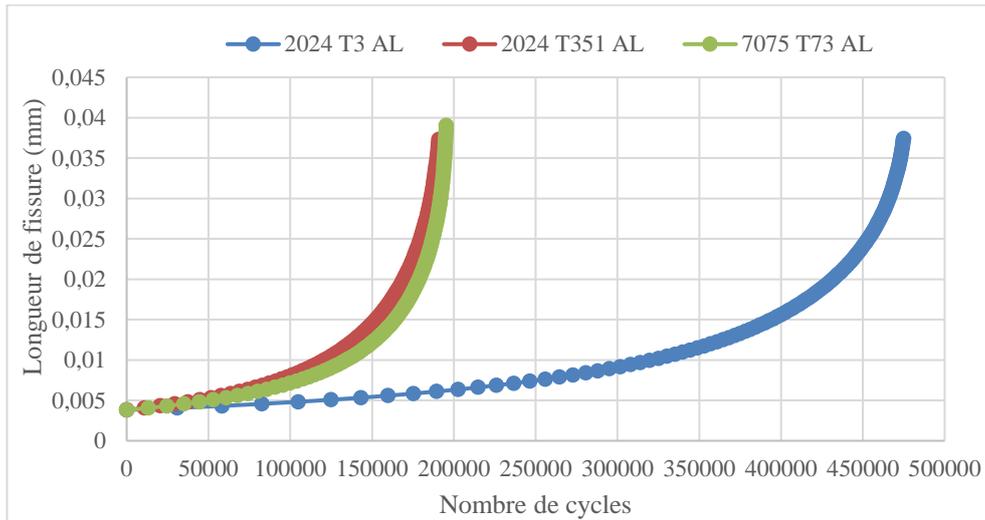


Figure III.29 : Comparaison des différents matériaux pour la plaque sans réparation.

Cette figure montre une comparaison graphique des différents matériaux en étude, pour la plaque sans réparation, pour montrer parmi ces matériaux, celui qui est le plus résistant et le plus fiable pour une durée de vie importante, surtout si on travaille dans le domaine aéronautique. On conclut que le matériau **2024 T3 AL** est le plus correspondant à ces structures, vue sa légèreté, sa résistance, et d'autres propriétés propres à lui, qui permettent une durée de vie plus intéressante et plus longue comparativement aux autres matériaux de notre étude qui sont le **2024 T351 AL** et le **7075 T3 AL**.

III.4.4 la vitesse de fissuration en fonction de ΔK :

Le matériau **2024 T3 AL** :

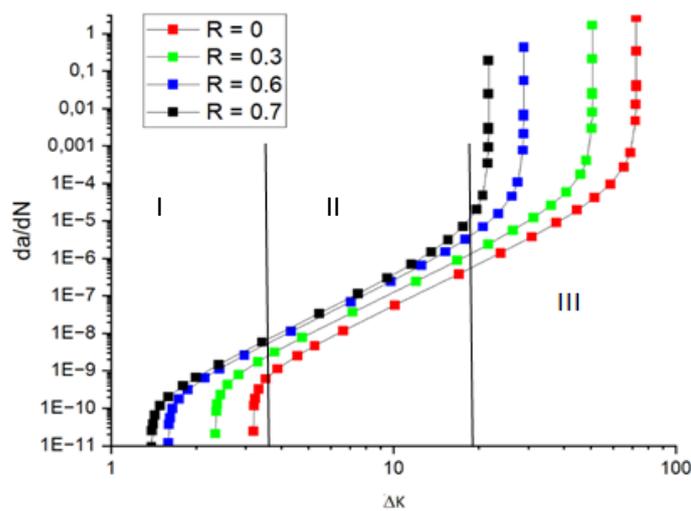


Figure III.30 : Comparaison des différents rapports de charge R pour Le matériau 2024 T3 AL sans réparation.

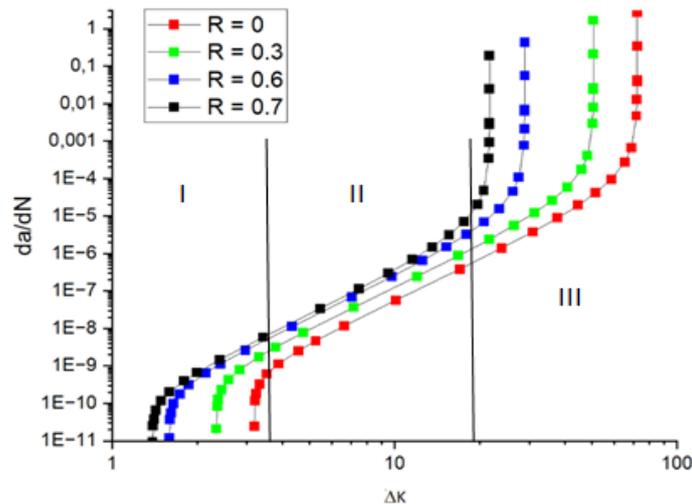


Figure III.31 : Comparaison des différents rapports de charge R pour Le matériau 2024 T3 AL réparée par le graphite/Epoxy.

En générale l'expérience nous montre que l'amorçage des fissures résulte de la concentration de déformation plastique qui se produit dans un domaine de dimension finie. Une fois que les fissures se sont amorcées ; elles peuvent se propager d'une façon stable. L'évolution de la vitesse de fissuration en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte K , permet de faire distinguée trois domaines de fissuration qui représente en échelle logarithmique la vitesse de fissuration da/dN en fonction de ΔK .

Domaine I : Domaine des faibles vitesses de fissuration où les effets de l'environnement et de la microstructure sont prédominants. Pour décrire ce domaine, on effectue généralement des essais à ΔK décroissant pour déterminer la valeur de ΔK_s

Domaine II : Domaine des vitesses moyennes ou de Paris où la vitesse de propagation varie linéairement avec ΔK en échelle bi-logarithmique. La fissure se propage le plus souvent dans un plan perpendiculaire à la direction de l'effort appliqué.

Domaine III : Domaine correspondant au cas des chargements élevés pour lesquels une déchirure se produit dans le matériau en pointe de fissure. Les vitesses de propagation sont très élevées et conduisent très vite à la rupture de la pièce (pour $K_{max} = K_{IC}$).

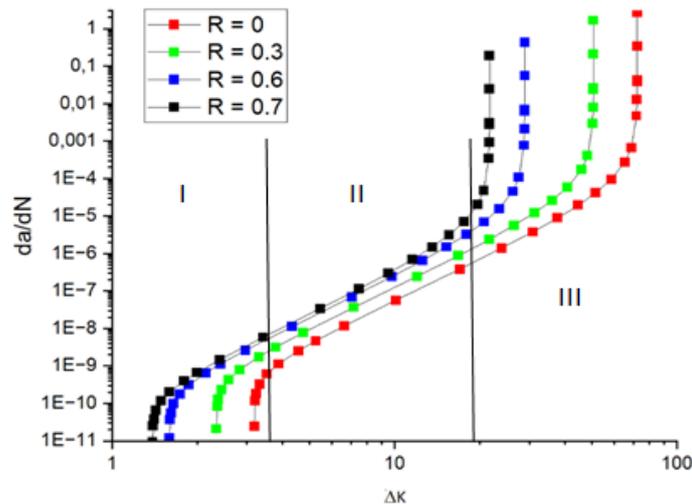


Figure III.32 : Comparaison des différents rapports de charge R pour Le matériau 2024 T3 AL réparée par le Bore/Epoxy.

Les figures **III.30**, **III.31** et **III.32** montrent l'effet du rapport de charge sur le taux de croissance des fissures de fatigue pour trois l'états de la plaque (sans réparation / réparation avec graphite/Epoxy et avec Bore/Epoxy) et illustrent une augmentation générale de da/dN avec R pour un ΔK donné.

Il a été clairement observé un effet significatif de R sur ce matériau, notamment à des valeurs élevées de ΔK . Lorsque le facteur d'intensité de contrainte est faible, une légère réduction du taux de croissance des fissures de fatigue est constatée en fonction de la variation du rapport de charge R. Cependant, à des contraintes élevées, on observe une augmentation importante de la croissance des fissures de fatigue

Cela suggère que le rapport de charge R joue un rôle crucial dans la propagation des fissures de fatigue pour ce matériau. À des valeurs élevées de ΔK , où les contraintes sont plus élevées, la croissance des fissures de fatigue est plus prononcée. En revanche, aux faibles valeurs du facteur d'intensité de contrainte, une diminution moins significative du taux de croissance est observée avec la variation du rapport de charge R.

Cette observation souligne l'importance de prendre en compte le rapport de charge R lors de l'évaluation de la durée de vie des structures soumises à des fissures de fatigue dans ce matériau.

Conclusion :

L'effet du matériau **AL 2024-T3** sur la variation de la durée de vie sur la propagation de fissure pour la plaque non réparée et réparée par le bore/époxy et graphite/époxy, toujours le bore/époxy présente une meilleure réparation vue son augmentation de la durée de vie de la plaque fissurée et réparée avec un nombre de cycles très important.

Le matériau **AL 2024T3** présente de meilleurs résultats par rapport aux deux autres matériaux tels que le **2024 T351 AL** et le **7075 T3 AL**, relativement aux propriétés mécaniques pour chaque matériau.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le monde de l'élaboration des matériaux composite est un monde innovant, en pleine expansion, les découvertes sont toujours possibles et les combinaisons entre les propriétés des matériaux sont toujours envisageables.

Le travail que nous avons mené durant cette étude est une étude théorique. Cette étude basée sur les matériaux composites dont le comportement mécanique est dépendant de plusieurs paramètres structuraux tels que : le rapport de charge, le type de matériau, le type de patch, Et la vitesse de fissuration.

Donc notre étude montre que la réparation par patch donne un bon résultat pour la durée de vie de plaque fissuré, cela signifie la différence de nombre des cycles entre une plaque non réparée et plaque réparée très remarquable.

Pour la variation de la propagation de fissure en fonction du nombre de cycles de la plaque non réparée et réparée par le Bore/Epoxy et le graphite/Epoxy pour les différents rapports de charge ($R=0$; 0.3 ; 0.6 et 0.7), le rapport de charge est strictement proportionnel à la durée de vie de la plaque et aussi on distingue l'effet de la réparation par composite sur le prolongement de la durée de vie de la plaque fissurée.

Pour les différents matériaux, le Bore/époxy présente une meilleure réparation, vue son augmentation de la durée de vie de la plaque fissurée et réparée dont un nombre de cycles très important, puis le graphite/époxy. Le matériau AL 2024-T3 présente de meilleurs résultats par rapport aux deux autres matériaux tels que le AL 2024-T351 et le AL 7075-T3 AL, relativement aux propriétés mécaniques pour chaque matériau.

Pour la vitesse de fissuration en fonction de ΔK . l'effet du rapport de charge R est clairement remarqué pour le matériau AL 2024-T3, représente une augmentation générale de da/dN avec R pour un ΔK donné, dans les trois états d'étude de la plaque soit sans réparation ou avec réparation (Bore/époxy, graphite/époxy).

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] J.M. Berthelot. Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer New-York. 1999
- [2] MOKHTARI A., 2016.modélisation du comportement et de l'endommagement des composites à matrice thermoplastiques. Mémoire de doctorat. Université mouloud Mammeri tizi-ouzou. P6-25.
- [3] Gharbi, A., Analyse des fissurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage utilisant des capteurs piézo-électriques.
- [4] Jean-Marie BERTHLOT Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures, 4ème édition, Ed TEC&DOC, Lavoisier, 2005.
- [5] g. cailletaud, mécanique des matériaux solides, mars 2012.
- [6] Stéphane HUGUET, « Application de classificateurs aux données d'émission acoustique: identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère », Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2002.
- [7] David SEDAN, « Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite », Thèse de doctorat, l'Université de Limoges, 2007.
- [8] M. Laarej, Etude par spectroscopie raman et modélisation d'un résine composite RTM, Tlemcen, 2010.
- [9] J. M. Berthelot, Mécaniques des matériaux et structures composites, Le Mans: ISMANS, 2010.

- [10] E.J. JULES, « Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis diélectrique », ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARTS ET METIERS, 2001.
- [11] Omiriimen Yamina, « l'effet du traitement des fibres naturelles sur l'endommagement d'un béton polymère », mémoire master, université du m'sila ,2014/2015.
- [12] Doan Thi Thu Loan, « Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylène and époxy matrices », Thèse de doctorat, l'université de Dresden, 2006
- [13] Polycop ; Les éléments Constituants d'un Matériau composite. Consulté le 10/05/2020
- [14] Jean Paul Bailon et Jean Marie Dorlot, Des Matériaux, 3ème Edition, Ecole de Montréal, 2000.
- [15] Daniel Gay, Matériaux Composites 4ème Edition, Hermès 2009.
- [16] B. E. H. LY, "Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose," INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2008.
- [17] Maurice Reyne Technologie des composites Edition HERMES, Paris, 1990
- [18] R.P.C. Decathlon. Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs. Congrès RFIS.
- [19] Jean Marie Berthelot, Mécanique des Matériaux et structures composites, le Mans, Novembre 2010.
- [20] Y. Perrot, Contribution à l'étude des matériaux composites utilisés en construction navale de plaisance, Thèse de l'Université de Bretagne Sud, U.F.R Sciences et Sciences de l'Ingénieur,2006.
- [21] Matériaux composites : Introduction à l'usage des ingénieurs et des techniciens, Ecrit par la Société Européenne de Propulsion (S.E.P), éditeur TEKNEA, TEKNEA, ISBN : 9782877170079,1989, 288 p.

- [22] S. Bensaïd, Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotrope, Engineering Sciences, Hal id : tel-00424804, Université de Nantes, 2006. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00424804>.
- [23] Mohamad JABBADO (2006) Fatigue polycyclique des structures métalliques : durée de vie sous chargements variables Thèse de Doctorat, de l'Ecole Polytechnique Spécialité : Mécanique et Matériaux de Bordeaux.
- [24] A. Compa. Technologie professionnelle, paris 1984
- [25] Mécanique du solide et des matériaux Elasticité-Plasticité-Rupture Jean Claude Charmettes.
- [26] Hichem DJABALI Hichem YOUSFI (2009) Étude expérimentale de la fatigue en flexion rotative Thèse d'ingénieur d'état Département de génie mécanique. Faculté de technologie Université Hadj Lakhdar de Batna.
- [27] Abdulkader Zalt. Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des structures soudées de type caisson. Autre. Université de Lorraine, 2012. Français.
- [28] A.-F. GOURGUES-LORENZON(2006) Comportement, endommagement et rupture par fatigue thèse d'Amine Bennani, soutenue à l'Ecole des Mines de Paris.
- [29] Didier DUPRAT (2004) Fatigue et mécanique de la rupture des pièces en alliage léger Bureau d'études. Aérospatiale Toulouse.
- [30] Bernard Barthélémy (1980) notions pratiques de mécanique de la rupture Paris eyrolles.
- [31] A. BRAND, Calcul des pièces à la fatigue, CETIM (1980).
- [32] R. CAZAUD, G. POMEY, P. RABBE et Ch. JANSSEN, La fatigue des métaux, DUNOD Paris 5e édition (1969).
- [33] Introduction à la résistance des matériaux Cours RDM / A.U : 2012-2013x
- [34] Jérôme BENABES (18 décembre 2006) A proche énergétique non local du calcul de durée de vie de structure en fatigue multiaxiale sous chargement d'amplitude variable application a une roue de train ferroviaire' Thèse de Doctorat, ENSAM, CER de Bordeaux.

- [35] Marc Blétry 2007 Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux.
- [36] Didier DUPRAT (2004) Fatigue et mécanique de la rupture des pièces en alliage léger Bureau d'études. Aérospatiale Toulouse.
- [37] François PLESSIER 2008 Approche mécanique multi-échelle des interactions hydrogène plasticité" LMP Université Bordeaux .
- [38] Abdulkader Zalt. Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des structures soudées de type caisson. Autre. Université de Lorraine, 2012. Français.
- [39] H.LARIBI (2007) , Simulation Numérique de Milieux multifissurés par la Méthode de Discontinuité de Déplacement. Département Génie Mécanique, Ecole Nationale Polytechnique.
- [40] Abderrahim Zeghloul. Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture. Université de Lorraine, 2017. Français.
- [41] le site web officiel de le software AFGROW, Consulté le 30/05/2023, à 14 :00.
- [42] Forman RG, Mettu SR. Behavior of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in Ti-6Al-4V alloy. In: Fracture Mechanics :22nd Symposium, Vol. 1 (Eds H.A. Ernst, A. Saxena, D.L. McDowell), ASTM STP 1131, American Society for Testing and Materials, Philadelphia;1992. p.519-546.

Résumé :

Notre mémoire présente une étude de l'effet de la réparation par patches en composite sur la durée de vie d'une plaque en alliage d'aluminium présentant deux fissures latérales sous sollicitations cycliques en traction sur sa partie supérieure et inférieure. Plusieurs paramètres ont été mis en évidence, tels que le rapport de charge entre la contrainte minimale et maximale, la vitesse de fissuration, ainsi le matériau de la plaque et voir parmi ces matériaux proposés celui qui est le plus résistant à ces sollicitations, en plus, cette plaque a été sollicitée sans réparation et avec réparation par deux composites différents, tels que, le bore/époxy et le graphite /époxy.

Mot clé : plaque- réparation par patches- sollicitation - matériaux composite- rapport de charge - durée de vie – fissuration

Abstract:

Our thesis presents a study of the effect of composite patch repair on the service life of an aluminum alloy plate with two lateral cracks under cyclic tensile stresses on its upper and lower part. Several parameters were highlighted, such as the load ratio between the minimum and maximum stress, the cracking rate, thus the material of the plate and see among these proposed materials the one that is the most resistant to these stresses, in addition, this plate was solicited without repair and with repair by two different composites, such as, boron/epoxy and graphite/epoxy.

Keyword: plate- patch repair- stress - composite materials- load ratio - service life - cracking

ملخص:

تقدم أطروحتنا دراسة لتأثير إصلاح التصحيح المركب على عمر خدمة صفيحة سبائك الألومنيوم مع شقين جانبيين تحت ضغوط الشد الدورية في الجزء العلوي والسفلي. تم تسليط الضوء على العديد من الخصائص، مثل نسبة الحمل بين الحد الأدنى والحد الأقصى للإجهاد، ومعدل التكسير، ومادة اللوحة لننظر من بين هذه المواد المقترحة الأكثر مقاومة لهذه مثل البورون الضغوط، بالإضافة إلى ذلك، تم طلب هذه اللوحة دون إصلاح ومع الإصلاح بواسطة مركبين مختلفين، الايبوكسي والجرافيت / الايبوكسي

الكلمة الرئيسية: لوحة - إصلاح التصحيح - الإجهاد - المواد المركبة - نسبة التحميل - عمر الخدمة - التكسير