

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE SIDI BEL ABBES
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Thèse de Doctorat en science

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Mécanique des matériaux avancés

Présentée par Madame : DEMMOUCHE Nadjet

THÈME

Etude des effets de l'endommagement d'adhésif et de la plasticité sur la réparation des structures fissurées.

Soutenu en Mars 2020
devant la commission d'examen :

– JURY –

Présidente :

- Fekirini Hamida

Professeur UDL de Sidi Bel Abbès

Encadreur:

- Bachir Bouiadjra Bel Abbès

Professeur UDL de Sidi Bel Abbès

Examineurs :

- Aminallah Laid

Professeur U Mascara

- Bouziane Mohamed Mokhtar

Professeur U Mascara

- Berrahou Mohamed

Maître de Conférence CU Relizane

- Salem Mokadem

Maître de Conférence UDL de Sidi Bel Abbès

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

je dédie ce modeste travail:

* *A mon cher regretté, petit frère "BACHIR" Que Dieu lui accorde sa miséricorde et qu'il repose dans son vaste paradis .*

* *Ames très chers parents pour leur patience et leur soutien tout le long de mes études.*

* *A mon cher époux, et mes petits: Yasmine Nour-Alyakine , Mohamed Imed*

-Eddine, Nesrine Hibat-Elrahmane et mon petit poussin Bachir Youcef.

* *A mes frères et ma sœur, mes neveux et mes nièces.*

* *A mes beaux parents, ainsi que mes beaux frères et mes belles sœurs.*

* *A mes amies et mes collègues.*

Remerciements

Je remercie **ALLAH** qui grâce à lui seul j'ai aboutie à de tel niveau et je souhaite etre digne de ces perfections précieuses.

J'exprime mon appréciation et ma gratitude sincères à mon encadreur monsieur **BACHIR BOUIADJRA Bel Abbes** (Professeur à l'université de S.B.A) pour son aide et l'attention continue qu'il a porté à mon travail, sa disponibilité permanente et son notable patience durant ces années, ainsi que je remercie les membres de jury, qui accepté d'évaluer mon travail de thèse.

La présente étude à été effectuée au sein du laboratoire de mécanique des matériaux, Merci pour la qualité de l'accueil et l'amabilité de tous les membres du laboratoire.

je remercie également **M^{elle} FEKIRINI.H, M^R BERRAHOU.M** et **M^R BACHIR BOUIADJRA Bachir**, pour leurs aides techniques et leurs soutiens informatiques.

Un grand merci pour les camarades doctorants du LMP avec qui j'ai passé de bons moments. Merci à ma famille et belle-famille pour leur soutien, j'adresse mes vifs remerciements à mes chères parents.

Enfin, je remercie mon époux qui m'a soutenue et supportée pendant toute la durée de ma thèse.

RESUME

L'assemblage par collage est une technique de plus en plus utilisée dans les industries aéronautique, aérospatiale et médicale. L'étude des assemblages est d'une grande importance et nécessite le développement de techniques de contrôle des performances, au niveau mécanique, que physico-chimique.

L'objet de la présente étude porte sur une analyse numérique par la méthode des éléments finis tridimensionnelle, de la réparation des fissures par patch en composite.

Deux lois de comportement de la structure fissurée sont considérées ; la première est élastique linéaire ou les concepts de la mécanique linéaire de la rupture sont utilisés pour l'étude des performances de réparation. Les résultats numériques ont montré que la zone plastique autour de la tête de la fissure est réduite après collage du patch et cette réduction est sensible pour les deux alliages d'aluminium (le 2024 T3 et le 7075 T6). Les propriétés mécaniques et géométriques du substrat, de l'adhésif ainsi que le patch sont mises en évidence sur les variations du facteur d'intensité de contrainte en pointe de fissure. La deuxième loi de comportement de la plaque fissurée en mode d'ouverture est de type contrainte-déformation. Une approche énergétique, de la mécanique non linéaire de la rupture fondée sur l'intégrale J de Rice, est utilisée pour décrire le comportement des fissures réparées par patch en composite. L'influence et la taille de la fissure ainsi que les épaisseurs de la plaque, de l'adhésif et du composite sont mises en évidence sur les variations de l'énergie de rupture et l'étendue de la zone plastique en pointe de fissure.

Mots-clés :

Patch composite, adhésif, fissure, Réparation, Composite, plaque, défaut, Facteur d'intensité de contrainte FIC, Intégrale J, Zone plastique, moment, traction, module de cisaillement.

ABSTRACT

Bonding is a technique increasingly used in the aviation, aerospace and medical industries. The study of assemblies is of great importance and requires the development of performance control techniques, at the mechanical, as well as physico-chemical level.

The subject of this study is a numerical analysis by the three-dimensional finite element method of repair of cracks by composite patch.

Two constitutive laws of the cracked structure are considered; the first is linear elastic or the concepts of linear fracture mechanics are used to study repair performance. The numerical results showed that the plastic area around the crack head is reduced after bonding of the patch and this reduction is noticeable for the two aluminum alloys (2024 T3 and 7075 T6). The mechanical and geometric properties of the substrate, the adhesive as well as the patch are evidenced by variations in the stress intensity factor at the crack point. The second constitutive law of the cracked plate in opening mode is of the stress-strain type. An energetic approach, nonlinear fracture mechanics based on Rice's J integral, is used to describe the behavior of patch repaired cracks. The influence and size of the crack as well as the thicknesses of the plate, adhesive and composite are shown on the variations in fracture energy and the extent of the plastic crack tip zone.

Keywords:

Composite patch, adhesive, crack, Repair, Composite, plate, defect, Stress intensity factor FIC, Integral J, Plastic area, moment, tension, shear modulus.

المخلص

الترباط هو تقنية تستخدم بشكل متزايد في صناعات الطيران والفضاء والطب. تعد دراسة التجميعات ذات أهمية كبيرة وتتطلب تطوير تقنيات التحكم في الأداء على المستوى الميكانيكي وكذلك الفيزيائي الكيميائي. موضوع هذه الدراسة هو التحليل العددي باستخدام طريقة العناصر المحدودة ثلاثية الأبعاد لإصلاح التشققات بواسطة الرقعة المركبة.

تم النظر في اثنين من القوانين التأسيسية للهيكل المتصدع ؛ الأول هو المرونة الخطية أو تستخدم مفاهيم ميكانيكا الكسر الخطي لدراسة أداء الإصلاح. أظهرت النتائج العددية أن المساحة البلاستيكية حول رأس الشق تقل بعد التصاق الرقعة وهذا الانخفاض ملحوظ لسبائك الألومنيوم (T3 2024 و T6 7075). تتضح الخواص الميكانيكية والهندسية للمادة اللاصقة وكذلك الرقعة من خلال الاختلافات في عامل شدة الإجهاد عند نقطة التصدع. القانون التأسيسي الثاني للوحة المكسورة في وضع الفتح هو من نوع الإجهاد والانفعال. يتم استخدام نهج نشط ، ميكانيكا الكسر غير الخطي على أساس تكامل J Rice لوصف سلوك الشقوق التي تم إصلاحها بالرقع. يظهر تأثير وحجم الشق وكذلك سمك اللوح والمادة اللاصقة والمركب في الاختلافات في طاقة الكسر ومدى منطقة طرف الكسر البلاستيكي.

الكلمات الدالة :

رقعة مركبة ، مادة لاصقة ، صدع ، إصلاح ، مركب ، لوح ، عيب ، عامل شدة الإجهاد FIC ، منطقة بلاستيكية ، لحظة ، توتر ، معامل القص.

SOMMAIRE

-	Introduction général	01
-	Chapitre I : La fatigue des matériaux	
	I-1- Introduction	03
	I-2- Historique du phénomène de fatigue.....	04
	I-3- Définition du phénomène de fatigue.....	05
	I-3-1- c'est quoi la fatigue.....	06
	I-3-2- comment agit la fatigue.....	08
	I-3-3- type de sollicitation en fatigue.....	09
	I-3-4- Courbe de Wohler	11
	I-4- Effet d'entaille.....	12
	I-4-1- Facteur de concentration de contrainte.....	13
	I-4-2- Effet d'entaille en fatigue	14
	I-4-3- Coefficient de réduction de la résistance à la fatigue k_f	15
	I-5- Phase de propagation d'une fissure en fatigue	16
	I-5-1- Amorçage de la fissure.....	16
	I-5-2- La propagation stable.....	17
	I-5-3- La propagation rapide.....	17
	I-6- Fissuration par fatigue	17
	I-7- Facteurs de l'endurance des pièces	18
	I-7-1- Facteurs métallurgiques	18
	I-7-2- Facteurs géométriques	19
	I-7-3- Facteurs de surfaces... ..	19
	I-7-4- Facteurs de sollicitation.....	19
	I-7-5- Facteurs de l'environnement.....	20
-	Chapitre II : Réparation des fissures par collage de patch en composite	
	II-1-1- Historique du collage.....	21
	II-1-2- Définition technique du collage et le secteur d'utilisation	22
	II-1-2-1- une technique d'assemblage	22
	II-1-2-2- les secteurs d'application du collage	23
	II-1-2-3- les techniques du collage.....	24
	II-1-3- Théorie de l'adhésion.....	27
	II-1-3-1- Définition.....	27
	II-1-3-2- Différents théories d'adhésion.....	27
	II-1-4- Principales familles de colle et adhésifs.....	30
	II-1-4-1- Adhésifs époxydes.....	30
	II-1-4-2- Les adhésifs polyuréthanes réactifs.....	31
	II-1-4-3- Colles thermo-durcissable.....	32
	II-1-4-4- Adhésifs thermo-fusible.....	32
	II-1-4-5- Colles émulsions vinyliques et copolymères	33
	II-1-4-6- Les rubans adhésifs	33

II-1-5- Avantages et inconvénients du collage	34
II-1-5-1- Avantages	34
II-1-5-2- inconvénients	35
II-1-6- Comportement mécanique des assemblages collés.....	35
II-1-6-1- Caractéristiques mécaniques.....	35
II-1-6-2- Résistance au pelage	36
II-1-6-3- Résistance au cisaillement	37
II-1-6-4- Résistance à la traction	37
II-1-6-5- Résistance au clivage.....	38
II-1-6-6- Résistance au fluage	38
II-1-6-7- Résistance au chocs.....	39
II-1-6-8- Dureté.....	39
II-1-7- Défauts dans les réparations collés.....	39

- **Chapitre III : Description de l’approche méthodologique.**

III-1- Introduction	42
III-2- Méthode expérimentale	42
III-2-1- Matériaux.....	42
III-2-2- Essai de fatigue.....	44
III-2-2-1- Eprouvettes de l’essai de fatigue.....	44
III-2-2-2- Déroulement de l’essai de fatigue.....	45
III-2-3- Observation des surfaces de ruptures	46
III-3- Approche numérique	46
III-3-1- Méthode éléments finis de la plaque réparée	46
III-3-2- Théorie de la zone endommagée	48

- **Chapitre IV : Propagation des fissures de fatigue réparées par patch en composite.**

IV-1- Introduction	50
IV-2- Durée de vie en fatigue des plaques réparées et non réparées	50
IV-2-1- Plaques non réparées	50
IV-2-2- Plaques réparées	52
IV-3- Analyse des facies de ruptures	54
IV-3-1- Eprouvettes non réparées	54
IV-3-2- Eprouvettes réparées	56
IV-4- Variation de l’intégral J	57
IV-4-1- Eprouvettes non réparées	57
IV-4-2- Eprouvettes réparées	59
IV-5- Vitesse de la propagation de la fissure	61
IV-5-1- Eprouvettes non réparées	61
IV-5-2- Eprouvettes réparées	63
IV-6- Conclusion	65

-	Chapitre V : Interaction entre la plasticité dans la plaque d'aluminium et l'endommagement de l'adhésif.	
	V-1- Introduction	66
	V-2- Variation de la zone plastique en fonction de la longueur de la fissure.....	67
	V-3- détermination de la zone endommagée dans la couche adhésive.....	71
	V-3-1- cas du chargement de 70 Mpa.....	71
	V-3-2- cas du chargement de 200 Mpa.....	75
	V-4- Détermination du taux de la zone endommagée.....	78
	V-5- Conclusion.....	81
-	Conclusion générale et perspectives.....	82
-	Références bibliographiques.....	83

Introduction Générale

Dans les joints collés sous chargement mécanique ou thermique, le transfert de contraintes se produit du moins rigide au plus rigide des adhérents à travers la couche adhésive. Cette propriété a été utilisée pour réparer des structures aéronautiques endommagées par collage d'un patch en composite. Ce collage permet de réduire les contraintes autour du fond de la fissure, ce qui améliore la tenue en fatigue de la structure entière. Le principal avantage de la technique de réparation par patch en composite (RPC) est l'uniformité du transfert des contraintes à travers la zone adhésive; les concentrations de contraintes sont alors évitées, contrairement au rivetage ou au boulonnage où les zones de concentration de contraintes sont inévitables. De plus, la bonne résistance mécanique des matériaux composites et leur faible densité confèrent une meilleure capacité à absorber les contraintes transférées de la région fissurée. Le développement de la technique RCP est limité par plusieurs phénomènes tels que le vieillissement hydrothermal du composite et de l'adhésif et principalement par le décollement éventuel de l'adhésif qui peut survenir lors du chargement de fatigue agissant sur la structure de l'aéronef.

La conception patch en composite est une tâche très difficile en raison de l'interférence entre les effets de plusieurs paramètres, notamment les propriétés mécaniques de différents matériaux (panneaux en aluminium, composites et adhésifs), les propriétés géométriques du patch en composite, ainsi que conditions du chargement. La complexité de la conception est plus forte pour le simple patch composite (sur une seule face) comparé au double patch symétrique. Dans le cas du simple patch, un moment de flexion est généré par le décalage de l'axe neutre du panneau en aluminium. Ce moment augmente les contraintes dans la zone fissurée et réduit ainsi l'efficacité de la réparation. La minimisation de ce moment doit impérativement passer par l'optimisation du rapport de rigidité entre le patch composite et le panneau en aluminium.

La ductilité du métal réparé peut jouer un rôle prépondérant dans les performances de la réparation du moment où elle affecte directement la résistance à la fatigue du matériau. Cet effet de la plasticité n'a pas été suffisamment analysé dans la littérature. Le but de cette thèse est d'étudier les effets d'interaction entre l'endommagement de la couche adhésive et la plasticité dans le métal réparé par la technique de patch en composite. Nous avons choisi deux alliages aéronautiques d'aluminium pour réaliser cette étude : le Al 2024 T3 et le Al 7075 T6. Il est connu que le Al 2024 T3 a un comportement plus ductile. La thèse se compose de quatre chapitres :

Introduction Générale

- Dans les deux premiers chapitres, nous avons présenté une étude bibliographique sur le collage en général et sur la technique de réparation des structures métalliques par patch en composite.
- Dans le troisième chapitre, on a fait une description de l'approche méthodologique, en passant par des méthodes expérimentales tel que l'essai de fatigue et des approches numériques.
- Dans le quatrième chapitre, nous avons étudié expérimentalement la propagation des fissures de fatigue réparées par patch en composite en montrant particulièrement l'effet de la ductilité du matériau réparé sur cette propagation.
- Et enfin, dans le cinquième chapitre, nous avons analysé l'évolution de la zone plastique autour d'une fissure réparée par patch en composite ainsi que la variation de la zone endommagée dans la couche adhésive lors d'une RPC.

CHAPITRE I

La fatigue des matériaux

I-1- Introduction :

Tirer sur un fil de fer ne permet pas forcément de le casser. Par contre, exercer sur celui-ci un mouvement de flexion répété avec des efforts peu élevés engendre une détérioration progressive qui peut alors provoquer sa rupture. Ainsi, tous les matériaux, lorsqu'ils sont soumis à des chargements mécaniques cycliques, c'est-à-dire variables dans le temps, subissent un phénomène de fatigue. C'est le cas par exemple d'un moteur ou d'une machine tournante et des vibrations qu'ils engendrent sur eux-mêmes. Mais ce peut être aussi les efforts exercés sur les ailes d'un avion au cours d'un vol ou bien lors du décollage et de l'atterrissage. C'est aussi le passage de camions sur un pont à une certaine fréquence.

«La résistance à la fatigue est une des préoccupations majeures de l'industrie d'aujourd'hui, plus particulièrement sur les ouvrages de haute sécurité et sur les véhicules, avions ou automobiles »

L'étude de la fatigue des matériaux et des structures est une des activités représentatives du laboratoire. Elle permet des recherches à la fois fondamentales et appliquées, et une ouverture vers l'industrie[01].

L'objectif des chercheurs dans ce domaine est en particulier de bien évaluer les efforts acceptables par les structures afin d'éviter les endommagements et les fissures de fatigue. En effet, la propagation d'une fissure peut aboutir à une rupture brutale et catastrophique.

Le rôle du LMPM dans ce domaine n'est pas de travailler directement sur les structures (c'est celui de l'industrie), mais plutôt de comprendre le comportement des matériaux employés, afin d'établir des lois d'endommagement face aux efforts qui leur sont imposés et d'optimiser les alliages pour qu'ils soient les plus résistants possibles à la fatigue. Ces lois, issues de données de laboratoire, doivent être applicables dans les codes de calcul afin d'évaluer la durée de vie en service des composants. A partir d'un effort donné, et dans des conditions très précises de température et d'environnement, nous étudions le lieu où se crée l'endommagement et sa propagation. Celle-ci est directement en relation avec la microstructure du matériau[02].

Notre but permet de dégager des lois mathématiques reliant les fissures et le nombre de cycles nécessaires pour les propager et produire une rupture. L'objectif est de choisir au mieux la nature du matériau et les dimensions des pièces. Lors des études très fondamentales, nous choisissons le matériau le mieux adapté à la compréhension d'un processus élémentaire de déformation par fatigue. Il y a là une évolution permanente des exigences : les matériaux doivent être de plus en plus résistants compte tenu des performances qui leur sont demandées.

I-2- Historique du phénomène de fatigue :

Le mot fatigue vient d'un mot latin « fatigare » qui signifie « tiredness » en anglais. Ce terme est utilisé fréquemment en science de l'ingénierie pour montrer l'endommagement, la fissuration et la rupture des matériaux sous une sollicitation mécanique cyclique.

À partir du début de la première révolution industrielle (fin XVIIIe - début XIXe), la fatigue des matériaux devient une problématique majeure. On remarque à cette époque que la répétition d'un chargement sur une pièce engendre sa rupture alors que ce chargement appliqué une seule fois n'implique aucun endommagement visible[02].

La fatigue a été mise en évidence et étudiée pour la première fois par l'ingénieur allemand Wöhler qui analysait les nombreuses ruptures d'axes de wagons de chemin de fer (**figure I.1**). Il montra grâce à des essais que le nombre de cycles jusqu'à la rupture d'un arbre dépendait de la contrainte maximale dans l'axe (contrainte de flexion variant entre plus et moins l'amplitude maximale à chaque tour de roue) et des détails géométriques de l'axe. Ce domaine a commencé à se développer avec l'augmentation de l'usage des structures en fer particulièrement dans la fabrication des ponts et des chemins fer. Le premier vrai travail de recherche sur métal a commencé en 1842 à cause d'un accident de chemin de fer à côté de Versailles en France. Cet accident a causé 1500 à 1800 morts à l'époque[03].

Wöhler fut ainsi le premier à établir des courbes de fatigue qui aujourd'hui portent son nom. La (**figure I.2**) donne un exemple de ces courbes telles que présentées par Wöhler. Elle montre le nombre de cycles avant rupture pour des aciers en fonction de la contrainte alternée appliquée aux échantillons. Ces résultats montrent la forte diminution de la durée de vie (du nombre de cycles) causée par la présence d'une concentration de contrainte dans l'éprouvette. On reviendra sur la courbe de Wöhler et sur l'effet des concentrations de contrainte [04].

L'étude de la fatigue des matériaux a démarré avec la première révolution industrielle, de nombreux travaux ont été réalisés dans ce domaine. Malgré cela, il reste toujours des zones d'ombre dans la compréhension des mécanismes de fatigue comme par exemple l'existence d'une limite de fatigue et de l'effet de fréquence de sollicitation.

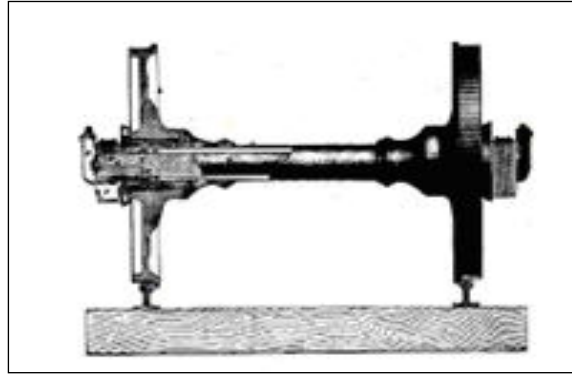


Figure I.1. Axes de wagons de chemin de fer[04].

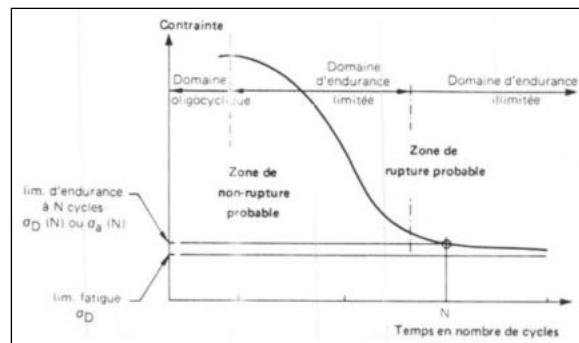


Figure I.2. Allure de la courbe de Wöhler[08]

I-3- Définition du phénomène de fatigue :

Le terme fatigue généralement utilisé pour décrire la déformation et la rupture des matériaux sous chargement cyclique. L'endommagement des matériaux par fatigue provient du caractère cyclique des sollicitations qui leur sont appliquées. Ce dommage peut conduire à la ruine du composant ou de la structure elle-même lorsque son accumulation atteint une valeur critique qui est fonction des matériaux.

Le phénomène de fatigue est lié à l'amorçage et à la propagation d'une fissure à partir d'un défaut au sein de la pièce, (situation favorable à une cohésion locale du matériau du fait d'une forte concentration de contraintes)[05].

On peut identifier deux grandes classes de comportements dus à la fatigue.

- La fatigue associée à un grand nombre de cycles : c'est la plus courante, la rupture a lieu sans aucune déformation permanente et la déformation se produit dans les limites du domaine élastique.
- La fatigue plastique associée à un petit nombre de cycles (fatigue oligocyclique) : c'est celle qu'on rencontre dans le cas du fil de métal plié et déplié. La contrainte est telle qu'elle provoque à chaque cycle, une déformation plastique. Dans ce cas, la durée de vie est beaucoup plus courte ($N < 10^4$ cycles).

Fatigue des matériaux : détérioration progressive des matériaux sans déformation apparente, aboutissant à une rupture. La fatigue d'un matériau résulte de l'application répétée de contraintes. La rupture par fatigue apparaît de façon soudaine et imprévisible, contrairement à l'usure, à la déformation ou à la corrosion, qu'il est possible de détecter bien avant la rupture. L'étude de la fatigue des matériaux est particulièrement importante ; elle permet de déterminer la résistance mécanique d'éléments de machines et de structures soumises à des contraintes périodiques ou à des vibrations[06].

I-3-1- Fatigue :

Pour comprendre ce phénomène prenons un fil d'acier entre deux mains en le coudant dans un sens et puis dans l'autre sens, en faisant cela plusieurs fois jusqu'à la rupture(**figure. I-3**).

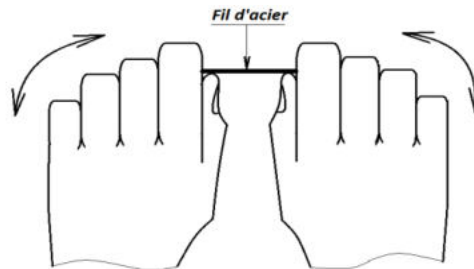


Figure I.3.Rupture d'un fil d'acier sous l'effet d'une flexion cyclique aux mains

Le fil est rompu après 10 à 15 cycles, analysons le problème:

On assimile le fil d'acier à une poutre sur laquelle sont appliqués les efforts des deux mains, dans le premier sens la fibre AB est tirée (sens 1) contrainte positive, lorsqu'on inverse le chargement (sens 2), la fibre AB est comprimée et la contrainte est négative. En répétant plusieurs fois jusqu'à la rupture. C'est le phénomène de fatigue. (**figure. I-4**)[07].

En résumé, la fatigue est la rupture sous des sollicitations répétées.

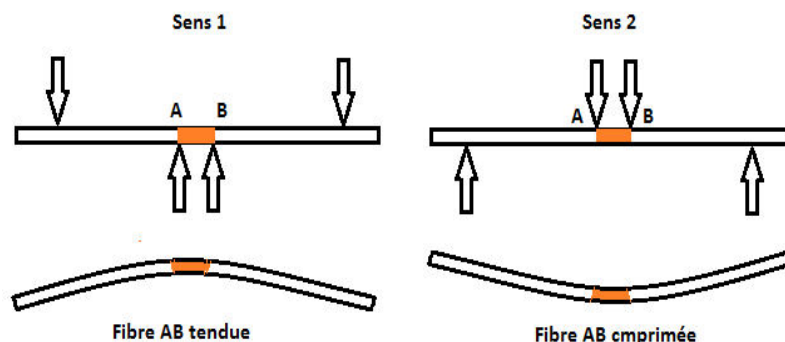


Figure I.4.Modélisation du chargement appliqué par les mains sur le fil d'acier[07].

Prenons quelques images qui montrent le phénomène de fatigue de différents matériaux



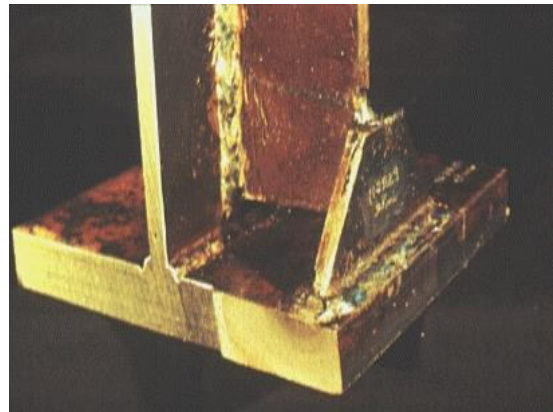
1- Rupture d'un tirant



2- Fissuration au niveau du mécanisme d'atterrissage d'un avion



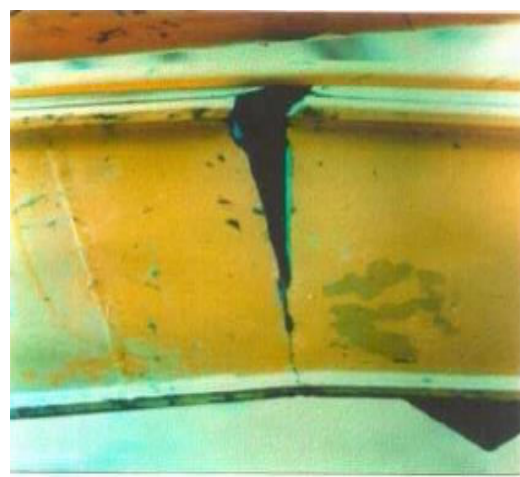
3- Rupture d'un arbre cannelé



4- Rupture au niveau d'une charpente métallique



5- Détachement d'une partie d'une roue dentée



6- Fissuration du monobloc soudé de pelle mécanique

I-3-2- Action de la fatigue :

Considérons une structure soumise à un effort cyclique agissant jusqu'à la rupture (après un nombre de cycles donné) ;(figure. I-6).

L'endommagement est imprévisible, il peut naître (à l'échelle microscopique) souvent à la surface de la pièce comme il peut naître à l'intérieur. En évoluant il passe par 3 stades :

1) **Amorçage** : A cause de la grande finesse du défaut initié, sa détection n'est possible que si on utilise de puissants équipements de laboratoire. Son initiation peut avoir lieu dans des endroits où l'accès est impossible. Dans la figure (figure. I-6) la zone d'amorçage est repérée par zone 1.

2) **Propagation** : Sous l'effet du changement cyclique du chargement la fissure initiée commence à prendre des dimensions importantes menant finalement à la ruine. A ce stade la fissure qui a grandi résultait de la propagation des microfissures causées par le défaut initié dans la première étape, c'est elle qui deviendra la fissure de la fatigue. Sur la figure (figure. I-6) ce stade correspond à la zone 2.

3) **Rupture brutale**:(figure. I-5) Lorsque la fissure atteint une distance de telle façon que la section résiduelle est trop faible pour supporter de fortes contraintes résultant d'une concentration au fond de la fissure, sur la figure (figure. I-6) cette section correspond à la zone 3 [07].

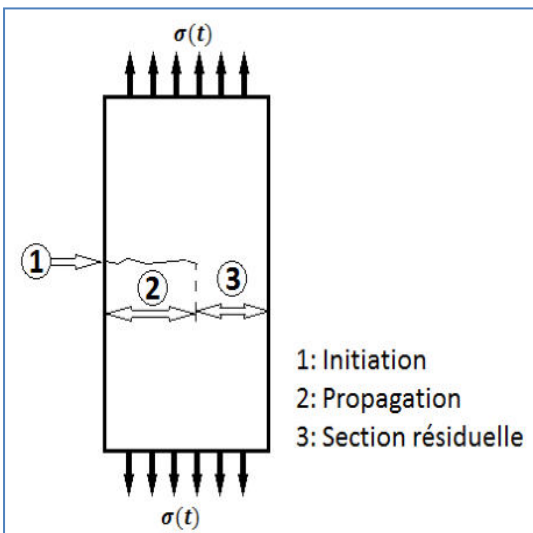


Figure I.5.La section résiduelle

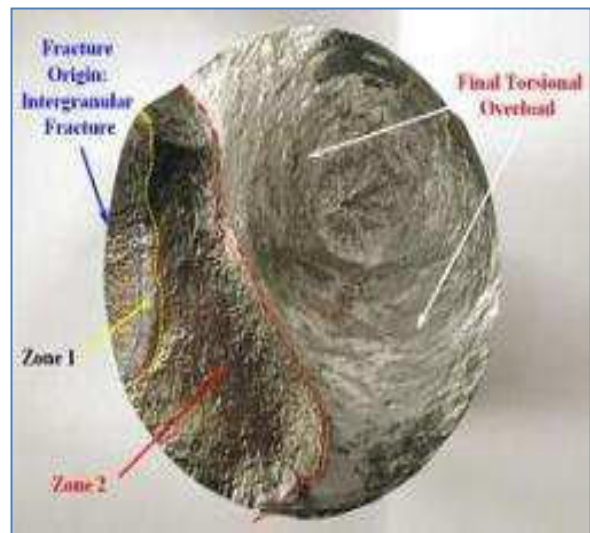


Figure I.6.Faciès de rupture d'un arbre de transmission de voiture de course.

I-3-3- Types de sollicitation en fatigue :

1) **Sollicitations axiales (Traction/Compression):** Dans le système triangulaire ci-contre (**figure. I-7**), Les barres AD, DE sont en compression, tandis que les barres AE et EB sont en traction.

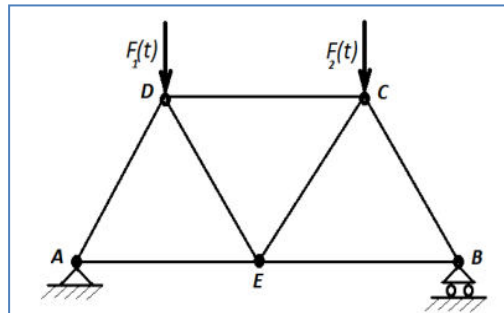


Figure I.7. Système en treillis

2) **Flexion :** On distingue deux types de flexion :

2.1. Flexion ondulée :

Les contraintes de flexion sont de même signe durant les cycles de fatigue. La figure (**figure. I-8**) illustre un exemple de structures en flexion ondulée.

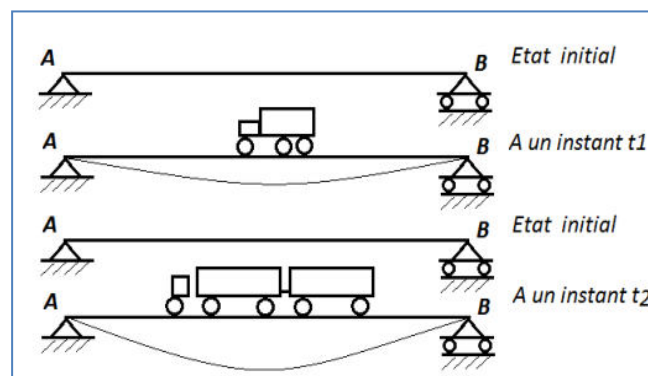


Figure I.8. Cas d'un pont

2.2. Flexion alternée:

Dans ce cas de sollicitation les contraintes sont opposées en signes durant les cycles effectués. Une poutre vibrant sous l'effet d'un chargement dynamique est en flexion alternée, la fibre supérieure tantôt tirée tantôt comprimée.

2.3. Flexion rotative:

Si on assimile la structure, soumise à une flexion rotative, à une poutre tournante par rapport à la direction de la charge (**figure. I-9**) la fibre A se trouve tantôt comprimée tantôt tendue. Ce cas de flexion correspond au type purement alterné c.à.d. que les contraintes de flexion sont égales mais opposées durant les cycles effectués (**figure. I-10**).

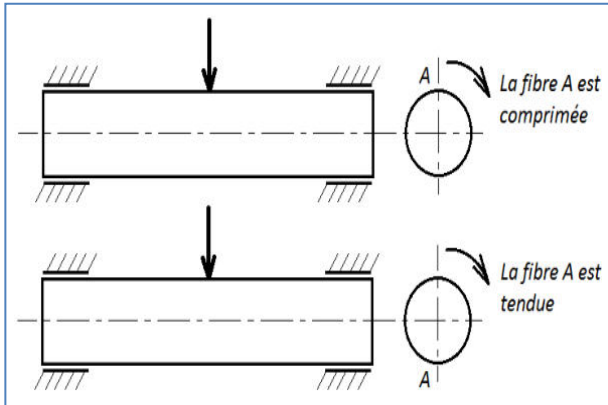


Figure I.9. Flexion rotative

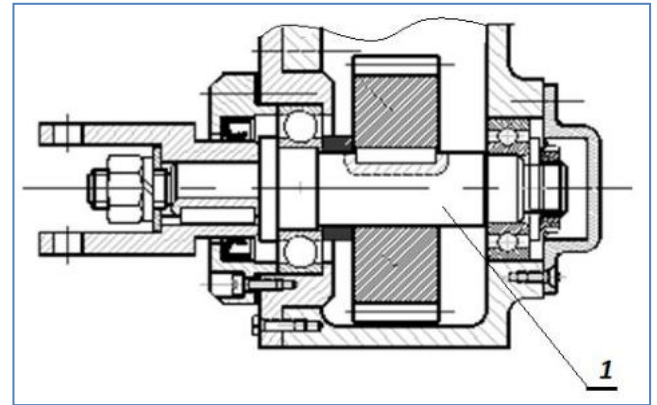


Figure I.10. Arbre en flexion rotative.

3) Torsion;

Cette sollicitation est analogue à la flexion ; en effet on distingue :

3.1. Torsion ondulée

Les contraintes tangentielles sont de même signes. Comme exemple on peut citer la barre de torsion de suspension arrière d'un véhicule (illustrée par la **figure. I-11**).

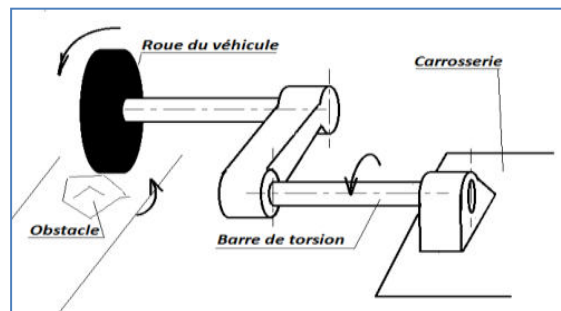


Figure I.11. Barre de torsion d'un véhicule

3.2. Torsion alternative

Les contraintes tangentielles sont de signes opposées. Dans la (**figure. I-12**) l'arbre tournant est en rotation continue et l'arbre oscillant est en rotation alternative, ce dernier est soumis à une torsion alternative.

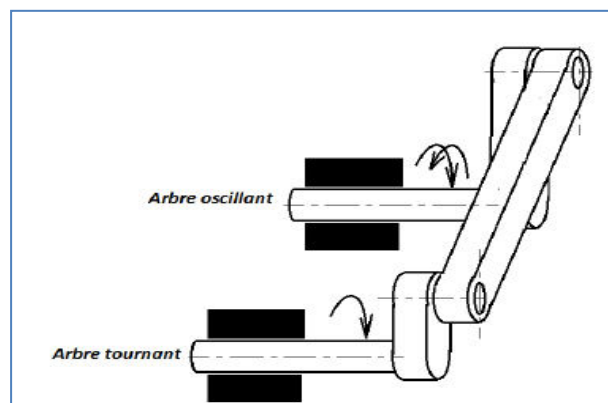


Figure I.12. Mécanisme oscillant

4) Sollicitation combinée:

La sollicitation peut être la combinaison de traction, torsion ou de flexion. L'arbre 1 du réducteur de la figure (Fig. I-10) est soumis à une flexion rotative et une torsion.

5) Fatigue en contact:

Au moment du contact le corps 1 exerce une pression de contact sur le corps 2 cela engendrera des contraintes maximales de cisaillement sous la surface de contact (figure. I.13). Une pression répétée pourrait entraîner une fissuration et une détérioration de la zone de contact c'est la fatigue de contact. Ce phénomène est très rencontré surtout dans les roulements, les engrenages et les chemins de fer. (figure. I.14).

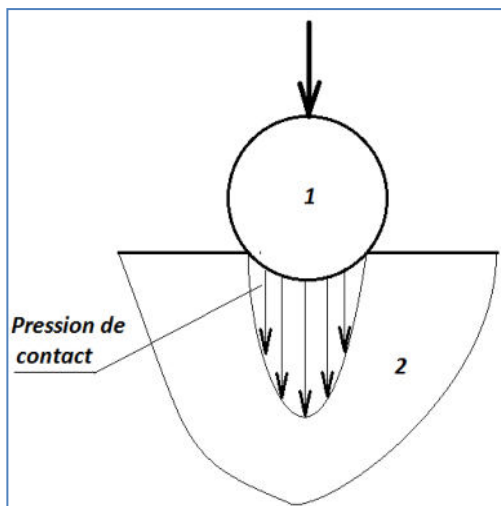


Figure I.13. Contact de deux corps



Figure I.14. Détérioration d'une bague de roulement.

I-3-4- Courbe de Wohler :

La courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule permettant de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans le domaine de fatigue. Elle définit une relation entre la contrainte appliquée σ_a et le nombre de cycles à rupture N_R [08].

Pour la tracer, on réalise généralement des essais simples, qui consistent à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude de chargement constante fluctuant autour d'une valeur moyenne fixée, et de noter le nombre de cycles à rupture N_R .

Pour plus de commodité, ce nombre N_R est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique, et l'amplitude de contrainte σ_a est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire. Ainsi, à chaque éprouvette testée, correspond un point du plan (N_R, σ_a) . A partir d'un certain nombre d'essais, nous établissons la courbe de Wöhler, (figure. I.15).

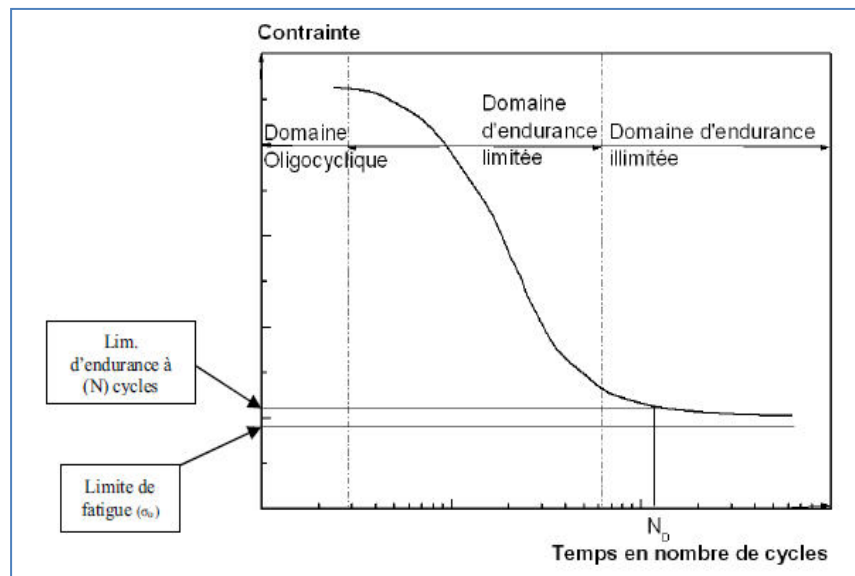


Figure I.15. Courbe de Wöhler ($\sigma - N_R$) [08].

- **Limite de fatigue**

C'est la contrainte pour laquelle aucune rupture n'est observée après un nombre de cycles infini, Figure I.15.

- **Limite d'endurance**

La limite d'endurance correspond à la valeur limite vers laquelle tend l'amplitude de contrainte lorsque le nombre de cycles devient très grand. Dans le cas des aciers, cette limite d'endurance peut être réellement approchée avec 10^7 cycles [09].

- **Durée de vie**

C'est le nombre de cycles au bout duquel l'éprouvette rompt.

Les courbes de Wöhler présentent un coude plus ou moins prononcé entre 10^6 et 10^7 cycles. Plusieurs auteurs [10] ont proposé des expressions analytiques pour les représenter dans le domaine d'endurance limité. Ces équations permettent de calculer le nombre moyen de cycles à rupture en fonction de l'amplitude de contrainte. L'équation la plus simple et la plus utilisée dans les codes de calcul est :

$$N_R = \frac{C}{\sigma_a^m} \tag{Équation I.1}$$

C et m des coefficients qui dépendent du matériau.

Cette équation peut s'écrire : $\text{Log} N_R = \text{Log} C - m \cdot \text{Log} \sigma_a$ Équation I.2

I-4- Effet d'entaille:

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 [11].

Les entailles peuvent être de quatre types :

- métallurgiques,
- chimique (corrosion),
- mécaniques,
- de service.

Ces discontinuités (qui peuvent être un trou, un 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, associée aux discontinuités géométriques, réduisent les résistances statiques et cycliques des structures (figure.I.16).

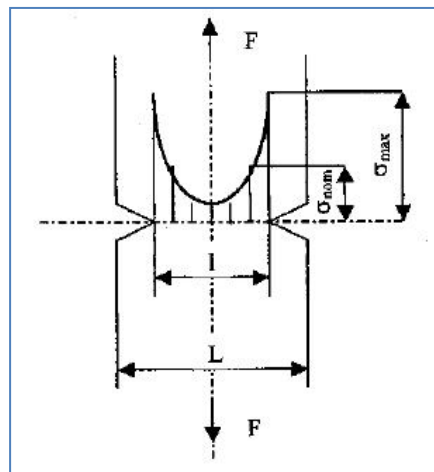


Figure I.16. Champ de contrainte dans une éprouvette entaillée sollicitée en traction[11].

I-4-1- Facteur de concentration de contrainte :

Dans le domaine élastique, Peterson [12] 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 s'écrit :

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}}$$

Équation I.3

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

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_g}$$

Équation I.4

On constate que ce facteur dépend de la géométrie locale de la pièce et du type de sollicitation. Dans le domaine élasto-plastique, le facteur de concentration de contrainte K_σ est défini par deux manières:

a. par rapport à la contrainte nominale :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_L}{\sigma_{nom}}$$

Équation I.5

b. ou par rapport à la contrainte globale :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_L}{\sigma_g}$$

Équation I.6

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.

I-4-2- Effet d’entaille en fatigue :

L’amorçage en fatigue est sensible à l’effet d’entaille (**figure I.17**), où la courbe de Wöhler, obtenue sur éprouvettes lisses, est comparée à celle obtenue sur éprouvettes entaillées [13].

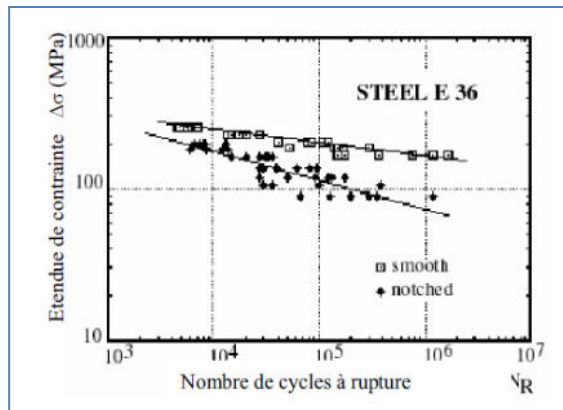


Figure I.17. Effet d’entaille en fatigue (Acier E 360, barres cylindrique lisses et entaillée soumise à un moment fléchissant) [13]

• **Rôle de l’amplitude de la contrainte locale maximale sur le processus de fatigue**

A partir des résultats expérimentaux, le calcul de l’amplitude de la contrainte locale maximale est réalisé par la méthode des éléments finis. Cette contrainte est reportée en fonction du nombre de cycles à rupture et comparée à la courbe de référence en fatigue obtenue sur éprouvettes lisses.

On remarque que la courbe $\Delta\sigma_{max} = f(N_R)$ est au-dessus la courbe de référence en fatigue (**figure I.18**).

Il est donc nécessaire de réduire la valeur de l’amplitude de la contrainte maximale jusqu’à une valeur effective. Ceci peut être obtenu par deux méthodes : l’approche “point chaud” et la méthode volumétrique.

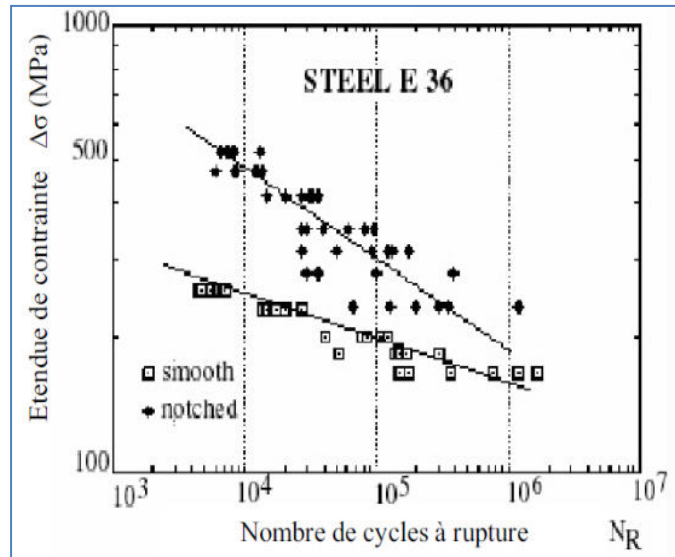


Figure I.18. Amplitude de contrainte maximale en fonction du nombre de cycle en fatigue [13]

I-4-3- Coefficient de réduction de la résistance à la fatigue K_f

L'effet d'entaille en fatigue se mesure par le rapport :

$$K_f = \frac{\text{Limite d'endurance sur éprouvette lisses}}{\text{Limite d'endurance sur éprouvette entaillées}} \tag{Équation I.7}$$

Remarquons que K_f est un coefficient cyclique, alors que K_t est un coefficient statique.

La sensibilité à l'effet d'entaille s'exprime par le facteur q :

$$q = \frac{k_f - 1}{K_t - 1} \tag{Équation I.8}$$

On utilise parfois le facteur K :

$$K = \frac{K_t - K_f}{K_t - 1} = 1 - q \tag{Équation I.9}$$

Le facteur (q) peut varier de 0 à 1 :

- lorsque q = 0 (K_f = 1) le matériau n'est pas sensible à l'effet d'entaille.
- lorsque q = 1 (K_f = K_t) il n'y a pas d'adaptation et l'effet obtenu est égale à l'effet théorique.

Les différentes expressions mathématiques donnant le coefficient de contrainte en fatigue K_f sont résumées dans le **Tableau I.1** :

Auteur	Expression	Paramètre
Peterson [12]	$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \left(\frac{a_p}{\rho}\right)}$	a_p : constante du matériau
Heywood [14]	$K_f = \frac{K_t}{1 + 2\sqrt{\frac{C_H}{\rho}}}$	$C_H = f$ (résistance ultime de matériau R_m , géométrie)
Siebel et Stieler [15]	$K_f = \frac{K_t}{1 + \sqrt{1 + C_s \cdot \chi}}$	$C_s = f$ (R_e , constante du matériau)
Neuber [16]	$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{a_N}{\rho}}}$	$a_N = f$ (R_m)
Khun et Hardraht [17]	$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{\pi}{\pi - \omega} \sqrt{\frac{C_{KH}}{\rho}}}$	$C_{KH} = f$ (R_m) ω : angle d'ouverture d'entaille

Tableau I.1: Expressions de K_f

I-5- Phase de propagation d'une fissure en fatigue :

L'évolution d'une fissure de fatigue peut être divisée en trois phases [18] :

I.5.1- Amorçage de la fissure : (phase A dans la figure I.19)

Il est difficile de donner une définition de l'amorçage suivant que l'on s'intéresse à l'évolution microstructurale ou que l'on considère l'apparition d'une microfissure détectable par une technique quelconque. Par exemple on peut définir le nombre de cycles d'amorçage N_a pour une longueur de fissure de l'ordre de 0,1mm. Le stade d'amorçage est très important puisqu'il peut représenter jusqu'à 90% de la durée de vie du matériau dans le cas de la fatigue à très grand nombre de cycles. L'amorçage d'une fissure est influencée principalement par la différence de contraintes $\Delta\sigma$, par le facteur de 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.

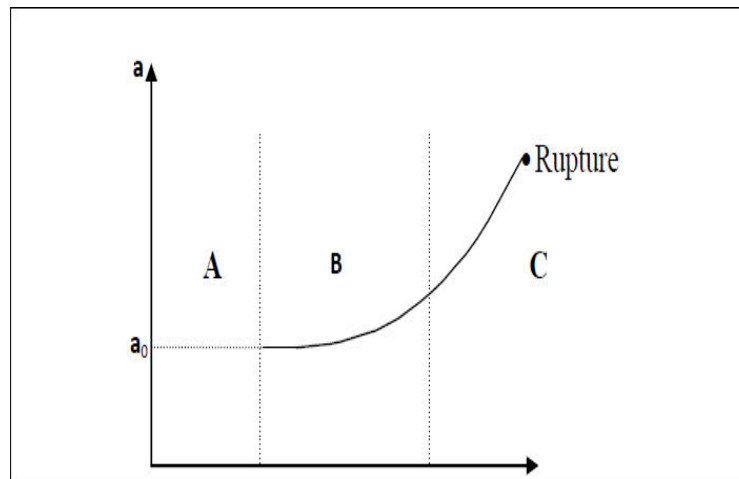


Figure I.19. Représentation schématique de la propagation d'une fissure [18]

I.5.2- Propagation stable : (phase B dans la figure I.19)

Elle est influencée principalement par la différence de contraintes $\Delta\sigma$, par la géométrie 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.

I.5.3- Propagation rapide: (phase C dans la figure I.19)

Elle 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.

I-6- Fissuration par fatigue:

I.6.1. 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 [19], 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 I.20**). 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 cycles et tracer la courbe de fissuration de l'éprouvette ou des pièces considérées, soumises à la contrainte périodique maximale. On peut également reporter la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles et tracer la courbe de fissuration de l'éprouvette ou des pièces considérées, soumises à la contrainte périodique maximale.

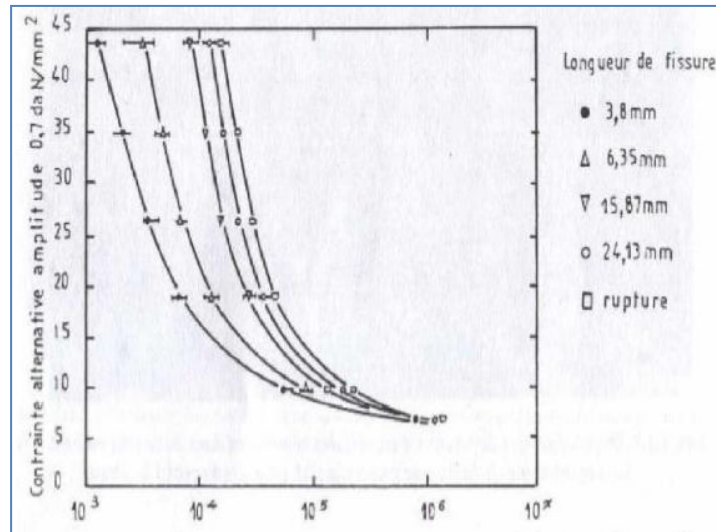


Figure I.20. Courbe de fissuration donnant la longueur de la fissure selon le nombre de cycles et le niveau de contrainte [19].

- 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.

I-7- Facteurs 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.
- Les facteurs qui agissent sur la fatigue sont très nombreux et on peut les classer en quatre catégories [18] :

I.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 [19].

I.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) [19].

I.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 [19].

I.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 [20].
- **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 microdéformations 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 [21] :

- 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 [21].

I.7.5- Facteur de l'environnement:

- **Influence de la température:** La limite élastique et la résistance à la traction diminuent 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 [21].

CHAPITRE II

Réparation des fissures par collage de patch en composite

II-1-Historique du collage:

Le collage est l'une des premières techniques d'assemblage d'une structure utilisée par l'homme. Ce dernier s'est en effet servi très tôt des produits d'origine végétale, animale et minérale tels que la gomme arabique, le latex, les farines de céréales, le goudron etc..., pour concevoir de la colle. Dès la plus haute antiquité, la cire d'abeille fut par exemple utilisée pour les sceaux. Cette technique permettait de fermer un pli et de graver, par moulage, une signature attestant l'identité de l'expéditeur[22].

L'emploi des adhésifs était connu dès 4500 av. JC. Ces adhésifs étaient composés de matières premières animales et végétales, comme la colle d'os, (graisse animale) et de caséine, ainsi que de goudron, de poix, de cires, etc. C'est seulement à la fin du 19^{ième} siècle(en 1876 environ) que l'on produit les premières solutions de caoutchouc et de résines avec du benzène qui servent à un collage relativement fiable du bois, du papier, du carton, des tissus et du cuir.

Au début du XXe siècle, d'autres techniques d'application de colles naturelles se développent comme l'emballage et l'étiquetage. Cette situation change brutalement avec la fabrication des résines synthétiques et le développement de la chimie des macromolécules.

La notion de colle structurale apparaît dans les années 1940. Les études entreprises sur les collages caoutchouc-métal et bois-métal et la mise au point des polyuréthanes et des colles phénoliques impulsent le développement des techniques de collage métal-métal. Ces colles, qui permettent une très grande résistance, commencent à être utilisées dans la construction des avions. Les résines époxy (permettant d'effectuer des collages sous faible pression) et les polymères silicones (utilisés soit pour coller, soit pour jouer un simple rôle de joints d'étanchéité et/ou de dilatation thermique) sont découverts à la même époque [22].

C'est après la Deuxième Guerre mondiale que le collage empirique devient véritablement une science. Les laboratoires de recherche et de développement commencent à étudier les lois du collage, le vieillissement et la durée de vie des assemblages collés. Diverses théories et modèles sont proposés pour comprendre les mécanismes du collage, pour déterminer les principaux paramètres actifs ainsi que leurs importances respectives selon les conditions de réalisation de l'assemblage souhaité [23].

Les domaines d'application sont dès lors de plus en plus vastes, ils ne sont plus cantonnés à l'aérospatial et à l'industrie. Les médecins et dentistes sont en effet intéressés par ces techniques de collages. Des colles biocompatibles ont été mises au point pour résoudre des problèmes de fixation en chirurgie et en odontologie. Par exemple, en orthopédie dento-faciale, les verrous sont collés sur la face externes des dents pour modifier la denture en cas de malocclusion et d'esthétisme ingrat [24].

II-2-Définition technique du collage et le secteur d'utilisation :

Le collage est une technique d'assemblage moderne et assez complexe à mettre en œuvre. Il est nécessaire d'avoir de bonnes connaissances dans la théorie de la colle pour pouvoir appliquer cette méthode dans des conditions satisfaisantes.

Le collage ne doit pas être un palliatif ou une roue de secours. Il faut penser au collage dès la conception du produit. Les conditions de réussite sont d'autant plus grandes que l'on maîtrise la théorie des adhésifs et que l'on a de bonnes notions des colles disponibles sur le marché. Le collage est une technique qui est très couramment utilisée. Ainsi, de nombreux objets peuvent être collés : dans une automobile par exemple, on colle le pare-brise, et sur sa face interne la vignette l'opercule d'un yaourt adhère également au pot grâce à de la colle. Selon l'utilisation que l'on fait de ces objets, les colles sont plus ou moins résistantes (l'opercule du yaourt doit se décoller rapidement et facilement, à la différence du pare-brise sur une voiture) [25]

Le collage est un procédé qui permet de maintenir solidement et durablement deux matériaux semblables au moyen d'une colle. Le terme de colle reste encore souvent employé pour désigner des formulations à base de produits naturels (végétaux, animaux) alors que le terme d'adhésif est plus réservé à des formulations faisant appel à des résines de synthèse ou élastomère. Cette distinction tend à disparaître pour employer le mot adhésif comme terme générique [26].

II-2-1- Technique d'assemblage :

La géométrie des collages dépend, bien entendu, du cas de figure et du contexte général, mais dans de nombreux exemples, le collage se fait en recouvrement.

L'efficacité d'un collage dépend fortement de la géométrie d'assemblage. Chaque application nécessite une conception adaptée au mode de sollicitation. Généralement les adhésifs sont efficaces lorsqu'ils travaillent en cisaillement. Les efforts de traction ou de pelage sont moins bien supportés. Un autre paramètre important est la surface de recouvrement, ainsi pour un collage en bout (**figure II.1**), présentant une surface restreinte, le joint a une résistance insuffisante pour la transmission des sollicitations. La résistance est très faible par rapport à celle des pièces assemblées[26].

Le joint à simple recouvrement permet une répartition des charges convenable, mais la distribution des contraintes n'est pas homogène, ce qui a pour effet d'engendrer un moment de flexion. Pour pallier à ce problème, il est possible de modifier les géométries ; ainsi, optimiser la répartition des contraintes, comme pour le cas du joint à simple recouvrement biseauté qui réduit les contraintes aux extrémités (**figure II.1**). Autre exemple, plus résistant, est le joint bord-à-bord à double recouvrement symétrique qui permet une très bonne transmission des sollicitations, sans déformation sous les

contraintes les plus élevées. Il existe de nombreuses configurations adaptées à chaque condition d'effort (Cognard, 2003)[27].

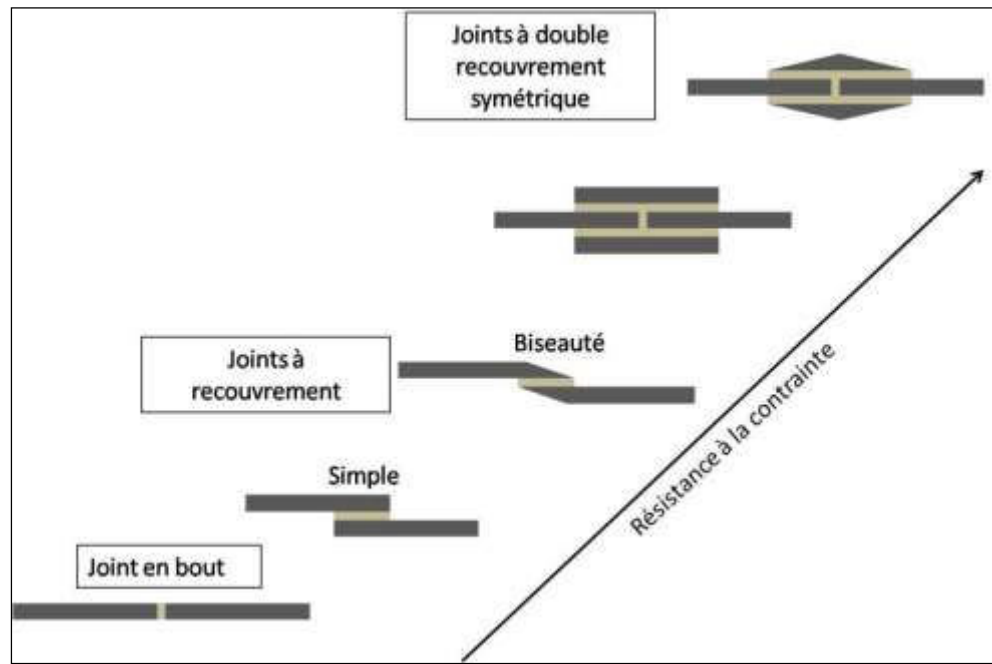


Figure II.1. Représentation schématique de différentes géométries d'assemblage[27]

II-2-2- Les secteurs d'applications du collage :

Les principaux secteurs d'application des adhésifs sont l'emballage, la construction et le transport, représentant plus de 2/3 des débouchés des adhésifs, le marché du bricolage couvre environ 8 % du marché mondial par des applications diverses, principalement à usage domestique[28].

- **L'emballage:** le marché de l'emballage, représentant environ 390 milliards d'euros, repose prioritairement sur l'Amérique du nord et l'Europe de l'Ouest. ces deux zones représentent environ 60% du marché mondial.

Au sein de ce marché, le papier et le carton arrivent pratiquement en position équivalente avec respectivement 141 milliards d'euros et 133 milliards d'euros.

- **La construction:** le secteur de la construction reste globalement au niveau mondial l'une des plus importantes activités, avec 10% de l'activité mondiale. les premières applications se développent eu égard à la facilité d'utilisation des colles et leur faible cout, dans l'isolation, les évacuations et les joints soudés.
- **Le transport:** le marché mondial des véhicules représente environ 55 millions de véhicules, dont 70% sont des voitures particulières.

L'utilisation des adhésifs est souvent liée à l'usage des plastiques mais aussi justifiée par les propriétés de rigidité, d'étanchéité et antivibratoire. Il présente environ 10% de la demande mondiale d'adhésifs.

- **Le bois:** le secteur du bois comprend les planches, le contreplaqué et les panneaux de particules. Le collage est traditionnellement une technologie très présente utilisant des adhésifs peu coûteux le plus souvent à la base de solvants du fait de leurs emplois faciles. Les adhésifs utilisés dans le secteur du bois représentent entre 8 et 10% des marchés mondiales des adhésifs.
- **Le secteur de matériel électrique:** ce secteur a vu le nombre d'applications fortement augmenter du fait du besoin d'assembler des matériaux différents. Les adhésifs sont aussi utilisés pour atténuer le son et les vibrations ainsi que pour assurer l'isolation et l'emballage. entre 2 et 4 des adhésifs mondiaux sont consommés dans ce secteur.
Annuellement, ce marché peut être estimé à environ 222 millions de pièces uniquement pour les équipements ménagers allant depuis le réfrigérateur en passant par la machine à laver et le four à micro-ondes[28].
- **Le secteur de matériel électronique:** ce secteur est une niche pour les adhésifs. Il représente moins de 2% de la demande mondiale. Le développement des ordinateurs et téléphones portables a conduit à une croissance rapide durant ces dernières années.
- **Le secteur de la chaussure:** le marché de la chaussure représente un secteur fortement consommateur d'adhésifs souples. L'obligation de remplacer les colles solvantées par des colles aqueuses, plus coûteuses et souvent moins performantes sur ces applications, a favorisé les pays à faible coût de main d'œuvre [28].
- **Le secteur médical:** le développement du collage dans le secteur médical repose à la fois sur le développement de nouveaux adhésifs remplaçant la suture et sur le développement de l'usage des matières plastiques.
- **Le secteur du textile:** couvrant la fabrication de linge de maison et d'articles d'ameublement, la fabrication d'autres articles confectionnés en textile, la fabrication des tapis et moquettes[29]

II-2- 3- les techniques du collage:

Afin de réaliser un bon collage, une colle doit mouiller les deux surfaces qui vont être assemblées, elle doit donc être fluide au moment de l'application. Pourtant le film de colle doit durcir pour acquérir sa cohésion [30].

- Dans le cas des colles solvants, on peut arriver à ce résultat de plusieurs façons:

- collage humide.
- collage après évaporation des solvants.
- colle contact.
- Réactivation solvant ou chaleur.

- Dans le cas des colles chimiquement réactives, par la polymérisation,
- Dans le cas des colles thermo-fusibles, par refroidissement du produit déposé à chaud.

❖ Le collage humide:

Le collage humide consiste en l'enduction de l'une ou l'autre des deux surfaces qui doivent être assemblées et en leur mise en contact immédiate. Cette méthode ne peut être utilisée que pour des surfaces poreuses afin de permettre l'évaporation ultérieure du solvant. La force de cohésion du joint sera très faible au départ, elle augmentera progressivement avec le temps en fonction de l'évaporation du solvant[30].

❖ Le collage thermo-fusible:

Dans ce principe de collage, l'adhésif passe de l'état solide à l'état liquide par chauffage puis de l'état liquide à l'état solide par refroidissement. Refroidie, la colle durcit sans modification chimique.

Le temps de prise et l'assemblage seront fonction de l'état de surface des supports, des caractéristiques de l'adhésif et de la pression.

❖ Le collage contact:

Cette technique est identique au collage avec évaporation des solvants. Le temps de séchage sera lui aussi variable en fonction du type de colle et de la température ambiante.

Les colles contact développent des performances importantes aussitôt après la mise en contact des deux surfaces en réclamant une pression plus régulière sur tout le joint réalisé. On utilise cette méthode chaque fois que le joint de colle doit être sollicité dans les heures qui suivent l'adhésion. Généralement, ce sont des colles à base de polychloroprène qui possèdent des caractéristiques particulières.

❖ Le collage par réactivation:

On utilisera les méthodes de réactivation chaque fois que l'on souhaitera obtenir des performances maximales, que l'on ne pourra pas attendre le temps normal d'évaporation des solvants ou que l'on voudra stocker des pièces encollées avant utilisation[30].

* Réactivation solvants

Dans cette méthode, le film de colle est parfaitement sec sur les surfaces à joindre. On imprègne le film sec avec le solvant correspondant; cela permet de rendre poisseux le film de colle et lui redonne de l'adhérence. On peut de cette manière assembler immédiatement les deux matériaux. Il est

indispensable d'utiliser, pour cette réactivation, le solvant correspondant à cette colle ou un solvant qui permet de dissoudre partiellement le caoutchouc de base de la colle.

***Réactivation chaleur**

Cette méthode sera utilisée pour des films de colle secs sur les matériaux. Sous l'action de la chaleur, on ramollit le film sec pour redonner la possibilité d'adhésion sur les surfaces en contact. On presse les matériaux assemblés et la cohésion du collage est immédiatement importante. Généralement, on presse pendant ce chauffage ce qui permet d'obtenir les meilleures performances. On laisse refroidir l'assemblage en maintenant la pression.

Une température d'environ 100 °C, une pression de 2 à 3 bars pendant 2 à 3 minutes représentent des conditions moyennes de réactivation chaleur.

❖ Le collage avec évaporation des solvants:

Dans cette méthode, la colle est déposée sur les deux supports et on attend l'évaporation de la plus grande partie des solvants contenus dans le film de colle. Un test simple pour déterminer le moment de presser l'un contre l'autre les deux matériaux ; cela consiste à contrôler l'adhésion du film de colle avec le doigt. Si le film de colle est adhésif au dos du doigt sans transfert de colle, l'assemblage est possible sinon il est nécessaire d'attendre plus longtemps [30].

- La Polymérisation

Pour les produits à 100% d'extrait sec, la mise en œuvre du produit ne peut évidemment être fonction des solvants.

✓ Par mélange

Ces produits se présenteront sous forme de deux parts : (base et durcisseur): A et B qu'il convient de mélanger intimement pour obtenir un produit final qui après polymérisation aura d'excellentes performances.

✓ Par polymérisation sous l'action de l'humidité

L'humidité atmosphérique provoque une polymérisation des produits avec un développement progressif des performances en fonction de l'évolution de la réaction sous l'action de l'humidité. On atteint des valeurs maximales après plusieurs jours[30].

✓ Par polymérisation sous l'action de la chaleur

Dans le cas de produits structuraux, la plupart des polymérisations sont obtenues par la chaleur. Une température de 100 à 200 °C sera nécessaire pendant 20 à 60 minutes.

✓ Par simple contact entre la base et le durcisseur

C'est le cas des colles acryliques.

II-3-Théorie de l'adhésion:**II-3-1- Définition:**

L'adhésion est une liaison interfaciale, les forces de liaisons peuvent être soit d'origine physique, soit d'origine chimique. Le phénomène d'adhésion fait intervenir plusieurs facteurs. D'abord liquide ou fluide, la colle (ou un adhésif) est étalée sur l'une (ou sur les deux) surfaces à assembler et s'y accroche par divers mécanismes physiques ou chimiques. C'est le phénomène dit d'**adhésion** ; puis les matériaux sont assemblés et la colle durcit ou sèche: c'est ce que l'on appelle le **durcissement** ou le **séchage** ou la **prise** ou la **polymérisation** de la colle[28].

Les colles (ou adhésifs) se caractérisent donc par l'adhésion et la cohésion (ou solidité finale).

Que l'on s'intéresse à la formation de l'interface colle-solide ou à sa destruction, il est nécessaire d'en comprendre les mécanismes. Malgré une large variété d'adhésifs dans de nombreux domaines on distingue quatre types de mécanismes dans la littérature (Wake, 1978 [31] ; Shanahan,1991[32]; Chawla, 1998 [33] ; Awajaa, 2009 [34]): (1) l'adhésion physique, (2) l'adhésion chimique, (3) l'adhésion mécanique et (4) la théorie de la diffusion ou inter-diffusion.

II-3-2- Différentes théories d'adhésion:

Un bref rappel sur les principales théories reconnues actuellement est comme suit:

❖ **Théorie mécanique**

L'un des premiers modèles utilisés pour rendre compte de l'adhésion fut développé par Mc Bain et Hopkins en 1925, il s'agit de l'ancrage mécanique. Ce modèle résulte de la pénétration par capillarité de la colle liquide dans les pores et aspérités des surfaces rugueuses à assembler, suivi de la solidification de la colle. L'augmentation de la surface de contact réelle et l'accroissement du nombre de liaisons interfaciales expliquent l'accroissement de la résistance aux tests mécaniques. Pour obtenir une bonne surface de contact, la rugosité n'est pas le seul critère important, le mouillage, vu précédemment, intervient comme phénomène complémentaire, puisqu'il va permettre de pénétrer au mieux dans les aspérités de la surface (**figure II.2**). (Kim et al, 2010) montrent l'importance de la morphologie de l'état de surface sur la force d'adhésion en contrôlant la rugosité de surface[35].

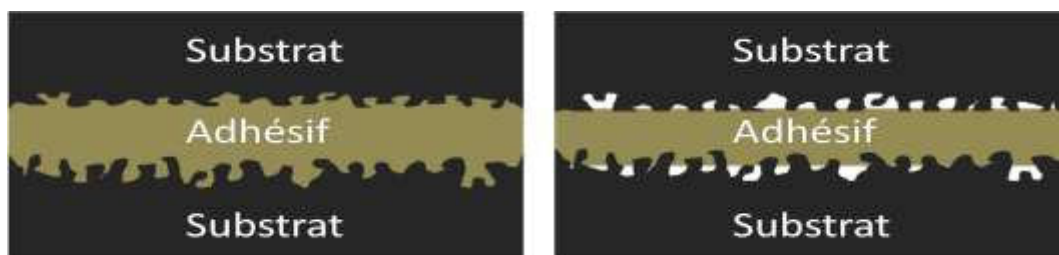


Figure II.2.Modèle de l'ancrage mécanique. La colle doit mouiller parfaitement la surface du solide (image de gauche) afin d'éviter le piégeage (image de droite) de bulles d'air [35].

❖ Théorie de l'adsorption et du mouillage

L'efficacité d'un collage dépend fortement du contact entre l'adhésif et le matériau à assembler. En général, lors de l'application, les adhésifs se trouvent sous une forme liquide ou sont susceptibles de le devenir, dans le cas, par exemple, des thermoplastiques ; ils passent de l'état solide à liquide par chauffage. Dans ce cas, les adhésifs vont s'étaler sur la surface avec plus ou moins de facilité. Ce phénomène est appelé le mouillage [36][37].

Le mouillage et l'adsorption mettent en jeu des liaisons physiques faibles, type Van Der Waals [38] de l'ordre d'une dizaine de KJ/mole, qui se compose de liaisons entre deux molécules présentant chacune un dipôle permanent et la liaison entre une molécule avec un dipôle permanent et une autre avec un dipôle induit, correspondant à deux dipôles instantanés. A ces liaisons s'ajoutent les liaisons donneur-accepteur, appelées «acide-base», qui s'établissent par pont hydrogène lors du partage d'un atome d'hydrogène entre deux composés. Ces différents types de liaisons conduisent à une énergie d'adhésion réversible faible de l'ordre d'une centaine de KJ/mole.

Ces forces secondaires sont directement liées aux énergies libres de surface et d'interface, γ , des surfaces en contact. Elles sont elles-mêmes liées au travail thermodynamique réversible d'adhésion, W_a , entre l'adhésif et le substrat.

Lorsqu'une goutte de liquide est déposée sur une surface plane, celle-ci adopte une configuration minimisant l'énergie du système, rendant compte des interactions entre liquide et solide (**figure II.3**).

La goutte s'étale avec un angle sur la surface du solide. Les énergies libres interfaciales γ_{SV} , γ_{LV} et γ_{SL} (S, L et V représentent le solide, le liquide et la vapeur respectivement) interviennent dans les équations de Young et de Laplace qui décrivent l'équilibre thermodynamique de la goutte dans son environnement [39]:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos(\Theta) \quad \text{Équation II.1}$$

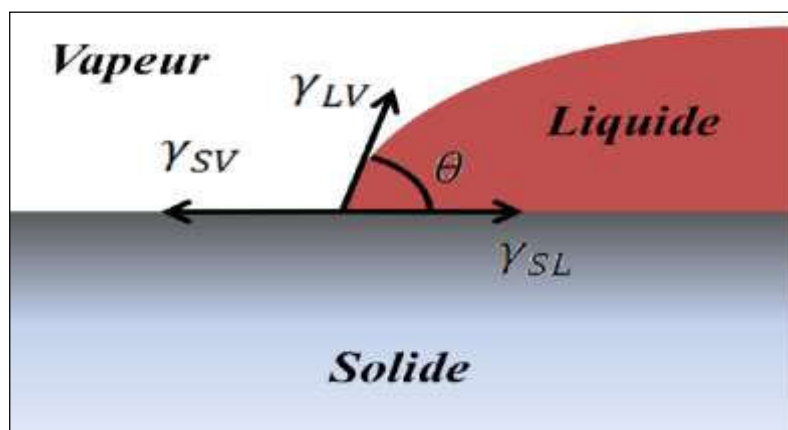


Figure II.3. Mouillage selon modèle de Young

Le travail thermodynamique réversible d'adhésion ou de Dupré, W_a , correspond au travail nécessaire pour séparer une unité de surface de deux phases constituant une interface. En l'absence d'adsorption, d'interdiffusion et d'interactions mécaniques, W_a en milieu inerte s'écrit comme la différence d'énergie libre entre les deux surfaces séparées ($\gamma_x + \gamma_y$) et les surfaces assemblées (γ_{xy}) :

$$W_a = \gamma_x + \gamma_y - \gamma_{xy} \quad \text{Équation II.2}$$

où γ_x et γ_y sont les énergies libres de surface de chaque phase et γ_{xy} l'énergie libre d'interface.

La condition d'obtention d'une bonne adhésion dépend du contact entre les deux solides à assembler, donc du mouillage lors de la formation de l'assemblage. La tension de surface de la colle doit être inférieure à celle du substrat. Dans le cas contraire, combinant une énergie de surface faible et une importante rugosité on trouve des angles de contact élevés (**figure II.3 et II.4**).

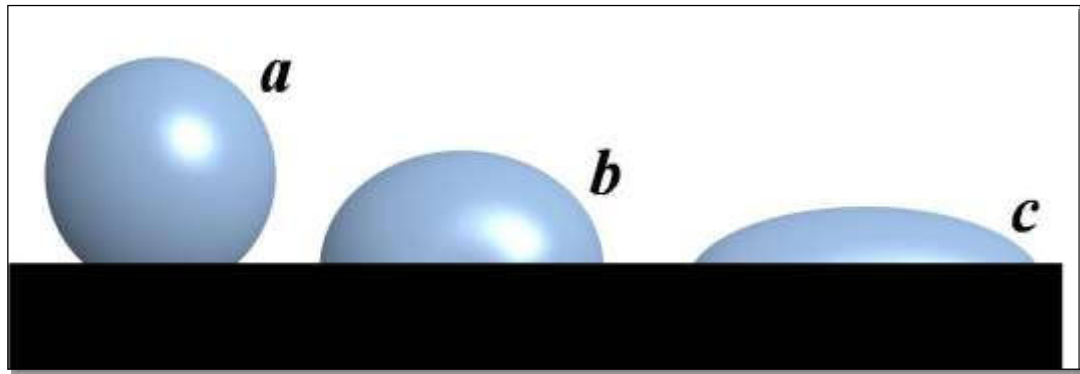


Figure II.4. Représentation schématique du mouillage.
a: mauvais mouillage, b: mouillage partiel, c: bon mouillage

❖ La théorie électrostatique

Pour des matériaux de natures différentes, il convient d'évoquer le modèle électrostatique [40]. La composante électrostatique de l'adhésion est basée sur le transfert de charges électriques lors du contact et le réajustement des niveaux de Fermi, conduisant à la formation d'une double couche électrique à l'interface, assimilable à un condensateur (**figure II.5**). La séparation des deux phases de ce condensateur à la rupture provoque une séparation de charges et une différence de potentiel qui augmente jusqu'à décharge. Dans cette théorie, l'adhésion est due à l'existence des forces attractives présentes à travers la double couche électrique. Cependant, la séparation mécanique d'assemblages dissipant de l'énergie à travers les comportements visqueux, viscoélastique ou plastique des matériaux, indique que les effets électrostatiques, lorsqu'ils sont observés sont plus souvent des effets de l'adhésion constatée.

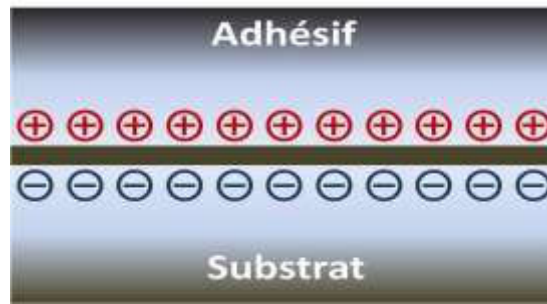


Figure II.5. Représentation schématique du modèle électrostatique [40]

❖ La théorie diffusionnelle

Cette théorie, proposée par (Voyutskii, 1963) [41], explique l'adhésion intrinsèque des polymères entre eux et avec eux-mêmes, ou auto-cohésion. Lorsque deux polymères chimiquement compatibles sont en contact intime, la mobilité moléculaire, thermiquement induite, est suffisante pour que les chaînes macromoléculaires interdiffusent produisant une interphase ainsi que des liaisons chimiques. Ce phénomène est développé plus tard par de Gennes (de Gennes, 1980) [42]. La zone interfaciale est appelée interphase. Cette théorie ne peut s'appliquer que pour des matériaux ayant une mobilité et une inter-solubilité suffisante.

❖ Théorie de liaison chimique:

Cette théorie s'intéresse à la formation des liaisons chimiques faibles ou fortes entre la surface du substrat et le polymère. Il est parfois possible de créer à l'interface colle/substrat des liaisons covalentes ou ioniques lors des réactions chimiques. Ces liaisons seront autant de points d'ancrage qui assureront une grande résistance à la rupture et une bonne durabilité de l'assemblage. Ces liaisons chimiques peuvent être créées de deux manières:

- Par réaction directe entre l'adhésif et le substrat; c'est par exemple le cas entre une résine d'époxyde et la couche d'oxyde superficielle d'un métal.
- Par l'intermédiaire d'un agent de couplage, c'est-à-dire d'une molécule compatible à la fois avec la colle et avec le substrat, C'est généralement la technique utilisée pour obtenir une bonne adhésion entre une matrice époxyde et des fibres de verre dans les matériaux composites.

II-4- Principales familles des colles et adhésifs:

II-4-1- Adhésifs époxydes:

Ce sont des adhésifs à hautes performances, structuraux dans tous les cas, selon leur mode de prise et de durcissement on trouve de type d'adhésifs:

- Soit à chaud pour les époxydes mono-composants;
- Soit à température ambiante pour les bi-composants.

La forme mono-composante est souvent présentée sous forme de film ou de pâte contenant une résine époxyde et un durcisseur, la réticulation se fait à chaud.

En ce qui concerne les bi-composants, sont sous forme liquide ou pâteuse durcissent à froid ou à chaud. Le temps de durcissement pour des performances optimales peut être de 2 à 7 jours. Tous les adhésifs sont sensibles à l'état de la surface des matériaux. Cependant, les époxydes sont particulièrement sensibles dans le cas de surfaces métalliques. Leurs avantages sont les suivants [43]:

- Adhésif fort et polyvalent conçu pour offrir de bonnes performances d'adhésion.
- Performant en cisaillement.
- Forte rigidité, et une bonne résistance aux produits chimiques.
- Bonne résistance au fluage.
- Traitement facile avec faible rétrécissement.
- Bonne tolérance aux températures élevées.

Les désavantages des époxydes sont les suivants :

- Peu de flexibilité et faible résistance au test de pelage.
- La force de liaison est sensible à l'humidité et à la contamination des surfaces.
- Cassant à basse température.
- La réticulation est généralement lente et une résine relativement coûteuse.

II-4-2- Adhésifs polyuréthanes réactifs:

Les adhésifs polyuréthanes réactifs constituent une large famille de polymères généralement appliqués à des températures inférieures à 65°C qui présentent une importante capacité d'élongation.

Les polyuréthanes peuvent se présenter sous forme mono- ou bi-composants. Ils sont obtenus par polyaddition entre un isocyanate et des polyesters ou des polyéthers branchés comprenant plusieurs groupements hydroxyle. Ils polymérisent en 24 h à température ambiante, la réticulation est catalysée par l'humidité ambiante.

Les polyuréthanes présentent une bonne adhésion à basse température, et, selon la composition, peuvent aussi bien être souples que rigides. Cependant, ils se montrent moins résistants à l'humidité et aux produits chimiques. Ils sont moins résistants que les époxydes (6 à 20 MPa en cisaillement). La synthèse nécessite des composés relativement toxiques.

Ces colles sont de plus en plus utilisées notamment dans l'industrie automobile, pour coller les éléments composites à base de polyester sur des ossatures métalliques, les autres secteurs utilisateurs sont le bâtiment, l'industrie de la chaussure et l'emballage [44].

II-4-3- Colles thermo-durcissables:

Les colles thermodurcissables sont urée-formol (UF), mélamines-formol (MF), phénolique-formol (PF), résorcine-formol (RF), ils se présentent sous forme de sirop ou poudre, elles sont utilisées avec adjonction de durcisseur et font leur prise par une réaction chimique (dite de condensation), cependant ces colles contiennent de l'eau et dégagent de l'eau lors de la condensation ce qui nécessite que l'un des substrats soit poreux et de maintenir les pièces sous pression pour les empêcher de se séparer[45].

Les colles thermodurcissables présentent:

- Une résistance au cisaillement de 6 à 12 MPa.
- Résistance à la chaleur jusqu'à 120 °C.
- Joint de colle dur relativement cassant.
- La possibilité de durcissement à froid ou à chaud.

Leur principales utilisations : le bois et le meuble, la fabrication du contreplaqué et les portes iso-planes et la fabrication de charpentes lamellées.

II-4-4- Colles thermo-fusibles :

Ces adhésifs sont à base de matière thermoplastique solide à la température ambiante, suivant leur utilisation on distingue :

- polyamides, appliqués en général autour de 200°C, ils adhèrent bien sur les plastiques, les métaux et le bois et résistent jusqu'à 140°C environ; ce sont des adhésifs semi-structuraux;
- hot melts EVA (éthylène-acétate de vinyle) ; ils conviennent pour les collages de plastiques sur bois et panneaux de particules, dans la fabrication de meubles, mais n'adhèrent pas sur les métaux;
- hot melts réactifs à base de polyuréthanes (PU) ou d'époxydes: après application de ces adhésifs, ils sont durcis de diverses façons : soit vers 200°C dans le cas des adhésifs époxydes; soit par réaction avec l'humidité ambiante.

Leurs principales caractéristiques :

- Une température d'application qui va de 140 jusqu'à 220°C selon les formules, ils font leur prise sans dégagement.
- Un temps très court de 15 à 30 secondes.
- Tenues à la chaleur et au fluage médiocres
- Ne peuvent pas être utilisés sur matériaux sensibles à la chaleur.

Les principales utilisations de ces adhésifs sont : fabrication de meubles, emballage, reliure couches bébés, textiles, chaussures : (montage des dessus, collage du cuir ou plastique), collage des filtres (papier sur métal)[45].

II-4-5- Colles émulsions vinyliques et copolymère:

Ces sont des colles blanches en milieu aqueux, dont la prise est réalisée par absorption de leur eau par les substrats poreux, et qui sont constituées de: acétates de polyvinyle (PVAC) en émulsion ou copolymères vinyliques, plastifiées; émulsions VAE (acétate de vinyle-éthylène); charges minérales et additifs divers[45].

Ces colles présentent les caractéristiques techniques suivantes:

- Bonne résistance à l'arrachement: 5 MPa en cisaillement pour un collage bois sur bois;
- Résistance à la chaleur: 60°C à 80°C;
- Mauvaise tenue à l'eau (sauf pour certaines formules spéciales).

Elles sont utilisées dans les secteurs industriels suivants: Bois et meubles, emballage et transformation du papier carton (fabrication des sacs, sachets, enveloppes, fabrication de caisses carton...), bâtiment (collage de revêtements muraux).

II-4-6-Rubans adhésifs:

On distingue plusieurs sortes de rubans adhésifs structuraux: les films supportés, les films époxy non supportés, et enfin les films acryliques (**figure II-6**).

Les films supportés sont développés depuis plusieurs années mais sont peu utilisés.

Les films structuraux mono-composants ont des caractéristiques supérieures aux colles époxydes classiques. Les joints peuvent atteindre plus de 30 à 35 MPa en cisaillement et d'environ 12 à 13 N/mm en pelage.

Ils permettent de combler des jeux assez importants. Un apport de chaleur est nécessaire pour assurer une bonne polymérisation.

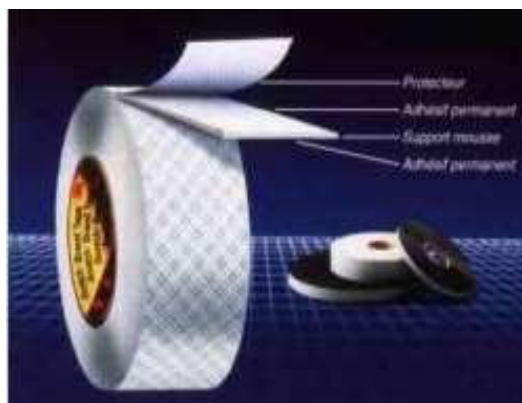


Figure II.6.Ruban adhésif.

Il existe de nombreuses applications des rubans adhésifs:

- collage classique.
- Rubans pour la construction électrique.
- Rubans de protection pour condensateurs plastiques.
- Ruban de masquage(dorure des contacts de circuits imprimés).
- Rubans adhésifs d'épargne pour les traitements de surface.
- Rubans d'assemblages ouvrables et re-fermables.
- Rubans adhésifs industriels anti-adhérents.

II-5- Avantages et inconvénients du collage:

Le collage trouve des applications dans tous les domaines industriels, il est devenu une technique d'assemblage au même titre que le «triangle classique» rivetage–vissage-soudage. L'assemblage par collage présente de nombreux avantages par rapport aux techniques traditionnelles employées en aéronautique comme le rivetage ou le soudage. Les conséquences techniques et économiques font qu'ils sont de plus en plus utilisés dans des secteurs aussi divers que la mécanique, le textile, le bois, le transport, le bâtiment[46].

II-5-1 Avantages:

- Elle est tout d'abord très rapide à mettre en œuvre, d'autant plus que son application est souvent automatisée.
- Il permet d'assembler des matériaux de natures très différentes, et la possibilité d'assembler de très petites pièces, les pièces fragiles (électronique, bijouterie, pièces de verre)et des pièces très minces (revêtement des films ou feuilles).
- Respecter l'intégrité des matériaux, l'assemblage étant continu, les efforts sont répartis uniformément, évitant ainsi les concentrations de contraintes,
- La continuité de la liaison qui assure, aux assemblages collés, une meilleure tenue en fatigue,
- La préparation ne nécessite pas d'échauffement local important et ainsi ne modifie pas les propriétés des matériaux à assembler,
- Améliore la résistance à la corrosion galvanique, et absorbe les vibrations et chocs,
- Améliore l'étanchéité dans les joints, et offre un meilleur aspect visuel par la réalisation des joints non visibles et encore améliore l'aérodynamisme en aéronautique.
- et permet de réduire la masse de l'assemblage tout en étant efficace.

- le collage crée des liaisons entre des éléments sur toute la surface à assembler avec une résistance typique à la traction de 10 à 30 MPa, ce qui assure une très grande résistance de l'assemblage même. Par comparaison, un rivet ou un point de soudure de 5mm de diamètre à une résistance de 25 MPa. Il faudrait un point de soudure tous les cm pour approcher la résistance d'un assemblage collé[47].

II-5-2- Inconvénients

- les traitements de surfaces mécaniques ou chimiques sont souvent nécessaires pour, respectivement, modifier la rugosité pour augmenter les surfaces de contact et augmenter les énergies libres de surface,
- le manque de moyens fiables de contrôle non-destructif.
- Le collage est mal connu par les industriels, les mécaniciens, la mise en œuvre de cette technique nécessite formation, adaptation et connaissance de la technique du collage.
- Il nécessite une bonne préparation des surfaces des métaux (surface plane, propre et traitée).
- le joint de colle doit travailler en cisaillement, jamais en traction pure ni en clivage car les efforts sont concentrés sur les petites surfaces, sa résistance au pelage est faible.
- La durabilité du collage est limitée : elle varie de 5 à 40 ans, selon les types d'adhésifs, les contraintes de l'environnement.
- Une longue durée de durcissement parfois de 10 à 20 heures à température ambiante.
- La résistance à la chaleur est limitée : les colles classiques pour métaux ne résistent qu'à environ 70°C à 150 °C avec des adhésifs thermostables très spéciaux qui résistent à 200 voire 300 °C.
- Le collage est sensible à l'humidité et au risque de corrosion si la préparation des surfaces n'est pas parfaite.
- Le coût d'un collage doit être estimé par comparaison à un autre mode d'assemblage. Le collage n'est pas bon marché puisqu'il faut préparer la surface et qu'il est lent, néanmoins il est souvent économique si l'on tient compte des avantages qu'il offre[47].

II-6- comportement mécanique des assemblages collés :

II-6-1- Caractéristiques mécaniques :

Il existe de nombreux types d'assemblages collés qui varient par la géométrie retenue, par la nature du substrat (polymère, acier, aluminium...), par le type de traitement de surface (sablage, traitement chimique, plasma...) et évidemment par la nature de l'adhésif et l'épaisseur du joint. Il est possible de

distinguer au moins trois facteurs pour rendre compte des propriétés mécaniques d'un assemblage collé. Toutes les caractéristiques mécaniques sont mesurées sur l'adhésif ou sur l'assemblage après le durcissement complet de l'adhésif.

II-6-2- Résistance au pelage:

Le choix de l'essai dépendra également de la nature des matériaux en contact. Si au moins l'un des matériaux est suffisamment flexible, l'essai de pelage est souvent un bon choix car il permet un contrôle continu de l'adhésion, plusieurs géométries de ce test existent, telle que l'angle de pelage Θ reste constante pendant l'essai. En définition le pelage est l'opération de séparation de deux matériaux collés, il existe divers modes de pelage (**figure II.7**)

— Pelage en T lorsque les deux matériaux sont souples (**figure II.7.a**)

— Pelage à 90 °C ou à 180°C(**figure II.7.b et c**)

— En aéronautique on pratique le pelage de panneaux-sandwich (tôles collées sur nid d'abeilles) par la méthode Bell ou la méthode du rouleau grim pant (**figure II.7.c**).

L'adhérence dépend du couple colle-matériau. Une colle doit donc être formulée avec des matières de base qui accrochent sur les matériaux à coller.

La résistance au pelage R_p est donnée par la relation :

$$R_p = \text{charge à la rupture} / \text{largeur de l'éprouvette}$$

et s'exprime en N/cm de large (ou en kg/cm).

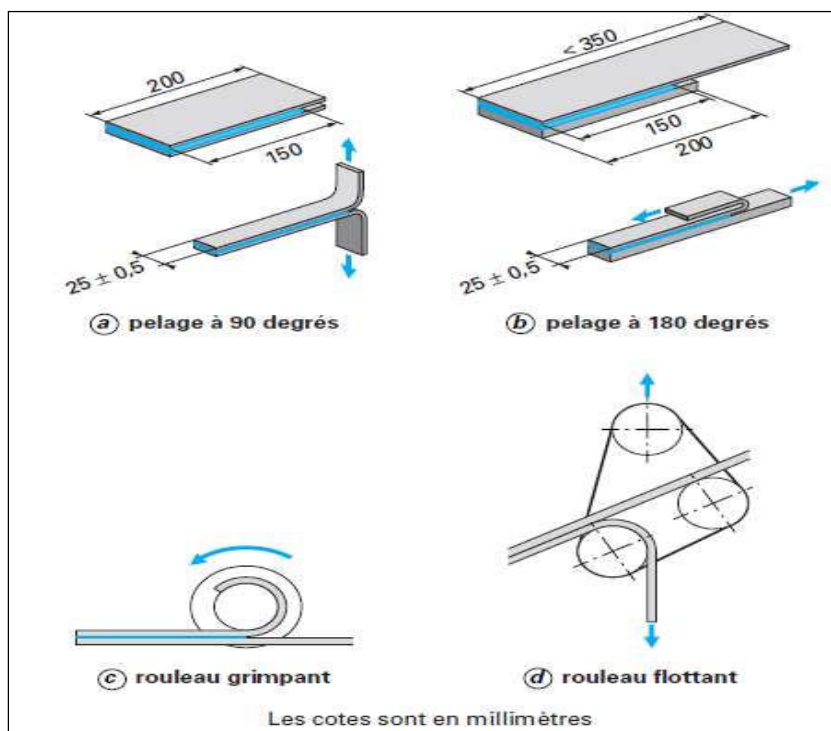


Figure II.7. Différentes méthodes d'essais de résistance en pelage[49]

II-6-3- Résistance au cisaillement:

En général, les adhésifs résistent très bien au cisaillement. Dans toute la mesure du possible, quand on étudie une structure collée, on doit privilégier ce mode de contrainte par rapport aux autres. La méthode consiste à soumettre l'éprouvette à un effort de traction parallèlement au plan du collage. Pour réaliser une éprouvette, on colle l'une sur l'autre deux plaquettes généralement en aluminium sur une petite surface (**figure II.8**). On tire sur les deux plaquettes jusqu'à rupture à l'aide d'une machine de traction. On en déduit la résistance au cisaillement qui est évaluée en MPa.

La contrainte de cisaillement moyenne peut être évaluée selon la relation:

$$\tau = F/bl \quad \text{Équation II.3}$$

ou **F** est la force à la rupture et **bl** est la force de recouvrement.

L'éprouvette peut être placée dans un four pour mesurer la résistance au cisaillement à une température donnée.

Différentes normes décrivent la mesure de la résistance au cisaillement [48]

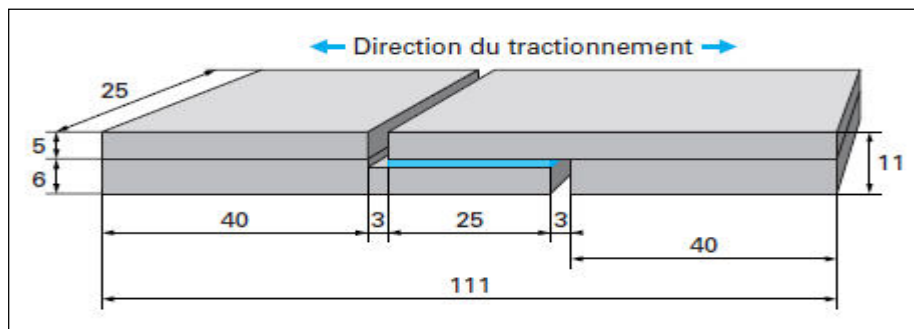


Figure II.8.Éprouvette de cisaillement en hêtre massif[49]

II-6-4- Résistance à la traction:

De préférence, les assemblages collés ne doivent pas travailler en traction pure, mais plutôt en cisaillement afin de répartir les contraintes sur une surface la plus large possible[49].

Pour que le test de résistance à la traction soit valable (**figure II.9**), la contrainte doit être exactement perpendiculaire au plan de collage. Comme le joint de colle a seulement quelques dizaines de micromètres d'épaisseur, le montage de traction doit avoir aussi la même précision d'alignement des forces de traction, sinon la rupture se produirait au point où la contrainte est la plus forte, à une valeur inférieure à la résistance réelle à la traction.

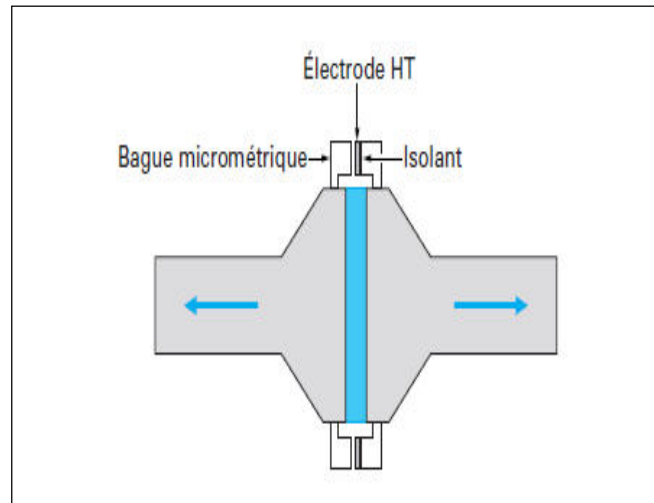


Figure II.9. Représentation schématique d'un banc d'essai de traction d'un adhésif[49].

II-6-5- Résistance au clivage :

Le clivage est largement utilisé pour mesurer l'adhésion entre deux solides, contrairement au test de pelage, il permet de provoquer une séparation des surfaces en travaillant avec une faible déformation globale, même pour des énergies d'adhésion élevées. Il est donc beaucoup plus sensible, ce test permet de rester dans le domaine des petites déformations en arrière du front de fissure.

Deux plaques minces sont collées par un joint d'adhésif d'épaisseur contrôlée (**figure II.10**). Une lame, au coin, est introduite entre les deux substrats, provoquant la séparation des deux plaques et la propagation d'une fissure dans le système[49].

Lorsque le coin est maintenu fixe, la séparation se poursuit à une vitesse gouvernée par le taux de restitution d'énergie élastique emmagasiné dans la déformation élastique des substrats. Ce taux s'identifie à l'énergie d'adhésion à une vitesse de fissuration donnée

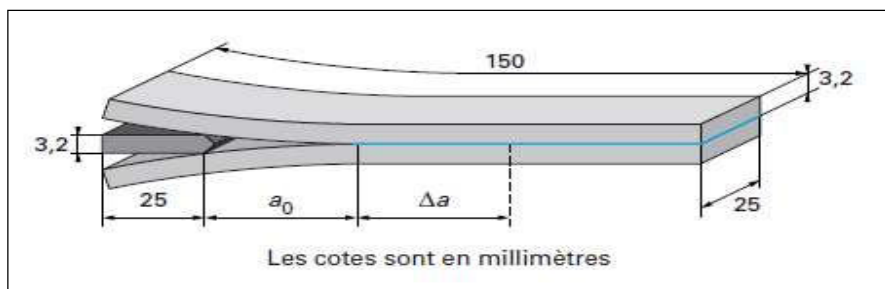


Figure II.10. Eprouvette normalisée de test de clivage[49]

II-6-6- Résistance au fluage :

Le fluage est la déformation lente et irréversible de la colle sous l'action de sollicitations extérieures : chaleur, poids des matériaux, effet ressort des rabats d'un emballage, etc. Pour la mesurer (**figure II.11**), on suspend un poids P à l'assemblage collé, on met éventuellement

l'ensemble dans une étuve chauffée à la température que devra supporter l'adhésif, et on mesure le déplacement en fonction du temps (et de la température).

La force P exercée est déterminée en fonction des contraintes mécaniques que cet assemblage subira dans les conditions normales d'utilisation.

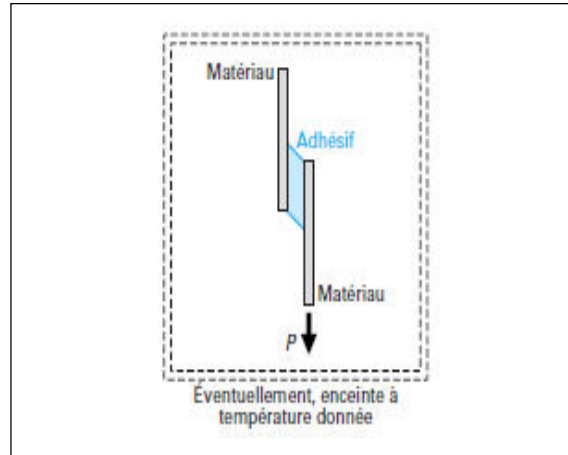


Figure II.11. Essai de fluage[49]

II-6-7- Résistance au chocs :

Certains adhésifs sont très rigides et cassants : ils ne résistent donc pas aux chocs. C'est le cas par exemple des cyanoacrylates.

II-6-8- Dureté:

La dureté des colles et adhésifs est très variable selon les types et les familles chimiques :

- les adhésifs structuraux (époxydes, cyanoacrylates) sont le plus souvent assez durs ;
- les adhésifs thermoplastiques (colles vinyliques) et élastomères (colles néoprènes) sont plus souples et moins durs.

Cependant un même matériau comme le bois peut être indifféremment collé avec une colle souple comme les colles PVAC (vinylique) ou une colle très dure et rigide comme les UF.

II-7- Défauts dans les assemblages collés:

Comme tous les modes d'assemblages, la réalisation des joints collés comporte des défauts qui sont à l'origine de la défaillance du système réalisé. Ces défauts sont évidemment des sites préférentiels pour l'amorçage de la rupture. Les quelques défauts que l'on peut rencontrer dans les assemblages collés sont:

- la porosité due aux bulles d'air ou de gaz emprisonnées lors de la polymérisation et sa mise en œuvre.

- les cavités dues à des applications médiocres de l'adhésif ou aux dégagements gazeux durant la polymérisation.
- les fissures au sein de l'adhésif sont dues à l'action de contrainte thermique au cours de la réticulation.
- le phénomène de fatigue et de fluage ainsi que les contraintes résiduelles provoquent des microfissures.
- les imperfections de mise en œuvre comme la mauvaise consistance ou préparation de l'adhésif ou de temps de polymérisation non contrôlé résultant des zones de faibles polymérisations[50].
- un mauvais traitement de surface du substrat ou la présence de contaminants lors du collage pouvant créer des zones de décollement. la (figure II.12.) illustre ces défauts[51].

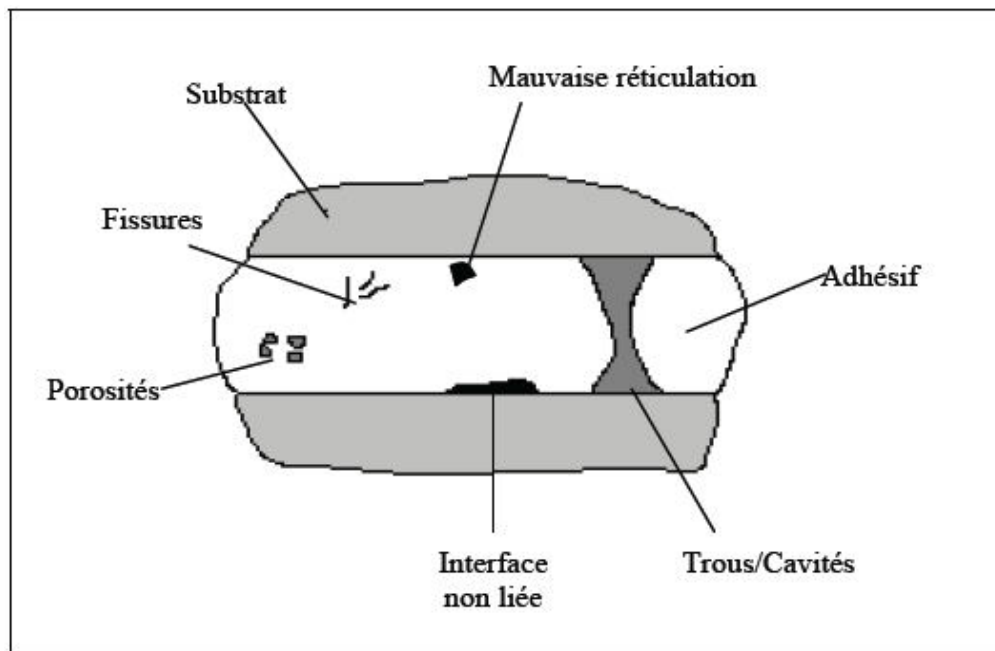


Figure II.12. Défauts typiques d'un assemblage collé [51].

Le tableau II.1 ci-dessous regroupe les différents types de défauts susceptibles d'être rencontrés.

Nature du défaut Apparition durant	Fabrication	Apparition durant
Absence d'adhésif (bulles-porosité)	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise application de l'adhésif avant assemblage. - Evacuation insuffisante du solvant au cours du durcissement. - Pression insuffisante pendant l'assemblage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Application de fissures dues à une charge trop élevée, ou à un phénomène de fatigue sous sollicitations dynamiques.
Cohésion (rupture au sein de l'adhésif)	<ul style="list-style-type: none"> - Dosage incorrect dans le cas d'un adhésif bi-composant. - Mauvaise conditions de stockage de l'adhésif. - Corps étrangers dans l'adhésif. - Fonctionnement anormal d'une étuve pour les colles durcies à chaud. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dégradation de l'adhésif par oxydation, hydrolyse. - Plastification par l'eau ou par d'autre corps chimiques. - Migration de plastifiants, de produits non complètement polymérisés.
Adhésion (rupture aux interfaces: Métal/adhésif Composite/adhésif)	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement de surface absent ou impropre. - Pollution de la surface: oxydation, dépôt d'huile, poussière, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosion du support à l'interface.

Tableau II.1: Défauts dans les assemblages collés.

CHAPITRE III

Description de l'approche méthodologique.

III-1 Introduction :

L'objectif de cette thèse est de caractériser numériquement les effets d'interaction entre la plasticité des plaques en aluminium réparées par patch en composite et l'endommagement de l'adhésif liant la plaque et le composite. Une étude expérimentale a été menée pour valider la nécessité de l'approche numérique utilisée. Dans l'approche expérimentale des essais de fatigue ont été réalisés sur des éprouvettes entaillées pour les deux alliages d'aluminium; le 2024 T3 et le 7075 T6. Dans la partie numérique nous avons modélisé par la méthode des éléments finis la plaque d'aluminium avec le patch en composite et l'adhésif. Nous avons supposé un comportement élasto-plastique de l'alliage d'aluminium et de l'adhésif. Nous avons intégré dans le code de calcul la loi de la zone endommagée pour prédire l'endommagement dans l'adhésif. L'étude numérique nous a permis de faire une corrélation entre la zone endommagée dans l'adhésif et la zone plastique dans l'aluminium réparé.

III-2 Méthode expérimentale:**III-2-1 Matériaux:**

Trois matériaux essentiels entrent dans la procédure de réparation ; ce sont les alliages d'aluminium avec lesquels ont été usinées les éprouvettes réparées et non réparées. Le composite carbone/époxyde constitue l'adhésif Araldite 2015 qui assemble les plaques d'aluminium utilisées. Les alliages 2024T3 thermiquement traité à la température de 351°C et laminé à froid est relativement ductile. Il résiste bien à la fatigue traction-traction. L'aluminium 7075 T6 est thermiquement traité à la température de 671°C et artificiellement vieilli ; il résiste bien à la fatigue en compression. Les compositions chimiques de l'alliage d'aluminium 7075 T6 et 2024 T3, données par le fournisseur, sont représentées dans le **tableau III-1**.

	%									
	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Other
2024T3	90.7-	Max	3.8-	Max	1.2-	0.3-	Max	Max	Max	Max
	94.7	0.1	4.9	0.5	1.8	0.9	0.5	0.15	0.25	0.15
7075T6	87.1-	0.18-	1.2-2	Max	2.1-	Max	Max	Max	5.1-	Max
	91.4	0.28		0.5	2.9	0.3	0.4	0.2	6.1	0.15

Tableau III-1 : Compositions chimiques de Al2024T3 et Al7075T6 [52]

Les courbes de traction obtenues pour les deux alliages sont représentées sur la (figure III-1)

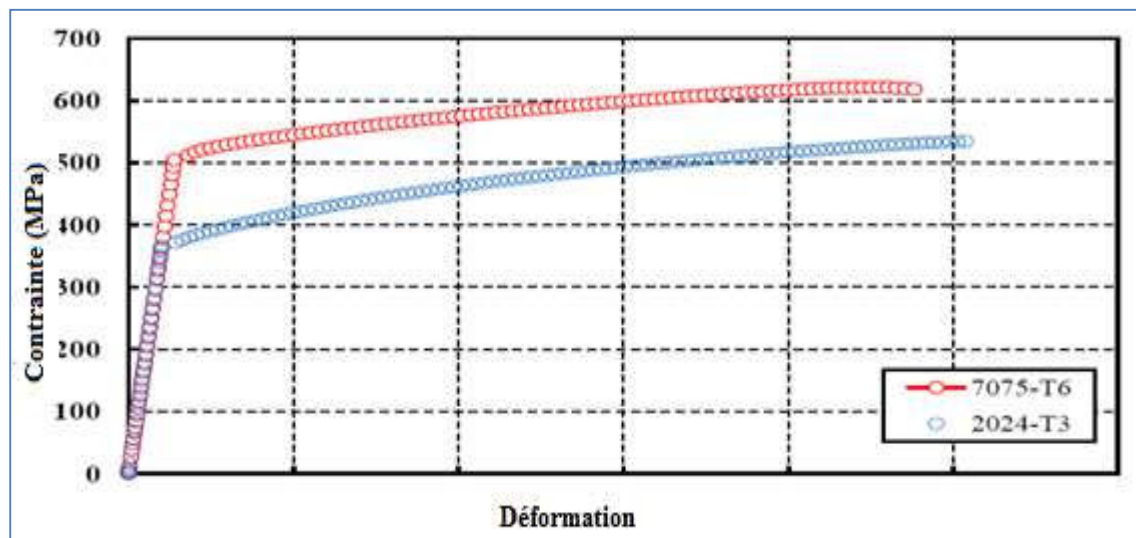


Figure III-1 : Courbes contraintes-déformations pour les deux alliages d'aluminium [52]

Du carbone époxy pré-imprégné a été fourni sous forme de rouleau. Le composite en carbone à fibre unidirectionnelle contient environ 65% en volume de fibre. Le composite stratifié a été fabriqué en différents couches. Nous avons utilisé 8 couches unidirectionnelles. Ce choix a été dicté par le fait que les plaques sont soumises à des essais de fatigue uni axiale, la direction de la fibre doit être parallèle à la direction du chargement pour avoir une efficacité maximale de réparation.

L'adhésif utilisé est l'Araldite 2015 époxy. C'est un adhésif bi-composant avec la résine époxyde plus le durcisseur utilisé à température ambiante. Les propriétés mécaniques de cet adhésif, (données par le fournisseur) sont :

Module de Young $E=2.52$ Gpa

Coefficient de Poisson $\nu=0.36$

Limite élastique $\sigma_e=25$ Mpa

Les surfaces collées ont été réparées d'après la méthode spécifiée par Dell [52]. L'éprouvette a été nettoyée par de l'acétone après avoir reçue une légère pré-polissage.

Le tableau III-2 Résume les propriétés élastiques des différents matériaux utilisés :

Propriétés	Matériaux			
	Al 7075T6	Al 2024T3	Carbone/Epoxy	Araldite
Module de Young Longitudinal(GPa)	71.7	72.4	130	2.52
Module de Young Transversal(GPa)	71.7	72.4	9	2.52
Coefficient de Poisson Longitudinal	0.33	0.33	0.33	0.36
Coefficient de Poisson Transversal	0.33	0.33	0.53	0.36
Dureté	39.1	29.5	-	-
Dilatation jusqu'à la rupture	10	18	-	-
Module de cisaillement (GPa)	28	26.9	-	0.954
Limite élastique (Mpa)	503	370	-	-

Tableau III-2 : Propriétés mécanique des matériaux utilisés [53]

III-2-2 Essai de fatigue

III-2-2-1 Eprouvettes de l'essai de fatigue

Les éprouvettes de fatigue ont été fabriquées avec une entaille en V en utilisant un découpage par jet d'eau. La base et la hauteur de l'entaille sont égales à 6mm avec un angle de 60°. Des tests de fatigue ont été menés sur les éprouvettes avant réparation pour obtenir une pré-fissure de 3 mm. Le patch en carbone/époxyde unidirectionnel a été déposé pour la réparation de la fissure. Le patch a été collé sur la zone fissurée en utilisant l'araldite 2015 époxyde, (**figure III-2**).

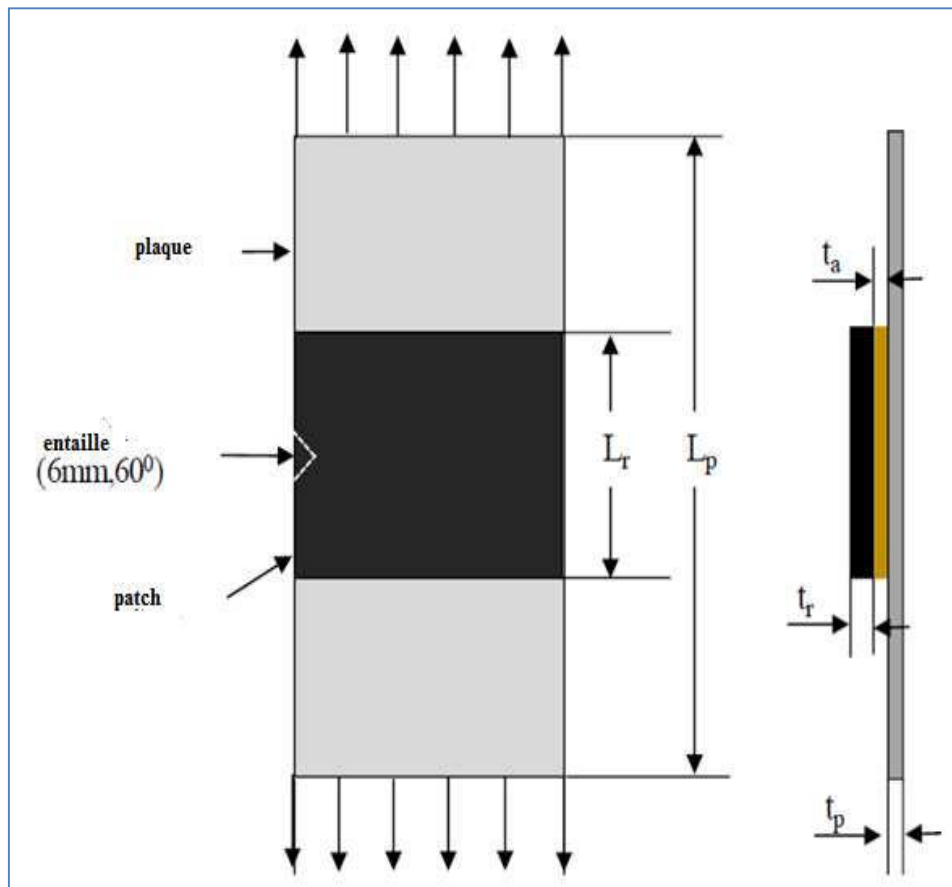


Figure III-2 Modèle géométrique de la plaque réparée

Nous avons vérifié que le taux de rigidité du patch est inférieur à 1.5 [53]. Ce taux est égal à

$$S = \frac{E_r e_r}{E_p e_p} \quad \text{Équation III.1}$$

E : Module de Young longitudinal

e : épaisseur

r : représente le patch et p la plaque (plate).

III-2-2-2 Déroulement de l'essai de fatigue

Des essais de fatigue ont été menés sur une machine servo-hydraulique Instron-type 8801 de capacité 100KN. La figure III-3 montre le montage de l'éprouvette sur la machine de fatigue. Tous les tests de fatigue ont été menés à température ambiante en utilisant un signal sinusoïdal avec une fréquence de 20 Hz. Les éprouvettes (réparées et non réparées) ont été chargées cycliquement avec un rapport de charge de 0.1 et une amplitude de charge maximale $F_{max}=70$ Mpa.



Figure III-3: Photo de l'éprouvette réparée montée sur la machine de fatigue

III-2-3 Observation des surfaces de rupture:

Des observations des faciès de rupture des éprouvettes rompues après fatigue ont été réalisées sur un microscope électronique à balayage (MEB) pour analyser le mode de rupture (ductile ou fragile). Cette analyse nous permettra de justifier le choix de l'approche numérique utilisée (linéaire ou non-linéaire).

III-3 Approche numérique:

Nous avons utilisé la méthode des éléments finis tridimensionnels avec le code Abaqus pour déterminer l'évolution de l'endommagement de la couche adhésive ainsi que l'évolution de la zone plastique autour du front de fissure réparée par patch en composite. Le critère d'endommagement de l'adhésif a été implémenté dans le code Abaqus à partir de la théorie de la zone endommagée qui sera décrite ultérieurement.

III-3-1 Modèle éléments finis de la plaque réparée

Le modèle géométrique utilisé dans la partie numérique est celui représenté dans la figure III-4. Ce modèle consiste en une plaque en aluminium (2024 T3 ou 7075 T6) avec une entaille latérale en V. Sur cette plaque est collé un patch rectangulaire en carbone/époxyde qui couvre toute la largeur de la plaque. Le collage se fait à l'aide de l'adhésif Araldite 2015 de type époxyde. Les dimensions de la plaque en aluminium sont : 100x50x2 mm avec une entaille en V dont la taille de la hauteur et de la base est 6 mm, l'angle est de 60°. Les dimensions du patch sont : 50x50x1.5 mm.

L'épaisseur de l'adhésif est 0.15 mm. L'alliage d'aluminium et l'adhésif sont considérés comme élasto-plastiques et le carbone époxyde est considéré comme élastique orthotrope. Les courbes contraintes-déformations des deux alliages d'aluminium sont données dans la **figure III-1** et les propriétés mécaniques des différents matériaux sont présentées dans le **tableau III-2**. La plaque est soumise à des chargements de 70, 120 et 200 MPa.

Le code de calcul Ansys a été utilisé pour réaliser l'objectif principal de cette étude. Le modèle éléments finis consiste en trois sous-couches qui modélisent respectivement la plaque fissurée l'adhésif et le patch en composite. La plaque, l'adhésif et le composite sont maillés séparément avec des éléments briques à 20 nœuds avec exactement le même maillage sur les surfaces de contact. Pour avoir une précision de calcul au front de fissure, nous avons raffiné le maillage autour de ce front. Le nombre d'éléments utilisés dans cette étude est 17 028 : 12 216 éléments dans la plaque d'aluminium, 3208 éléments pour le patch en composite et 1604 éléments pour la couche adhésive. La figure III-4, présente le modèle éléments-finis pour la structure globale et au niveau de la région de la fissure.

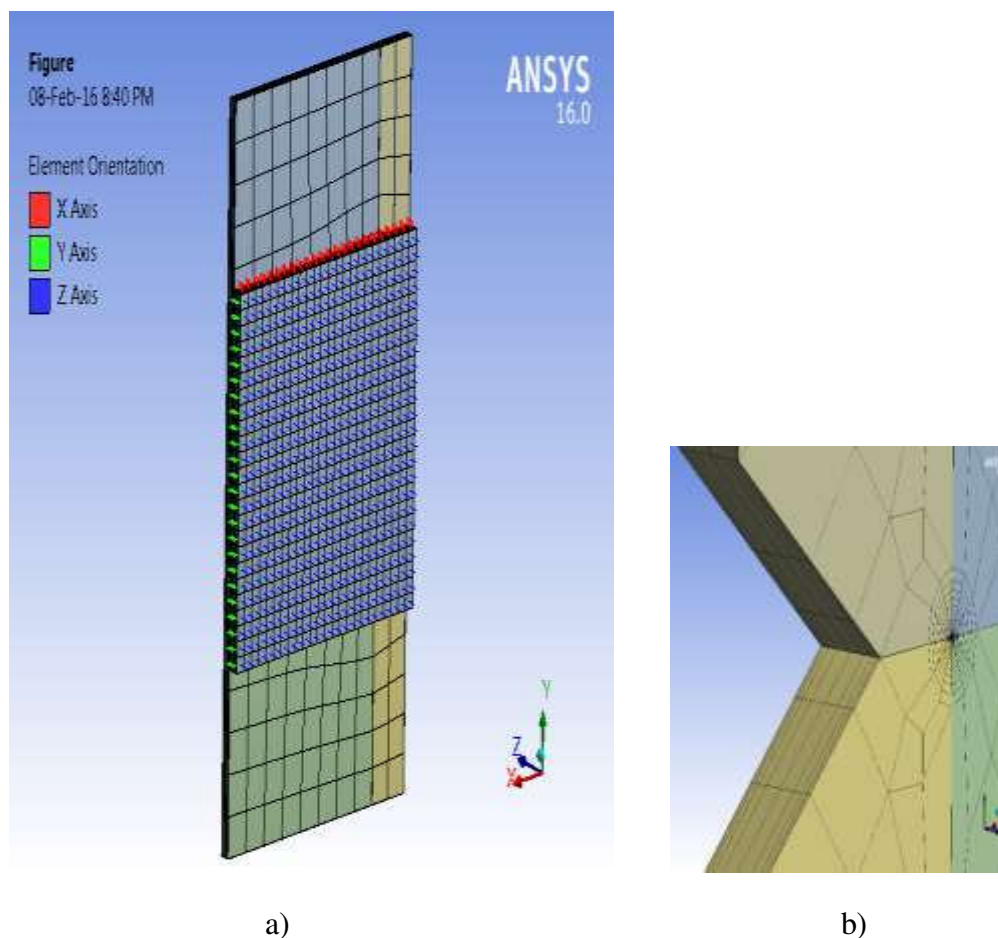


Figure III-4: Modèle éléments finis

a) Structure globale

b) au niveau de la fissure

Pour tenir compte de la non-linéarité des matériaux dans le modèle des éléments finis nous avons utilisé le critère de Von-Mises, associé à la théorie de la plasticité incrémentale. Les équations éléments finis non linéaires ont été résolues à l'aide de la méthode itérative de Newton – Raphson avec un nombre limite d'étapes de 100 et une taille d'incrément comprise entre 10 et 5 et 1. L'intégrale J le long du front incurvé de la fissure a été calculée en utilisant l'approche de domaine intégrale [54].

III-3-2 Théorie de la zone endommagée

La principale hypothèse de la théorie de la zone endommagée est que la rupture des joints collés se produit après le développement la zone endommagée. Sous de faibles charges, l'endommagement se localise dans les bords libres parce que le matériau est soumis localement à des contraintes supérieures à la contrainte ultime du matériau. Sous les charges moyennes, les zones endommagées devront croître en taille, et comme la charge à la rupture est atteinte, la zone d'endommagement va croître jusqu'à une taille critique conduisant à la rupture du joint. Un critère de rupture est appliqué pour identifier la zone critique lorsqu'elle dépasse un certain seuil. L'adhésif utilisé dans l'analyse est un adhésif ductile qui devrait subir des charges ultimes. Par conséquent, le critère utilisé pour une rupture de la couche adhésive est de type cohésif et il est équivalent au critère de Von Mises.

$$\epsilon_{equiv} = \frac{1}{\sqrt{2(1+\nu)}} \times \sqrt{(\epsilon_{p1} - \epsilon_{p2})^2 + (\epsilon_{p2} - \epsilon_{p3})^2 + (\epsilon_{p3} - \epsilon_{p1})^2}$$

Équation III.2

Dont : ϵ_{equiv} : la déformation équivalent , ϵ_{pi} : déformation plastique dans les différentes directions
et ν : coefficient de Poisson

Ce critère est satisfait lorsque la déformation principale maximale dans le matériau atteint la déformation principale ultime. La zone endommagée correspond aux points dans la couche adhésive où la déformation ultime est dépassée. Pour l'adhésif Araldite 2015, la zone endommagée a été définie comme une surface dans laquelle les déformations dépassent la déformation ultime qui est de 7,87% [55], voir (figure III-5).

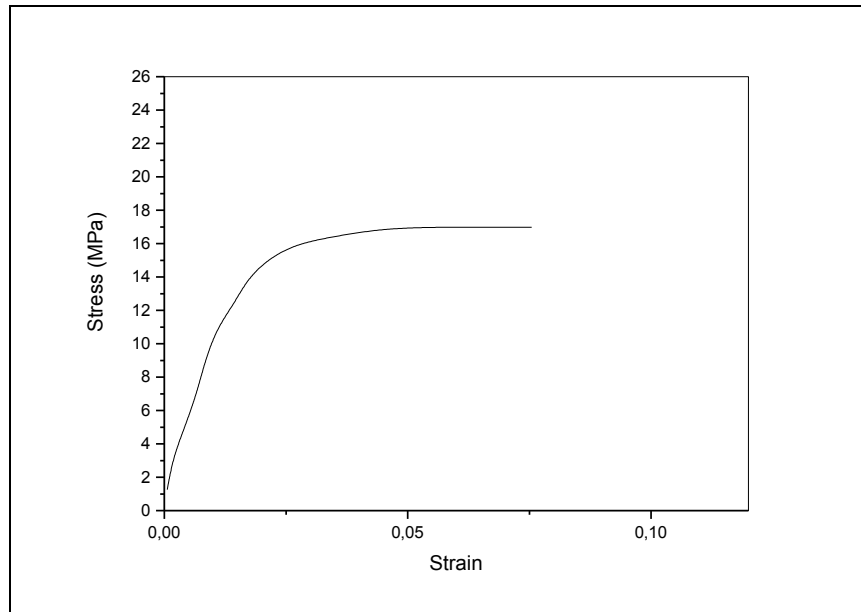


Figure III-5: Courbe contraintes-déformations de l'adhésif araldite 2015 époxyde [56]

Selon la théorie de la zone endommagée, nous supposons que le décollement a lieu lorsque la zone endommagée atteint une certaine valeur de référence et qui peut être définie soit par déformation ultime ou bien par contrainte ultime. Le raisonnement par les déformations est plus approprié puisque l'adhésif présente une non-linéarité significative. Il existe deux modes de rupture pour les joints collés: rupture interfaciale et cohésive. Dans le mode interfacial, la charge de rupture du joint de colle dépend de la tension interfaciale entre l'adhésif et le substrat à coller [57]. Cependant, l'adhésif s'affaiblit quand la rupture de type cohésive se produit dans les joints de colle. Il est recommandé d'utiliser le critère de la zone endommagée pour ce mode de rupture. Nous pouvons aussi prédire l'endommagement des joints d'adhésif en calculant le rapport de la zone endommagée qui est défini comme suit:

$$D_R = \frac{\sum A_i}{l.w}$$

Équation III.3

D_R : rapport de la zone endommagée

A_i : la surface sur laquelle la déformation équivalente est supérieure à 7,87%.

l : la longueur de l'adhésif

w : la largeur de l'adhésif

Il a été montré que l'adhésif Araldite 2015 se décolle complètement lorsque la valeur du taux D_R atteint 0,2474 [56].

CHAPITRE IV

Propagation des fissures de fatigue réparées par patch en composite.

IV-1 Introduction:

Dans les structures aéronautiques, la plasticité joue un rôle prépondérant dans la propagation des fissures de fatigue. Il est connu que les alliages d'aluminium plus ductiles tels que le 2024 T3 sont plus résistants à la propagation des fissures de fatigue lorsque la structure est soumise à un chargement cyclique de type traction-traction (Rapport de charge positif). L'écrouissage cyclique augmente la résistance à la propagation des fissures de fatigue. Lorsque ces structures sont réparées par patch en composite, la plasticité est réduite du fait de l'absorption des contraintes par le patch à travers la couche adhésive. Dans ce cas, l'effet de la plasticité peut être atténué. L'objet de ce chapitre est d'analyser expérimentalement l'effet de la plasticité sur la propagation de fissures de fatigue réparées par patch en composite pour deux alliages d'aluminium le 2024 T3 et le 7075 T6 par l'application de deux chargements cycliques à amplitude constante : $\sigma_{\max}=70$ MPa avec un rapport de charge $R=0.1$ et $\sigma_{\max}=120$ MPa avec un rapport de charge $R=0.1$, ce qui représente :

- Pour 70 MPa : 20% de la limite élastique de l'alliage 2024 T3 et 13% de la limite élastique du 7075T6

- Pour 120 MPa : 32 % de la limite élastique du 2024 T3 et 23% de la limite élastique du 7075 T6.

L'étude de l'effet de la plasticité sur la propagation des fissures de fatigue s'est faite en quatre étapes :

1. Détermination des courbes de durée de vie $a = f(N)$ directement à partir des essais de fatigue,
2. Observation des faciès de rupture des éprouvettes rompues au MEB,
3. Calcul de l'évolution de l'intégrale J en fonction de la longueur de la fissure,
4. Détermination de la variation de la vitesse de propagation de la fissure en fonction de l'intégrale J ($da/dN = f(\Delta J)$).

IV-2 Durée de vie en fatigue des plaques réparées et non réparées

IV-2-1 Plaques non réparées:

Afin de mieux comprendre l'effet de la plasticité sur la propagation des fissures de fatigue réparées par patch en composite, nous avons jugé utile de faire l'étude d'abord pour des plaques non-réparées afin de comparer le comportement des fissures réparées et non réparées et déduire ainsi l'interaction entre patch en composite et plasticité dans le matériau réparé.

La figure IV-1 présente les courbes de durée de vie en fatigue pour des éprouvettes non réparées en alliages Al 2024 T3 et Al 7075 T6 sous une amplitude maximale de chargement de 70 MPa et un rapport de charge de 0.1. Le suivi de fissure a été fait visuellement en collant un papier millimétré sur l'éprouvette ; l'enregistrement du nombre de cycles fait directement par la machine de fatigue. On remarque que sur la figure IV-1, l'éprouvettes en alliage 2024 T3 présentent une plus longue durée

de vie en fatigue comparées aux éprouvettes en Al 7075T6. Le nombre de cycle à la rupture pour l'éprouvette en Al 2024 T3 est de l'ordre de 75 000 cycles alors que ce nombre est de l'ordre de 40000 cycles pour le 7075 T6, ce qui présente un rapport de 1.875. Ces résultats confirment que la ductilité (la plasticité) du matériau améliore la durée en fatigue. Le 2024 T3 est plus ductile que le 7075 T6 présentant ainsi une plasticité plus importante.

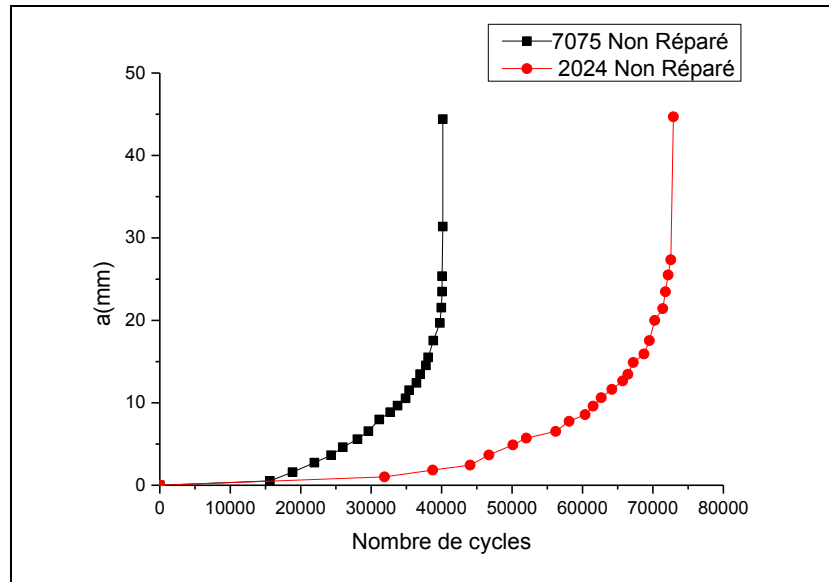


Figure IV-1 Durée de vie en fatigue pour des éprouvettes non réparées sous une contraintes maximale de 70 MPa

En augmentant la contrainte maximale appliquée à 120 MPa (avec $R=0.1$) (**figure IV-2**), on remarque que la durée de vie pour les deux alliages chute considérablement. Cette chute découle du fait que l'augmentation de la charge appliquée entraîne une accélération de la propagation de la fissure. On constate d'après (**la figure IV-1**), que le nombre de cycles à la rupture pour les plaques en Al 2024 T3 est de l'ordre de 16600 alors que ce nombre est de l'ordre de 12 900 pour le 7075 T6 donnant un rapport de 1.28. Ce rapport est inférieur à celui déterminé par un chargement de 70 MPa (1.875). On peut dire que l'écart relatif de la durée de vie en fatigue entre les plaques en Al 2024 et celles en 7075 T6 a considérablement diminué pour un chargement de 120 MPa. Ceci peut être expliqué par le fait que l'augmentation de la charge appliquée a entraîné une augmentation de la plasticité dans l'alliage 7075 T6 ce qui a réduit l'écart relatif entre les durées de vie en fatigue des deux alliages.

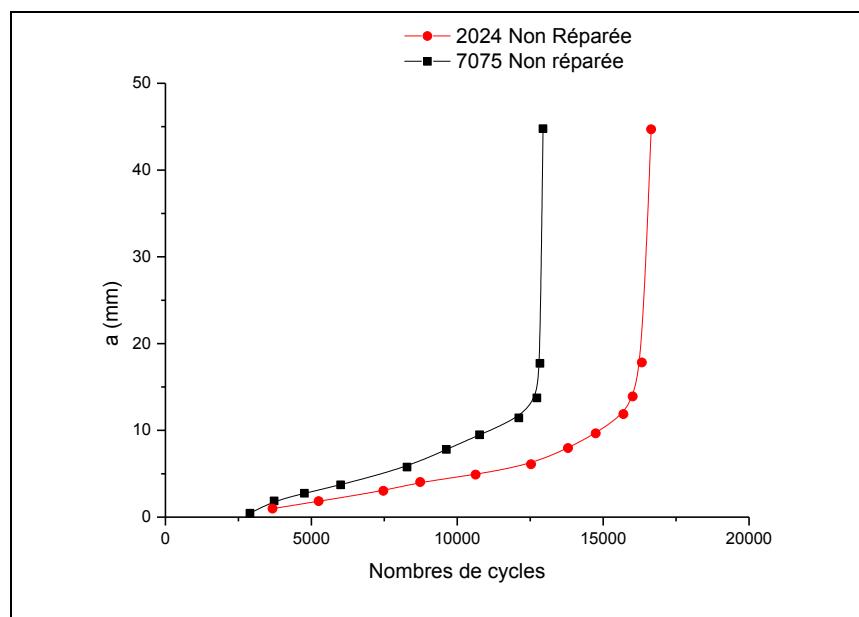


Figure IV-2 Durée de vie en fatigue pour des éprouvettes non réparées sous une contraintes maximale de 120MPa

IV-2-2 Plaques réparées:

La figure IV-3 présente les courbes de durée de vie pour des plaques réparées en Al 2024 T3 et 7075 T3 sous un chargement cyclique de contrainte maximale égal à 70 MPa. Le suivi de la fissure a été fait sur la surface non-réparée de l'éprouvette du moment que nous avons appliqué un simple patch. On remarque que le patch en composite a nettement amélioré la durée de fatigue des plaques fissurées. Pour l'alliage 2024 T3 le nombre de cycles à la rupture a augmenté (pour ce cas de chargement) de 75 000 pour le cas sans réparation à 130000 cycles avec réparation. Le taux d'amélioration de la durée de vie est de 1.73 fois. Ce taux peut atteindre 10 fois pour des entailles circulaires ou semi-circulaires [57, 58]. Les entailles en V donnent des accélérations importantes de la purgation des fissures. Pour l'alliage 7075 T6 le nombre de cycles à la rupture augmente de 40 000 à 90 000 donnant un taux d'amélioration de 2.25 fois. L'amélioration de la durée de vie en fatigue par le patch en composite est due au transfert des contraintes de la plaque fissurée vers le patch à travers la couche adhésive. Ce transfert réduit partiellement les contraintes autour de la pointe de la fissure entraînant ainsi une augmentation de la durée de vie en fatigue.

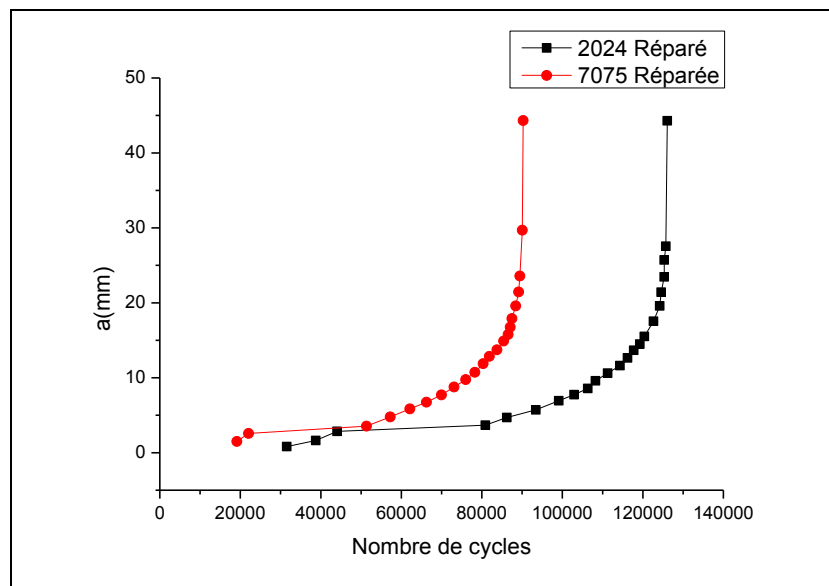


Figure IV-3 Durée de vie en fatigue pour des éprouvettes réparées sous une contraintes maximale de 70 MPa

Pour une contraintes maximales de 120 MPa (**figure IV-4**), On remarque aussi une amélioration de la durée de vie en fatigue des éprouvettes pour les deux alliages d'aluminium. Pour le 2024 T3 le nombre de cycles à la rupture augmente de 16 600 (cas non réparé) à 26 500 pour l'éprouvette réparée donnant un taux d'amélioration de la durée de vie de 1.59 fois. Ce taux est légèrement inférieur au cas du chargement de 70 MPa qui était de 1.73 fois. Pour l'alliage 7075 T6 le nombre de cycles à la rupture augmente de 12 900(cas non réparé) à 22360 pour des éprouvettes réparées donnant un taux d'amélioration de la durée de vie de 1.73 fois. Ce taux est aussi inférieur à celui mesuré pour un chargement de 70 MPa qui est était de 2.25 fois. On peut dire que l'augmentation de la charge appliquée réduit la performance de la réparation par patch en composite.

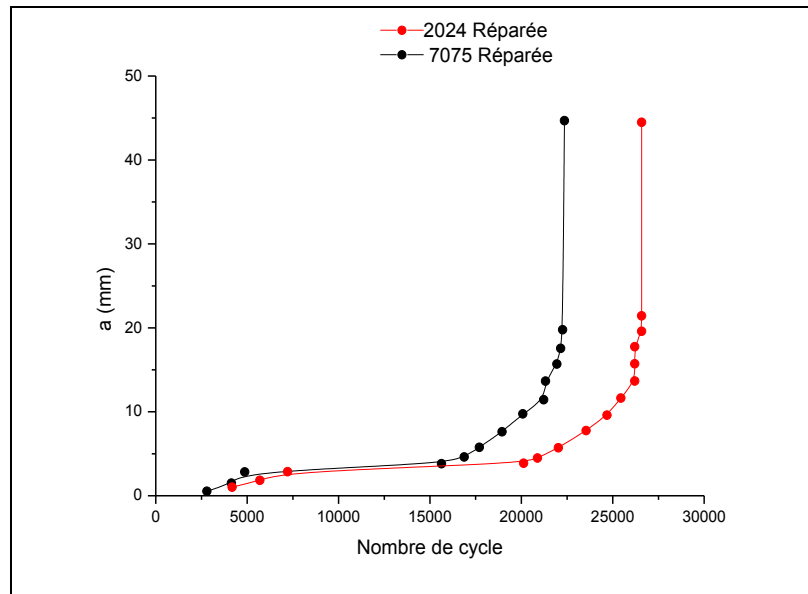


Figure IV-4: Durée de vie en fatigue pour des éprouvettes réparées sous une contraintes maximale de 120 MPa

IV-3 Analyse des faciès de ruptures:

L'analyse du type de rupture (fragile, ductile ou mixte) est l'un des moyens le plus utilisé pour évaluer les effets de la plasticité sur la propagation de fissures de fatigue. Pour cette raison nous avons observé les surfaces de ruptures des éprouvettes réparées et non réparées au microscope électronique à balayage (MEB). Les observations ont été réalisées uniquement pour les éprouvettes soumises à un chargement cyclique de contraintes maximales égal à 120 MPa car l'effet de la plasticité dans ce cas est plus sensible.

IV-3-1 Eprouvettes non réparées:

La figure IV-5 présente les faciès de rupture observés au MEB pour une éprouvette non réparée en 2024 T3 après rupture finale. L'éprouvette a été soumise à un chargement de fatigue avec une contrainte maximale de 120 MPa et un rapport de charge de 0.1. Le taux d'agrandissement de l'image est de 460 fois. La photo a été prise au milieu de l'éprouvette. On remarque que la rupture est mixte ductile+fragile avec dominance de la rupture ductile. En effet, on remarque la présence de très grands nombres de microcavités ce qui indique qu'il y'a eu à un certain moment une déchirure ductile de l'éprouvette. En plus, on remarque aussi la présence stries de fatigue ce qui montre une rupture ductile par clivage. La présence de cavités indique que pour ce niveau de charge la plasticité dans le 2024 T3 avait un effet assez important sur la propagation de la fissure de fatigue.

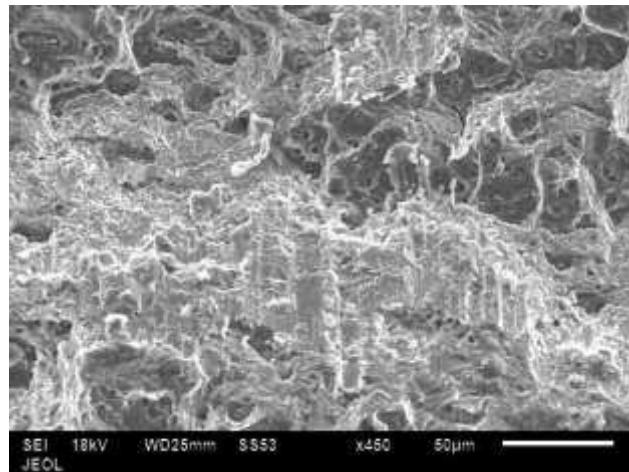


Figure IV-5: Faciès de rupture de l'éprouvette non réparée en Al 2024 T3 sous un chargement de 120 MPa

La figure IV-6 présente les faciès de rupture d'une éprouvette en Al 7075 non réparée après un chargement de 120 MPa (contrainte maximale). L'observation au MEB a été prise au milieu de l'éprouvette avec un agrandissement de 400 fois. On observe aussi une rupture mixte avec dominance fragile. La rupture par clivage pour cet alliage est dominante mais on observe quelques microcavités de faibles tailles comparées au cas de l'Al 2024 T3. La rupture ductile est aussi observable pour cet alliage mais elle est moins importante. La plasticité a donc un effet moins sensible sur la propagation de la fissure pour cet alliage.

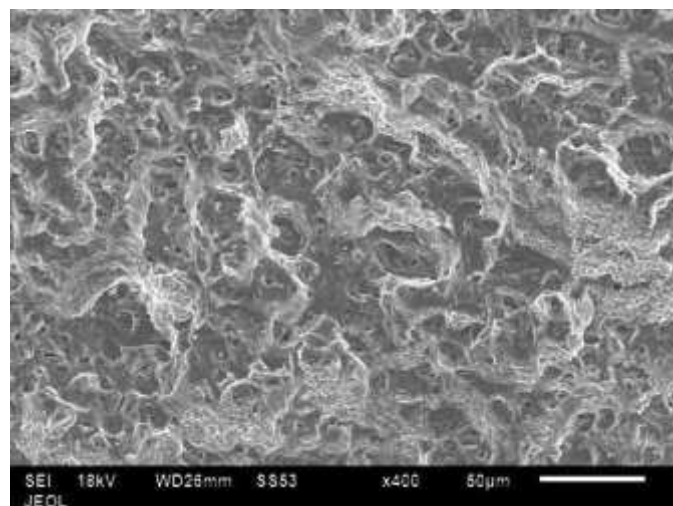


Figure IV-6: Faciès de rupture de l'éprouvette non réparée en Al 7075 T6 sous un chargement de 120 MPa

IV-3-2 Eprouvettes réparées:

La Figure IV-7 présente la surface de rupture d'une éprouvette réparée en Al 2024 T3 rompue après un chargement de fatigue de contrainte maximale de 120 MPa. La photo a été prise au milieu de l'éprouvette avec un agrandissement de 500 fois. On remarque que la rupture est principalement fragile par clivage néanmoins, on peut voir aussi quelques microcavités de faibles dimensions qui se sont initiées après l'accroissement de la longueur de la fissure. On peut donc déduire que la présence du patch en composite a considérablement réduit la plasticité autour de la pointe de la fissure rendant la rupture à dominance fragile alors qu'elle était à dominance ductile pour les éprouvettes non-réparées en Al 2024 T3.

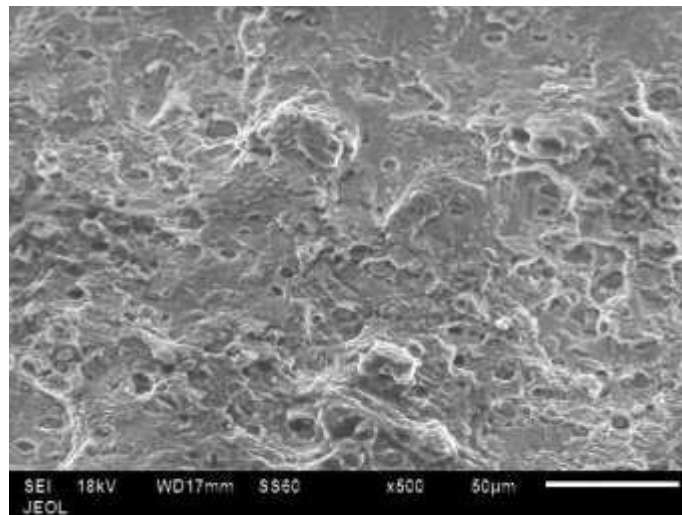


Figure IV-7: Facies de rupture de l'éprouvette réparée en Al 2024 T3 sous un chargement de 120 MPa

La figure IV-8 présente la surface de rupture d'une éprouvette réparée en Al 7075 T6, rompue après un chargement de 120 MPa. L'image a été prise au milieu de l'éprouvette avec un agrandissement de 500 fois. On peut clairement observer que la rupture est complètement fragile par clivage. Les stries de fatigue sont clairement observables montrant ainsi que la présence du patch en composite a complètement éliminé la plasticité autour de la pointe de fissure pour cet alliage et pour ce niveau de chargement.

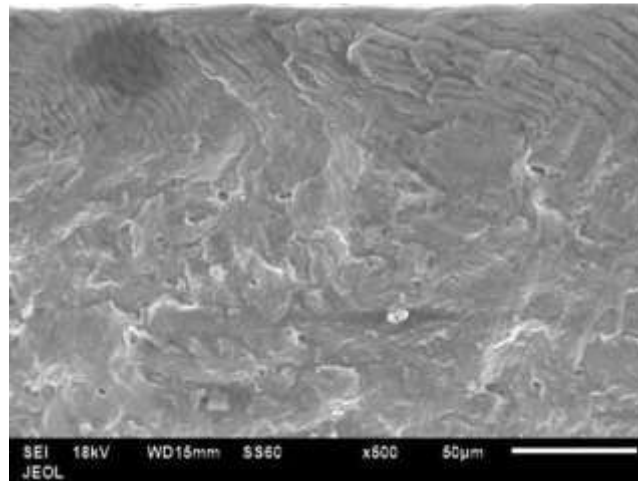


Figure IV-8: Facies de rupture de l'éprouvette réparée en Al 7075 T6 sous un chargement de 120 MPa

IV-4 Variation de l'intégrale J

Si l'effet de plasticité sur la propagation des fissures de fatigue a été illustré expérimentalement par les observations des faciès de rupture au MEB, nous essayerons d'illustrer cet effet numériquement par l'étude de la variation l'intégrale J au cours de la propagation de la fissure. L'intégrale J (intégrale curviligne) représente un moyen de calculer le taux de restitution de l'énergie de déformation ou de travail (énergie) par unité de surface de zone rompue au sein d'un matériau⁵. Le concept théorique de l'intégrale J a été développé, de façon indépendante, en 1967 par Cherepanov [59] et en 1968 par Jim Rice [60]. Ces travaux mettent en évidence que le contour délimitant la zone plastique aux abords du front de fissure (appelé J) est indépendant du profil (contour) de la fissure. Dans ce paragraphe nous déterminerons l'évolution de cette intégrale en fonction de longueur de la fissure pour des éprouvettes réparées et non-réparées. Nous avons calculé la différence de l'intégrale J entre les contraintes maximales et minimales :

$$\Delta J = J_{\max} - J_{\min}$$

Équation IV.1

IV-4-1 Eprouvettes non réparées:

La figure IV-9 présente la variation de l'intégrale J autour de la pointe de fissure en fonction de la longueur de fissure (a) pour les éprouvettes non réparées en Al 2024 T3 et Al 7075 T6 soumises à un chargement de traction uni-axiale de 70 MPa. On remarque que les deux alliages d'aluminium présentent des valeurs de l'intégrale pratiquement identiques lorsque la longueur de la fissure est inférieure à 15 mm, c'est-à-dire, pour une longueur de fissure inférieure à 15 mm l'effet de la plasticité est inexistant, ce qui donne le même intégrale J. Au-delà de la longueur de 15 mm pour la fissure, on

remarque que l'alliage Al 2024 T3 présente des valeurs plus importantes de l'intégrale J. La plasticité est donc plus sensible lorsque la longueur de la fissure dépasse la valeur de 15 mm pour ce niveau de la charge appliquée (70 MPa).

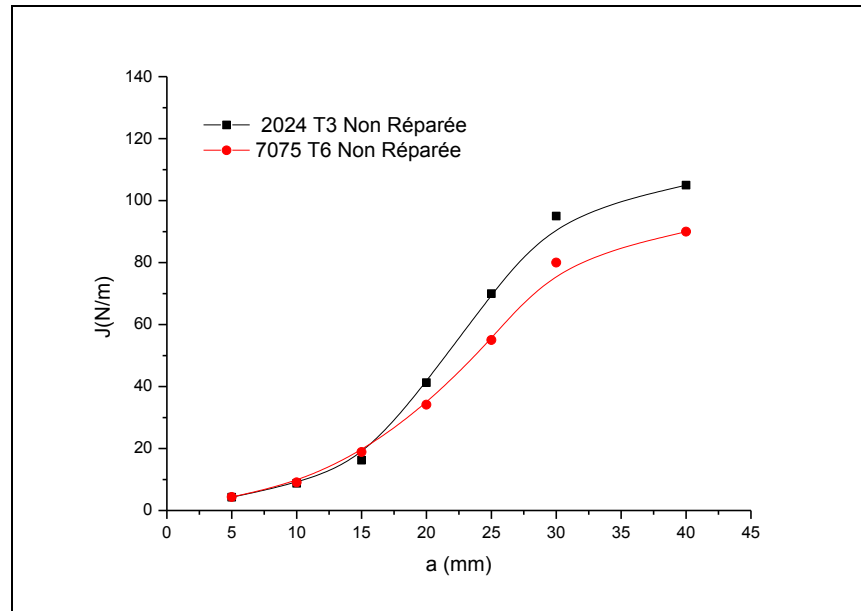


Figure IV-9: Variation de l'Intégrale J pour des éprouvettes non-réparées sous un chargement de 70 MPa

La figure IV-10 présente la variation de l'intégrale J en fonction de la longueur de la fissure pour des éprouvettes non réparées avec un chargement de 120 MPa en traction. On remarque que l'effet de la plasticité devient plus sensible pour des longueurs de fissures supérieures à 5 mm. Les valeurs de l'intégrale J pour ce niveau de chargement sont plus significatives. La plasticité est aussi plus marquée pour l'alliage 2024 T3. On remarque que la différence de l'intégrale J entre les deux alliages d'aluminium augmente avec la propagation de fissure. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait qu'au cours de la propagation de la fissure, la zone plastique autour de la fissure augmente pour les deux alliages mais le taux d'augmentation est plus significatif pour l'alliage 2024 T3 qui présente une ductilité plus importante.

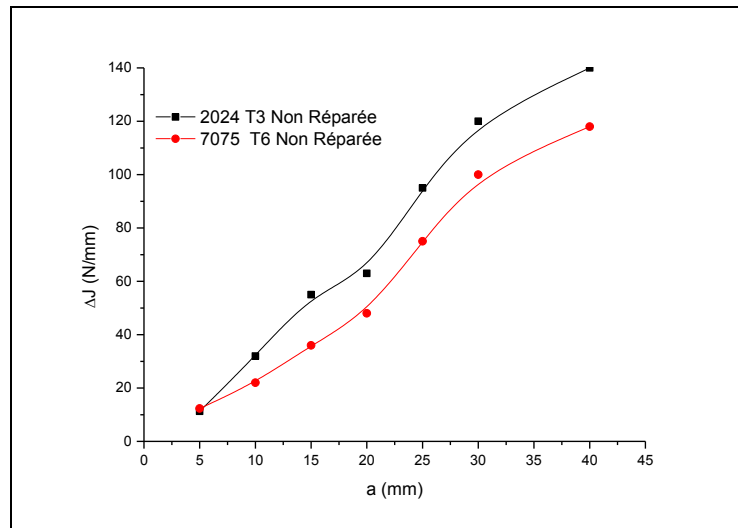


Figure IV-10: Variation de l'Intégrale J pour des éprouvettes non-réparées sous un chargement de 120 MPa.

IV-4-2 Eprouvettes réparées:

Sur la **figure IV-11** nous présentons la variation de l'intégrale J pour des éprouvettes réparées par patch en composite sous un chargement de contrainte maximale égal à 70 MPa. On remarque d'abord que les valeurs de l'intégrale de Rice ont été réduites de manière significative par la présence du patch. En effet, la valeur de cette intégrale pour une longueur de la fissure de 30 mm a chuté de 88 N/m (**figure IV-9**), à 2.6 N/m pour l'Al 2024 T3. Cette réduction est due à l'absorption des contraintes par le patch en composite. La réduction des contraintes autour de la pointe de la fissure réduit considérablement les valeurs de l'intégrale J. Cette réduction dépendra bien sûr de plusieurs paramètres dont les propriétés mécaniques du patch, ses propriétés géométriques, les propriétés de l'adhésif ainsi que du niveau du chargement. D'autre part, on remarque sur la **figure IV-11**, que les deux alliages présentent les mêmes valeurs de l'intégrale J, ce qui nous permet de conclure que la présence du patch en composite a complètement éliminé la plasticité autour de la pointe de la fissure réparée, excepté pour des longueurs de fissures de 40 mm.

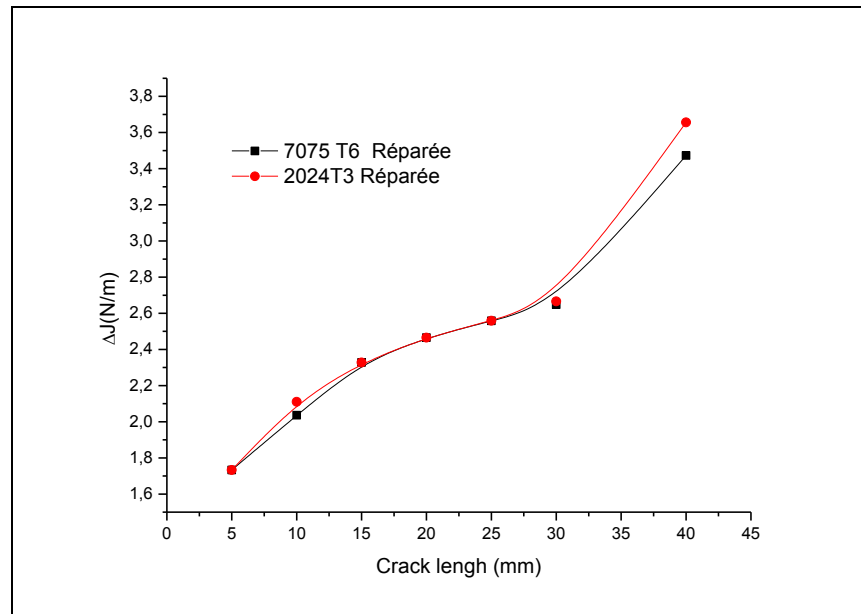


Figure IV-11: Variation de l'Intégrale J pour des éprouvettes réparées sous un chargement de 70 MPa

La figure IV-12 présente la variation de l'intégrale J pour un chargement de 120 MPa. On remarque que le taux de réduction de l'intégrale J reste très significatif pour ce niveau de chargement. L'efficacité de la réparation en composite est importante même si on augmente les niveaux de contraintes. Cependant, on peut constater un phénomène assez influant qui peut atténuer l'efficacité de la réparation pour des simples patches (sur un côté); c'est le moment de flexion dû au déplacement de l'axe neutre lorsqu'on colle un patch sur une seule surface de l'éprouvette. Ce moment va entraîner une augmentation des contraintes autour de la pointe de la fissure provoquant ainsi une réduction de l'efficacité de la réparation par patch en composite. Le collage d'un patch double symétrique élimine complètement le moment auxiliaire de flexion causé par le simple patch.

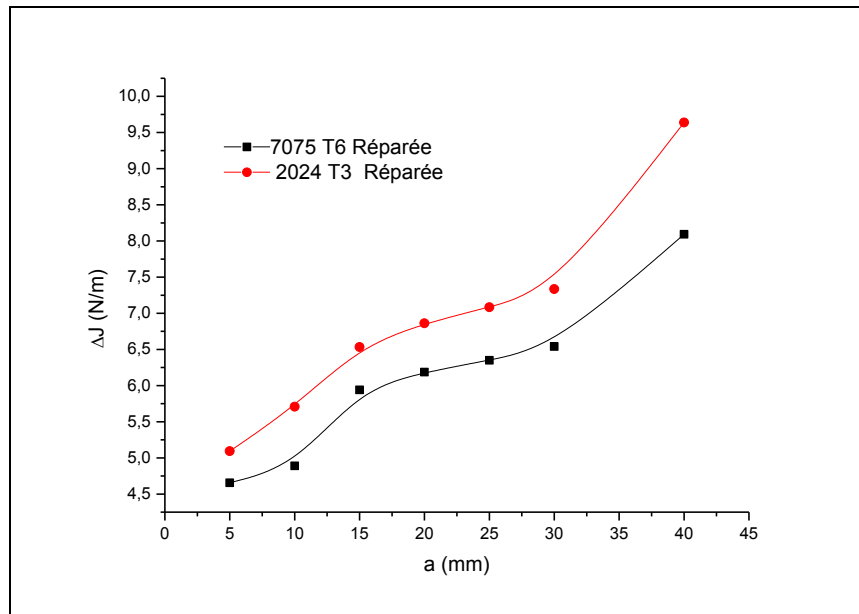


Figure IV-12: Variation de l'Intégrale J pour des éprouvettes réparées sous un chargement de 120 MPa

IV-5 Vitesse de la propagation de la fissure:

La réparation par collage composite doit permettre de renforcer la structure fissurée et de réduire la contrainte à la pointe de la fissure réparée. Cela permet de rétablir la résistance résiduelle à un niveau acceptable et de réduire les vitesses de propagation des fissures dans les conditions de chargement de fatigue afin de garantir une durée de vie résiduelle acceptable [61]. Pour calculer la vitesse de propagation des fissures, nous avons utilisé la technique sécante ou point à point. La méthode consiste à calculer la pente de la droite entre deux points de la courbe de la durée de vie ($a=f(N)$) comme suit :

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \tag{Équation IV.2}$$

Etant donné que la valeur de da/dN calculée est une valeur moyenne pour une longueur de fissure comprise entre (a_i, a_{i+1}) , la longueur moyenne de la longueur de fissure $a_m = (a_i + a_{i+1})$ sera utilisée pour calculer l'intégrale ΔJ .

IV-5-1 Eprouvettes non réparées:

La figure IV-13, présente la variation de la vitesse de propagation des fissures non réparées en fonction de l'intégrale ΔJ (avec une échelle logarithmique) pour les deux alliages d'aluminium sous le chargement en fatigue avec $\sigma_{max} = 70$ MPa et $R=0.1$. On remarque que pour des fissures non-réparées

on peut approximer une partie de la courbe de la vitesse de propagation de la fissure par une fonction linéaire simulable à celle de Paris pour le cas linéaire :

$$\frac{da}{dN} = C. (\Delta J)^m \text{Équation IV.3}$$

où les paramètres m et n sont des constantes caractérisant le matériau. Ces paramètres sont différents de ceux estimés pour la propagation de fissure dans un milieu élastique car les valeurs de l'intégrale J montrent que, pour $\sigma_{max} = 70$ MPa, les fissures des deux matériaux ont un comportement élasto-plastique lorsque la longueur de la fissure dépasse 15 mm (**Figure IV-9**). D'autre part, il est clair que le taux de propagation des fissures est plus important pour l'Al 7075 T6, ce qui confirme que l'Al 2024 T3 présente une plus grande résistance aux charges de fatigue.

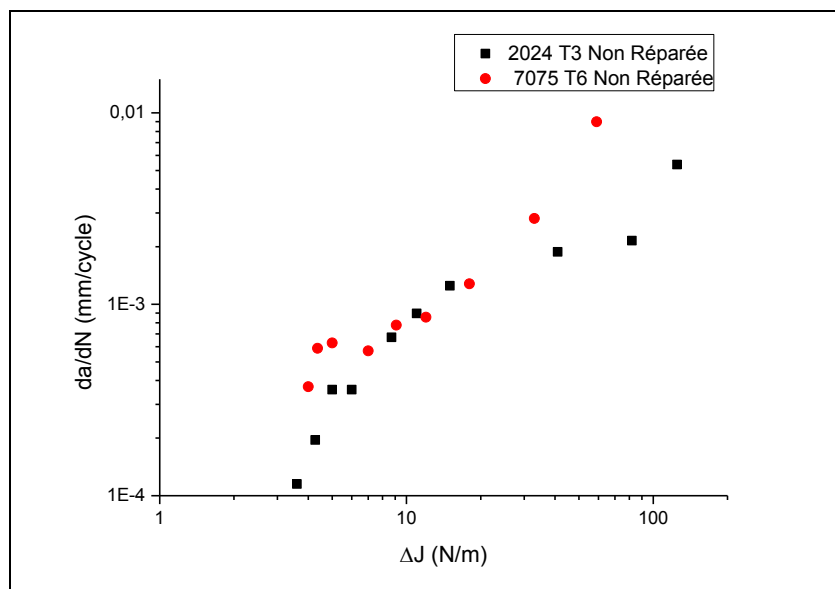


Figure IV-13: da/dN vs ΔJ pour un chargement de 70MPa
(Eprouvettes non réparées)

Les résultats de la figure précédente sont également confirmés à la figure Iv-14. Cette figure montre la variation la vitesse de propagation des fissures de fatigue (da / dN) en fonction de l'intégrale J pour des éprouvettes non réparées avec un chargement de 120 MPa (contraintes maximales). L'augmentation de la charge appliquée entraîne une accélération de la propagation de la fissure et en conséquence la durée de fatigue diminue.

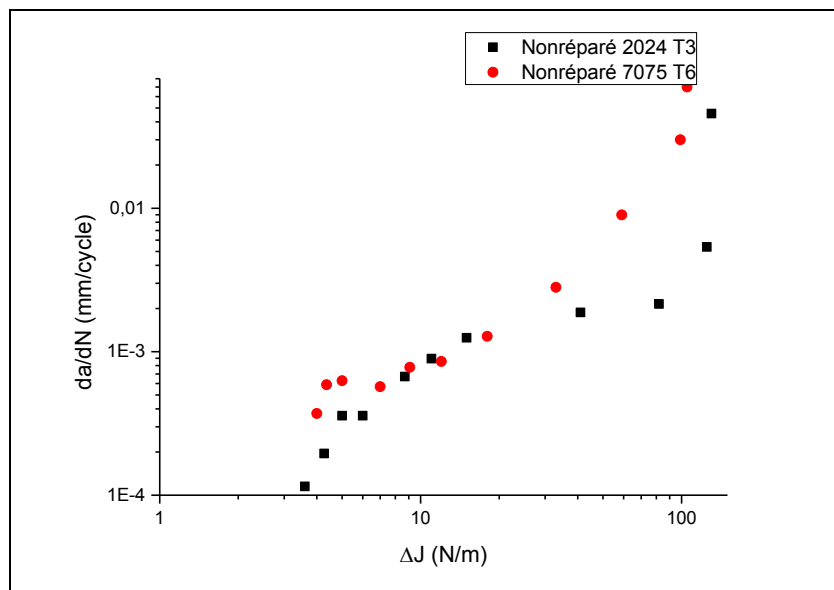


Figure IV-14: da/dN vs ΔJ pour un chargement de 120 MPa
(Eprouvettes non réparées)

IV-5-2 Eprouvettes réparées:

La figure IV-15 montre la variation de da / dN en fonction de l'intégrale J , pour les deux éprouvettes d'alliages d'aluminium réparées avec des patches en composite et soumise à une charge de fatigue maximale de 70 MPa. La réparation du patch réduit considérablement, la vitesse de propagation des fissures et améliore par conséquent la durée de vie en fatigue. Différents taux d'amélioration de la durée de vie en fatigue ont été trouvés dans la littérature [62-65]. La variance dans les résultats rapportés peut être attribuée aux différences de conditions de chargement et des paramètres de réparation utilisés dans chaque étude et à la rupture de l'adhésif lors du chargement en fatigue. En raison de contraintes de cisaillement inter-laminaires, un décollement de l'adhésif peut se produire et réduire de manière significative la durée de vie en fatigue des structures réparées. L'augmentation de la charge appliquée accélère la propagation des fissures réparées dans les deux alliages d'aluminium d'après la figure IV-16.

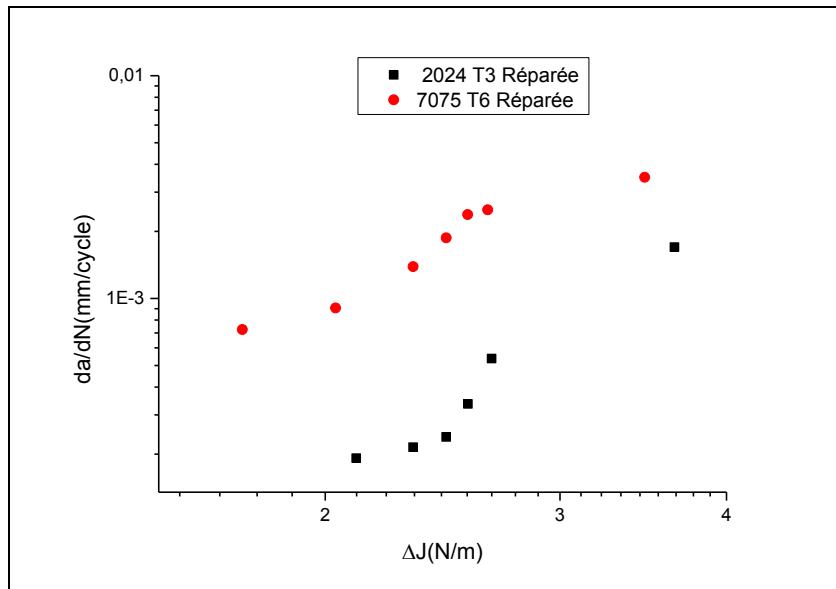


Figure IV-15: da/dN vs ΔJ pour un chargement de 70 MPa (Eprovettes réparées)

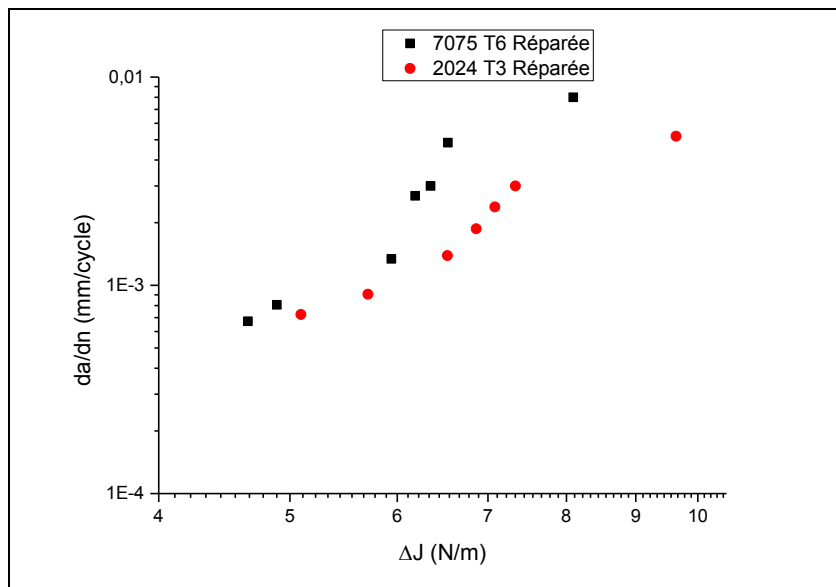


Figure IV-16: da/dN vs ΔJ pour un chargement de 120 MPa (Eprovettes réparées)

IV-6 Conclusion:

La réparation par composite lié augmente considérablement la durée de vie en fatigue des plaques fissurées. En raison de sa ductilité, l'alliage d'aluminium 2024 T3 présente des durées de vie en fatigue, meilleures par rapport à l'alliage 7075 T6. L'effet de cette ductilité est réduit par la présence du patch en composite. L'augmentation de la charge de fatigue appliquée réduit considérablement l'efficacité de la réparation. La vitesse de propagation des fissures de fatigue réparées ne présentent pas de comportement similaire à la loi de Paris. La prévision de la durée de vie en fatigue des structures réparées est donc difficile et des travaux supplémentaires sont nécessaires pour établir des modèles de propagation des fissures de fatigue pour les plaques réparées.

CHAPITRE V

Interaction entre la plasticité dans la plaque d'aluminium et l'endommagement de l'adhésif.

V-1 Introduction:

L'utilisation de patches en composite pour la réparation de dommages et de fissures dans les structures d'avions a augmenté ces dernières années en raison des nombreux avantages offerts par les matériaux composites par rapport aux métaux. Les patches métalliques fixés mécaniquement sont moins efficaces que les patches composites collés [66-70]. L'utilisation du collage réduit les concentrations de contraintes, ce qui peut fortement atténuer le risque d'initiation de fissures nouvelles provoquées par des trous de fixation supplémentaires. Dans la réparation par patch en composite, les contraintes autour de la pointe de la fissure sont transférées au patch composite à travers toute la couche adhésive. Ce transfert peut réduire considérablement l'intensité de contraintes autour du front de la fissure, ce qui améliore le comportement en fatigue des panneaux endommagés [71-75].

Plusieurs paramètres affectent le processus de réparation des structures métalliques endommagées, parmi lesquels on peut citer:

- les propriétés mécaniques du composite et de l'adhésif [76-79],
- Les propriétés géométriques du composite et de l'adhésif qui incluent la forme du patch, l'épaisseur du patch (nombre de plis du composite), l'orientation des plis, l'épaisseur de l'adhésif.

D'autres paramètres apparaissant pendant l'opération de collage ou après le processus de réparation ont des effets importants sur les performances de cette réparation. Ces paramètres sont: les contraintes résiduelles dues au chauffage de la surface métallique avant collage et le décollement éventuel de l'adhésif au cours du chargement de fatigue. Bachir Bouiadjra et al [80] ont montré que le décollement de l'adhésif réduit considérablement la durée de vie en fatigue des structures réparées. En effet, la présence du décollement de l'adhésif entraîne une augmentation significative du facteur d'intensité de contrainte pour les fissures réparées, ce qui implique une réduction des performances de réparation. L'étude de Bachir Bouiadjra et al [80] a montré que, lorsque le décollement de l'adhésif se propage perpendiculairement à la direction de la fissure, il réduit considérablement l'efficacité de la réparation alors que la propagation du décollement dans le sens parallèle de la fissure n'a pas d'effet significatif sur l'efficacité de la réparation.

Avant d'appliquer un adhésif thermique, la zone réparée des structures métalliques doit être chauffée à la température de durcissement de l'adhésif. Pendant le refroidissement, la différence de température entre la structure en aluminium et le composite (qui ont des coefficients de dilatation thermique différents) génère des contraintes résiduelles laissant le composite en compression et le métal en tension. De nombreux chercheurs ont analysé les effets des contraintes résiduelles

thermiques sur l'efficacité de la réparation. Mhamdia et al. [81], ont étudié l'effet des contraintes résiduelles thermiques sur la variation du facteur d'intensité de contraintes pour les fissures réparées par patch sous un chargement thermomécanique; ils ont montré que l'optimisation des propriétés de l'adhésif celles du patch en composite peut atténuer considérablement l'effet négatif de ces contraintes résiduelles d'origine thermique.

Si les effets du décollement de l'adhésif et des contraintes résiduelles ont été largement étudiés, ceux de la plasticité autour de la fissure n'ont pas eu beaucoup d'intérêt dans la littérature. Ouadad et al [82], ont montré que la présence du patch composite réduisait considérablement la taille de la zone plastique en avant de la fissure. Cette réduction est très importante pour que les concepts de mécanique de la rupture linéaire puissent être appliqués aux fissures réparées. Albedah et al [83], ont mené des études expérimentales sur l'effet du changement d'amplitude du chargement sur la durée de vie en fatigue d'une plaque en Al 2024 T3, fissurée réparée avec un patch composite. Ils ont montré que le changement de l'amplitude de la charge de fatigue d'un bloc à forte charge à un bloc à faible amplitude entraîne un effet de retard dans la propagation de la fissure. Cet effet est atténué lorsque la fissure est réparée. Ce comportement s'explique par le fait que le collage du patch sur la fissure réduit la plasticité autour de la fissure, ce qui entraîne une réduction du transfert de contrainte entre la structure réparée et le patch en composite.

L'objet de ce chapitre est d'étudier numériquement l'interaction entre la plasticité autour d'une fissure réparée et l'endommagement de l'adhésif pour un chargement de traction uni-axiale. Cette étude permettra de montrer si la ductilité du matériau a un effet sensible sur le risque du décollement de l'adhésif. Nous allons présenter en premier lieu la variation de la zone plastique en fonction de la longueur de la fissure pour des fissures réparées, puis nous évaluerons par la théorie de la zone endommagée l'évolution du dommage dans la couche adhésive en fonction de la longueur de la fissure.

V-2 Variation de la zone plastique en fonction de la longueur de la fissure

La figure IV-1, présente l'évolution du rayon de la zone plastique en fonction de la longueur de la fissure pour des éprouvettes non-réparées sous chargement de traction uni-axiale avec une contrainte appliquée de 70 MPa pour les deux alliages d'aluminium 2024 T3 et 7075 T6. On peut voir sur cette figure que l'étendue de la zone plastique croît avec la propagation de la fissure parce que l'augmentation de la longueur de la fissure entraîne des déformations plus importantes et par conséquent des déformations plastiques croissantes. Par exemple, pour le 2024 T3, le rayon de la

zone plastique autour de la fissure passe de 1 mm (pour une fissure de 5 mm) à 13 mm (pour une longueur de fissure de 30 mm). Le rapport entre le rayon de la zone plastique et la longueur de fissure (r_p/a), augmente donc de 0.2 à 0.43 sur cet intervalle ; ce qui nous permet de confirmer que le concept de la mécanique linéaire devient de moins en moins applicable lorsque la longueur de la fissure augmente. D'autre part, on remarque que l'alliage d'aluminium 2024 T3, présente des rayons de la zone plastique plus élevés compte tenu de sa ductilité élevée, confirmant ainsi les résultats expérimentaux et les observations microscopiques présentés dans le chapitre précédent.

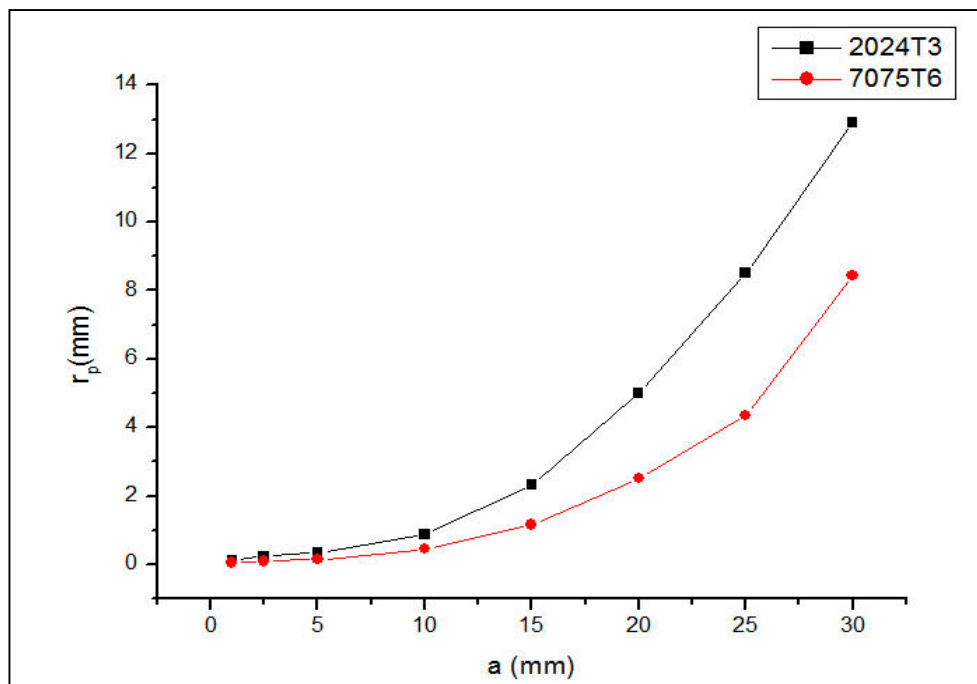


Figure V-1: Rayon de la zone plastique vs longueur de la fissure pour un chargement de 70 MPa (Fissures non réparées)

La **figure IV-2**, présente la variation du rayon de la zone plastique en fonction de la longueur de la fissure pour des plaques non-réparées sous un chargement de 200 MPa (ce chargement présente 57% de la limite élastique pour le 2024 T3 et 40 % pour le 7075 T6). On peut clairement voir sur cette figure que l'augmentation de la contrainte appliquée a conduit à une augmentation significative du rayon de la zone plastique autour de la pointe de la fissure pour les deux alliages d'aluminium. Le rayon calculé pour une longueur de la fissure de 5 mm est de l'ordre de 7 mm pour le 2024 T3 (alors qu'il était de l'ordre de 1 mm pour un chargement de 70 MPa). Ce rayon passe à 24 mm pour une fissure de 30 mm (pour 70 MPa nous avons trouvé un rayon de 13 mm). Pour ce cas de chargement nous avons un rayon plastique proche de la longueur de la fissure et l'alliage Al 2024 T3, qui présente aussi une plasticité plus importante comparé à l'alliage Al 7075 T6

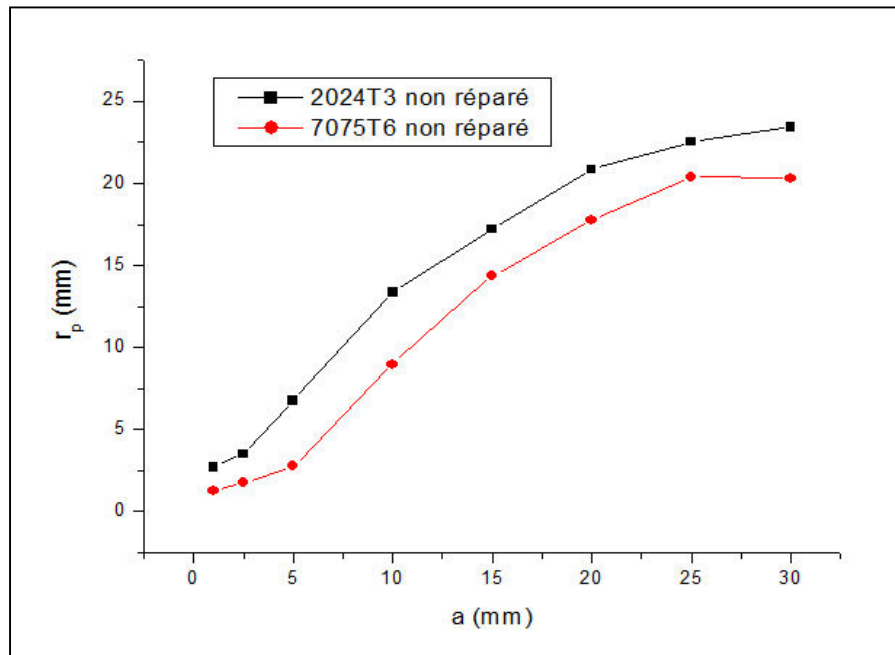


Figure V-2: Rayon de la zone plastique vs longueur de la fissure pour un chargement de 200 MPa (Fissures non réparées)

Sur la **figure IV-3**, nous présentons la variation du rayon de la zone plastique en fonction de la longueur de la fissure pour des plaques réparées sous un chargement de 70 MPa. On remarque clairement que la présence du patch en composite a considérablement réduit l'étendue de la zone plastique autour de la pointe de la fissure. Pour le cas du 2024 T3, et pour une fissure de 5 mm, le rayon de la zone plastique calculé est de l'ordre de 0.17 mm alors qu'on a trouvé 1 mm pour une fissure non réparée soit une réduction de dix sept fois. Pour le même matériau et pour une fissure de 30 mm, le r_p calculé est de l'ordre de 0.38 mm sachant que nous avons calculé un r_p de l'ordre de 13 mm pour une fissure non réparée, la réduction est de donc de 34 fois. On peut donc confirmer que le transfert de contraintes vers le patch augmente au fur et à mesure que la fissure se propage. Concernant le rapport r_p/a , il est égal à 0.034, pour une fissure de 5 mm et 0.012, pour $a=30$ mm, il en résulte que les concepts de la mécanique linéaire de la rupture peuvent être parfaitement applicables aux fissures réparées par patch en composite. En comparant, les rayons plastiques pour les deux alliages, on peut dire que le taux de réduction de la zone plastique par le patch en composite est plus important pour le 7075 T6.

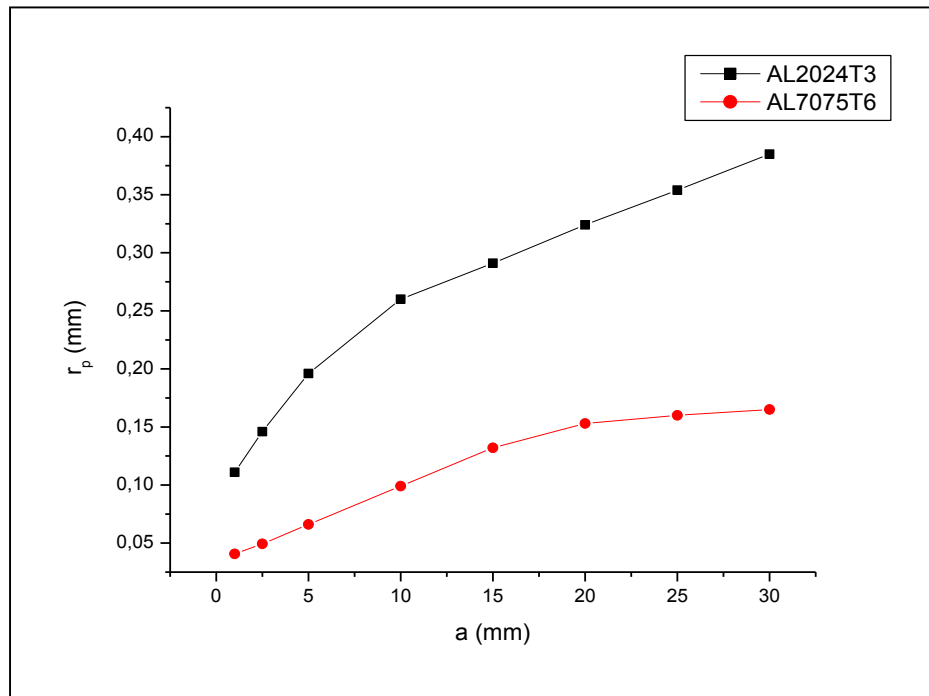


Figure V-3: Rayon de la zone plastique vs longueur de la fissure pour un chargement de 70 MPa (Fissures réparées)

La **figure V-4**, montre la variation du rayon plastique pour des fissures réparées sous un chargement de 200 MPa pour les deux alliages d'aluminium. L'étendue de la zone plastique pour ce cas de chargement augmente sensiblement mais reste largement inférieure au cas des fissures non-réparées. Par exemple, pour le 2024 T3, nous avons obtenu un r_p égal à 2.7 mm (ce rayon était de 7 mm pour une fissure non-réparée). Pour une fissure de 30 mm, le r_p obtenu est de l'ordre de 6 mm, les calculs par la MEF ont donné un rayon de 23 mm pour une fissure non-réparée. On peut donc confirmer que l'augmentation de la charge appliquée réduit l'efficacité de la réparation ce qui est conforme avec les résultats expérimentaux présentés dans le chapitre IV. D'autre part, le rapport entre le rayon de la zone plastique et la longueur de la fissure (r_p/a) est de l'ordre de 0.54, pour une fissure de 5 mm et de 0.2, pour une fissure de 30 mm. On peut dire que pour des chargements élevés et même si la fissure est réparée les concepts de la mécanique linéaire de la rupture ne peuvent pas être appliqués, le recours aux concepts de la mécanique élasto-plastique de la rupture est obligatoire pour des niveaux de contraintes élevés.

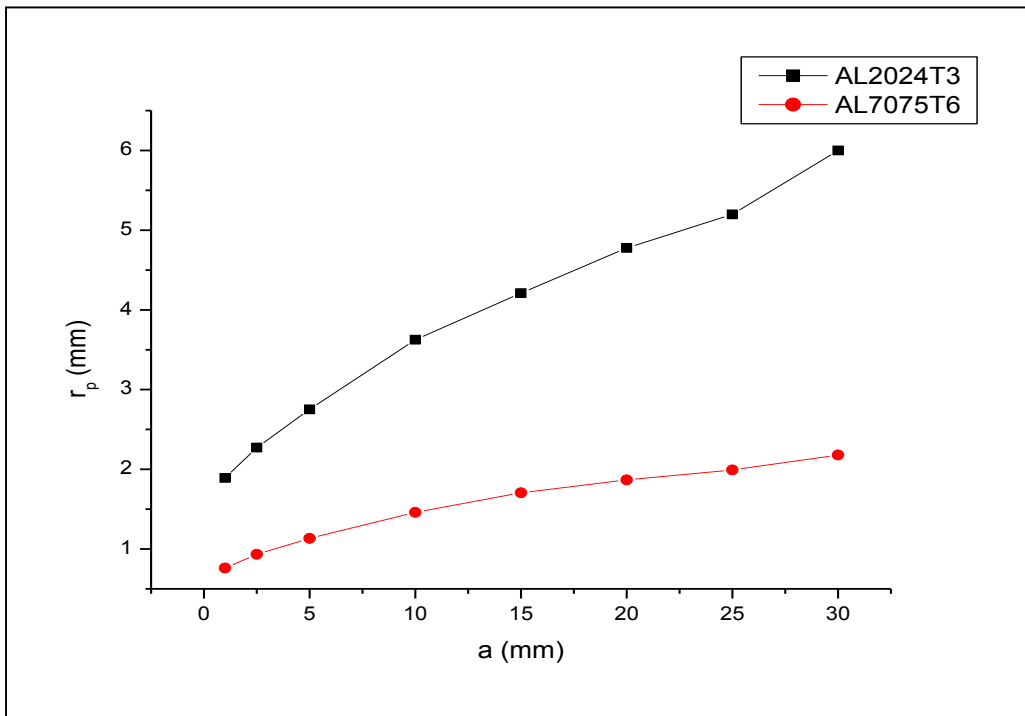


Figure V-4: Rayon de la zone plastique vs longueur de la fissure pour un chargement de 200 MPa (Fissures réparées)

V-3 Détermination de la zone endommagée dans la couche adhésive:

En intégrant le critère de la zone endommagée dans le code de calcul par éléments finis, nous avons pu déterminer l'étendue de la zone endommagée pour différents chargements et pour différentes longueurs de la fissure.

V-3-1 Cas du chargement de 70 MPa:

La figure V-5, montre que l'étendu de la zone endommagée dans l'adhésif pour le cas d'une plaque en 2024 T3 avec une longueur de la fissure de 1 mm sous un chargement de traction de 70 MPa. La zone endommagée est représentée par la couleur grise. On remarque que pour cette longueur de la fissure ($a= 1\text{mm}$), la zone endommagée dans l'adhésif est de dimension très faible, cette zone est localisée autour du front de fissure. On peut donc affirmer que pour cette taille de la fissure le risque de décollement est inexistant.



Figure V-5: zone endommagée dans l'adhésif (en gris)
pour le cas du 2024 avec $a=1$ mm et $\sigma=70$ MPa.

La figure V-6, présente la zone endommagée pour une longueur de la fissure de 5 mm et pour le cas d'une plaque en 2024, réparée par patch en composite. On peut voir que l'étendue de la zone endommagée dans l'adhésif a considérablement augmenté avec la progression de la fissure. Ceci est dû principalement à l'augmentation des contraintes autour de la pointe de la fissure qui va entraîner une augmentation de l'absorption de ces contraintes par ma couche adhésive. On remarque aussi pour cette taille de la fissure que la zone endommagée dans l'adhésif reste localisée au-dessus et autour du front de cette fissure

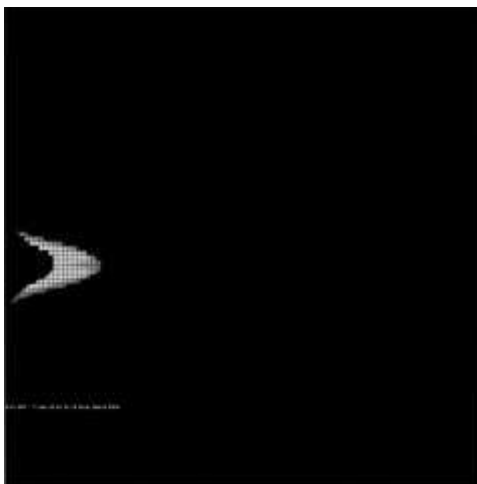


Figure V-6: zone endommagée dans l'adhésif (en gris)
pour le cas du 2024 avec $a=5$ mm et $\sigma=70$ MPa

Pour une longueur de fissure de 10 mm (figure V-7), on remarque que la zone endommagée dans l'adhésif croît avec la taille de la fissure et se propage parallèlement à la direction de la fissure ce qui est conforme aux résultats présentés par Ouaddad et al. [82] et A.Abdelah et al.[83]. En plus, on remarque que la zone endommagée dans l'adhésif a une forme pratiquement semi-elliptique, ce qui est en concordance avec les observations de Calimnero et al. [84], qui ont montré avec la technique du Laser que le décollement dans l'adhésif présente une forme a peu près semi-elliptique.

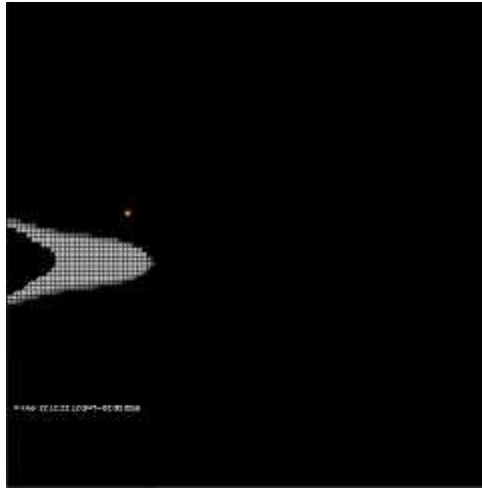


Figure V-7: zone endommagée dans l'adhésif (en gris)
pour le cas du 2024 avec $a=10$ mm et $\sigma=70$ MPa

Pour comparer entre les deux alliages d'aluminium, nous avons présenté sur la figure V-8 la zone endommagée dans l'adhésif (ZEA) pour une plaque en Al 7075 T6, avec la même longueur de la fissure ($a=10$ mm) et la même amplitude de chargement (70 MPa). On voit que l'étendue de la ZEA est légèrement supérieure pour le 7075 T6, comparée au cas du 2024 T3, mais la différence n'est pas très importante. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'étant plus résistant, le 7075 T6, absorbe plus d'énergie et donc est le siège de contraintes plus élevées offrant ainsi un transfert de contraintes plus important vers la couche adhésive. Cependant, cette différence pourrait être due aux erreurs de calcul et la ductilité du matériau n'a pas réellement un effet significatif sur l'endommagement de la couche adhésive.

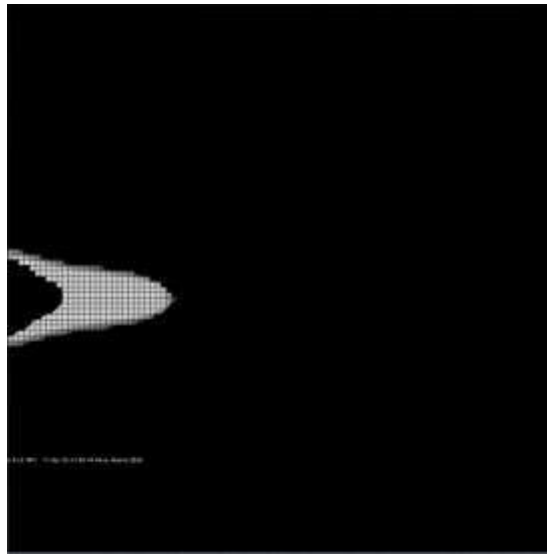


Figure V-8: zone endommagée dans l'adhésif (en gris)
pour le cas du 7075 T6 avec $a=10$ mm et $\sigma=70$ MPa

Sur la **figure V- 9**, nous présentons l'étendue de la zone endommagée de la couche adhésive pour l'A 2024 T3 avec une longueur de la fissure de 30 mm et un chargement de 70 MPa. On remarque que l'extension de la ZEA est toujours suivant la direction de la fissure avec une forme elliptique. Pour le cas du 7075 T6 avec les mêmes conditions de géométrie et de chargement (figure V-10), on remarque la même forme de la ZEA avec des dimensions pratiquement identiques comparée au cas de l'alliage 2024 T3, ce qui indique que la plasticité dans le métal réparé n'a pas un effet significatif sur l'étendue de la ZEA.

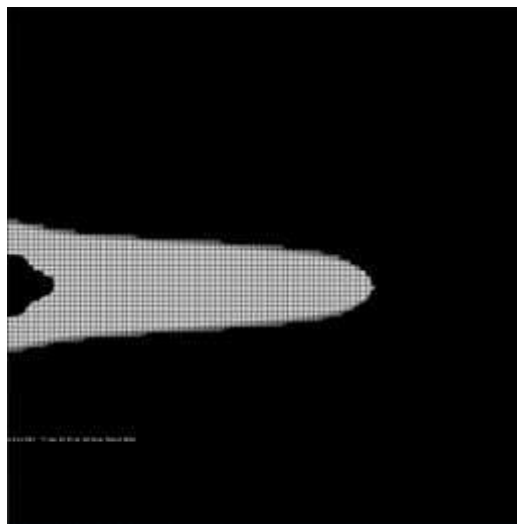


Figure V-9: zone endommagée dans l'adhésif (en gris)
pour le cas du 2024 T3 avec $a=30$ mm et $\sigma=70$ MPa

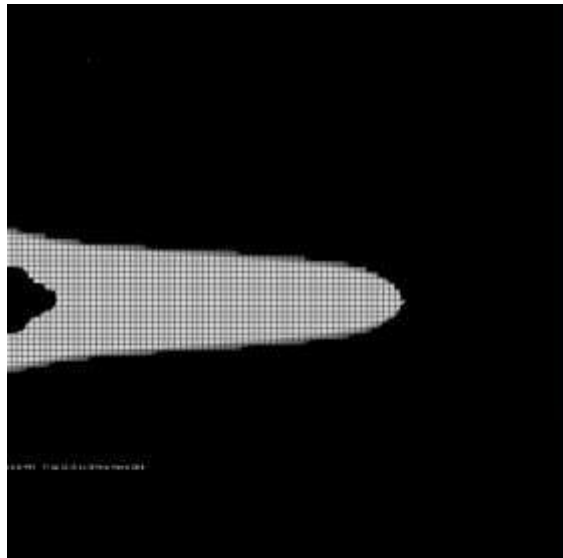


Figure V-10: zone endommagée dans l'adhésif (en gris)
pour le cas du 7075 T6 avec $a=30$ mm et $\sigma=70$ MPa

V-3-2 Cas du chargement de 200 MPa:

Pour mieux comprendre les phénomènes d'endommagement de la couche adhésive durant la réparation des plaques métalliques en alliages d'aluminium, nous avons augmenté la charge appliquée à 200 MPa et calculé l'étendue de la ZEA pour cette amplitude de chargement et pour les deux alliages d'aluminium. La **figure V-11**, présente l'étendue de la ZEA pour une longueur de fissure de 5 mm et pour le cas de l'alliage 2024 T3. On remarque que l'amplitude de chargement a un effet important sur la ZEA. En effet, cette zone a augmenté de manière considérable avec l'augmentation de la charge. En outre, on peut distinguer sur la figure V-11 deux zones distinctes : la première autour de la région fissurée et la seconde au niveau des bords libres du patch en composite. L'augmentation de la charge appliquée a entraîné une augmentation des contraintes et déformation au niveau des bords libres de la couche adhésive entraînant un endommagement important dans ces zones. Cet effet est généralement appelé effet de bord.

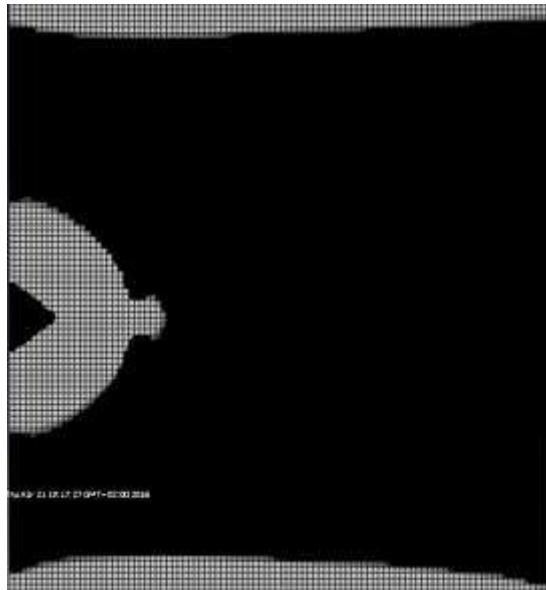


Figure V-11: zone endommagée dans l'adhésif (en gris)
pour le cas du 2024 T3 avec $a=5$ mm et $\sigma=200$ MPa

Pour l'alliage 7075, avec les mêmes conditions de géométrie et de chargement (Figure V-12), on remarque pratiquement les mêmes tailles des ZEA comparées au cas du 2024 T3, ce qui montre que l'effet de la plasticité a été complètement dominé par l'effet du chargement appliqué.

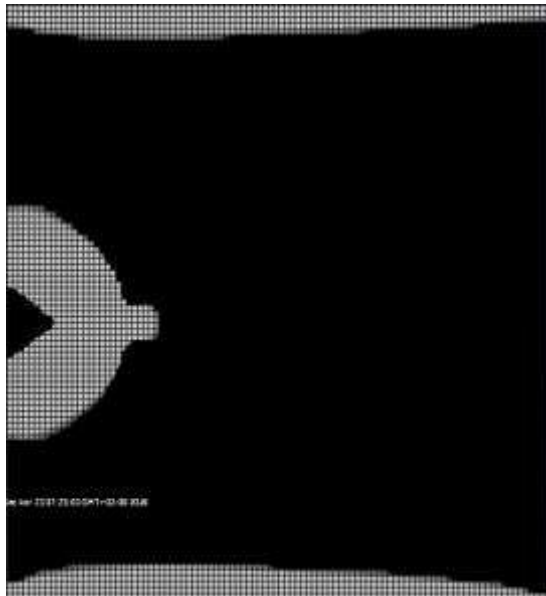


Figure V-12: Zone endommagée dans l'adhésif (en gris)
pour le cas du 7075 T6 avec $a=5$ mm et $\sigma=200$ MPa

La **figure V-13**, présente l'étendue de la ZEA pour le 2024 T3, avec une longueur de la fissure de 30 mm et un chargement de 200 MPa. On remarque que la zone endommagée a augmenté considérablement et elle recouvre pratiquement toute la surface de la couche adhésive, c'est-à-dire, qu'on est à la phase de rupture totale de la couche adhésive. La ZEA au niveau de la fissure s'est propagée parallèlement et perpendiculairement à la direction de la fissure entraînant une coalescence des différentes ZEA (celle entourant la région fissurée et celle du bord libre de la couche adhésive).

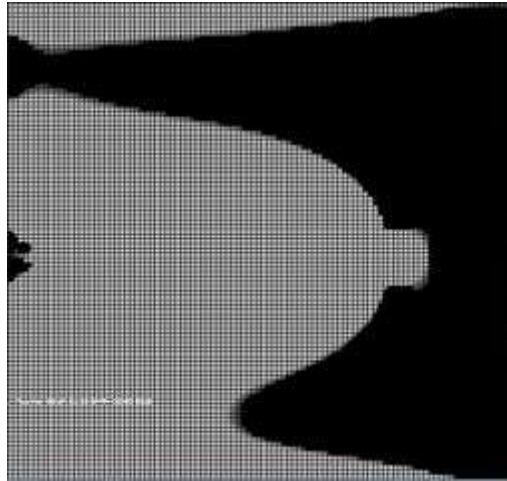


Figure V-13: Zone endommagée dans l'adhésif (en gris) pour le cas du 2024 T3 avec $a=30$ mm et $\sigma=200$ MPa.

Pour comparaison nous avons présenté sur la figure V-14 l'étendue de la ZEA pour le cas du 7075 T6, avec les mêmes conditions de géométrie et de chargement. On remarque la même évolution par rapport au cas du 2024 T3, et environ les mêmes dimensions des ZEA pour l'adhésif réparant les deux alliages d'aluminium.

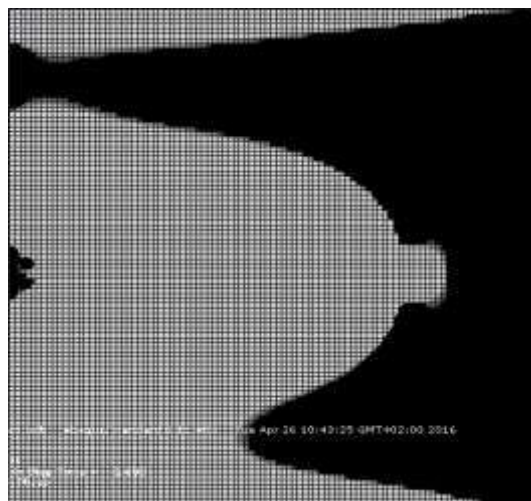


Figure V-14: Zone endommagée dans l'adhésif (en gris) pour le cas du 7075 T6 avec $a=30$ mm et $\sigma=200$ MPa

V-4 Détermination du taux de la zone endommagé:

Pour compléter cette étude, nous avons déterminé le taux de la zone endommagée (D_R) qui représente le rapport de la somme des surfaces endommagées dans l'adhésif par la surface totale de la couche adhésive :

$$D_R = \frac{\sum A_i}{L.W}$$

Équation V.1

Pour l'Araldite 2015, nous avons une rupture totale de la couche adhésive si le taux D_R dépasse la valeur de 0,2474. Le taux D_R a été calculé pour trois amplitudes de chargement 70, 120 et 200 MPa.

La **figure V-15**, présente la variation du rapport D_R en fonction de la longueur de la fissure pour un chargement de 70 MPa et pour les deux alliages d'aluminium 2024 T3 et 7075 T6. On remarque que le taux de la zone endommagée augmente d'une manière pratiquement linéaire avec la longueur de la fissure. Pour un chargement de 70 MPa on peut voir que le rapport D_R n'atteint pas la valeur critique de 0.2475 pour l'adhésif Araldite 2015 quelle que soit la taille de la fissure, ce qui montre que pour cette amplitude de chargement le risque de rupture totale de la couche adhésive reste faible. Le rapport D_R représente 4% de la valeur critique pour une longueur de fissure de 5mm. Pour une longueur de fissure de 30 mm, le taux D_R représente 49% de la valeur critique de l'Araldite 2015. D'autre part, on constate aussi sur la figure V-15, que la nature de l'alliage n'a pratiquement aucun effet sur la variation du rapport D_R ce qui prouve que la ductilité du matériau réparé n'a aucun effet sur l'endommagement de l'adhésif pour ce niveau de l'amplitude du chargement.

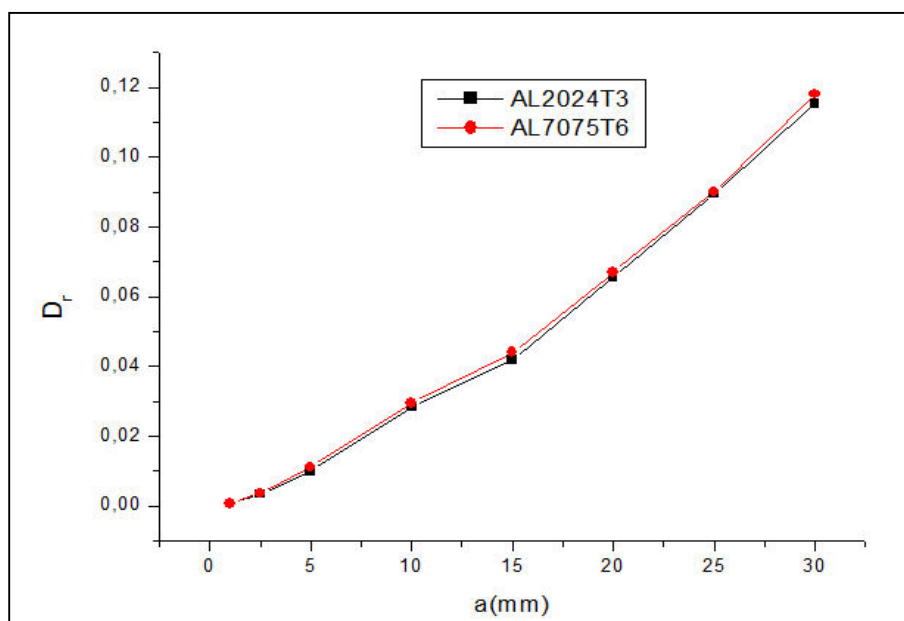


Figure V-15: Variation du rapport D_R en fonction de la longueur de la fissure pour un chargement de 70 MPa.

La **figure V-16**, présente la variation du rapport D_R en fonction de la longueur de la fissure pour une charge appliquée de 120 MPa et pour les deux alliages d'aluminium. On remarque aussi une augmentation quasi-linéaire du rapport D_R lorsque la longueur de la fissure croît. La valeur critique du rapport est atteinte pour une longueur de fissure de l'ordre 27 mm c'est-à-dire que d'après nos calculs, la rupture totale de l'adhésif se produit lors de la rupture totale de l'éprouvette réparée (figure IV-2). D'après cette figure pour $a=27$ mm, la plaque réparée pour les deux alliages est dans la phase de rupture totale. On peut conclure que pour cette amplitude de chargement, la durabilité de la réparation (caractérisée par la durabilité de l'adhésion) n'est pas négativement affectée.

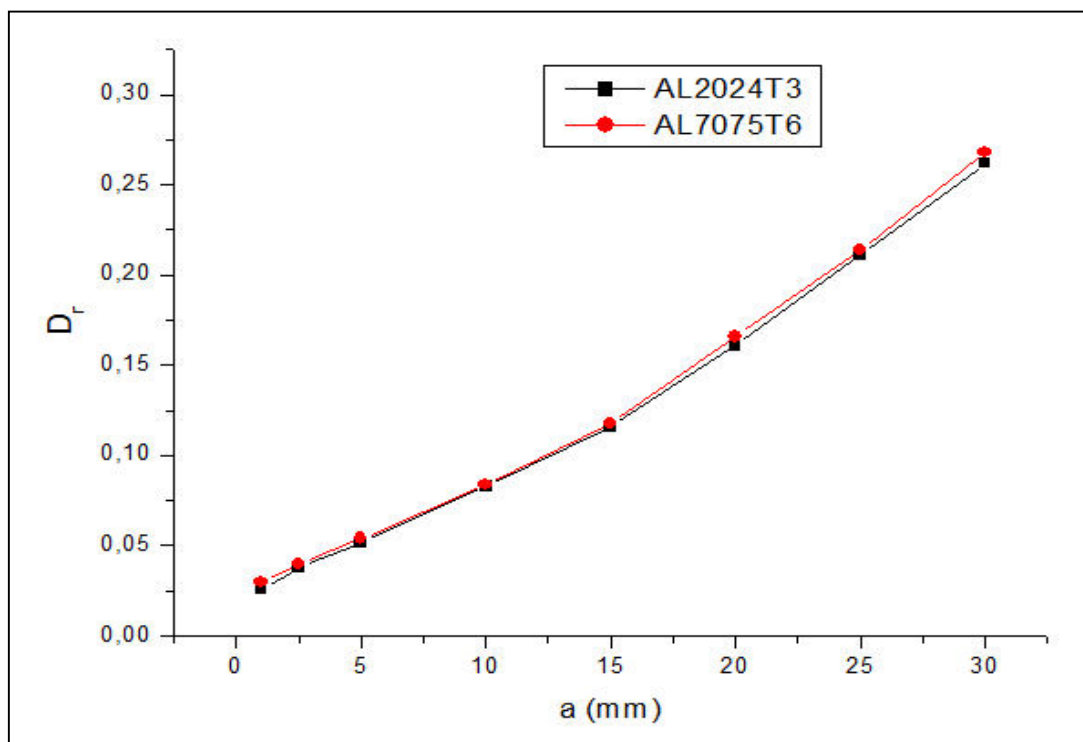


Figure V-16: Variation du rapport D_R en fonction de la longueur de la fissure pour un chargement de 120 MPa.

La **figure V-17**, montre la variation du rapport D_R pour un chargement de 200 MPa et pour les deux alliages d'aluminium. On constate sur cette figure que la valeur critique du rapport D_R est atteinte pour une longueur de fissure de l'ordre de 11 mm ce qui représente environ 25% de la largeur utile de l'éprouvette réparée. On peut donc dire que pour cette amplitude de chargement le risque de la rupture totale de l'adhésion peut apparaître à des longueurs de fissure relativement faibles. La réparation par patch de composite pour ce niveau de contraintes appliquées peut ne pas être efficace ; elle peut même être dangereuse si elle est appliquée sur une structure aéronautique réelle.

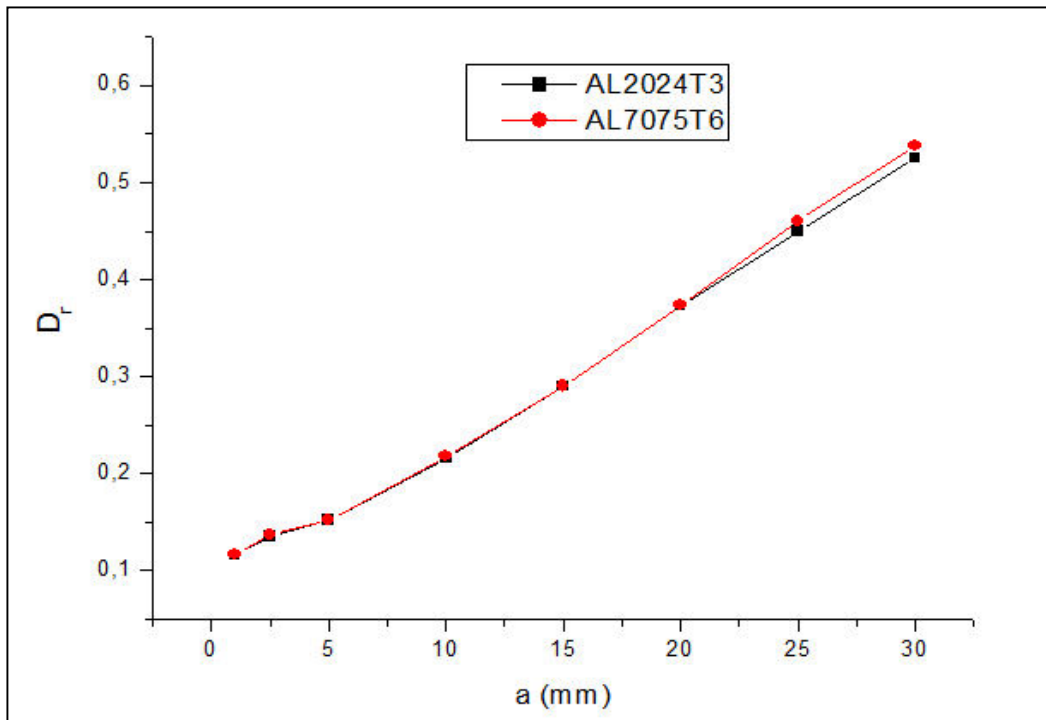


Figure V-17: Variation du rapport D_R en fonction de la longueur de la fissure pour un chargement de 200 MPa.

V-5 Conclusion:

Dans ce chapitre, il a été montré que la présence du patch composite réduit la plasticité autour du front de fissure et que le taux de cette réduction dépend de la charge appliquée. Le rapport de la zone endommagée dans la couche adhésive dépend également des niveaux de contraintes appliquées. Une contrainte appliquée très élevée conduit nécessairement à la rupture de l'adhésif entre le patch composite et la plaque métallique réparée. Cependant, il a été déduit des résultats obtenus que la ductilité des matériaux n'influence pas le rapport de D_R puisque les deux alliages d'aluminium, après réparation, donnent le même rapport de la zone endommagée de l'adhésif. Il est recommandé au concepteur du patch en composite de choisir un adhésif à haute résistance et d'augmenter la surface collée afin de réduire le rapport de la zone endommagée de l'adhésif et, éventuellement, de minimiser le risque de rupture totale de l'adhésion.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

Cette étude a été menée dans le but d'analyser les effets de la plasticité dans des matériaux réparés et sur l'endommagement de la couche adhésive liant la structure réparée au patche en composite. Il a été montré que la propagation des fissures de fatigue dépend fortement de la ductilité du matériau réparé. Cette dépendance reste entière après collage d'un patche en composite. La RPC augmente considérablement la durée de vie en fatigue. Les observations microscopiques au MEB ont montré que la présence du patche réduit la rupture ductile même si on augmente le chargement de fatigue ce qui conduit à une nette diminution de la vitesse de propagation de la fissure. Les résultats numériques obtenus ont montré que la zone plastique autour de la tête de la fissure est réduite après collage du patche et cette réduction est sensible pour les deux alliages d'aluminium (Al 2024 T3 et le Al 7075 T6), le taux de réduction dépend fortement de la charge appliquée. L'utilisation de la théorie de la zone endommagée pour l'adhésif nous a permis de montrer que la ductilité du matériau réparé n'a pas un effet sensible sur l'endommagement de la couche adhésive. Par contre, cet endommagement dépend fortement de la charge appliquée. L'augmentation de cette charge augmente le risque du décollement de la couche adhésive. Le taux de la zone endommagée de la couche adhésive atteint la valeur critique lorsque la longueur de la fissure dépasse 10 mm pour une contrainte appliquée de 200 MPa. Cette étude doit être complétée pour mieux comprendre les phénomènes mis en jeu et comme perspectives nous pouvons citer :

- Le suivi expérimental du décollement de la couche adhésive par des contrôles non destructifs tels que l'émission acoustique pour avoir plus de précision sur l'initiation et la propagation de ce décollement.
- La quantification de la propagation du décollement de la couche adhésive par une grandeur physique tels que le facteur d'intensité de contraintes ou l'intégrale J pour essayer de prédire avec précision la durée de vie en fatigue des fissures réparées par patche en composite.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [01] Laetitia Becq-Giraudon –Fatigue des matériaux- **L'Actualité Poitou-Charentes – Hors série mai 1998**
- [02] Hichem DJABALI Hichem YOUSFI (2009) **Étude expérimentale sur la fatigue des matériaux en flexion rotative** Thèse d'doctorat d'état Département de génie mécanique. Faculté de technologie Université Hadj Lakhdar de Batna.
- [03] Bardia ESMAEILLOU (2011) **Approche cinétique du comportement en fatigue du Polyamide 66 renforcé par 30% de fibres de verre** Thèse de Doctorat, ENSAM SMI de paris. École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'Ingénieur. Doctorat Paris Tech.
- [04] Thomas DELAHAY (2004) **Développement d'une méthode probabiliste de calcul en fatigue multiaxiale prenant en compte la répartition volumique des contraintes.** Thèse de Doctorat l'ENSAM CER de Bordeaux.
- [05] Thomas DELAHAY (2004) **Développement d'une méthode probabiliste de calcul en fatigue multiaxiale prenant en compte la répartition volumique des contraintes.** Thèse de Doctorat l'ENSAM CER de Bordeaux.
- [06] 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.
- [07] Belkacem Meddour (2016) **Fatigue des matériaux cours et exercice**, Université de ABBES Laghrour KHENCHELA.
- [08] Jérôme BENABES (18 décembre 2006) **Approche 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.
- [09] Hichem DJABALI Hichem YOUSFI (2009) **Étude expérimentale sur la fatigue des matériaux en flexion rotative** Thèse d'doctorat d'état Département de génie mécanique. Faculté de technologie Université Hadj Lakhdar de Batna.
- [10] C.LALANNE. Dommage par fatigue. **Vibration et chocs mécanique**, Paris, 1999.
- [11] Y.NADOT, V. D. Fatigue failure of suspension arm, experimental analysis and multiaxial criterion. Sciencedirect, 2003. Acesso em: 2010.
- [12] R.E.PETERSON. Stress Concentration Factors. New-York: [s.n.], 1974.
- [13] H.NEUBER. Kerbspannungslehre springer. Berlin, Germany: [s.n.], 1958
- [14] R.B.HEYWOOD. Designing against fatigue. London: [s.n.], 1962.
- [15] E.SIEBEL, M. S. Non uniform stress distribution during fatigue loading. [S.l.]: [s.n.], 1955.
- [16] H.NEUBER. Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with

Références bibliographiques

arbitrary nonlinear stress-strain law. [S.I.]: [s.n.], 1969.

[17] P.KHUN, H. F. H. An engineering method for estimating notch size effect in fatigue test on steel. [S.I.]. 1952.

[18] A.-F. GOURGUES-LORENZON(2006) **Comportement, endommagement et rupture par fatigue** thèse d'Amine Bennani, soutenue à l'Ecole des Mines de Paris.

[19] Didier DUPRAT (2004) **Fatigue et mécanique de la rupture des pièces en alliage léger** Bureau d'études. Aérospatiale Toulouse.

[20] Lyamine Saidani, (2007) Etudes esxperimentale du comportement en fatigue des metaux par flexion rotative Thèse de MAGISTER Spécialité : Mécanique, option : CM Université Med Boudiaf de M'sila.

[21] François PLESSIER 2008 Approche mécanique multi-échelle des interations hydrogène plasticité" LMP Université Bordeaux I.

[22] Barquins, M. (2001). **Le collage** : le moyen intelligent d'assembler. *Fusion* , 84, 26-36.

[23] le collage en France, un atout pour l'assemblage- industriel dominique CARLACH Yves HEMERY DEVELOPPEMENT ET CONSEIL pour le compte de la DIGITIP/SIMAP.

[24] Higgins, A. (2000). **Adhesive Bonding of Aircraft Structures**. *Int. J. Adhes. Adhes.* , 20 (5), 367-376.

[25] A.A.Baker- **Composite structures**, 74, 1999, 431-443.

[26] Chai, 1993- **Déformation and failure of adhesive bonds under shear loading**, H.Chai, J.Mat. Sci, 1993. 28, 4944-4956

[27] Cognard, P. (2003). **Collage des matériaux – Mécanismes. Classification des colles. Techniques de l'Ingénieur** , BM 7 615.

[28] Kheloufi Lakhdar- **adhésifs et techniques de collage- caractérisation de l'adhérence-** thèse de magister – université M'Hamed Bougara de Boumerdes.

[29]Dominique **CARLAC'HYVES HEMERY-** le collage en France, un atout pour l'assemblage-industriel- développement et conseil pour le compte de la DIGITIP/SIMAP.

[30] Les techniques du collage - Pole Matériaux et structures (MAS)

[31] Wake, W. (1978). Theories of adhesion and uses of adhesives: a review. *Polymer*, 19 (3), 291-308.

[32] Shanahan, M. (1991). *Rubber World* , 28-36.

[33] Chawla, K. (1998). *Composite Materials: Science and Engineering, 2nd Ed.* New York: Springer.

[34] Awajaa, F., Gilbert, M., Kellya, G., Foga, B., Pigram, P.J. (2009). Adhesion of Polymers. *Prog. Polymer Sci.*, 34 (9), 948-968.

Références bibliographiques

- [35] Kim, W., Yun, I., Lee, J., Jung, H. (2010). Evaluation of mechanical interlock effect on adhesion strength of polymer-metal interfaces using micro-patterned surface topography. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 30 (6), 408-417.
- [36] Huntsberger, J. (1967). Dans R. Patrick, *Treatise on Adhesion and Adhesives* (p. 119). New York: Marcel Dekker.
- [37] Schonborn, H. (1969). *Adhesion: Fundamentals and Practice*. London: McLaren and Son.
- [38] Evidence for **van der Waals** adhesion in gecko setae. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 99 (19), 12252-12256.
- [39] Chow, T. (1998). Wetting of rough surfaces. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10 (27), L445.
- [40] Deryagin, B.V., Krotova, N.A. (1948). *Doklady Akademir Nank SSSR*, 61, 849-852.
- [41] Voyutskii, S. (1963). *Autohesion and adhesion of high polymers*. New York: Wiley and Sons.
- [42] De Gennes, P.-G. (1980). Dynamics of fluctuations and spinodal decomposition in polymer blends. *J. Chem. Phys.*, 72 (9), 4756-4763.
- [43] SEBASTIEN CHAUFFAILLE (2011), durabilite des assemblages colles -aspects mécaniques et physico-chimiques-
L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I
- [44] **Jean Claude Prévot**: www.agmat.asso.fr
- [45] Belhoucine abderrahim- **Distribution des contraintes les structures endommagées et réparation par patch-2009** - thèse de Magister – université de Sidi Bel Abbes.
- [46] **S.R.Debarros**, Modele d'interface pour la simulation des comportement des assemblages collés l'université de Versailles Saint-Quentin (2005)
- [47] **J.Cognard**, sciences et technologies du collage, presse polytechniques et universitaire romandes, Lausanne.ISBN 2-88074-410-5 (2000)
- [48] **Philippe Cognard**, caractéristique-mise en œuvre des colles par article BM 7617
- [49] **Philippe Cognard**, Mécanisme et classifications des colles par article BM 7615
- [50] KOUIDER.MADANI- **Etude numérique et expérimentale de la technique de réparation des structures aéronautiques par patch en composite, cas de l'Aluminium 2024T3 Réparé par composite**-Thèse – université de SBA-UDL 2007.P32-214.
- [51] **Adams,1984**- "Structural adhesive joints in engineering", R. D. Adams et W. C. Wake, 1984, Elsevier Appl. Sci. Publishers, London.
- [52] Hart-Smith LJ. Adhesive-bonded single-lap joints: Langley Research Center Hampton, VA; 1973.
- [53] Sun C, Klug J, Arendt C. Analysis of cracked aluminum plates repaired with bonded composite patches. *AIAA journal* 1996;34:369-74.

Références bibliographiques

- [54] Parks DM. A stiffness derivative finite element technique for determination of crack tip stress intensity factors. *International Journal of fracture* 1974;10:487-502.
- [55] Da Silva Lucas FM, Da Silva RAM, Chousal JAG, Pinto AMG (2008) Alternative methods to measure the adhesive shear displacement in the thick adherend shear test. *J Adhes Sci Technol* 22:15–29 24.
- [56] Ban C-S, Lee Y-H, Choi J-H, Kweon J-H (2008) Strength prediction of adhesive joints using the modified damage zone theory. *Compos Struct* 86:96–100
- [57] Baker A, Rajic N, Davis C (2009) Towards a practical structural health monitoring technology for patched cracks in aircraft structure. *Compos A: Appl Sci Manuf* 40:1340–1352
- [58] Albedah A, Khan SMA, Benyahia F, Bachir Bouiadjra B (2016) Effect of load amplitude change on the fatigue life of cracked Al plate repaired with composite patch. *Int J Fatigue* 88:1–9
- [59] Cherepanov C.P. (1979) *Mechanics of Brittle Fracture*. McGraw-Hill, New York.
- [60] Rice J. (1968) A path-independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics* 35, 379–386
- [61] Khan SM, Benyahia F, Bachir Bouiadjra B, Albedah A (2014) Analysis and repair of crack growth emanating from V-notch under stepped variable fatigue loading. *Procedia Eng* 74:151–156
- [62] . Bachir Bouiadjra B, Oudad W, Albedah A, Benyahia F, Belhouari M (2012) Effects of the adhesive disband on the performances of bonded composite repairs in aircraft structures. *Mater Des* 37:89–95
- [63]. Mhamdia R, Bachir Bouiadjra B, Serier B, Oudad W, Touzain S, Feugas X (2012) Stress intensity factor for repaired crack with bonded composite patch under thermo-mechanical loading. *J Reinf Plast Compos* 30:416–424
- [64] . OudadW, Bachir Bouiadjra B, BelhouariM, Touzain S, Feugas X, (2009) Analysis of the plastic zone size ahead of repaired cracks with bonded composite patch of metallic aircraft structures. *Comput Mater Sci* 46:950–954
- [65] Albedah A, Khan SMA, Benyahia F, Bachir Bouiadjra B (2016) Effect of load amplitude change on the fatigue life of cracked Al plate repaired with composite patch. *Int J Fatigue* 88:1–9
- [66] Alan Baker, Andrew J. Gunnion, John Wang, Paul Chang, Advances in the proof test for certification of bonded repairs – Increasing the Technology Readiness Level, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016, 64: 128-141
- [67] W. Hu, R. Jopnes, A.J. Kinloch, Computing the growth of naturally-occurring disbands in adhesively-bonded patches to metallic structures, *Engineering Fracture Mechanics*, 2016, 152: 162-173

Références bibliographiques

- [68] A. Albedah, M. Berrahou, M. Es-saheb, F. Benyahia, B. Bachir Bouiadjra, Mass Gain Estimation Between Double and Single-Bonded Composite Repairs for Inclined Cracks in Aircraft Structures, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2011, 25 : 181-192
- [69] H. A. Aglan, Y.X. Gan, Q. Y. Wang & M. Kehoe, Design guidelines for composite patches bonded to cracked aluminum substrates, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2012, 16:197-211
- [70] Khan, S. M., Benyahia, F., Bouiadjra, B. B., and Albedah, A., 2014, "Analysis and Repair of Crack Growth Emanating from V-notch under Stepped Variable Fatigue Loading," *Procedia Engineering*, 2014, 74: 151-156.
- [71] Jarkko Aakkula, Olli Saarela, An experimental study on the fatigue performance of CFRP and BFRP repaired aluminium plates, *Composite Structures*, 2014, 118: 589–599
- [72] D. Ouinas, A. hebbbar, Full-width Disbonding Effect on Repaired Cracks in Structural Panels with Bonded Composite Patches, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 23, 4: pp. 401-412 *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2010, 23: 401-412
- [73] Joel J. Schubbe, Scott H. Bolstad, Sabrina Reyes, Fatigue crack growth behavior of aerospace and ship-grade aluminum repaired with composite patches in a corrosive environment, *Composite structures*, 2016, 144 : 44-56
- [74] Alan A. Baker, A Proposed Approach for Certification of Bonded composite repair to Flight-Critical Airframe Structure, *Applied Composite Materials*, 18 (2011) 337-369
- [75] J.S. Ahn, P.K. Basu, K.S. Woo, Analysis of cracked aluminum plates with one-sided patch repair using p-convergent layered model, *Finite Elements in Analysis and Design*, 46 (2010) 438-448
- [76] Faycal Benyahia, Abdulmohsen Albedah, Bel Abbes Bachir Bouiadjra, Elliptical and Circular Bonded Composite Repair under Mechanical and Thermal Loading in Aircraft Structures, *Materials Research* 17(2014) 1219-1225
- [77] Alan Baker, Nik Rajic, Claire Davis, Towards a practical structural health monitoring technology for patched cracks in aircraft structure, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40 (2009), 1340-1352

Références bibliographiques

- [78] H.K. Chung, W.H. Yang, Mixed-mode fatigue crack growth in aluminum plates with composite patches, *Int J Fatigue*, 25 (2003), 325–333
- [79] M. Fari Bouanani, F. Benyahia, A. Albedah, A. Aid, B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, T. Achour, Analysis of the adhesive failure in bonded composite repair of aircraft structures using modified damage zone theory, *Materials & Design*, 50, (2013) 433-439.
- [80] B. Bachir Bouiadjra, W. Oudad, A. Albedah, F. Benyahia, M. Belhouari, Effects of the adhesive disband on the performances of bonded composite repairs in aircraft structures , *Materials & Design*, 2012, 37: 89-95
- [81] R. Mhamdia, B. Bachir Bouiadjra, B. Serier, W. Oudad, S. Touzain , X. Feugas, Stress intensity factor for repaired crack with bonded composite patch under thermo-mechanical loading, *Journal of reinforced plastic and composites*, 30, 2012,416-424
- [82] W. Oudad, B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, S. Touzain, X. Feugas, Analysis of the plastic zone size ahead of repaired cracks with bonded composite patch of metallic aircraft structures, *Computational Materials Science*, 2009, 46: 950-954.
- [83] A. Albedah, Sohail M.A. Khan, F. Benyahia, B. Bachir Bouiadjra, Effect of load amplitude change on the fatigue life of cracked Al plate repaired with composite patch, *International journal of fatigue*, 2016, 88:1-9
- [84] M.A. Caminero S. Pavlopoulou, M. Lopez-Pedro.sa, B.G. Nicolaisson, C. Pinna, C. Soutis Analysis of adhesively bonded repairs in composite: Damage detection and prognosis *Composites Structures*, 2012,