République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique

Université Djilali Liabes de Sidi Belabbes

Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE POUR L'OBTENTION

DU DIPLOME DE MAGISTER

Soutenu par Monsieur HAFS Louali

Thème :

Effet de la plasticité de l'adhésif dans la réparation des structures aéronautiques par patch en matériaux composites

Présenté devant le jury :

M.B.BACHIR BOUIADJRA	PROFESSEUR UDL.SBA, Président
M.A.AMIRI	MAITRE DE CONFERENCE UDL.SBA, Examinateur
M.K.KADDOURI	MAITRE DE CONFERENCE UDL.SBA, Examinateur
M.K.MADANI	MAITRE DE CONFERENCE UDL.SBA, Examinateur
M.B.SERRIER	PROFESSEUR UDL.SBA UDL.SBA, Directeur de thèse

Année universitaire 2011-2012

Notions de la mécanique

Contraintes (unités : N/mm2 ou MPa) :

Elles caractérisent par des indications chiffrées les efforts de cohésion qui existent entre les grains de matière. On trouve des contraintes normales, ou de tension, ayant pour symbole **σ** (sigma) et des contraintes de cisaillement, ayant pour symbole **τ** (tau).

Déformations :

Elles résultent et varient avec les charges appliquées sur les objets.

Elles sont mises en évidence par la variation des dimensions, et peuvent être élastiques ou plastiques. **Exemples :** allongement, raccourcissement, fléchissement, torsion, glissement.

Homogénéité :

Un matériau est homogène s'il possède, en tous points, les mêmes propriétés chimiques et physiques. La plupart des métaux et des alliages sont considérés comme homogènes. Le bois et les composites ne le sont pas, ils sont hétérogènes.

Isotropie:

Un matériau est dit isotrope s'il présente les mêmes caractéristiques mécaniques dans toutes les directions de la matière. Les métaux et les alliages sont généralement isotropes. Les matières plastiques, les matériaux composites et le bois ne sont pas isotropes. Le bois est plus résistant dans le sens des fibres que dans qui lui sont perpendiculaire.

Élasticité :

Elle caractérise l'aptitude qu'a un matériau à reprendre sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé. Un ressort, chargé normalement, a un comportement élastique. La propriété contraire est la plasticité.

Plasticité :

Un matériau qui ne reprend pas sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé est dit plastique. La pâte à modeler à un comportement plastique. La plupart des métaux et des alliages ont un comportement élastique sous charges modérées et plastique sous charges excessives.

Malléabilité :

Cette propriété est identique à la ductilité mais appliquée à la compression. L'aluminium, certains laitons et certains aciers inoxydables sont très malléables

(A% > 35%) et acceptent des emboutissages profonds.

REMERCIEMENTS ET DEDICACES

Je tiens en premier ordre à remercier le directeur de ma thèse le professeur B.SERIER, pour son aide et ses orientations tout au long de la préparation de ce travail.

Je tiens à remercier au même titre, l'ensemble des professeurs du département de génie mécanique de l'Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes, où je cite les professeurs B.bachir BOUIADJRA et BELHOUARI Mohamed.

Je tiens aussi à remercie Monsieur Ouahid OUDAD pour son soutien et son aide inestimable pour l'achèvement de ce travail.

Comme je tiens à dédier ce travail à la mémoire de mon père, l'homme le plus généreux, l'homme qui a été toujours à mes cotés dans toutes les circonstances.

Je tiens à remercie du fond du cœur tous les membres de ma famille pour leurs soutiens et encouragements le long de ma carrière professionnelle jusqu'à ce jour, à leurs tète ma mère, ma femme, mes filles mes frères et sœurs cousins et cousines et à tous mes amis.

Résumé :

Afin de conserver l'aspect esthétique et d'éviter de chauffer pour souder ou de percer pour mettre des rivets dans le but de réparer des structures aéronautiques endommagées par des fissures, l'industrie opte pour un collage de patches en matériaux composites.

Dans cette technique se sont les propriétés mécaniques de l'adhésif qui jouent un rôle déterminant pour la tenue, la réussite et la durabilité des pièces endommagées et réparées.

L'objet de cette étude est d'analyser numériquement par la méthode des éléments finis l'effet de la plasticité des adhésifs sur la durée de vie des structures aéronautiques endommagées par fissures et réparées par des patchs en MC.

Cette analyse fait intervenir le collage des patchs en matériaux composites qui reprennent les efforts qui lui seront transmis de la plaque par l'intermédiaire de la colle, une fois le seuil d'élasticité dépassé et le domaine plastique installé.

Cette analyse se fait en faisant intervenir les valeurs de l'intégrale J au alentour de la fissure afin d'y connaitre son évolution.

Mots clés : Plasticité, adhésifs, matériaux composites, éléments finis, Intégrale J.

Abstract.

In Order to conserve the appearance and to avoid heat to weld or drill to put rivets in order to repair aircraft structures damaged by cracks, the industry opts for a collage of patches of composite materials.

In this technique, the mechanical properties of adhesives, play a crucial role in keeping the success and sustainability of damaged parts and repaired.

The purpose of this study is to analyze numerically by the finite element method the effect of plasticity of adhesive on the life of aircraft structures damaged by cracks and repaired by patching MC.

This analysis involves the bonding of composite patches that which take up the loads that are transmitted to the plaque via the adhesive, once the threshold of elasticity is exceeded and the plastic phase installed.

This analysis is done by involving the values of the J-integral around the crack in order to know its evolution.

Keywords: Plasticity, adhesives, composites, finite elements, J. Integral

ملخص:

للحفاظ على المظهر المثالي وتجنب الحرارة للحام أو الثقوب لوضع المسامير من أجل إصلاح هياكل الطائرات التي تضررت بفعل التشققات فان الصناعة توجهت للمواد اللاصقة و الملصقات من المواد المركبة.

وفي هذه التقنية فأن الخواص الميكانيكية للمواد اللاصقة هي التي تلعب دورا حاسما في الصيانة و الحفاظ على نجاح واستدامة الأجزاء التالفة و المصلحة.

والغرض من هذه الدراسة هو بالتحليل العددي و ذلك باستخدام طريقة العناصر المحدودة لمعرفة تأثير لدونة المواد اللاصقة على أطالة حياة هياكل الطائرات التي تضررت بفعل الشقوق والمصلحة بالملصقات من مواد مركبة.

هذا التحليل يشير الى استعمال و الصاق مواد مركبة التي تأخذ على عاتقها القوى التي تنتقل عن طريق المواد اللاصقة عند تجاوز عتبة المرونة وحلول اللدونة.

ويتم هذا التحليل من خلال إشراك قيم التكامل ج-J من حول التشققات في محيطها لمعرفة تطورها.

كلمات مفتاحيه : اللدونة, المواد اللاصقة, مواد مركبة, العناصر المحدودة , التكامل ج-J

Tableau des figures

Fig.1 : Comportement d'une goutte d'un liquide sur une surface d'un solide

Fig. 2 : Effet de la tension superficielle

Fig. 3 : La régosité qui empeche le mouillage

Fig. 4 : La régosité qui favorise le mouillage

Fig. 5 : Entre structure micro et mcroscopique des matériaux composites

Fig. 6 : Exemples de microstructures de composites

Fig. 7 : Schématisation d'un pli unidirectionnel.

Fig. 8 : Un pli unidirectionnel, et un élément de volume de ce pli.

Fig. 9 : Effet de traction sur un pli unidirectionnel dans la direction des fibres.

Fig. 10 : Effet de traction sur un pli unidirectionnel dans la direction perpondiculaire aux fibres.

Fig. 11 : Effet de cisaillement sur un pli unidirectionnel.

Fig. 12 : Effet d'un effort quelconque sur un pli unidirectionnel.

Fig. 13: Une base orientée d'un angle quelconque par rapport aux fibres.

Fig. 14 : Un tissu composite "4D" carbone/carbone, repère d'orthotropie.

Fig. 15 : Un tissu composite stratifié.

Fig. 16 : Le clivage

Fig. 17 : Le pelage

Fig. 18 : La traction

Fig. 19 : Le cisaillement

Fig. 20 : Assemblage à simple et doule joints collés.

Fig. 21 : Les différents types d'assemblages collés.

Fig. 22 : Effet des fissures et comportement des contraintes.

Fig. 23 : Effet des fissures, Mode I : Ouverture

Fig 24 : Effet des fissures, Mode II : Glissement de translation

Fig 25 : Effet des fissures, Mode III : Glissement de rotation

Fig 26 : Effet des pelage des plaque collées.

Fig 27 : Effet des pelage des plaque trop souples collées.

Fig. 28 : Répartition des contraintes de cisaillement

Fig. 29 : Dispositif ARCAN pour un essai de cisaillement traction.

Fig. 30 : Dispositif ARCAN pour un essai de cisaillement.

Fig. 31 : Contraintes enregistrées suite à un essai de cisaillement à 90°

Fig. 32 : Contraintes enregistrées suite à un essai de traction à 0°

Fig. 33 : Contraintes tangentielle suite à un essai de cisaillement traction à 45°

Fig. 34 : Contraintes normale suite à un essai de cisaillement traction à 45°

Fig. 35 : Contraintes tangentielle suite à un essai de cisaillement compression à 45°

Fig. 36 : Contraintes normale suite à un essai de cisaillement compression à 45°

Fig. 37 : Résultats expérimentaux pour des essais de traction-cisaillement pour différents angles et des Chargements monotones V = 0.5 mm/min.

Fig.38 : Déplacement dans la direction tangentielle, Essais de cisaillement (γ =90°)

Fig.39 : Déplacement dans la direction normale, Essais de traction (γ =0°)

Fig.40 : Déplacement dans la direction tangentielle, Essais de traction-cisaillement (γ =45°)

Fig.41 : Déplacement dans la direction normale, Essais de traction-cisaillement (γ =45°)

Fig. 42. Distribution des contraintes équivalentes dans l'adhésif et le composite sous chargement de traction (γ= 0°), de traction-cisaillement (γ = 45°) et de cisaillement (γ = 90°) ; Joint de colle de 0.2 mm d'épaisseur ; Plaques composites de 1 mm d'épaisseur.

Fig.43 : Dispositif TAST

Fig.43 : Distribution des contraintes suivant le Dispositif TAST

Fig.44 : Courbe de contrainte-déformation en traction pour l'Aluminium 2024T3

Fig 45 : Courbe contraintes-déformations dans la colle

Fig. 46 : Niveau de distribution de la contrainte normale σ_y dans la colle

Fig. 47 : Variation des contraintes tangentielles τxz en fonction de la distance Tête de fissure – bord libre de la colle suivant l'axe des Y

Fig. 48 : Variation des contraintes tangentielles τ_{yz} en fonction de la distance Tête de fissure – bord libre de la colle suivant l'axe des Y

Fig. 49 : Variation de la contraintes normale σ_{yy} induite dans l'adhésif en fonction de la distance tête de fissure –bord libre de la colle

Figure 50 : Variation de la contrainte normale σ_{zz} induite dans la colle en fonction de la distance du front de fissure suivant l'axe des Y

Fig. 51 : Variation de la contraintes normale σ_{zz} induite dans la colle en fonction de la taille de fissure réparée suivant l'axe des Y

Fig. 52 : Variation de la contraintes normale σ_{yy} induite dans la colle en fonction de la taille de fissure réparée

Fig. 53 : Variation des contraintes tangentielles τ_{xz} induite dans la colle en fonction de la taille de fissure réparée suivant l'axe des Y

Fig. 54 : Variation des contraintes tangentielles τ_{yz} induite dans la colle en fonction de la taille de fissure réparée suivant l'axe des Y

Fig 55 : Effet de la taille de la fisure reparée sur le niveau de la distribution de la contrainte equivalente de von mises induites dans l'adhesif

Fig 56 : Variation des contraintes tangentielles τ_{xz} en fonction de la distance Tête de fissure –bord libre de la colle suivant l'axe des X

Fig 57 : Variation des contraintes tangentielles τ_{yz} en fonction de la distance Tête de fissure –bord libre de la colle suivant l'axe des X

Fig 58 : Variation de la contrainte normale σ_{yy} induite dans l'adhésif en fonction de la distance tête de fissure –bord libre de la colle l'axe des X

Fig 59 : Variation des contraintes tangentielles τ_{yz} induite dans la colle en fonction de la taille de fissure réparée suivant l'axe des X

Fig 60 : Variation des contraintes tangentielles τ_{xz} induite dans la colle en fonction de la taille de fissure réparée suivant l'axe des X

Fig 61 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif

Fig 62 : Effet de l'épaisseur du patch

Fig 63 : Effet de la variation du coefficient de poisson de la colle.

Fig 64 : Effet de la variation de la force appliquée

Fig 65 : Effet de la variation du module d'élasticité longitudinale de la colle.

INTRODUCTION

Lorsqu'un avion décolle, plane, ou atterrisse plusieurs de ses parties structurelles sont sollicité. Ces sollicitations statiques soient elles ou cycliques risquent de provoquer des dommages pouvant nuire à la bonne tenue de l'appareil et la survie des passagers ; et afin de prolonger la durée de vie de telles structures, il existe plusieurs alternatives, qui dépendent du niveau de ces dommages :

– si le niveau de ces dégâts n'est pas trop important, l'une des solutions souvent utilisées en maintenance est l'alésage de la pointe de fissure. Ceci a pour conséquence d'arrêter sa propagation ;

– si le niveau de dommages est trop important, les voilures sont tout simplement changées. Et c'est ce que craint les compagnies aériennes, vu le cout inévitablement très élevé de cette solution;

Entre ces deux cas, courant ou prévisible et extrême nous pouvons nous trouver devant deux cas de figure :

– si des fissures apparaissent dans des zones moins critiques, elles peuvent être pontées par des matériaux composites. On parle de dans ce cas de réparation.

– si les fissures ne sont pas encore apparues, une solution plus prospective est envisagée. Un patch composite peut en effet être collé à proximité de la zone endommagée afin de la renforcer de manière préventive. On parle alors de renforcement.

Les patchs en matériaux composite comme son nom l'indique est un matériau composé de plus d'un matériau tout en exploitant de chaque composant ses meilleures qualités (dureté, résistivité ou isolation, souplesse ou plasticité…….etc.) et sont connus comme étant des moyens plus judicieux et plus efficaces pour la réparation des fissures et des défauts. Leurs utilisations se traduisent dans notre cas par une réduction du facteur d'intensité des contraintes.

Ce dernier dépend de plusieurs paramètres, tels que les dimensions et les propriétés intrinsèques du patch, de l'adhésif et du matériau. Dans ce travail, nous exposons des expériences qui ont étudié les effets d'un seul paramètre, qui est la plasticité de l'adhésif pour aboutir à une optimisation du patch.

Le calcul des forces et contraintes aux voisinages les plus proches (valeur du facteur d'intensité de contrainte ou valeur de l'intégral J), se fait par la méthode des éléments fini.

En outre, les patchs en matériaux composites sont classiquement et inévitablement utilisés *(vu les avantages présentés)* dans l'aéronautique, comme toute autre industrie pour la réparation et le renforcement des structures métalliques présentant ou risquent de présenter des dommages de type fissures et criques nuisibles à la bonne tenue de cette dernière. La réparation de ces structures consiste à les renforcer préventivement, avant que les défauts n'apparaissent, par renforts composites, dans le but de retarder l'apparition ou la propagation de fissures.

La conception des renforts nécessite l'utilisation d'outils spécialisés pour définir les caractéristiques réelles ou optimales du patch : géométrie, choix de la colle et de ses propriétés intrinsèques, choix du renfort en matériaux composites et de leurs dimensions géométriques nombre de plis unidirectionnels, orientation des plis les uns par rapport aux autres, positionnement autour de la zone à soulager... Pour cela, un des programmes d'optimisation de patchs par algorithme génétique ont été écrié. Il est couplé à des logiciels tels que « Abaqus » pour le calcul par éléments finis.

Plusieurs essais se sont faits et mis en œuvre pour permettre de déterminer des caractéristiques de patchs, afin de réduire de manière optimale les contraintes mécaniques dans une zone donnée, et ce, pour différents types de sollicitations.

Fin de la partie introduction

I. LES DIVERSES PROPRIETES DES MATERIAUX

I.1 PROPRIETES MECANIQUES DES MATERIAUX

En mécanique, les matériaux sont classés généralement en trois catégories selon le type de comportement mécanique.

I.1.A LES TROIS CLASSES DE MATERIAUX

A .01-Verres et céramiques :Durs, fragiles, Isolants et réfractaires *(résistent à de très hautes températures)*

A.02-Métaux et Alliages : Ductiles, Conducteurs et Réflecteurs *(Réfléchir la lumière. miroir réflecteur, dont les voilures des structures aéronautiques.*

A.03-Polymères : Le caractère essentiel est la Déformabilité.

A ces trois classes s'ajoute la classe des ***composites,*** *qui permet une grande souplesse de combinaisons de propriétés.*

II. FACTEURS FAVORISANT LA NAISSANCE DES FISSURES:

II.A : LA FATIGUE

La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure. La fatigue est notamment caractérisée par une étendue de variation de contrainte bien inférieure à la résistance à la traction du matériau. Les étapes principales de la fatigue sont :

L'amorçage de fissures (si des défauts ne sont pas déjà présents dans le matériau) ;

La propagation de fissures ;

La rupture finale.

Les paramètres souvent utilisés pour prédire le comportement en fatigue et ainsi le nombre de cycles à rupture d'une structure sont : l'amplitude de cette sollicitation (chargement ou déformation imposée), sa valeur moyenne, le fini de surface et le milieu dans lequel la structure sera utilisée.

Ce cas de figure peut se présenter tout en considérant que le matériau est un matériau homogène.

II.B : PRESENCE DES CONTRAINTES RESIDUELLES

Dans le secteur de la fabrication métallique, l'accumulation des contraintes est un problème majeur, produisant des distorsions (*singularités ou anormalités*) et des instabilités dimensionnelles, car on sait tous combien il est difficile de maintenir les tolérances dimensionnelles des pièces fabriquées.

Techniquement parlant, une contrainte résiduelle est définie comme étant une contrainte quelconque au sein d'un corps élastique libre de tout effort ou restriction externe et ne présentant

aucun gradient de température (*variations thermiques*). Ces contraintes internes résultent souvent d'une certaine incompatibilité entre des régions adjacentes du métal, susceptible de déformer les régions avoisinantes.

Un déséquilibre des contraintes engendre une déformation du métal. De fortes contraintes localisées sur un côté d'une pièce métallique vont créer un mouvement ou une déformation.

Des contraintes même très élevées, tant qu'elles sont uniformes à travers tout le métal, ne produisent aucune déformation. Par contre, les déformations seront d'autant plus prononcées que les contraintes sont en déséquilibre. Si ce déséquilibre est suffisant, la déformation des grains devient permanente et aucune libération des contraintes ne peut alors ramener la pièce à son état initial. Les contraintes résiduelles sont de deux types :

II.B .1 : Tension et compression. Les lois physiques et mathématiques exigent que les degrés de compression et de tension soient égaux. Malheureusement, à travailler avec les métaux, on obtient rarement un tel équilibre. Dans le domaine de la fabrication métallique, le but est de produire une pièce ou une structure métallique libre de toutes contraintes résiduelles.

Ceci nécessite ainsi de recourir à un traitement de détente, c'est à dire de réduction de ces contraintes résiduelles, pour éviter d'endommager le métal.

Pour mieux expliquer la chose, prenons l'exemple du corps humain durant le sport. Supposons (qu'en jouant au tennis, vous subissez un claquage ou une crampe sévère au niveau d'un des muscles de la jambe. Ceci est comparable à une contrainte résiduelle. Si vous continuez à jouer sans réduire la contrainte résiduelle (crampe ou claquage), vous risquez une lésion sévère et peut-être permanente du muscle concerné. Par contre, si vous massez le muscle, lui permettant de se relaxer, vous pourrez peut-être continuer à jouer et finir la partie, voila un exemple d'un traitement de détente.

II.B .2 : Facteurs donnant naissance aux contraintes résiduelles : Les contraintes résiduelles sont introduites dans de nombreuses structures et pièces métalliques au moment de leur fabrication soit :

1-durant le moulage par suite des forces de contraction au sein de la pièce moulée qui se refroidit.

2-durant le façonnage en raison des caractéristiques élastiques du métal.

3-durant la découpe, car les forces de cisaillement s'accompagnent de déformations.

4-durant le soudage, susceptible de provoquer des contraintes résiduelles particulièrement prononcées, vu que le métal se dilate puis se contracte en fonction des variations de température.

Bien qu'il soit difficile de la calculer ou de la mesurer, une contrainte résiduelle qui n'est pas corrigée, pourra à la longue se manifester de plusieurs façons désagréables ; fissuration ou un

affaiblissement prématuré des pièces, déformations ou des gauchissements, ou une dégradation de la résistance mécanique des soudures essentielles, réduisant ainsi la longévité de pièces qui sont à tous autres égards d'excellente qualité. Etant données les tolérances très strictes qui sont aujourd'hui la norme, le traitement de détente apparaît comme une méthode de choix pour maintenir la stabilité dimensionnelle et éliminer les distorsions.

CHAPITRE : I

Le collage, naissance & évolution

I.INTRODUCTION AU COLLAGE :

I.01 : NAISSANCE ET EVOLUTION:

Si le collage était né, ou au moins connu avec l'avènement de l'être humain sur terre, il connaît de nos jours la plus forte expansion de technologies modernes d'assemblage, car il n'y est guère de domaine technique qui puisse aujourd'hui ignorer l'importance de l'assemblage par collage.

Les premières recherches ou observations de l'existence des adhésifs, d'une manière générale, venaient de l'intérêt exprimé de cette technique pour le monde humain, animal ou même végétale pour leurs survies quotidiennes.

L'homme utilisait cette technique dans les époques lointaines de notre ère pour fabriquer ces outils de chasse ou ces vêtements, les animaux l'utiliser pour se déplacer et de s'accrocher tel que les limaces et les escargots.

L'extrait de naissance des d'adhésifs était connu dès 4500 av. JC et dans les temps les plus reculés de l'histoire.

Ces adhésifs étaient préparés avec des procédés rudimentaires et composés de matières premières animales et végétales, comme la colle d'os *(graisse animale)* et de caséine *(matière protéinique dans le lait)*, ainsi que de goudron, de cires, etc.

Ce n'est qu'à la fin du **19**^{iéme} **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 20ième **siècle**, apparaissent les premières colles à base de nitrocellulose qui permettent un assemblage de construction, en partie, sans utilisation de moyens mécaniques.

Jusqu'à la seconde Guerre mondiale, l'assemblage des matériaux s'effectuait principalement par des moyens mécaniques : boulons, vis, rivets, brasage (des métaux), couture (des cuirs et textiles). Seuls la fabrication de meubles et l'emballage faisaient un peu appel au collage.

C'est au cours de cette guerre que l'assemblage par collage a pris son essor. D'une part, le développement de nouveaux produits chimiques a apporté de nouvelles propriétés d'adhérence, de durcissement nécessaires au contrôle de la prise des colles, de durabilité, entre autres, a permis d'adapter cette technique d'assemblage à d'autres applications.

D'autre part, le collage a tiré partie du développement de l'industrie aéronautique en ce temps crucial de guerre, où les constructeurs américains et anglais commençaient à utiliser cette technique pour la fabrication d'éléments de structure d'avions en grandes séries. Alors, c'est en raison du progrès décisif dans le domaine de la chimie macromoléculaire que les bases et les techniques modernes du collage ont été mises en place et ce n'est qu'en l'an 1949 que se sont introduites les colles à base de Néoprène (caoutchouc industriel).

Les premières applications de collage d'acier datent du début des années 1970 et connaissent un essor important malgré une tradition très affirmée pour la soudure et les assemblages mécaniques.
En raison de l'évolution des caractéristiques des adhésifs à propriétés mécaniques améliorées et adaptées aux matériaux mis en œuvre qui a engendré une multitude d'applications industrielles, le collage occupe, à juste titre, une place de choix parmi les techniques les plus modernes d'assemblage. Les moyens de collage ne cessent d'évoluer et d'envahir tous les secteurs, arrivant à l'industrie aéronautique et aérospatiale, connue comme alliée au progrès technologique, forte de son autorité a ouvert la voie à toute l'industrie de la construction de profiter de cette technologie.
Et Il existe aujourd'hui plus de 30000 espèces d'adhésifs commercialisées, dont seul le marché français à titre d'exemple a passé de quelque 5 000 T /an en 1920 à 400 000 T /an en 2000.
Mais comme tout précédé, ce dernier présente des inconvénients, malgré ses multiples Avantages.

I.02 : INCONVENIENTS ET AVANTAGES

I.02 .A : INCONVENIENTS

-Résistance à la chaleur souvent limitée.
-La durabilité en milieux sévères est parfois moyenne (5 à 20 ans).
-Des traitements de surfaces sont souvent nécessaires et faible résistance au pelage.
-Démontage difficile et temps de prise de la colle est parfois long.

I.02.B : LES AVANTAGES.

-Répartition homogène et régulière des forces sur toute la surface collée.
-Non-détérioration des matériaux contrairement au rivetage, au clouage.
-Économie de poids (Application sur des matériaux de faible épaisseur - effet de contre placage: matériau de faible poids mais de solidité élevée).
-Élargissement des possibilités de combinaisons des matériaux.
-Pas de température d'assemblage élevée.
-Absence de corrosion électrochimique (Absence de percement des pièces).
-Élasticité des joints collés : amortissement des vibrations
-Étanchéité des joints collés et possibilité d'isolation électrique, électromagnétique, phonique...
-Amélioration de l'esthétique de l'assemblage.
-Prix de revient généralement inférieur à un assemblage traditionnel.
-Opération facilement automatisable permettant des grandes cadences de production.

I.03 : THEORIES DE L'ADHESION

Les mécanismes par lesquels deux matériaux solides sont maintenus ensemble par un contact inter-facial intime ont été étudiés depuis de nombreuses années. Différentes théories ont été proposées afin d'expliquer la nature des forces et/ou interactions mises en jeu lors du processus

d'adhésion, mais aucune de ces théories n'est capable à l'heure actuelle, d'expliquer de façon satisfaisante tous les cas rencontrés. On trouve dans la littérature des synthèses de diverses théories relatives à l'adhésion, qui montrent la complexité des phénomènes mis en jeu au cours de l'adhésion de deux matériaux ; On qualifie ces phénomènes comme étant un l'ensemble des forces qui s'établissent entre l'adhésif et la surface du solide et on peut citer :

I.03-1 : Théorie mécanique : L'adhésion a été longtemps considérée comme étant un simple problème mécanique, la solidité du joint résultant de la pénétration de l'adhésif dans les aspérités de la surface solide, explique une partie de l'adhésion.

I.03-2 : Théorie électrique : L'adhésion serait due à l'établissement d'une couche électrique aux interfaces, les forces étant de nature électrostatique.

I.03-3 : Théorie chimique : Elle interprète la liaison par la formation de liaisons covalentes entre deux corps en présence, cette théorie n'est prise en considération que dans peu de cas.

I.03-4 : Théorie de la diffusion : Il y a inter-diffusion entre les deux surfaces en présence. Elle suppose la solubilité mutuelle des matériaux telle que le Collage du PVC par exemple.

I.03-5 : Théorie thermodynamique : Elle indique l'établissement de liaisons faibles entre les surfaces. Ces forces s'exercent sur de faibles distances et existent dans tous les cas de figure ce qui explique une bonne partie de l'adhésion.

Ces différentes hypothèses montrent que les phénomènes d'adhésion ne sont pas encore bien élucidés. Il semble cependant que l'établissement de liaisons faibles d'un très grand nombre soit une des raisons principales de l'adhésion dans beaucoup de cas.

I.04 : NOTIONS CARACTERISTIQUES DES ADHESIFS *(Les précautions à prendre pour un meilleur collage) :*

Les adhésifs liquides sur un solide font intervenir comme tout procédé technique ou scientifique, un certains nombre de précautions ou de mise en garde pour sa réussite à savoir :

I.04-1 : Préparation des surfaces

C'est une étape indispensable avant d'effectuer un collage, elle a pour but de rendre la surface plus apte au collage, d'éliminer les agents contaminants ou de modifier la chimie de surface, sachant que l'application de l'adhésif intervient peu de temps après le nettoyage. Nous citons parmi ces procédés de préparation des surfaces les Traitements mécaniques, chimiques, électrochimiques et physicochimiques et qui se résultent en ce qui suit :

Le ponçage au papier abrasif, brosse métallique

Le sablage : Projection d'une poudre abrasive

Abrasion par ponçage: il faut éliminer ensuite les inclusions par nettoyage chimique, ce traitement est à éviter pour les métaux.

Le grenaillage et microbillage

Les ultrasons : Méthode onéreuse consistant à faire cavité l'eau par surpression- dépression

Le dégraissage (solvants, alcalins…)

Le décapage (acides…)

Traitement chimique : Il nettoie la surface sans modifier ses caractéristiques de mouillabilité.

Décapage chimique : Ce traitement permet d'éliminer la couche d'oxydes recouvrant certains métaux.

Traitement thermique ou électrique: flammage oxydant la surface ou traitement par effet Corona afin de créer des liaisons réactives.

Les conversions (phosphatation, chromisation, anodisation, métallisation, primaires…)

Les primaires d'adhésion : sont destinés avant tout à protéger les surfaces venant d'être traitées. En effet, toute surface préparée doit absolument être protégée de toute souillure pour conserver ses propriétés d'adhésion. On estime qu'après une exposition d'environ 5 à 8 heures à l'atmosphère ambiante, les propriétés adhésives diminuent à cause des différentes absorptions d'humidité, de gaz, de poussières, ...

Or du point de vue industriel, il n'est pas toujours possible de procéder à l'assemblage dans ce laps de temps. Les fournisseurs d'adhésifs proposent alors d'appliquer un film protecteur que l'on applique au pistolet (primaire d'adhésion). Les solvants doivent ensuite être évaporés par étuvage. Ils permettent de différer l'assemblage d'une vingtaine de jours.

On utilise également des primaires d'adhésion pour le collage des matières réputées incollables (Téflon, polypropylène).

Le passage par l'un de ces modes de traitement a pour but de favoriser ce qui suit :

I.04-2 : Le Mouillage *(ou mouillabilité)*:

Elle représente l'aptitude qu'a un liquide *(adhésif)* à occuper la plus grande surface possible lorsqu'on le dispose sur une surface solide. Nous la quantifierons par l'introduction de la notion d'énergie de surface d'un liquide ou d'un solide.

Expliquons

Posons une goutte de liquide sur une surface solide.

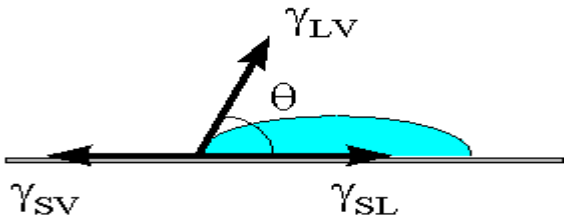


Fig.1 : Comportement d'une goutte d'un liquide sur une surface d'un solide

L'équilibre des forces donne l'équation de Young : $\gamma_{LV} \cos\theta + \gamma_{SL} = \gamma_{SV}$

Où γ_S, γ_{SL}, γ_L représentent l'énergie de surface du solide, l'énergie inter-faciale liquide solide et la tension superficielle du liquide.

Nous pouvons faire appel à l'énergie superficielle d'un liquide

Appelée aussi la tension superficielle, elle caractérise l'aptitude d'un liquide à prendre la plus petite la surface possible dans un milieu donné. Elle caractérise également la cohésion d'un liquide puisqu'il faut vaincre les forces de cohésion interne de celui-ci pour accroître cette surface.

Mécaniquement, elle s'exprime comme une force s'opposant à un accroissement de surface et rapportée à l'unité de longueur. L'unité utilisée est le N/m

Tension superficielle forte :	Tension superficielle faible :
Etalement est caractérisé par un grand angle de contact entre la goutte et la surface. *(Mauvais pour le collage)*	Etalement est caractérisé par un petit angle de contact entre la goutte et la surface. *(Bon pour le collage)*

Fig. 02 : Effet de la tension superficielle

Tension de surface ou superficielle ou énergie d'interface ou énergie de surface

À la surface d'un milieu dense liquide ou solide ou à l'interface entre deux milieux denses, la matière n'est pas, rigoureusement dans le même état *(les mêmes caractéristiques physique ou chimiques)*. Ce nouvel état local précisément là est nettement différent. À la surface ou interface est donc associée une certaine énergie par unité de surface (*exprimée en joules par mètres carrés. J/m²*) dont l'origine est la force de cohésion entre molécules identiques de part et d'autre.

Une autre façon d'exprimer la même chose consiste à dire qu'il existe, au voisinage de la surface ou interface, une certaine contrainte en tension dans le milieu ; c'est une force par unité de longueur, exprimée en N/m. On parle donc indifféremment d'énergie ou de tension. On a l'habitude, pour l'interface entre deux milieux denses, de parler de **tension inter-faciale**, d'**énergie inter-faciale** ou d'**énergie d'interface**. Entre un milieu dense et un gaz, on parle souvent plutôt de **tension superficielle**, de **tension de surface** ou d'**énergie de surface**.

Autrement dit, la tension superficielle est donc la force qu'il faut appliquer à un liquide ou à son intérieur pour provoquer l'extension de sa surface. On peut définir l'énergie d'interface comme un surplus d'énergie chimique lorsque les molécules de surface se trouvent à l'intérieur du liquide.

La tension superficielle est une caractéristique très importante notamment dans les processus industriels, plus elle est élevée, plus l'adhésion d'une substance (colle, adhésif) appliqué sur le matériau sera bonne.

Énergie de surface d'un solide

Elle représente la quantité de travail qu'il a fallu dépenser pour créer la dite surface, la température et la pression étant constantes. Elle s'exprime en J/m².

Énergie superficielle critique

L'étalement du liquide n'est parfait que si l'angle de contact A est nul. Cette valeur correspond à une valeur critique de l'énergie superficielle du solide qui permet de prédire que si:

$\gamma_L < \gamma_C$, alors A=0, le mouillage est bon.

$\gamma_L > \gamma_C$, alors A est positif, le mouillage est mauvais.

I.04-3 : Rugosité.

Le mouillage n'est pas réalisé dans les creux car la concentration de contraintes aux sommets de la surface rugueuse.

Sans creux, le mouillage est mieux réalisé est donc, l'adhésion sera meilleure.

D'où intervient l'importance de la rugosité ?

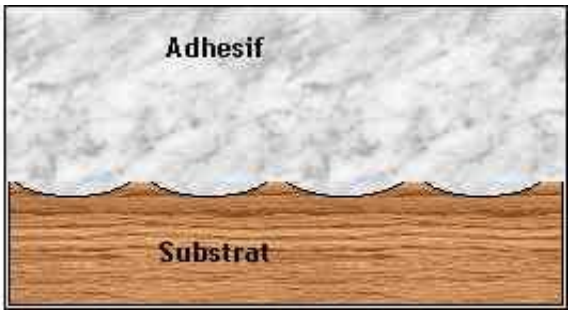
Une augmentation de la rugosité a deux incidences directes:

Un meilleur ancrage mécanique, implique Une élévation de la surface réelle de contact (10 à 100 fois la surface apparente).

On pourrait alors s'attendre à ce que la résistance du joint augmente dans des proportions similaires. Or ce n'est pas le cas, deux raisons essentielles expliquent ces observations.

Le mouillage n'est pas réalisé dans les creux il y'a concentration de contraintes au sommet des aspérités

Fig. 3 : La régosité qui empeche le mouillage



Sans creux, le mouillage est mieux réalisé Le sablage à créé des angles très ouverts l'adhésion sera donc meilleure

Fig. 4 : La régosité qui favorise le mouillage

La mouillabilité doit être la meilleure possible afin que le maximum des liaisons s'établisse entre l'adhésif et le substrat. L'équation de Young nous indique qu'un traitement de surface est pratiquement indispensable afin que l'énergie de surface du substrat soit maximale. Ces traitements devront avoir comme principal but de nettoyer la surface solide de tous les éléments susceptibles d'établir une barrière à l'établissement des liaisons.

La tension superficielle des adhésifs utilisés doit être inférieure à l'énergie de surface des solides considérés. C'est pourquoi il est extrêmement difficile de coller des plastiques à l'état brut.

Une bonne mouillabilité n'est pas une condition suffisante, encore faut-il qu'il se forme des liaisons nombreuses et solides, ce qui suppose que la géométrie de la surface soit bien connue et que la chimie de l'adhésif et de la surface solide soient parfaitement adaptées.

I.04-4 : Autres précautions, Coefficients de dilatation

Pour les assemblages de matériaux différents, il faut tenir compte des différences de coefficients de dilatation afin de choisir une colle assez souple et en épaisseur suffisante pour que le joint supporte les dilatations différentielles sans dommage.

La connaissance du coefficient de dilatation peut être utile afin de limiter les contraintes d'origine thermique à l'interface entre les matériaux et le film d'adhésif.

Les adhésifs structuraux ont le plus souvent des coefficients de dilatation dix fois plus grands que les métaux et il faut donc en tenir compte.

Si l'on craint des désordres éventuels par suite des variations de température on choisira si possible une température de durcissement intermédiaire entre les températures minimale et maximale de service. Les colles souples présentant des possibilités d'allongement absorberont mieux les différences de dilatation.

I.04-5 : Temps d'application

L'adhésif doit être appliqué peu de temps après le nettoyage afin d'éviter la décontamination de la surface.

I.05 : TYPES D'ADHESIFS :

I.05-1 : Les adhésifs structuraux

La notion d'adhésif structural est apparue lorsqu'on a commencé à réaliser des assemblages collés pouvant supporter des contraintes aussi importantes que les assemblages mécano - soudés.

L'assemblage collé présente alors une résistance équivalente à celle des matériaux constituant la structure. La colle est devenue donc partie intégrante de l'ensemble de la structure à la différence des produits de revêtements ou des mastics d'étanchéité, d'où l'appellation d'adhésifs structuraux.

Ils sont conçus pour résister à des contraintes supérieures à 7 MPA *(Une force qui peut être largement dépassée)* à température ambiante. Ils peuvent être sollicités sans défaillance à un pourcentage élevé

de leur résistance maximale pendant une longue période, ceci dans des conditions hostiles (basses températures, chaleur, agents chimiques, ...) et parmi ces colles apparaissent :

I.05-2 : Les Polyuréthanes

C'est une classe très vaste de produits dont certains peuvent être classés parmi les adhésifs structuraux. Ce sont alors des polymères réactifs sans solvants ou à très haut sec. Ils résultent de la condensation entre un monomère iso-cyanate et un monomère hydroxyde ou polyol. Ils se présentent sous la forme de bi-composants mais l'évolution tend à favoriser le développement des adhésifs polyuréthannes mono-composants en raison de leur facilité de mise en œuvre. Ils ont une excellente tenue au pelage, à la déchirure.

Les polyuréthannes bi-composants sont considérés comme une colle semi-structurale. Ils conviennent parfaitement aux assemblages mixtes métal/plastique. Certains fabricants développent des gammes de polyuréthannes mono-composants. Ces colles se présentent sous un état pâteux puis deviennent après réticulation à l'humidité ambiante des masses élastiques.

Les excellentes propriétés d'adhérence des polyuréthannes ont trouvé des applications dans les adhésifs à moyen et haut module dans tous les secteurs d'activité industrielle, en particulier chaque fois que les assemblages sont soumis à la dilatation, des chocs ou des vibrations conséquentes. Ils trouvent de nombreuses utilisations dans des domaines aussi différents que les matériels de transports, la construction navale, les équipements électriques, ...

Les polyuréthannes sont moins rapides que les époxydes mais par contre ils sont beaucoup plus souples.

En outre, on peut pratiquement les coller sur toutes les surfaces sans utiliser de primaires d'adhésion. Ces derniers ne sont nécessaires que sur le Téflon, c'est à dire des matériaux qui sont supposés incollables.

Un des gros avantages des polyuréthannes actuellement sur le marché sont qu'ils collent le verre sans primaire. On a donc une utilisation beaucoup plus simple qu'avec un époxy, par contre si on veut une prise rapide on utilise fréquemment des collages mixtes: polyuréthanne et ruban adhésif. On limite l'utilisation des rubans adhésifs car ils sont d'un coût assez élevé.

Il existe des polyuréthannes bi-composants. Ces derniers ont l'avantage de présenter des caractéristiques mécaniques plus élevées mais leur mise en œuvre est beaucoup plus complexe. Ils sont durs à étaler et les investissements sont lourds. Les fabricants développent maintenant des mono-composants avec des caractéristiques qui tendent à se rapprocher de celles des bi-composants.

Une des applications principales des polyuréthannes est le collage du verre. Par contre ils ont une mauvaise tenue aux UV. De nombreuses recherches sont menées afin de réduire ce problème (problème du collage des pare-brises des voitures).

Une autre application de ces colles est la réalisation de tapis de sols, de joints d'étanchéité, des assemblages d'éléments de bateaux, ... On joue beaucoup sur le fait de la grande souplesse de ces adhésifs. On parle d'ailleurs assez souvent de collage souple pour les polyuréthannes mono-composants.

A : Les caractéristiques principales des polyuréthannes sont:

-Élasticité et souplesse importantes même à basse température

-Bonne adhérence sur la plupart des matériaux

-Bonne résistance au vieillissement

-Résistance aux acides non dilués

-Bonne tenue à l'humidité

-Tenue aux températures moyennes(80-90 °C)

-Durcissement à chaud rapide(mono-composant)

-Vitesse de réticulation de 3 à 5 mm par jour pour les mono-composants

-Mise en œuvre technique pour les bi-composants

-Propriété d'isolant électrique, propriété d'étanchéité

-Absence de toxicité dans la plupart des cas

-Nécessité d'étuves pour les mono-composants

-Résistance au cisaillement moins élevée que les autres colles structurales

-Dureté très bonne

A l'heure actuelle, des fabricants commercialisent des polyuréthannes mono-composants qui n'ont plus leur principal défaut c'est à dire la lenteur de polymérisation. Cette nouvelle colle est obtenue par la présence d'un activateur. On a ainsi les avantages d'un polyuréthanne mono-composant (simplicité d'emploi) et ceux d'un bi-composant *(rapidité de prise).*

I.05-2 : Les Epoxydes

Ce sont des adhésifs thermodurcissables parmi les plus courants et les plus performants. Leur dénomination provient de la présence d'un groupement caractéristique appelé groupement époxyde. Les formulations sont présentées sous forme de produits liquides ou pâteux selon le cas. Ce sont des adhésifs sans solvants, mono ou bi-composants.

Pour les adhésifs bi-composants, le mélange durcisseur résine de base est fait au moment du collage, en respectant bien les quantités. Une réaction exothermique a alors lieu, permettant la réticulation. Généralement, le collage est fait à température ambiante mais il peut être accéléré par un apport de chaleur. Pour les adhésifs mono-composants, la colle est prête à l'emploi c'est à dire que la résine de base et le durcisseur cohabitent sans que la réaction ait lieu. Il est nécessaire d'avoir un apport de chaleur pour que la réaction se produise.

Les conditions de stockage sont importantes: la température ne doit pas dépasser 20 à 30 °C, au risque de provoquer un début de réaction.

Les époxydes sont fréquemment utilisées pour des collages métal / métal ou métal / plastique devant résister à des contraintes mécaniques très élevées. Elles offrent une très bonne adhésion sur la plupart des matériaux et une excellente résistance au vieillissement.

Pour les époxydes pouvant supporter des températures élevées, on insère des particules de céramique. Le problème est alors le temps de manipulation qui atteint 24 H. La recherche est axée sur la tenue en température de ces colles ainsi que sur la réalisation de plus en plus courante d'époxyde mono-composant à caractéristique mécanique élevée.

On commercialise des époxydes à prise rapide, semi-rapide, normale. Mais la résistance baisse au fur et à mesure que le temps de prise raccourcit. Il faut donc trouver un compromis entre les impératifs de rapidité de réalisation industrielle et la tenue du collage.

Citons comme caractéristiques pour les mono-composants:

A : Les avantages

Excellente résistance en température pouvant aller de -55 à +200 °C

Excellente résistance au cisaillement : jusqu'à 40 MPa à 20°C

Excellente tenue aux environnements

Excellente résistance aux huiles, solvants

B : Les inconvénients

Stockage à +4 ou -18 °C

Prix élevé, Nocivité

Manque de souplesse

Pour les époxydes bi-composants, on peut citer:

Excellente résistance en température et excellente résistance au cisaillement

Bonne tenue aux environnements et bonne résistance aux huiles et aux solvants

Possibilité de réduire la durée de polymérisation en augmentant la température

Stockage à température ambiante

I.05-3 : Les Acryliques

Il y a plusieurs types d'adhésifs à base acrylique.

I.05-4 : Les Cyanoacrylates

Ce sont des colles assez récentes qui connaissent un essor assez important en raison de certaines de leurs caractéristiques. La réaction est une réaction de polymérisation simple de type anionique, provoquée par la présence d'une base faible sur la surface considérée.

Au départ ces colles étaient destinées uniquement au collage de métaux / caoutchouc. Maintenant, on les utilise aussi pour les matériaux poreux.

Les caractéristiques principales de ces colles sont:

-Une vitesse de polymérisation faible en général mais elle dépend fortement de la nature des supports

- L'humidité est un bon catalyseur
- La polymérisation a lieu par compression du film fin de monomères
- Cette polymérisation a lieu sur une surface polaire non acide
- Les résistances mécaniques sont élevées et leur résistance aux solvants est bonne
- Elles ont un fort pouvoir couvrant
- Leur tenue à la température est faible
- Le film est incolore

Ce sont des colles assez spécifiques qui sont en général destinées aux industries de précision. On les utilise sur des petites pièces, pour le collage de joints en caoutchouc.

Elles résistent généralement assez mal aux chocs, à la température (100 °C). Mais maintenant certains fabricants commercialisent des cyanoacrylates qui résistent à 150 °C, à des jeux de 0.25 mm, à des chocs, à l'humidité. On élimine ainsi les principaux défauts de ce type de colle.

Un des grands avantages de ces adhésifs est de pouvoir adhérer sur des surfaces réputées incollables grâce à l'emploi de primaires d'adhésion. On évite ainsi sur le polypropylène, le Téflon, ..., des traitements de surface tels qu'un traitement plasma suivi d'effets CORONA.

I.05-5 : Les Anaérobies

Ce sont des colles thermodurcissables pour lesquelles la polymérisation ne peut avoir lieu qu'en l'absence d'oxygène ou d'air. Les surfaces métalliques ont la propriété de catalyser la réaction mais celle-ci nécessite également l'action d'un activeur ou de rayonnements électromagnétiques tels que les ultraviolets

A : Les caractéristiques principales sont:

Leur temps de prise faible

Une excellente résistance au cisaillement mais une très faible résistance à la traction

-Leur caractère thermodurcissable leur confère d'excellentes caractéristiques en fonction de la température. Certaines peuvent tenir jusqu'à 180 °C.

-Leur inertie chimique est très bonne.

-Elles sont inadaptées aux matériaux poreux.

Leur fluidité est plus ou moins importante pour compléter les jeux. On les utilise pour le freinage de filets, collage mécanique pour les roulements.

Le jeu doit rester faible et inférieur à 0.25 MM.

I.05-6 : Les Anaérobies réactivables aux UV.

On a une réactivité par manque d'oxygène et la présence d'U.V. Cette colle est utilisée pour le collage du verre sur tout support. La polymérisation a lieu en 20 S si on a une lampe UV, et en 24 H avec l'action du soleil. Cette colle est importante dans l'optique, la construction de miroirs, la décoration, ...

Elles sont très intéressantes puisqu'elles ont le même indice réfractaire que le verre. On n'a pas ainsi de problème pour les industries de l'optique. Il est possible de nettoyer la surface qui a été exposée à l'action de l'air. Ce type de colle est beaucoup utilisé dans le secteur de la décoration.

I.05-7 : Les Acryliques modifiées.

Il y a, par rapport aux acryliques classiques, l'apparition d'un radical uréthane. Cette modification entraîne des caractéristiques tout à fait particulières. Le durcissement est rendu possible par l'adjonction de deux parties différentes: un activateur et la colle. La colle est constituée de la résine de base alors que l'activateur est constitué de peroxyde.

Les principales caractéristiques des acryliques modifiées sont:

Une prise très rapide, quelques minutes pour la prise en main, quelques heures pour la résistance finale.

L'adhérence sur des surfaces mal préparées.

Une bonne tenue à la température et une résistance au cisaillement très bonne.

La résistance aux agents chimique et à l'humidité est très honnête.

L'épaisseur du joint doit être faible.

Ils sont utilisés pour la fabrication en chaîne car le temps de prise est assez faible contrairement aux époxydes. Par contre ce type de colle ne peut être utilisé dans tous les cas de figure. Par exemple le montage suivant ne peut pas être réalisé avec un adhésif de type acrylique modifié.

Ce type de collage est impossible à effectuer avec une colle acrylique modifiée.

En effet la colle est liquide alors que l'activateur est visqueux. La colle est donc chassée au moment de l'emmanchement.

I.05-8 : Les Thermofusibles ou Hot-Melts.

Au départ ils étaient utilisés pour le collage carton / carton et du bois. Mais on s'est rapidement rendu compte qu'ils étaient capables de coller beaucoup d'autres choses. Leur avantage principal est la prise immédiate. Ce sont des adhésifs qui présentent la particularité de devoir être chauffés afin d'être fluidifiés, la prise à lieu au refroidissement.

Ils ont un problème: lors de l'application sur des matériaux froids, il peut y avoir la formation d'une couche mince (un glacis) qui empêche le collage. Ils sont constitués d'un polymère de base, d'une résine et d'une cire auxquels on rajoute des additifs stabilisants ou plastifiants.

Le polymère de base est destiné à donner la cohésion, la tenue à la température et la stabilité thermique tandis que les cires ont pour objet de contrôler la viscosité résine tacktifiante est destinée à augmenter le pouvoir collant à chaud.

Les polymères de base sont essentiellement des copolymères d'éthylène tels que les EVA. On trouve également des polyesters et des polyamides. De par leur manutention assez facile et leur temps de prise faible, ces adhésifs connaissent un essor assez rapide.

A : Les principaux avantages de cette colle:

-Vitesse de prise rapide

-100 % d'extraits secs d'où une facilité de manutention

-Adhérence sur de nombreux supports

-Absence de solvants

-Réactivables à chaud en permanence

-Facilité d'utilisation

-Machines adaptées aux cadences évolutives (plieuses-colleuses)

B : Les principaux défauts:

-Résistance au fluage insuffisante

-Vitesse de solidification sensible à la température du support

-Compromis délicat entre vitesse de temps de prise et le temps d'ouverture

-Sensibilité à la chaleur

Au départ le composant de base était l'acrylique. Mais à l'heure actuelle, les fabricants utilisent des Thermofusibles à base de polyuréthanne mono-composant. Ils sont emballés dans des cartouches hermétiques et sous forme solide. On a les avantages d'une HOT-MELT classique. Le collage se fait par chauffage. Ensuite l'adhésif joue le rôle d'un polyuréthanne classique. On a donc une polymérisation. L'avantage est que la tenue est figée. Elle ne bougera plus. En outre la prise est rapide. C’est une colle miracle mais sa mise en œuvre est complexe. En effet, une fois que la cartouche est ouverte l'utilisateur doit l'utiliser jusqu'au bout. Il est nécessaire d'employer un pistolet spécial et coûteux. On doit en outre disposé d'un réchauffeur de cartouche. Enfin le pistolet doit être impérativement nettoyé avec un solvant spécial après chaque utilisation. Sinon, la colle polymérise et bouche le pistolet. On a donc en entretien et un matériel assez lourds et coûteux.

I.05-9 : Les colles en dispersion aqueuse

Tous les produits de cette famille sont parfaitement adaptés pour répondre à un grand nombre de sollicitations industrielles. Leur utilisation est conseillée là où les produits en phase solvant sont interdits. En effet les colles en dispersion aqueuse présentent l'avantage d'être beaucoup moins

toxiques qu'une colle solvant et d'être inflammables à l'état liquide (intérêt au niveau du stockage et de la mise en œuvre).

Ces produits donnent d'excellents résultats sur un grand nombre de supports tels le bois, les plastiques, les tissus, etc. A titre d'exemple, ces colles sont aujourd'hui utilisées pour la fixation de tissus sur bois dans la fabrication d'enceintes acoustiques ainsi que pour le collage de revêtements muraux notamment dans les transports en commun. Ces produits sont également très utilisés dans la fabrication de filtres industriels, de matériaux légers, ainsi que pour l'assemblage de produits d'isolation.

Les colles en dispersion aqueuse sont issues en général de deux technologies:

A-Les colles contacts: on effectue un double encollage, on attend le temps d'évaporation nécessaire et on affiche les deux surfaces encollées en maintenant la pression

B-Les colles auto-adhésives: Après évaporation complète du solvant(en l'occurrence de l'eau), ces produits restent auto adhésifs longtemps. Cela procure une grande flexibilité au niveau du processus de mise en œuvre du produit. Un apport de chaleur peut diminuer de façon considérable le temps de séchage de la colle.

Les colles en dispersion aqueuse ont en général un taux d'extraits sec assez importants. On peut souvent coller avec un litre de colle en dispersion une surface beaucoup plus importante qu'avec un litre de colle en solvant, on peut les appliquer sans problème au pinceau, au rouleau ou au pistolet.

I.05-10 : Les Rubans adhésifs.

On distingue plusieurs sortes de rubans adhésifs structuraux: les films supportés, les films époxys non supportés, et enfin les films acryliques qui 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, il en existe de nombreuses applications :

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 refermables

Rubans adhésifs industriels anti-adhérents

Il existe différents types de masses adhésives sur le marché:

Caoutchouc, Caoutchouc naturel, Caoutchouc synthétique

Caoutchouc non thermodurcissable, Caoutchouc thermodurcissable

Caoutchouc thermodurcissable réticulé

Acrylique, Acrylique thermodurcissable, Acrylique réticulée

Silicone, Silicone thermodurcissable

La colle la plus efficace est celle à base d'acrylique. C'est la seule qui peut être considérée comme structurale. Ce type de collage est connu depuis plus de 20 ans.

Au début il s'agissait essentiellement de résines époxy, réactivables à chaud plus pressage. Depuis 15 ans les rubans les plus performants sont à base d'acrylique. On a un support, la mousse, et l'adhésif.

I.06 : PRESENTATION DE QUELQUES AUTRES COLLES EXISTANTES

I.06-1 : 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.

I.06-2 : 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. Les adhésifs HOT-MELTS s'utilisent en simple encollage.

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.

I.06-3 : 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 poly-chloroprène qui possèdent des caractéristiques particulières.

I.06-4 : 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.

I.06-5 : X-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.

I.06-6 : Y-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.

I.06-7 : 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 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.

I.06-8 : 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, Par polymérisation sous l'action de l'humidité, Par polymérisation sous l'action de la chaleur.

I.07 : LES PARAMETRES IMPORTANTS DANS L'ASSEMBLAGE ETLEURS DURCISSEMENT SONT:

1-L'épaisseur du joint

2-La pression exercée

3-La montée en température

4-Le maintien en position des éléments à assembler

On peut employer pour l'assemblage un outillage spécial (serre-joints, presse à rouleaux, ...)

Les colles thermodurcissables nécessitent un durcissement par la chaleur grâce à des étuves à air chaud ou par autoclaves.

I.08 : COLLAGE STRUCTURAL (LA METHODE INNOVANTE D'ASSEMBLAGE)

Le collage structural, consiste à utiliser des colles et adhésifs à hautes performances *(solidité, cohésion élevées, résistance à la chaleur et à d'autres sollicitations et performances mécaniques élevées)*, afin d'obtenir des assemblages durables dont la solidité est comparable à celle des matériaux constitutifs (métaux, plastiques, bois, verre...), et offrant des performances pour les petites pièces en électroniques, bijouterie, tôles ou feuilles minces, très fragiles, des matériaux différents ,tout en assurant une meilleure répartition des contraintes et un allègement de la structure assemblée.

En plus d'un meilleur aspect visuel pour certains assemblages et un aérodynamisme aussi parfait que possible pour d'autres et un amortissement sans précédent des vibrations par le distribution des contraintes et une demande multiaxiale toujours souhaitée lors des assemblages isolation/conductivité, étanchéité, résistivité et légèreté.

I.08-01 : L'utilité des colles structurelles

La colle peut être utilisée pour plus d'une mission et il s'agit de :

A : Colle pour les assemblages : le procédé consiste à unir deux pièces ou plus, semblables soient-elles ou de nature différentes, une jonction qui ne pouvait se faire que d'une manière classique, par soudage ou rivetage

B : Colle pour la réparation: la détérioration des éléments des structures à des dégâts, occasionnés localement, pouvant nuire à la résistance et à la tenue mécanique des structures, à leurs affaiblissements et leurs fragilisations, nécessitent une intervention de réparation et de réhabilitation, par le remplacement du tronçon de l'élément affecté.

C : Colle pour le renforcement *:* Le renforcement peut concerner plusieurs éléments de structure neufs ou anciens pour renforcer leurs tenues suivant un besoin légitime visant l'amélioration d'un critère, telle que l'augmentation d'une résistance ou limitation d'une apparence de déformation préventive.

<u>En général ;</u>

L'ensemble des trois procédés ou d'interventions convergent vers des critères dont la recherche scientifique ne cessent de s'accentuer pour en réduire le cout et le temps de l'intervention à travers les différentes phases de la réparation.

CHAPITRE II

Les matériaux composites

II.1 : LES HYPOTHESES D'HOMOGENEITE ET D'ISOTROPIE

Les composites se distinguent sur bien des points des matériaux "traditionnels", pour lesquels on utilise la plupart du temps des modèles soit:

- **Homogènes**, c'est-à-dire que les propriétés du matériau sont supposées identiques en tout point de la pièce ;
- **Isotropes**, c'est-à-dire que les propriétés du matériau sont supposées identiques dans toutes les directions de l'espace.

De par la microstructure des composites, ces hypothèses sont susceptibles d'être remises en question car :

II.1.1 : Homogénéité

De manière générale, la théorie du modèle homogène dépend toujours de *l'échelle* à laquelle on souhaite l'utiliser. Ainsi, pour dimensionner une pièce mécanique d'acier, dont les dimensions sont au moins de plusieurs millimètres, on emploie presque toujours un modèle homogène, alors que la vue microscopique nous en révèle toute une autre réalité.

Car si nous prenons une pièce en aciers, le même acier présente clairement à cette échelle des hétérogénéités, alors que le modèle homogène ne permet donc pas d'en prédire le comportement du matériau. Il en va de même pour les composites : bien qu'un composite soit par définition hétérogène, *il est généralement possible d'utiliser comme un modèle homogène si l'on se place à une échelle bien plus grande que celle des hétérogénéités*, au moins en un sens du matériau.

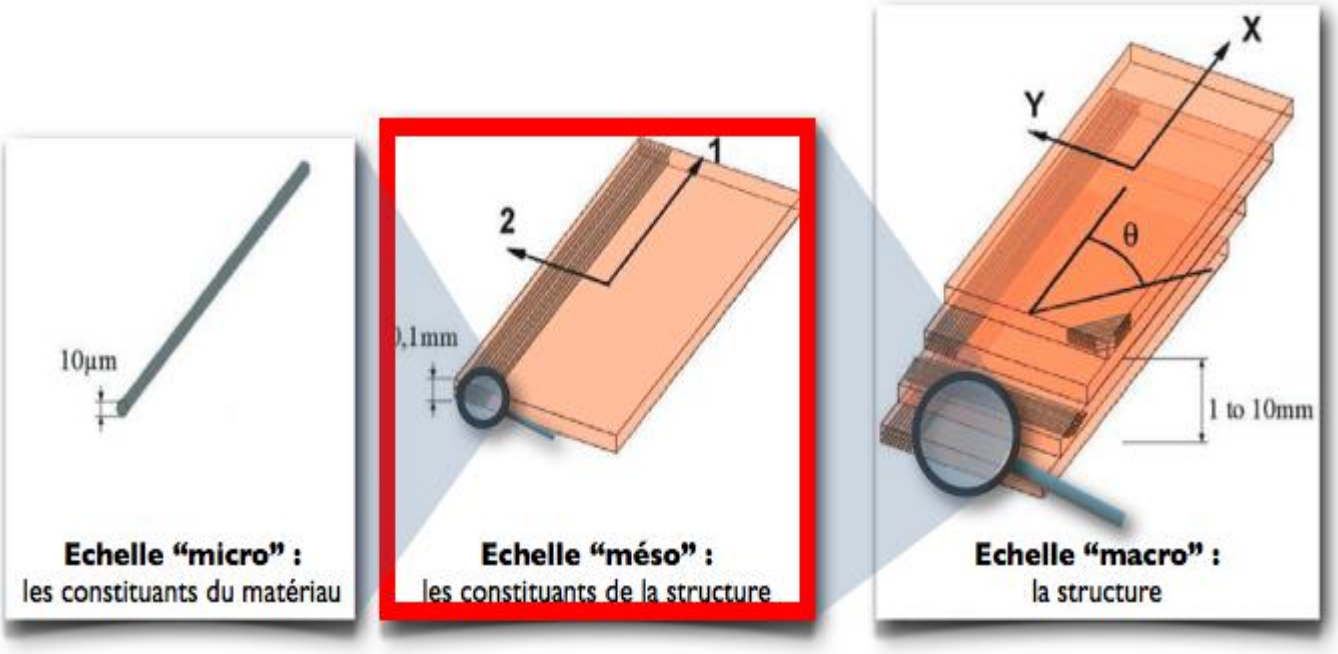


Fig. 5 : Entre structure micro et mcroscopique des matériaux composites

II.1.2 : Isotropie

En revanche, l'isotropie est souvent remise en question, car elle dépend **essentiellement** de *l'orientation des renforts* :

- lorsque l'orientation est aléatoire (Figure 6(a)), le comportement est à peu près isotrope ;
- lorsque l'orientation suit une ou plusieurs directions préférentielles (Figure 6(b)), le comportement est anisotrope.
-

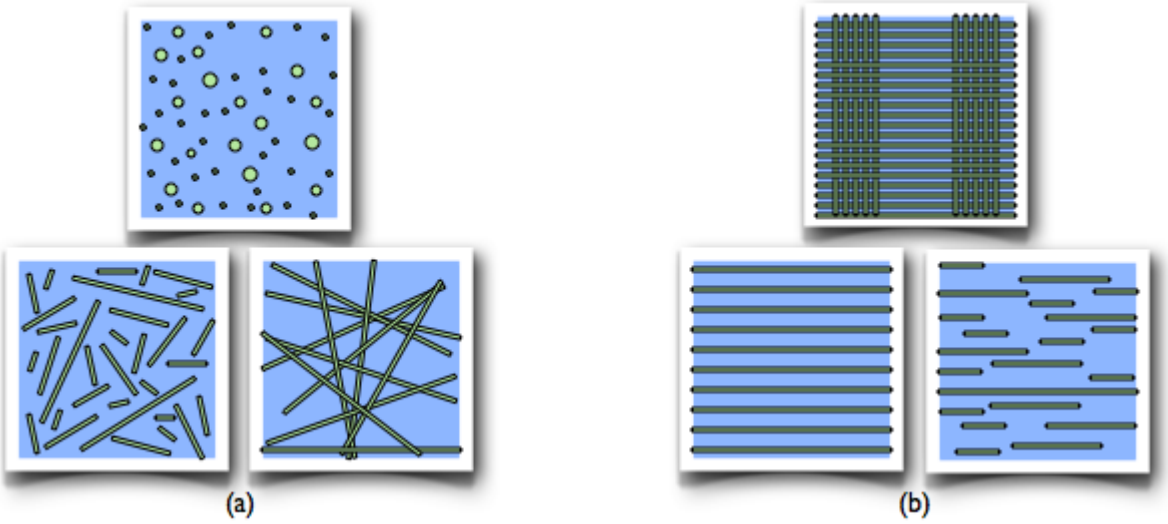


Fig. 6 : Exemples de microstructures de composites

(a) ayant un comportement isotrope ou quasi-isotrope.

(b) ayant un comportement fortement anisotrope.

Ici, nous supposons que les plis sont *unidirectionnels*, constitués de fibres longues continues, toutes parallèles entre elles, prises dans une matrice (Figure 7). L'anisotropie est donc très prononcée puisque les fibres sont orientées dans une seule direction !

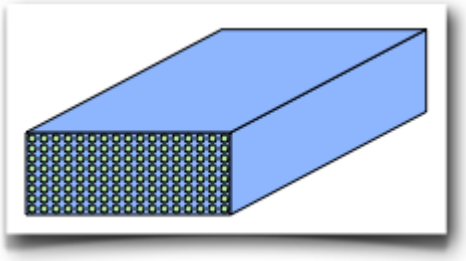


Figure 7 : Schématisation d'un pli unidirectionnel.

Pour modéliser le comportement d'un tel pli, **il est souvent possible de conserver l'hypothèse d'homogénéité, mais l'hypothèse d'isotropie doit être abandonnée**.

La suite de cette ressource expose le comportement mécanique d'un pli unidirectionnel, d'un point de vue expérimental, dans le cadre de l'élasticité linéaire. Des modèles d'élasticité anisotrope, capables de rendre compte des phénomènes observés, sont ensuite présentés.

II.2: Approche expérimentale du comportement d'un pli

Dans la plupart des cas, le pli soumis à divers efforts a été toujours considéré comme unidirectionnel, et nous analysons la façon dont il se déforme en retour. Car le comportement des matériaux, fera référence particulièrement au comportement d'un *élément de volume infinitésimal* situé au sein du pli (Figure 8), ou nous supposons que les efforts appliqués sur le pli permettent d'exercer des sollicitations simples sur l'élément de volume, c'est-à-dire de le soumettre à des chargements de traction/compression ou de cisaillement pur.

Nous modélisons ensuite le comportement observé dans le cadre de *l'élasticité linéaire en petites perturbations*

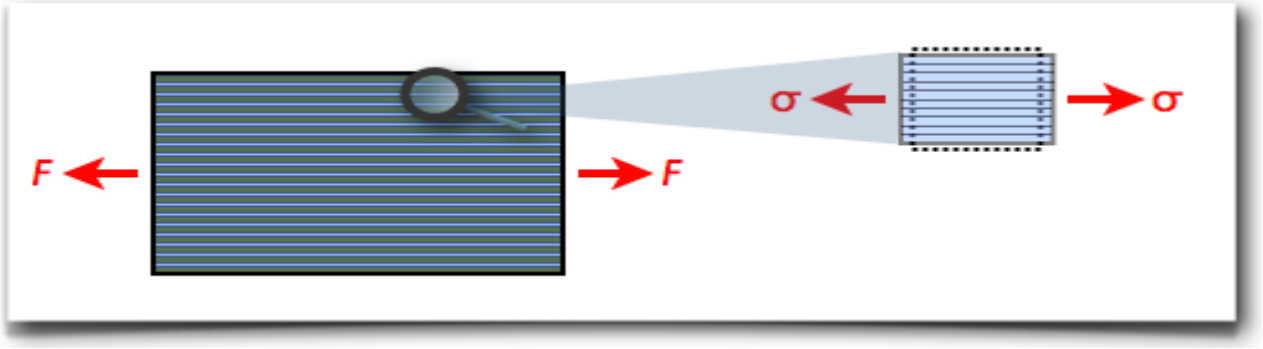


Figure 8 : Un pli unidirectionnel, et un élément de volume de ce pli.

II.2.1 : Traction longitudinale

Imaginons tout d'abord de tirer sur le pli *dans le sens des fibres*. Les actions exercées sur l'élément de volume peuvent alors être modélisées par une contrainte normale σ_L (L pour "longitudinal"). La Figure 9 représente le chargement appliqué et la déformation obtenue.

Figure 9 : Effet de traction sur un pli unidirectionnel dans la direction des fibres.

Nous simulons la réponse d'un élément de volume à une sollicitation de traction parallèle aux fibres, la réponse n'a rien de surprenant car le pli s'allonge parallèlement à la sollicitation, comme pour un matériau traditionnel, et on mesure donc une déformation longitudinale ε_L positive. Simultanément, il se contracte dans la direction perpendiculaire, et on mesure donc une déformation transversale ε_T négative. L'expérience montre que ces deux déformations sont proportionnelles à la sollicitation exercée.

Dans le cadre d'un modèle élastique linéaire, ces deux mesures permettent d'identifier deux coefficients d'élasticité relatifs à cette direction de sollicitation : *Le module d'Young longitudinal* $E_L=\sigma_L/\varepsilon_L$ et le *coefficient de Poisson longitudinale/transverse* $\boldsymbol{\nu_{LT}=-\varepsilon_T/\varepsilon_L}$ (ainsi appelé parce qu'il donne la déformation transversale obtenue lors d'une sollicitation longitudinale).

II.2.2: Traction transversale

Supposons maintenant que l'on tire perpendiculairement aux fibres, comme représenté sur la Figure 10.

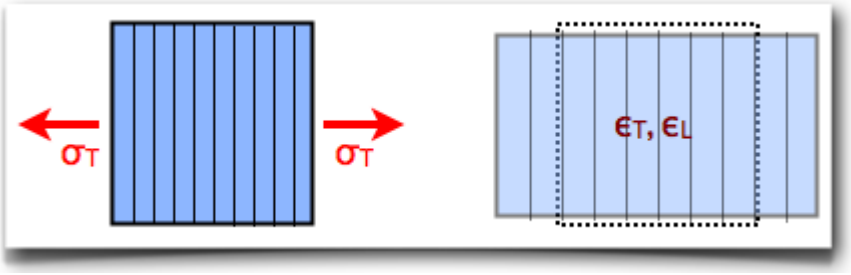


Figure 10 : Effet de traction sur un pli unidirectionnel dans la direction perpondiculaire aux fibres.

La réponse d'un élément de volume à une sollicitation de traction perpendiculaire aux fibres.

Là encore, on observe un allongement parallèlement à la sollicitation, et un léger rétrécissement perpendiculairement à celle-ci, tous deux proportionnels à la contrainte. Pour une sollicitation de même intensité que précédemment, on constate que l'allongement est beaucoup plus important, tandis que le rétrécissement perpendiculaire est identique.

Ceci a deux conséquences au niveau du modèle. Premièrement, **la valeur du module d'Young dépend de la direction des sollicitations**. Ainsi, le *module d'Young transversal* $\boldsymbol{E_T}$ est *beaucoup plus faible que le module longitudinal* $\boldsymbol{E_L}$: en pratique, un rapport de 10 ou 20 est courant. Deuxièmement, l'effet de Poisson est moins marqué que précédemment, puisque l'allongement est beaucoup plus important tandis que le rétrécissement est identique ! Il faut donc introduire un second coefficient de Poisson ν_{TL}, tel que le rapport ν_{TL}/ν_{LT} soit égal au rapport des deux modules d'Young E_T/E_L : l'égalité des rétrécissements dus à l'effet de Poisson est alors vérifiée.

On retiendra que **le coefficient de Poisson dépend donc, lui aussi, de la direction des sollicitations.**

Intuitivement, le premier constat (différence des allongements) s'explique aisément par le fait qu'en pratique, les fibres sont beaucoup plus rigides que la matrice, et par la disposition des constituants (qui étaient "en parallèle" lors de l'essai longitudinal, et sont maintenant "en série"). Le second constat (égalité des rétrécissements) est quant à lui tout à fait général, et reste vrai dans le cadre d'un comportement isotrope.

II.2.3 : Cisaillement longitudinale/transverse

Imaginons maintenant que l'on cisaille l'élément de volume dans le plan correspondant aux deux directions différentes, comme sur le schéma de la Figure 11. Nous supposons ici que l'élément de volume est sollicité en cisaillement pur (aucune contrainte normale).

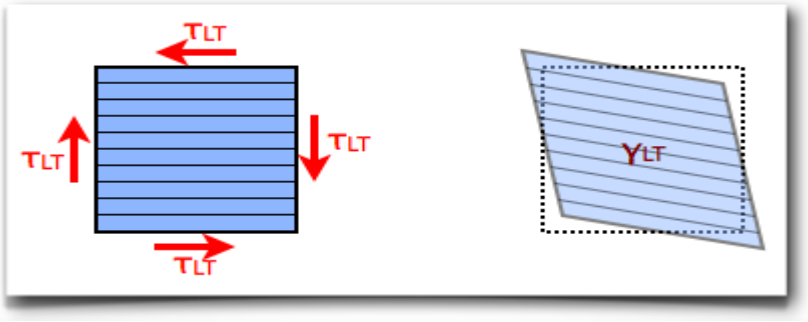


Figure 11 : Effet de cisaillement sur un pli unidirectionnel.

La Réponse d'un élément de volume à une sollicitation de cisaillement longitudinal transversal".

Comme pour un matériau isotrope, on observe une distorsion angulaire de l'élément de volume là encore proportionnelle à la sollicitation.

On peut donc identifier un *module de cisaillement* G_{LT} ; cependant, **celui-ci ne dépend pas des autres coefficients**, contrairement à ce qui se produit en élasticité isotrope où l'on a $G=E/2(1+\nu)$. Typiquement, les modules de cisaillement mesurés sur un pli réel sont plus faibles que ce que l'on pourrait calculer par une telle formule à partir des autres coefficients.

II.2.4 : Comportement dans une direction quelconque

L'anisotropie ne se manifeste pas uniquement par une dépendance de la rigidité en fonction de la direction des sollicitations. Des phénomènes plus déroutants (quelconques) peuvent se produire lorsque l'on sollicite le pli *dans une direction quelconque ou aléatoires*, c'est-à-dire ni parallèlement ni perpendiculairement aux fibres. Imaginons par exemple que l'on tire sur l'élément de volume à 45° par rapport aux fibres, comme sur la Figure 12.

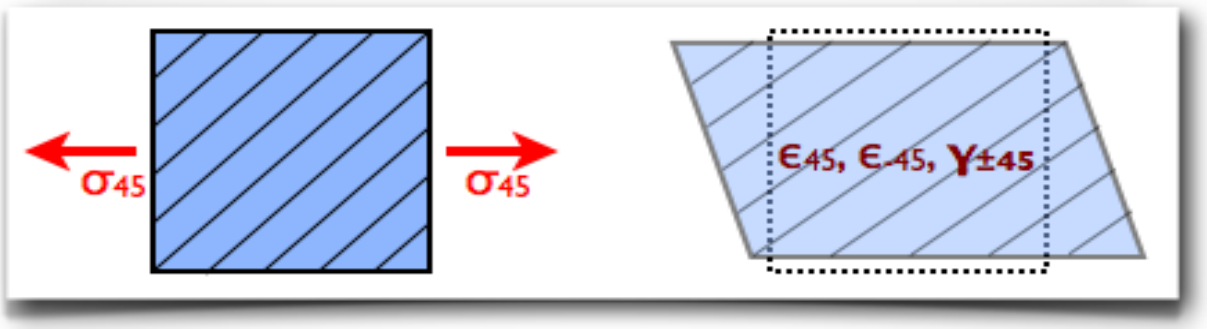


Figure 12 : Effet d'un effort quelconque sur un pli unidirectionnel.

La réponse d'un élément de volume à une sollicitation de traction à 45° par rapport aux fibres.

La déformation de l'élément de volume est clairement plus complexe que ce qu'aurait prédit un modèle isotrope ; non seulement l'élément s'allonge et se rétrécit, mais de plus il se tord. En d'autres termes, on obtient non seulement une déformation longitudinale et transversale, *mais également une déformation de cisaillement*, alors que l'élément est sollicité en traction pure !

Ce couplage entre traction et cisaillement est caractéristique des matériaux anisotropes. Il est relativement facile à interpréter physiquement si l'on se souvient que le matériau est beaucoup plus rigide dans le sens des fibres que dans le sens transverse : sur la Figure 12, l'élément de volume s'allonge relativement peu selon la diagonale parallèle aux fibres, et beaucoup plus selon l'autre diagonale. En se déformant, le "carré" devient donc un "parallélogramme", et non pas un "rectangle" comme précédemment. On obtient ainsi une déformation de cisaillement en plus de l'allongement et du rétrécissement.

II.3 : QUELQUES MODELES ELASTIQUES LINEAIRES ANISOTROPES

Nous présentons maintenant quelques modèles rendant compte du comportement décrit au paragraphe précédent. Afin de simplifier la présentation, nous nous plaçons dans un premier temps en 2D, conformément à l'exemple ci-dessus, en supposant que le pli est dans un état de contraintes planes. Le cas général sera présenté ensuite.

II.3.1: Le pli unidirectionnel en contraintes planes

Considérons d'abord le pli unidirectionnel du paragraphe précédent, en supposons que l'état de contraintes est plan. Nous nous plaçons naturellement dans le repère donné par la direction des fibres (direction longitudinale) et la direction transversale des figures ci-dessus. La modélisation effectuée à la suite des trois premiers essais (paragraphes 2.1 à 2.3) se traduit directement par l'expression ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{\mathrm{L}} \\ \epsilon_{\mathrm{T}} \\ \gamma_{\mathrm{LT}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{\mathrm{L}}} & -\frac{\nu_{\mathrm{LT}}}{E_{\mathrm{L}}} & 0 \\ -\frac{\nu_{\mathrm{TL}}}{E_{\mathrm{T}}} & \frac{1}{E_{\mathrm{T}}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{\mathrm{LT}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{\mathrm{L}} \\ \sigma_{\mathrm{T}} \\ \tau_{\mathrm{LT}} \end{bmatrix}$$

De plus, comme indiqué précédemment, nous savons que $\nu_{TL}/E_T=\nu_{LT}/E_L$. La matrice d'élasticité ci-dessus est donc *symétrique* ; cette symétrie traduit directement la symétrie du tenseur de Hooke, et modélise l'égalité des rétrécissements évoquée plus haut. D'autre part, les zéros de la matrice indiquent que :

- lorsque le matériau est sollicité en traction/compression pure dans la direction L et/ou dans la direction T, l'angle de distorsion γ_{LT} (ou la déformation de cisaillement) est nul ;
- de même, lorsque le matériau est sollicité en cisaillement pur dans les directions L et T, les déformations longitudinale ε_L et transversale ε_T sont nulles.

On a donc bien découplage entre traction/compression et cisaillement *dans le repère associé aux fibres*. Cependant, comme nous l'avons vu au paragraphe 2.4, **ce découplage disparaît lorsqu'on se place dans une direction qui n'est ni parallèle, ni perpendiculaire aux fibres.** Ainsi, dans une base (*x*,*y*) quelconque tournée d'un angle θ par rapport à la base précédente (Figure 12), la relation de comportement prend la forme générale suivante :

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x(\theta)} & -\frac{\nu_{xy}(\theta)}{E_x(\theta)} & \frac{\eta_{xy}(\theta)}{G_{xy}(\theta)} \\ -\frac{\nu_{yx}(\theta)}{E_y(\theta)} & \frac{1}{E_y(\theta)} & \frac{\mu_{xy}(\theta)}{G_{xy}(\theta)} \\ \frac{\eta_{xy}(\theta)}{G_{xy}(\theta)} & \frac{\mu_{xy}(\theta)}{G_{xy}(\theta)} & \frac{1}{G_{xy}(\theta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

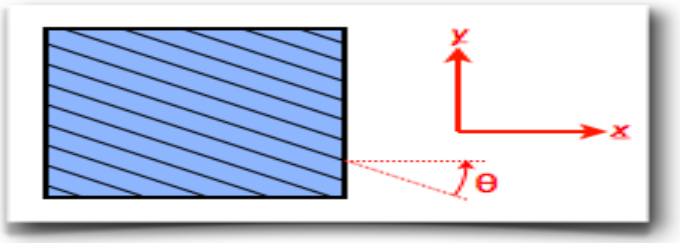


Figure 13: Une base orientée d'un angle quelconque par rapport aux fibres.

Les coefficients de cette matrice peuvent être calculés en écrivant la matrice de rotation et en effectuant un changement de base à partir de l'expression précédente, qui montre notamment que les termes de couplage $\eta_{xy}(\theta)$ et $\mu_{xy}(\theta)$ sont bien nuls si l'angle θ est un multiple de 90°, mais sont généralement *non nuls* si l'angle θ est quelconque.

Plus précisément, pour que ces termes soient nuls quel que soit l'angle, il faut vérifier deux conditions : les deux modules d'Young doivent être identiques et le module de cisaillement doit être égal à $G=E/2(1+\nu)$, ce qui correspond précisément à la définition d'un modèle isotrope !

II.3.2: Cas général en 3D

Les modèles anisotropes tridimensionnels sont construits selon le même principe que le modèle 2D ci-dessus. Nous présentons ici deux modèles couramment utilisés pour représenter le comportement des composites.

A : Modèle isotrope transverse

Un modèle de comportement est dit *isotrope transverse* lorsque les propriétés élastiques présentent une symétrie de révolution autour d'un axe. On distingue donc deux directions :

1-La direction de l'axe, dite *longitudinale* ;

2-Les directions perpendiculaires, dites *transversales*.

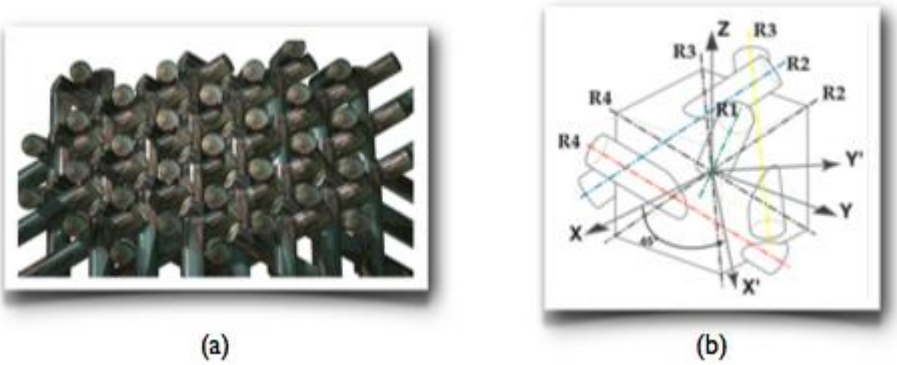
La plupart des matériaux à fibres parallèles peuvent être modélisés de cette sorte.

Un tel modèle s'écrit simplement dans n'importe quelle base ortho-normale contenant l'axe de révolution.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{TT}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{TT}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{TT})}{E_T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

B : Modèle orthotrope

On dit qu'un modèle de comportement est *orthotrope* lorsque les propriétés élastiques présentent une symétrie selon trois plans perpendiculaires. Un modèle isotrope transverse est automatiquement orthotrope (mais l'inverse n'est pas vrai) ; ces modèles sont typiquement utilisés pour les tissus 2D ou 3D orthogonaux, équilibrés ou non.



Vue des renforts schématisation

Figure 14 : Un tissu composite "4D" carbone/carbone, repère d'orthotropie.

Par exemple, la Figure 14 représente un tissu "4D" (quatre directions de fils, correspondant aux quatre diagonales d'un cube) utilisé pour réaliser un composite à fibres et matrice de carbone ; le diagramme polaire des modules d'Young apparents de ce composite est donné sur la Figure 12, dans le repère de la Figure 14(b). On observe bien les trois plans de symétrie ; les "lobes" (ou la partie représentée en perspective), correspondent naturellement à la direction des fils.

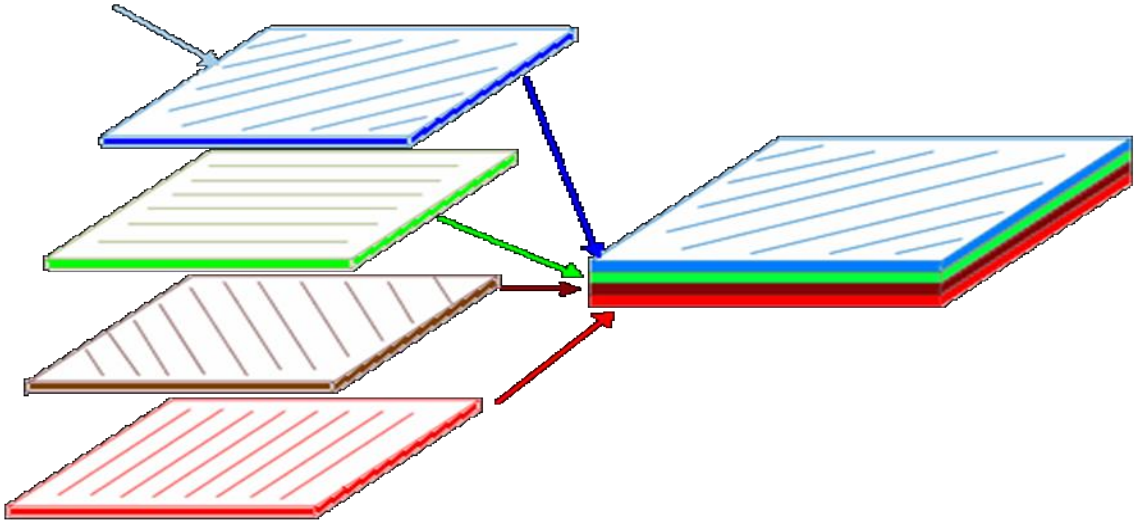


Figure 15 : Un tissu composite stratifié.

Remarque : Les laminés unidirectionnels (même orientation de matériau sur tous les plis) conviennent d'habitude pour recevoir des charges dans une seule direction. Ils sont habituellement faibles dans la direction transversale à l'orientation des plis

CHAPITRE III

Introduction aux essais mécaniques pour le collage des structures avec des composites

III.1: INTRODUCTION.

La présente étude s'intéresse à l'effet des contraintes locales sur la résistance de structures réparées par collage de patchs en matériaux composites. La réparation est effectuée à l'aide de patchs composites.

Les structures ainsi réparées sont ensuite sollicitées en traction statique et dynamique. Les essais montrent que la rupture des éprouvettes réparées est initiée par le décollement des patchs, et qu'elle est influencée par la rigidité des patchs utilisés ou la plasticité des adhésifs.

Aujourd'hui, de plus en plus de matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans les industries aéronautiques et automobiles. Comme toute structure mécanique, les structures composites peuvent être soumises à des chocs et à des impacts à basses vitesses qui sont souvent de nature accidentelle.

Dans de nombreuses applications, le coût élevé des structures stratifiées complexes ne permet pas l'échange systématique des éléments endommagés, on peut alors envisager la réparation comme une bonne alternative économique et mécanique.

Afin de rétablir au maximum les performances de la structure, tout en tenant compte des aspects pratiques et économiques, une des méthodes de réparation couramment utilisées repose sur le collage de patchs sur la partie endommagée.

La conception et la réalisation de ce type de réparation s'avèrent très complexes, car la réussite de la réparation dépend en grande partie de la bonne cohérence entre le matériau de la structure et les patchs, ainsi que de la colle utilisée. Elle dépend également de la qualité de mise en œuvre de la réparation.

Pour cela, des tests de traction quasi-statiques ont été réalisés afin de déterminer et de comparer les performances de plusieurs protocoles de réparation.

La méthode des éléments finis est utilisée enfin, afin d'identifier les zones critiques, de simuler le comportement des structures réparées et de dégager des voies d'optimisation.

Dans un premier temps, notre attention porte sur la conception des patchs de réparation. On étudie ensuite l'influence de la rigidité globale des patchs et de leur stratification sur la résistance des éprouvettes réparées. Les résultats obtenus permettent de proposer quelques réflexions pour l'optimisation de la réparation.

III.2 : LA CONCEPTION D'UN JOINT COLLÉ.

Une bonne conception des produits passera toujours par l'élaboration d'un cahier des charges, c'est-à-dire d'un descriptif aussi complet que possible des fonctionnalités attendues de l'assemblage, des contraintes de toutes natures auxquelles il sera soumis, ainsi que de l'environnement dans lequel il sera placé.

Bien sûr, s'il est évidemment important de définir avec précision la valeur des contraintes mécaniques que doit supporter un joint collé.

Les joints collés sont sujets comme nous le verrons à des forces de traction, de compression, de cisaillement, de clivage ou de pelage, et plus souvent à plus d'une combinaison entre ces efforts soit en mode statique, soit en mode vibratoire.

Les expériences aux laboratoires ont montré que des adhésifs développent de très fortes résistances au cisaillement, à la compression et à la traction. Ils le sont comparativement et malheureusement moins résistants vis-à-vis du pelage et du clivage.

En effet, le clivage et le pelage sont les efforts les plus critiques et les plus nuisibles, où la force appliquée étant concentrée sur une ligne de contrainte élevée et non pas répartie sur toute la surface collée, comme c'est le cas en traction, compression ou en cisaillement.

En pratique, et généralement, une structure collée doit résister à une combinaison de contraintes, pour ce, il convient bien entendu de concevoir un assemblage en combinant la meilleure géométrie possible du patch pour un adhésif donné et un type de sollicitation donné.

La résistance d'un joint est une fonction complexe résultant de l'équilibre entre les forces d'adhésion ou de cohésion des matériaux et du facteur de concentration des contraintes engendrées par la charge. Sachant que quant la rupture laisse une couche d'adhésif sur les deux surfaces du substrat la rupture est appelé *rupture de cohésion,* une telle rupture purement cohésive, indique que la résistance optimale des matériaux dans le joint collé a été atteinte, ce qui prouve aussi que la préparation de surface et le prétraitement ont été convenablement choisis et correctement effectués.

Le cas contraire, si la rupture a lieu à l'interface adhésif/substrat, on parle de *rupture d'adhésion.*

Mais dans la pratique, il y a plus d'un cas de figure de rupture où on peut citer :

Rupture d'un des supports à coller au delà de la surface préparée pour le collage.

Rupture de cohésion d'un support.

Rupture par délamination.

Pour ce, une meilleure répartition des contraintes étant l'un ou le premier des avantages du collage, pour ce, il est intéressant et primordial de chercher le patch avec un air de collage préparé, dimensionné et orienté dans la direction la plus favorable pour résister aux différents efforts.

III.3 : DIFFERENTS CAS D'ASSEMBLAGE DES COMPOSITES

L'assemblage des composites est rendu nécessaire pour diverses raisons et dans divers cas :

A : réalisation de pièces de grandes dimensions : des pièces qui ne peuvent pas être moulées en un seul bloc à cause de la taille limitée des équipements de fabrication (presses, autoclaves). Il faut

alors assembler dans la longueur (par exemple : ailes d'avions, coques de bateaux) ce qui peut être réalisé de différentes façons (recouvrement, profilés et encastrement, stratification et on doit faire en sorte que les assemblages travaillent alors en cisaillement ;

B : renforcement de plaques minces, planes ou courbes, par des profilés raidisseurs, on risque alors d'observer des efforts de pelage.

C : assemblages de pièces de différents matériaux : *(ex : composite sur métal),* qui est le cas de notre étude)

III.4 : PARAMETRES QUI INFLUENT SUR LA RESISTANCE DES ASSEMBLAGES

III.4.1: Paramètres matériaux

Les paramètres liés aux matériaux qui influent sur la résistance des assemblages sont :

A : La forme des renforts ;

B : Le mode de tissage des renforts (bidimensionnel, tridimensionnel)

C : La direction des renforts ;

D : Le mode d'empilement des nappes de fibres ;

E : Le pourcentage volumique de fibres.

III.4.2: Paramètres de conception

Les paramètres de conception influant sur la résistance des assemblages sont :

A : La configuration des joints ;

B : L'épaisseur des pièces ;

C : La direction des charges.

III.4.3: Modes de sollicitations mécaniques

La résistance des assemblages dépend de :

A : Le type de charges (statiques ou dynamiques) ;

B : La vitesse de variation des charges ;

C : Les types de sollicitations (cisaillement, traction, pelage, clivage, fatigue).

III.4.4: Caractéristiques de l'adhésif et du joint

Les caractéristiques de l'adhésif et du joint qui ont une influence notable sur la résistance des assemblages collés sont :

A : L'épaisseur de l'adhésif ;

B : Les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques de l'adhésif ;

C : La longueur et largeur de recouvrement ;

D : La forme du joint. *(Joint à double ou simple recouvrement, joints en biseau ou joints à étages),*

III.4.5: Environnement

Plusieurs phénomènes environnementaux influent sur la résistance des assemblages, tels que :

A : La pénétration possible de l'eau ou de l'humidité par la tranche des pièces ;

B : La chaleur ;

C : Les rayonnements UV

D : Les produits chimiques ou l'eau qui peut pénétrer dans l'adhésif ou dans le composite peut en effet réduire de 50 % la résistance mécanique du joint.

III.4.6: Effets thermiques, dilatations différentielles

Lorsque deux matériaux différents sont collés entre eux *(composite et alliage d'aluminium),* et que la température de cuisson de l'adhésif est différente de la température de service, des contraintes résiduelles sont induites dans le joint.

III.4.7: Différences de rigidité.

Une différence de rigidité entre les deux matériaux à coller modifie la répartition des contraintes. Par exemple, pour un joint à simple recouvrement, le matériau le moins rigide se déformera davantage. *(Il est toujours nécessaire d'avoir la plus grande rigidité en flexion, pour cela il faut que les fibres externes des composites soient alignées parallèlement à la longueur du joint)* clivage et pelage.

III.4.8 : La rigidité de l'adhésif.

Théoriquement, la résistance du joint collé augmente avec l'épaisseur de l'adhésif. Pourtant, les résultats expérimentaux ont toujours montré que la charge moyenne à rupture augmente puis décroît au-delà d'une certaine épaisseur jusqu'à une certaine limite. Cela s'explique par le développement des contraintes d'arrachement aux extrémités du joint, croissant avec l'épaisseur de l'adhésif, entraîne une diminution de la résistance au cisaillement.

Les études ont met en évidence qu'aux extrémités du joint, il existe des zones à très fort gradient de contraintes de pelage, accompagnant l'annulation des contraintes de cisaillement aux bords libres. Il montre par ailleurs que les ruptures du joint de colle tendent à être adhésives et non cohésives quand l'épaisseur augmente *(Ce n'est donc pas la structure interne de la colle qui s'affaiblit quand l'épaisseur croît)* : les contraintes sont d'autant plus élevées à l'interface substrat/adhésif que le joint est épais.

Quand le module de cisaillement de la colle augmente, la résistance au cisaillement diminue ; ceci pourrait être expliqué par l'augmentation des contraintes maximales adhésives des adhésifs quand leur module augmente.

III.5: LE CHOIX DU MATERIAU COMPOSITE UTILISE :

Le choix du patch *(de réparation ou de renforcement)* est primordial, sachant que suite à de nombreuse recherches il a été retenu plusieurs types de renfort dans le secteur de l'aéronautique et qui sont de type boron/époxy, et bore/époxyde.

Les laboratoires et les compagnies d'entretien et de réparation recommandaient d'employer le dernier type de renfort qui a reconnu un très grand succès dans les années 80, mais il est actuellement confronté à des études scientifiques et environnementales qui ont interdit l'utilisation des fibres de bore suite à leurs effets cancérigènes, pour ce, les études se sont retournées vers le renfort de type carbone/époxyde dans toutes les études préliminaires.

Le principal désavantage de ce type de renfort est que son coefficient de dilatation est très faible dans le sens des fibres (2,25.10−8 ◦C−1), ce qui peut provoquer des contraintes d'origine thermique assez importantes. (*Voir paragraphe : Les Autres précautions dans la préparation des surfaces à coller ; Coefficients de dilatation)*

Les propriétés du Composite de (Boron époxy) Plaque

Caractéristique	**Valeur**
Densité	1,6 g cm^{-3}
Module de cisaillement - à plat	7,2 GPa
Module de Young – longitudinal	200 GPa
Résistance au cisaillement - à plat	90 MPa

Le substrat *(Fuselages des avions)* à renforcer est en l'aluminium 2024 T3. Deux types de colle permettant de solidariser le renfort au substrat sont utilisées en pratique : la colle FM et Redux.

III.6 : MODES DE SOLLICITATIONS DANS UN JOINT COLLE.

Comme toutes structures monolithiques ou composé le joint collé peut être sollicité par des efforts donnant naissances à:

1. Des Contraintes Normaux : c'est la contrainte la plus connue, compressive soit elle ou attractive agissant directement et suivant la direction normale de la surface.

2. Des Contraintes Cisaillement : c'est le produit de deux forces égales et directement opposées, l'action de ces deux forces provoque le glissement d'un plan droit par rapport à l'autre, les charges de cisaillement se concentrent à l'extrémité d'un joint

3. Des Contraintes de pelage : Indésirables, elles se manifestent lorsqu'au moins l'un des matériaux est souple par rapport à l'autre, ils résultent de forces approximativement perpendiculaires au plan, mais confinées dans une ligne très mince au bord du joint. Quand le pelage intervient, le reste du joint ne contribue pas à la résistance. *Voir figure 17*

4. Des Contraintes de clivage : elles résultent de l'application de la force à l'extrémité d'un assemblage de matériaux comparativement rigides, elles sont similaires à des forces de traction car elles sont perpendiculaires au plan, mais elles se concentrent sur un côté du joint, le reste de la surface n'étant pas sous contrainte. *Voir figure 16*

N.B

Les contraintes les plus critiques sont ceux dues au clivage et au pelage, car on entend parler de facteur d'intensité de contraintes, où l'effort appliqué dans notre cas n'est plus reparti sur toute la surface de contact patch / substrat comme nous pouvons facilement le constater pour des efforts normaux ou de cisaillement.

Figure 16 : Le clivage

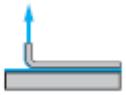


Figure 17 : Le pelage

Figure 18 : La traction

Figure 19 : Le cisaillement

III.7 : LES DIFFERENTS TYPES D'ASSEMBLAGES COLLÉS

Les divers assemblages collés employés dans le secteur de la réparation et le renforcement métallique automobile et spécialement aéronautique et spatial peuvent être classés en trois principales catégories :

• Les joints à simple et double recouvrement (single and double lap joints), figure 20, le thème de notre étude.

• Les joints massiques et annulaires en torsion (torsion butt joint and napkin ring)

• Les joints massiques sollicités en traction (butt joints).

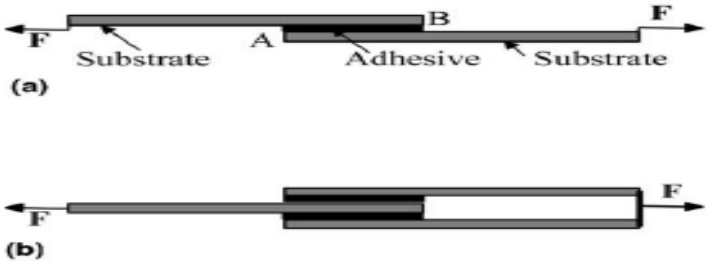
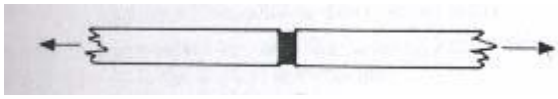


Figure 20 : Assemblage à simple et doule joints collés.

Pour atténuer les contraintes de pelage, plusieurs géométries peuvent être utilisées.

AUTRES MODES D'ASSEMBLAGE :

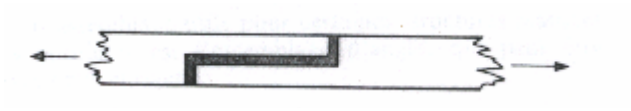
Joint en bout, bord à bord



Joint à recouvrement simple biseauté

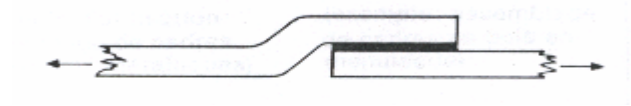
Joint biseauté en bout, enture

Joint à mi-épaisseur ou recouvrement en gradin



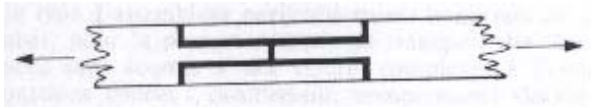
Joint à double enture

Joint embrevé ou à oreille simple



Joint bord à bord à recouvrement

Joint bord à bord à double recouvrement mi-épaisseur



Joint bord à bord à double recouvrement Symétrique

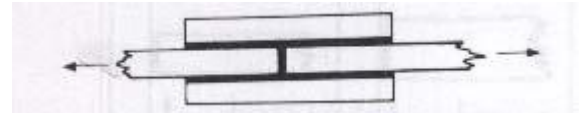


Figure 21 : Les différents types d'assemblages collés.

III.8 : CARACTERISTIQUES DE MISE EN ŒUVRE DES COLLES

IV.8.1. Épaisseur minimale-maximale

Si les deux surfaces à assembler sont parfaitement planes, on peut se limiter en général, à une épaisseur de colle de l'ordre de 0,2 mm (correspondant à 200 g/m2 pour une colle de densité 1).

Si les deux surfaces ne sont pas planes, il faut remplir le joint entre ces surfaces, ce qui peut nécessiter des épaisseurs de colles beaucoup plus importantes.

Certaines colles peuvent faire leur prise en forte épaisseur (jusqu'à 1 mm) ; c'est le cas : des colles sans solvants et sans eau, qui font leur prise par réaction chimique on peut citer :

A : colles à deux composants (époxydes, polyuréthannes) ;

B : certaines colles thermodurcissables (urée-formol spéciales pour joints épais).

D'autres colles ne peuvent faire leur prise convenablement qu'en fine épaisseur (quelques dixièmes de millimètres). C'est le cas :

A : des colles aqueuses et des colles solvantées, car il faut que l'eau ou les solvants puissent quitter le joint de colle le plus rapidement possible ;

B : des adhésifs cyanoacrylates, dont le durcissement est catalysé par des conditions alcalines sur les matériaux.

IV.8.2. Consommation ou grammage

Cette valeur correspond à la quantité de colle appliquée sur une surface donnée. On la mesure en grammes par mètre carré (ou en grammes par mètre si on applique un cordon de colle).

Pour obtenir un bon collage, il faut déposer une quantité optimale d'adhésif, c'est-à-dire ni trop ni trop peu si l'on ne met pas assez de colle, la force de collage est insuffisante, car la surface de contact entre la colle et les matériaux est trop faible ; de plus, pour des matériaux poreux et absorbants, une colle fluide risque d'être absorbée en laissant alors une couche insuffisante pour assurer un bon contact ,si on met trop de colle, cela non seulement augmente le coût, mais peut aussi perturber son durcissement ou son séchage.

La consommation varie avec la rugosité et la planéité des matériaux à coller. Si les matériaux sont très plans et lisses, la consommation sera faible (elle varie en général de 30 à 100 g/m2).

Enfin la consommation dépend aussi de la masse volumique de la colle (ρ). Pour un volume V déposé égal, une colle de masse volumique élevée entraîne une consommation c élevée suivant la relation : $c = V \times \rho$

IV.8.3. Temps de gommage, temps d'attente avant assemblage

Cette notion ne concerne que les colles qui font leur prise par séchage (colles solvantées et colles aqueuses). Le temps de gommage correspond à l'intervalle de temps que l'on doit laisser s'écouler entre le moment où l'on étale la colle sur le matériau et le moment où l'on procède à l'assemblage. Pendant ce temps, les solvants ou l'eau commencent à s'évaporer (totalement s'il s'agit d'une colle néoprène, ou en partie s'il s'agit d'une colle simple encollage).

La colle épaissit et acquiert ainsi son pouvoir collant et une cohésion suffisante pour que l'on puisse assembler, sans crainte de voir le matériau se relever.

Le temps de gommage est raccourci par la chaleur.

V.8.4. Temps ouvert

Parfois appelé temps d'assemblage ouvert, le temps ouvert correspond au temps qui s'écoule entre le moment où la colle a été étalée et celui où elle a perdu son pouvoir collant parce qu'elle a commencé à sécher, ou à s'épaissir, ou à se refroidir dans le cas d'un adhésif Thermofusibles.

Les adhésifs thermofusibles ont des temps ouverts très courts (quelques secondes).

Les colles aqueuses (vinyliques, etc.) ont des temps ouverts beaucoup plus longs (quelques dizaines de secondes voire quelques minutes).

Pour les colles à deux composants, le temps ouvert dépend de la vitesse de la réaction entre les deux composants, mais de toute façon on assemble immédiatement après encollage.

IV.8.5. Temps d'assemblage fermé

Le temps d'assemblage fermé correspond au temps s'écoulant entre la mise en contact des constituants et le pressage.

Sur les machines Hot-Melt ce temps est, en général, très court, de l'ordre de la seconde, voire moins. Il faut effectuer le pressage tant que la colle est encore collante.

IV.8.6. Tack ou adhérence immédiate

Le tack est la propriété de maintenir les matériaux ensemble, dès leur assemblage, pour qu'ils ne glissent pas, ne se déplacent pas l'un par rapport à l'autre, afin que le film de colle reste continu et immobile pendant la durée de prise et que les collages ne s'ouvrent pas.

IV.8.7. Durée de vie des structures collées

Juste après fabrication, la tenue mécanique de l'assemblage est généralement très satisfaisante. Le problème majeur est donc souvent la durabilité du joint. Les sollicitations mécaniques et environnementales (température, humidité, salinité de l'atmosphère, etc.) ont une influence considérable sur cette durabilité par exemple, la force de rupture en cisaillement d'un joint aluminium collé est parfaitement constante durant quatre années pour le joint maintenu en ambiance sèche et sans contrainte ; elle chute graduellement de 50% en quatre ans si le joint est soumis à une contrainte égale à 20% de la contrainte de rupture R σ. En ambiance chaude et humide, elle chute de 50% en une année et demie et une contrainte égale à 0.2 R σ provoque sa rupture en deux ans.

III.9 : LA CONCENTRATION DES CONTRAINTES *(MECANIQUE CLASSIQUE)*

Lorsque la limite d'élasticité est dépassée, des déformations plastiques se développent, ce qui nécessite l'utilisation des théories plus compliquées de la plasticité.

Cependant, la fatigue des matériaux ou encore la corrosion sous tension, se produisent le plus souvent à des niveaux de contrainte relativement bas où la théorie de l'élasticité est applicable.

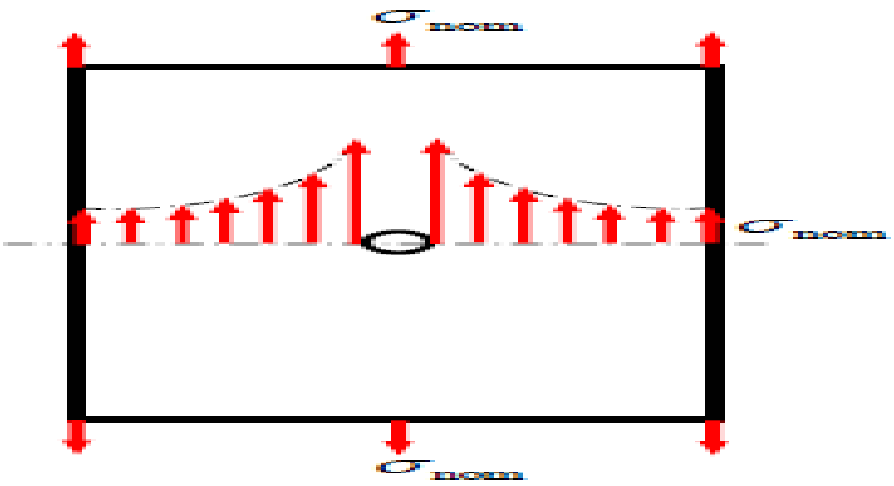


Figure 22 : Effet des fissures et comportement des contraintes.

Le facteur de concentration des contraintes est ***le rapport de la contrainte maximale (σ max) observée à la racine de l'incident de forme sur la contrainte nominale (σ nom) à laquelle la structure est soumise***. Ce facteur noté K_t, est donné par la relation :

$$K_t = (\sigma_{max}) / \sigma_{nom})$$

L'austérité et la gravite de la concentration de contraintes dépend principalement de la géométrie du défaut, fonctionnel soit il ou accidentel. Ce qui mène à chercher lors de la conception des structures à réduire autant que possible les concentrations de contraintes afin d'éviter les problèmes de rupture par fatigue et ce, bien sûre dans le cas général.

III.10 : MECANIQUE DE LA RUPTURE

Introduction

Les fissures sont présentes dans toutes les structures, elles peuvent exister sous forme de défauts de base dans le matériau ou peuvent être induites durant la construction, ces fissures sont responsables de la majorité des ruptures qui se produisent dans les structures et pièces de machines en service, soumises à des efforts statiques ou dynamiques.

La mécanique de la rupture a globalement pour objectif de prévoir le comportement des fissures susceptibles de se trouver dans tous composants industriels soumis à des sollicitations mécaniques.

La mécanique linéaire de la rupture concerne les matériaux dont le comportement est élastique linéaire. Compte tenu de cette linéarité, est de la possibilité d'appliquer les théorèmes de superposition, les calculs sont relativement simples à réaliser. Dans le cadre de travaux sur les matériaux fragiles comme le verre, les chercheurs du milieu du 20éme siècle ont ainsi pu déterminer une grandeur scalaire notée K qui caractérise les champs de contraintes et de

déformations au voisinage de la fissure. Ce paramètre a permis d'établir un critère Kc (K critique) pour déterminer l'amorçage et la propagation, il a pu être relié à l'énergie libérée par la fissure au cours de sa propagation.

Au cours des années 70, de nombreuses études ont porté sur la recherche d'un paramètre permettant d'étendre la mécanique de la rupture au comportement élastoplastique des matériaux.

Parmi les différents paramètres, l'intégrale de contour J, dont la paternité est attribuée à Rice, a connu un large succès en raison de la facilité de sa mise en œuvre et de ses propriétés numériques, à savoir une énergie obtenue par simple intégrale de contour, indépendante de celui-ci.

L'interprétation analytique de cette intégrale, a permis à Begley et Landes d'associer J à un critère d'amorçage Jc (J critique), ce paramètre de rupture a exprimé soit en termes de contraintes en pointe de fissure soit en termes d'énergie de toute la structure fissurée.

III.10.1 : Mécanique linéaire et non linéaire de la rupture

Selon le comportement du matériau durant la propagation d'une fissure, on peut être confronté à deux types de ruptures : rupture fragile, en l'absence de déformation plastique significative (mécanique linéaire de la rupture) et rupture ductile, en présence de déformation plastique non négligeable (mécanique non linéaire de la rupture).

Lorsque la rupture d'un matériau est fragile on observe généralement un site d'amorçage unique sur un défaut à partir duquel se propage une fissure principale par clivage jusqu'à la rupture de la pièce. Lors d'une rupture fragile, le comportement macroscopique du métal reste élastique. La rupture ductile dans le cas des métaux est un mécanisme d'endommagement très différent de la rupture fragile. C'est d'bord un mécanisme qui se produit lorsque le métal est macroscopiquement en plasticité.

De nombreuses cavités se développent sur des défauts. Ensuite, du fait de la déformation plastique, ces cavités grossissent puis coalescent. La rupture se produit par coalescence de micro-fissures ou de cavités.

La mécanique de la rupture se propose de décrire les étapes d'amorçage et de propagation de la fissuration. La mécanique linéaire de la rupture s'applique aux matériaux ayant un comportement élastique obéissant à la loi de Hooke. Même si des corrections liées à la présence d'une zone plastifiée près d'une zone de concentration de contraintes (entaille, fissure) ont été proposées par la suite, ces analyses reposant sur l'hypothèse que la plasticité reste confinée ne sont valables que pour des structures dont le comportement est globalement élastique. En mécanique linéaire élastique de la rupture, deux principaux critères de rupture sont utilisés, le premier proposé par Griffith (1920), est basé sur une approche énergétique, le second par Irwin (1960) , est défini à partir du champ local de contraintes à la pointe de la fissure.

III.10.2 : Modes de rupture

Mode de propagation des fissures

La progression d'une fissure plane, née et propage le long d'une interface dans le même matériau ou entre deux matériaux, au moins suivant l'un des trois modes de rupture :

Mode I : **Ouverture**, les surfaces de la fissure se déplacent dans des directions opposées et perpendiculairement au plan de fissure

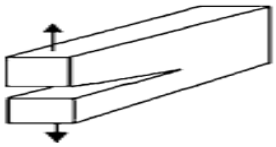


Figure 23 : Effet des fissures, Mode I : Ouverture

Mode I

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \sigma_{yy} \end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} \begin{bmatrix} 1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2} \\ \sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \frac{K_I}{2G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{bmatrix} \cos\frac{\theta}{2}\left(\chi - 1 + 2\sin^2\frac{\theta}{2}\right) \\ \sin\frac{\theta}{2}\left(\chi + 1 - 2\cos^2\frac{\theta}{2}\right) \end{bmatrix}$$

Mode II : Glissement de translation, les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de fissure ;

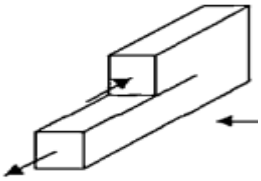


Fig 24 : Effet des fissures, Mode II : Glissement de translation

Mode II

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \sigma_{yy} \end{bmatrix} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} -\sin\frac{\theta}{2}\left(2 + \cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}\right) \\ \cos\frac{\theta}{2}\left(1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) \\ \sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \frac{K_{II}}{2G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{bmatrix} \sin\frac{\theta}{2}\left(\chi + 1 + 2\cos^2\frac{\theta}{2}\right) \\ -\cos\frac{\theta}{2}\left(\chi - 1 - 2\sin^2\frac{\theta}{2}\right) \end{bmatrix}$$

Mode III : Glissement de rotation, les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure.

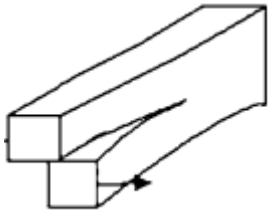


Fig 25 : Effet des fissures, Mode III : Glissement de rotation

Mode III

$$\begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} -\sin\frac{\theta}{2} \\ \cos\frac{\theta}{2} \end{bmatrix}$$

$$u_z = 2\frac{K_{III}}{G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\sin\frac{\theta}{2}$$

$$\sigma_{zz} = 0 \quad \text{en contrainte plane}$$
$$= \nu\,(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{en déformation plane}$$

(1) $G = \dfrac{E}{2(1+\nu)}$ module de cisaillement du matériau

avec E module d'Young du matériau,
ν coefficient de Poisson du matériau.

Le coefficient χ vaut : $\chi = 3 - 4\nu$ en déformation plane ;
$\chi = \dfrac{3-\nu}{1+\nu}$ en contrainte plane.

Pour les matériaux isotropes homogènes (dans notre cas les colles), un seul mode de rupture est considéré. Pour les bi-matériaux isotropes il y a un accouplement de deux modes de rupture (mode I et II) par contre dans le cas des matériaux anisotropes les trois modes sont couplés ce qui crée une complexité dans l'interprétation des contraintes et des déplacements au pointe de la fissure

III.10.3 : LES PARAMETRES INFLUANT SUR LES CONTRAINTES QUI SE MANIFESTENT DANS UN JOINT COLLE ET AINSI SUR LE COMPORTEMENT DES FISSURES :

Plusieurs études ont été menées tout en sachant que le décollement s'initie au fond d'entaille et progresse sous l'effet de la force motrice du champ de contraintes qui l'entoure, et que le FIC atteint sa valeur maximale lorsque la longueur de la fissure est de l'ordre de 2 / 5 du rayon d'entaille, l'amplification et la réduction de la valeur du facteur d'intensité de contraintes est engendré par ce qui suit :

1. Effet de l'épaisseur de la collé.

Les mêmes études nous on révélé qu'une réduction de l'épaisseur de l'adhésif entraîne un diminution de la valeur du FIC, ce qui signifie qu'une faible épaisseur de l'adhésif est recommandée pour renforcer les fissures, sachant qu'une grande épaisseur renforce l'adhésion mais réduit la capacité d'absorption des concentrations de contraintes du patch, alors l'utilisation des adhésifs de couches minces entraîne un renforcement meilleur de la fissure, et par conséquent assure sa stabilité.

D'autre part, une faible épaisseur adhésive augmente le transfert de la charge vers le patch d'un coté, et d'autre part elle augmente les risques de son détachement.

2. Effet de l'épaisseur du patch composite.

Pour ce qui est de l'effet de l'épaisseur du patch en composite sur la variation du FIC, les études ont fait connaitre que le FIC augmente considérablement avec la diminution de l'épaisseur du patch en composite. Cet accroissement est beaucoup plus marqué lorsque l'épaisseur du patch tend à une valeur égale ou inférieur à celle de la plaque réparée $(e_R / e_P \leq 1)$.

Donc une épaisseur plus importante du patch confirme que le choix du patch épais améliore les performances du renforcement, comme il est a recommandé pour une meilleure distribution des contraintes d'utiliser un patch en composite formé de plusieurs plis pour réparer les fissures.

3. Effet des l'orientation des fibres du matériau composites

Les études ont montré l'influence de l'orientation des fibres du matériau composite du patch sur la réduction du FIC où on observe La réduction de ce dernier lorsque l'orientation des fibres est perpendiculaire à l'avancée de la fissure, contrairement à son comportement, aussi intense lorsque les fibres sont disposés parallèlement a l'avancée de la fissure. Voir la figure

4. Effet de la taille de la fissure.

Enfin, il a été constaté que le FIC croit rapidement avec l'augmentation de la taille de la fissure jusqu'à une longueur $a \leq 15mm$. Ce qui implique que la réparation doit être prise en charges, préventivement, et ce, peut être en faisant des contrôles périodiques étudiés, pour les zones de l'appareil susceptibles à l'endommagement ou soumise à des sollicitations beaucoup plus fréquentes.

III.11 : ADHERENCE SUR DIFFERENTS SUPPORTS

Nous avons vu que les joints de colle peuvent être sollicités de différentes façons, comme il a été indiqué ci avant : traction, cisaillement, pelage, fluage.

L'adhérence et les autres propriétés mécaniques des adhésifs et des joints collés sont donc mesurées selon différentes techniques.

1 : Résistance au pelage

Ce test ne peut être utilisé que si l'un des deux matériaux est souple ou du moins déformable tout en supportant la force de traction.

On *pèle* un des matériaux à assembler, collé avec l'adhésif à tester sur un support adéquat tel que le verre, ou bien on sépare les deux matériaux collés et la machine de traction exercera une force constante et un déplacement des mâchoires à vitesse constante normalisée.

Il existe divers modes de pelage :

Pelage en T, lorsque les deux matériaux sont souples (figure **26 *a***) ;

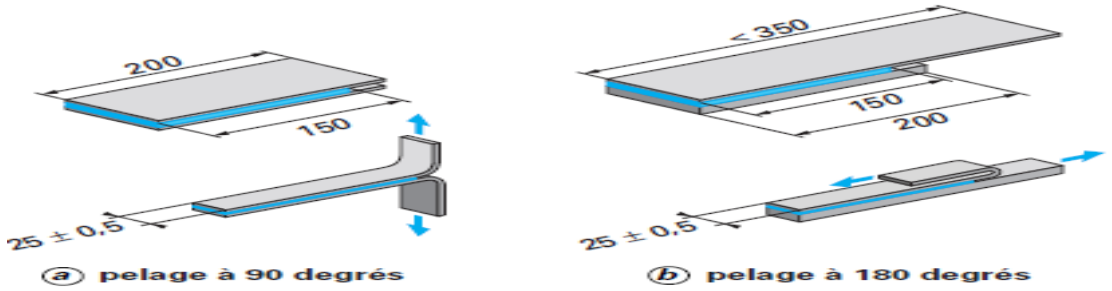
Pelage à 90°ou à 180° (figures **26 *b***) ;

Les normes décrivent la mesure de la résistance au pelage sont NF EN 2243-2, NF EN 28150-1.

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

La résistance au pelage Rp est donnée par la relation : $R_p = \frac{\text{charge à la rupture}}{\text{largeur de l'éprouvette}}$

Elle peut être exprimé en N/cm de large (ou en kg/cm).



26 : Effet des pelage des plaque collées.

2. Résistance au cisaillement

En général, les adhésifs résistent considérablement au cisaillement, contrairement au pelage et 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, puis 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.

Différentes normes décrivent la mesure de la résistance au cisaillement : NF EN 302, NF EN 1465.

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

Les colles ont des adhérences très variables sur les différents matériaux et la résistance au cisaillement peut varier, selon les matières collées, depuis des valeurs très élevées jusqu'à 0.

Tel que la une colle époxyde qui peut résister à 40 MPa en collage aluminium sur aluminium

Les tests doivent donc obligatoirement être effectués sur les matières réellement utilisées dans l'application envisagée.

Pour réaliser les éprouvettes, on doit utiliser des plaquettes suffisamment rigides. Si elles peuvent se tordre durant l'essai, le cisaillement se transforme en test de pelage beaucoup moins favorable (figure 8).Les valeurs trouvées sont alors très inférieures aux valeurs mesurées en cisaillement pur.

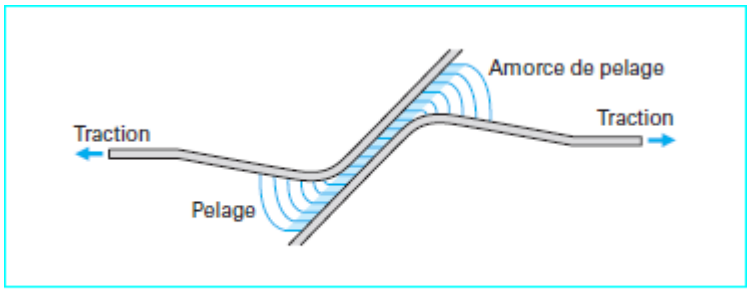


Figure 8 – Pelage lors d'un test de cisaillement (éprouvette trop souple)

27 : Effet des pelage des plaque trop souples collées.

3. 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. Pour que le test de résistance à la traction soit valable, 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.

Quelques données sur différents types d'adhésifs et différents mode de sollicitations

Adhésif	Substrat	Applications	Résistance en cisaillement (MPa)	Résistance au pelage (N/mm)	Résistance au vieillissement	Résistance en température (°C)	Remarques
Thermo-fusibles	Plastiques, métaux, bois	Emballage, positionnement	2 à 5	2 à 6	Bonne inertie chimique	60 à 80	
PSA sensible à la pression	Tous matériaux	Bâtiment, emballage	0,2 à 1,5	4 à 6	Tenue à l'eau médiocre	60 à 120	Mauvais comportement au fluage
Polyuréthanes structuraux	Tous substrats	Collages structuraux	8 à 20	4 à 8	Certains sont sensibles à l'eau	80 à 100	Formulation très étendue
Epoxydes mono- ou bi-composants	Tous matériaux	Collages structuraux, réparation	30 à 40	3 à 4	Bonne résistance chimique	Jusqu'à 150	Adhésifs structuraux, faible résistance au pelage
Acryliques bicomposants	Métaux, plastiques	Mécanique, aéronautique	10 à 30	1 à 5	Bonne résistance	60 à 100	Structuraux à prise rapide, cassants à basse température (– 40 °C)

III.12. LES METHODES DE CALCUL

Les méthodes de calcul sont issues des différentes approches analytiques et théoriques, elles concernent les assemblages plans *(à simple recouvrement sollicités en traction et à double recouvrement sollicités en traction ou cisaillement),* les assemblages cylindriques sollicités en traction ou torsion.

Le comportement des adhésifs est assimilé à un comportement purement élastique et dans le cas des assemblages plans il peut aussi être assimilé à un comportement élasto-plastique, par l'utilisation de critères de rupture *(contrainte ou déformation maximale admissible par l'adhésif)*.

Parmi ces théories nous pouvons citer la théorie de Volkersen.

1 : Analyse de Volkersen (1938)

L'état de contrainte dans un joint collé à simple recouvrement. Volkersen considère que l'adhésif et les substrats sont parfaitement élastiques et isotropes. Il néglige les contraintes de cisaillement dues à la flexion des substrats, supposés alors travailler en contraintes planes, et, s'intéresse à la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche de colle, où il obtint la répartition suivante pour une jonction équilibrée :

$$T(x) = 0.5\frac{\eta_V}{b}\frac{\cosh(\eta_V(0.5L - x))}{\sinh(0.5\eta_V L)}f \qquad \text{Où,} \qquad \eta_V = \sqrt{\frac{2G}{ee_1E_1}}$$

Il montre alors que la contrainte de cisaillement est maximale au bord du joint et minimale au centre selon la figure (cf. Fig. 28).

En notant T_{moy}, la contrainte de cisaillement moyenne appliquée, la contrainte maximale T_{max} s'écrit :

$$T_{max} = \frac{\eta_V L}{2\tanh(\eta_V L)}T_{moy} \qquad \text{Où,} \qquad T_{moy} = \frac{f}{bL}$$

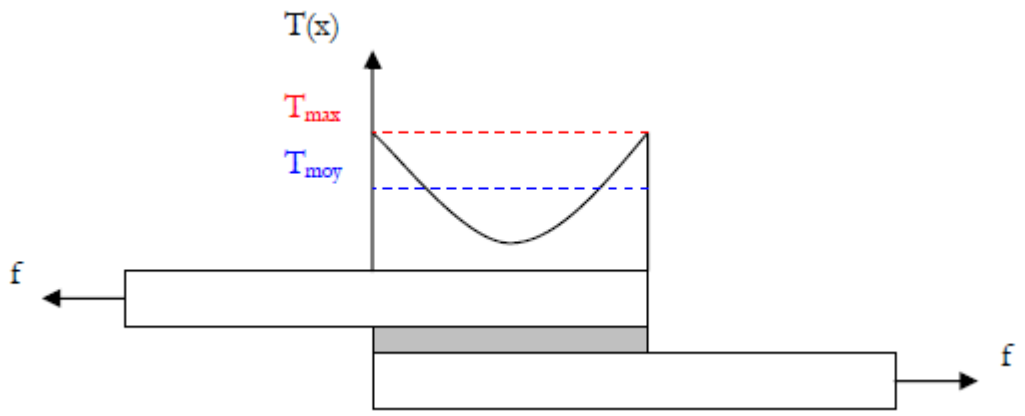


Fig. 28 : Répartition des contraintes de cisaillement

Ce qui nous permettrais de constater que :

$$\eta_V L << 1 \text{ implique } T_{max} = T_{moy} \text{ et } f_{critique} = bLT_{moy}$$

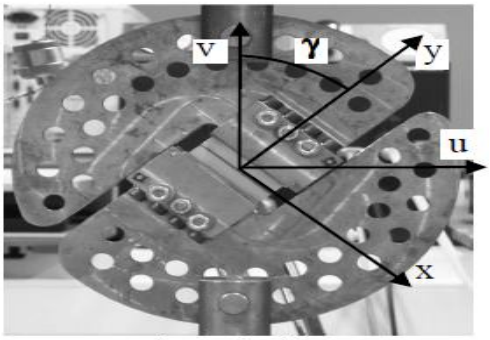
$$\eta_V L >> 1 \text{ implique } T_{max} = \frac{\eta_V L}{2} T_{moy} \text{ et } f_{critique} = \frac{2b}{\eta_V} T_{moy}$$

D'où on remarque que pour $\eta_V L >> 1$ la charge critique ne dépend plus de la longueur de recouvrement, et il existe donc une longueur optimale, $L_{opt} : 2/\eta_V$

Cette théorie implique la présence de fort gradient de contraintes au bord libre du joint collé.

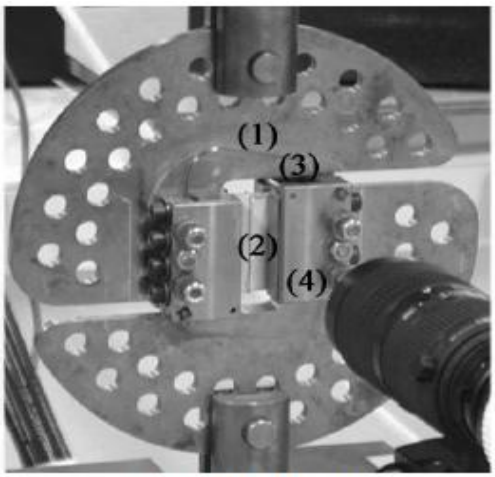
2 : Essai Arcan :

Afin d'étudier le comportement de l'adhésif sous différentes sollicitations simples et complexes, un système de fixation de type ARCAN a été développé par Cognard et Al. Ce dispositif, qui s'adapte sur une machine de traction universelle permet de combiner les composantes de traction ou compression aux composantes de cisaillement.



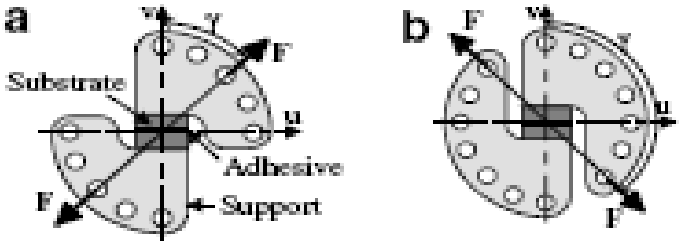
Traction-cisaillement

Fig. 29 : Dispositif ARCAN pour un essai de cisaillement traction.



Cisaillement

Fig. 30 : Dispositif ARCAN pour un essai de cisaillement.



Efforts de traction –cisaillement Efforts de compression -cisaillement

2.1 : Essai de traction-cisaillement

Pour caractériser le comportement d'une colle dans un assemblage jusqu'à rupture, en tenant en compte l'influence de la contrainte normale et de la contrainte de cisaillement, ce dispositif de type Arcan permet de limiter fortement les effets de bord par l'utilisation de becs et de maîtriser la répartition des contraintes dans le joint de colle.

Ce dispositif permet aussi d'analyser le comportement d'adhésifs dans un assemblage pour une large plage de chargements radiaux de traction/compression-cisaillement ; en particulier, il permet de déterminer l'enveloppe de rupture de la colle pour des contraintes normales et contraintes tangentielles.

Les Figures 31 & 32 présentent des résultats obtenus pour des essais de cisaillement pur ($\gamma = 90°$) et pour des essais de traction (arrachement) dans la direction normale au plan moyen du joint de colle ($\gamma = 0°$) pour des éprouvettes et une épaisseur de joint de colle de l'ordre de 0,4 mm.
Les résultats sont présentés en utilisant les contraintes moyennes de cisaillement ou de traction en fonction des déplacements relatifs tangentiels et normaux (respectivement DT, DN) et de l'épaisseur du joint de colle Ep.

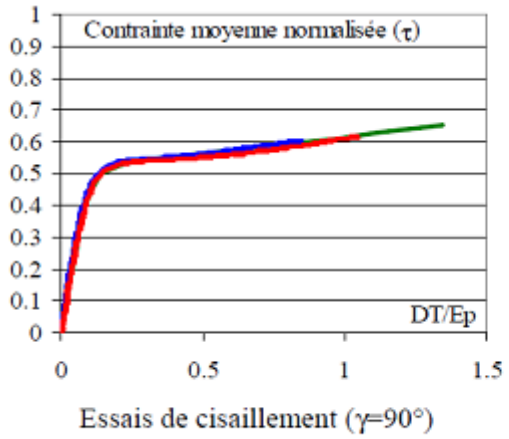


Fig. 31

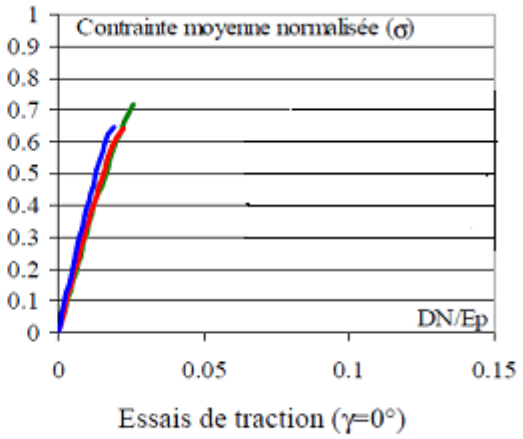
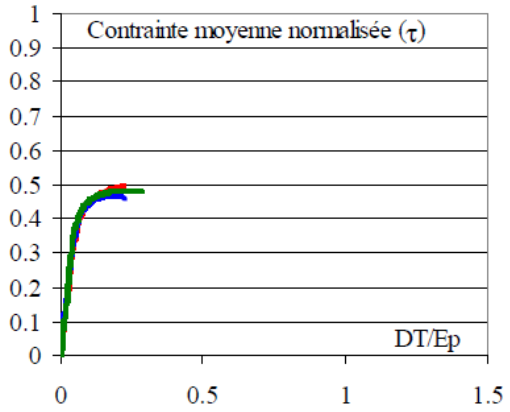
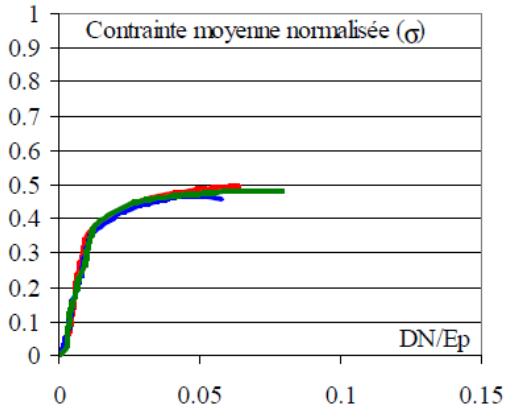


Fig. 32

Remarquons que pour la sollicitation de traction, les déformations du joint de colle sont beaucoup plus faibles qu'en cisaillement, ce qui implique que le mode de rupture a aussi une influence.

Les Figures 33 & 34 présentent aussi des résultats pour des essais de traction-cisaillement ($\gamma = 45°$) et de compression cisaillement ($\gamma = 135°$), voir les figures 35 & 36.

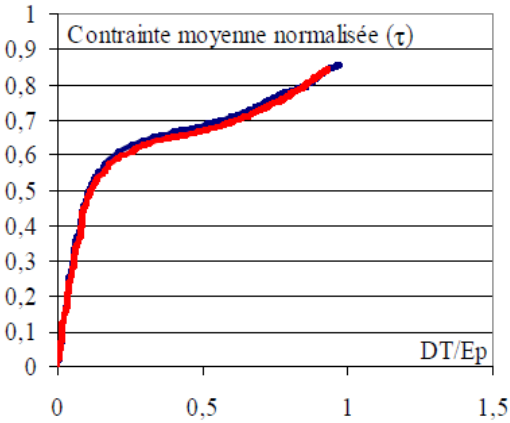


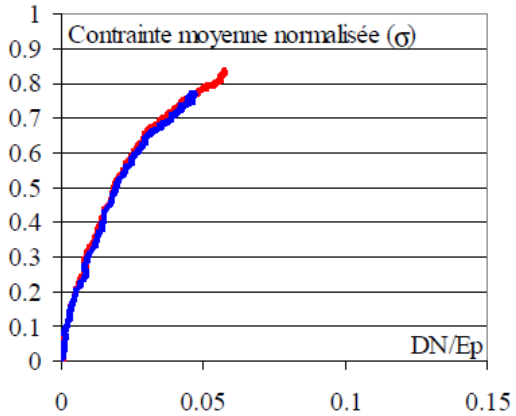


Essais de traction-cisaillement (γ=45°)

Figure 33

Figure 34





Essais de compression-cisaillement (γ=135°)

Figure 35

Figure 36

Remarquons aussi que pour la sollicitation de traction, les déformations du joint de colle sont beaucoup plus faibles qu'en compression.

Pour simplifier la présentation des résultats, les contraintes moyennes et déformations moyennes sont représentées avec des valeurs positives. De plus, il est important de noter la différence importante des déformations dans la direction tangentielle et dans la direction normale.

Ces résultats soulignent quelques points du comportement complexe d'une colle dans un assemblage, bien sur, en négligeant les effets de bord qui sont à l' origine de grandes contraintes selon la majorité des études, spécialement expérimentales.

3 : Essai Arcan Modifié

Ce dispositif permet de déterminer le comportement d'assemblages mixtes composite métal mais aussi de tester jusqu'à rupture le composite seul sous divers chargements. La conception de ce dispositif s'est appuyée sur une étude numérique qui a permis, de définir une géométrie de l'assemblage pour limiter les effets de bord en vue d'obtenir des résultats expérimentaux les plus

fiables possibles. Concernant la problématique du chargement et les besoins industriels il y eu deux types de dispositions:

-Caractériser un assemblage pour une procédure de fabrication donnée définie avec un joint de colle pouvant être à l'origine de la rupture mais tout en cherchant néanmoins à augmenter au mieux la résistance de l'assemblage.

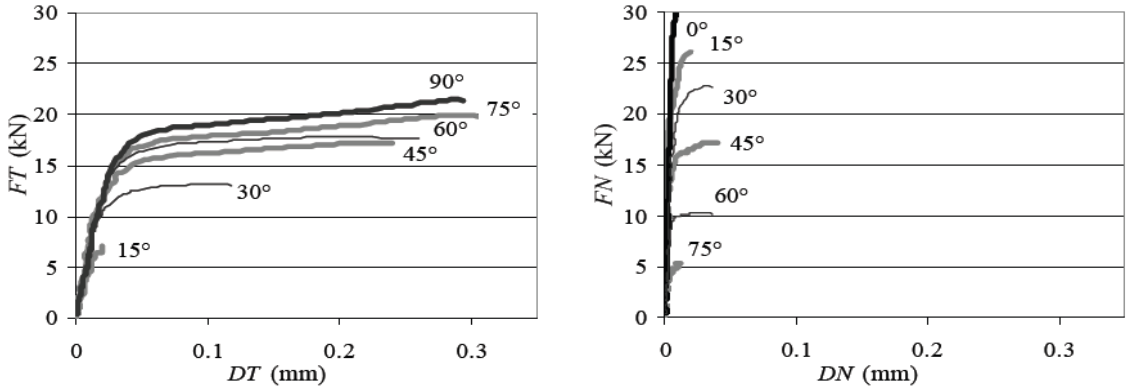
-Chercher, à l'aide d'un assemblage collé, à déterminer soit la résistance à rupture des composites ou bien le comportement de l'assemblage collé, pour optimiser la conception de l'assemblage.

Le choix de la colle et de la procédure de collage sont des éléments importants à prendre en compte dans l'étude.

3.1 : Essais arcan modifié pour une vitesse (*V*=0.5 mm/min)

La Figure ci-dessous présente les courbes effort-déplacement dans les directions normales et tangentielles du comportement du joint de colle pour différents angles (γ) sous des chargements monotones à une vitesse de déplacement donnée de traction (V = 0.5 mm/min). Une différence significative est observée dans la direction tangentielle DT pour γ ≥ 30°.

Il convient de noter que le comportement normal du déplacement relatif (DN) de l'adhésif est nettement inférieur à celui du déplacement relatif tangentiel (DT).



(a) déplacement tangentiel *(b) déplacement normal*

Fig. 37. Résultats expérimentaux pour des essais de traction-cisaillement pour différents angles et des Chargements monotones V = 0.5 mm/min.

3.2 : Essais arcan pour une large gamme de vitesse à chargement monotones.

Pour les adhésifs testés, les étudiés ont montré le même phénomène. Différents essais ont été réalisés pour des chargements monotones afin de caractériser le comportement non linéaire de l'adhésif sous chargements de traction-cisaillement pour une grande gamme de vitesses de déformation pour trois types d'essais :

01 : Traction (γ =0°) ;

02 : Traction-cisaillement (γ =45°) ;

03 : Cisaillement (γ =90°).

Les quatre vitesses de déformations ont été utilisées pour caractériser le comportement de l'adhésif : *V*=0.01 mm/min, *V*=0.05 mm/min, *V*=0.5 mm/min et *V*=10 mm/min.

Deux principaux phénomènes peuvent être soulignés :

a- l'écart important entre les déplacements relatifs dans les directions normale (*DN*) et tangentielle (*DT*), ce rapport peut atteindre un rapport de dix pour cent pour les essais de traction-cisaillement.

b- L'augmentation de la limite d'élasticité apparente lors d'une augmentation de la vitesse de sollicitation. Ces phénomènes visqueux semblent être similaires pour les différents angles de chargement γ.

Ces résultats expérimentaux mettent en évidence **le comportement non linéaire des colles pour différents modes de chargement et différentes vitesses de sollicitation**.

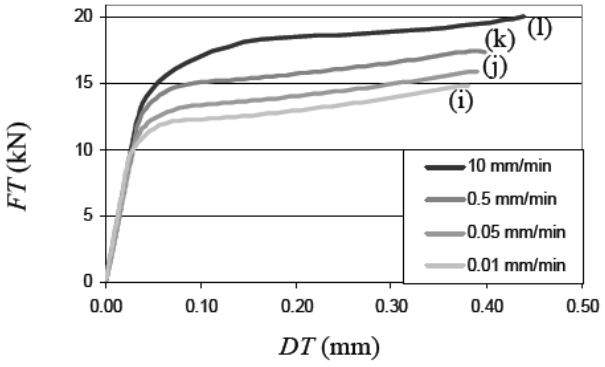


Fig.38 : Déplacement dans la direction tangentielle
Essais de cisaillement (γ =90°)

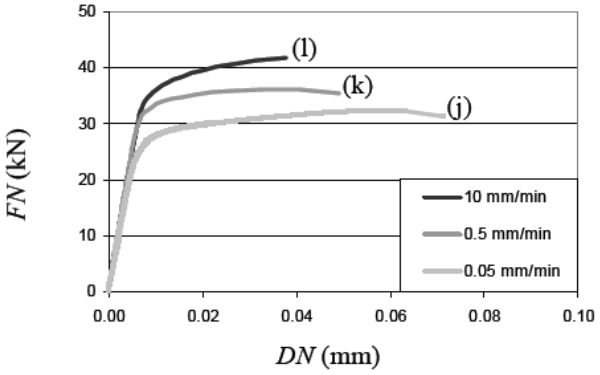


Fig.39 : Déplacement dans la direction normale
Essais de traction (γ =0°)

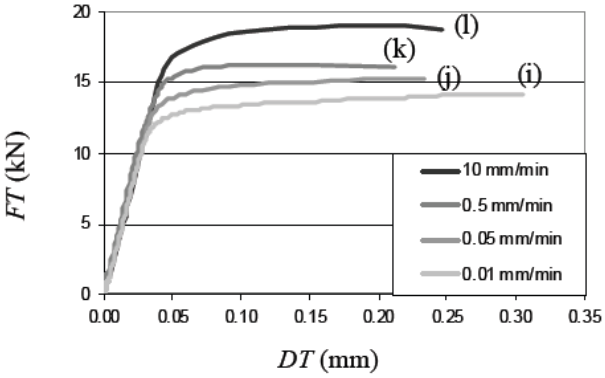


Fig.40 : Déplacement dans la direction tangentielle
Essais de traction-cisaillement (γ =45°)

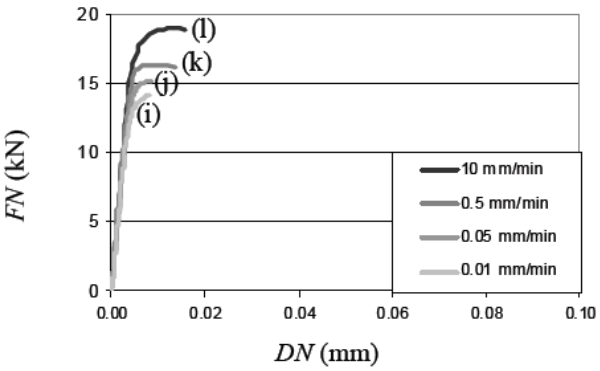


Fig.41 : Déplacement dans la direction normale
Essais de traction-cisaillement (γ =45°)

3.3 : Essais arcan pour de vitesse à chargement de traction.

Des études similaires ont été mènes sur les adhésifs et des éprouvettes en matériaux composites dans le but de connaitre le comportement de chacun des composants ,puis en assemblage en simple joint collé ou la figure ci-dessous présente la répartition des contraintes équivalentes dans

la colle et dans le composite pour des sollicitations de traction (γ = 0°), traction-cisaillement (γ = 45°) et cisaillement (γ = 90°) pour des substrats avec bec, a = 30°; des joints de colle fins, h = 0.2 mm; des plaques composites de faible épaisseur, H = 1 mm, et avec D = 5 mm.

Ces résultats montrent la limite d'élasticité est obtenue en premier dans le composite. Et que l'utilisation de joints de colle très fins entraîne effectivement une augmentation de limite d'élasticité et assure un comportement plastique du joint adhésif avant d'atteindre la sa rupture.

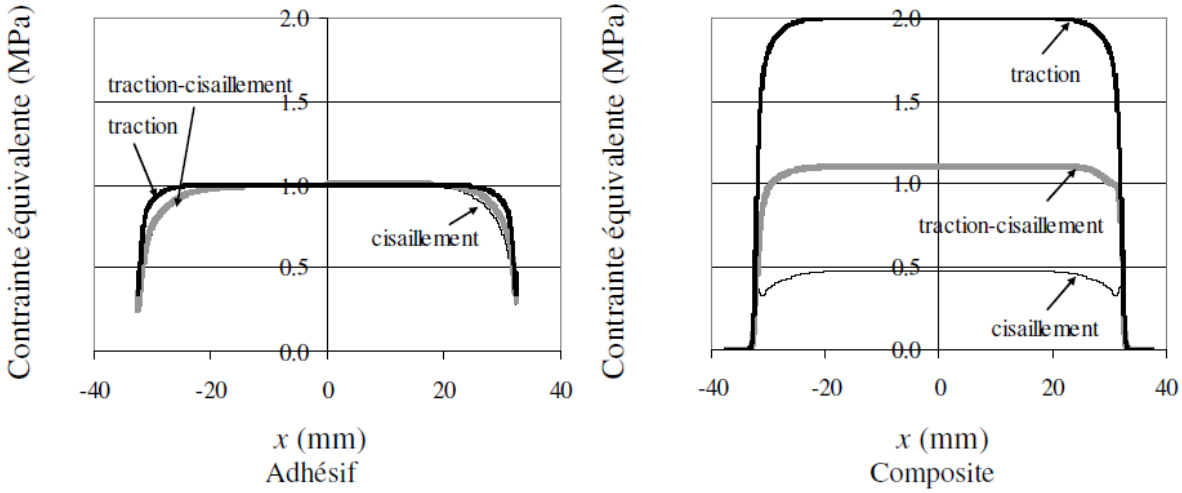


Fig. 42. Distribution des contraintes équivalentes dans l'adhésif et le composite sous chargement de traction (γ= 0°), de traction-cisaillement (γ = 45°) et de cisaillement (γ = 90°) ;
Joint de colle de 0.2 mm d'épaisseur ;
Plaques composites de 1 mm d'épaisseur.

4 : Essai Tast

L'essai TAST est un dispositif similaire au premier procédé et il permet d'analyser le comportement d'un joint de colle dans un assemblage sollicité en cisaillement (ASTM D5656-95).

C'est une mise en œuvre relativement facile à partir d'une machine de traction, mais il a été montré que la présence d'effets de bords importants pouvait avoir une influence sur l'analyse des résultats expérimentaux.

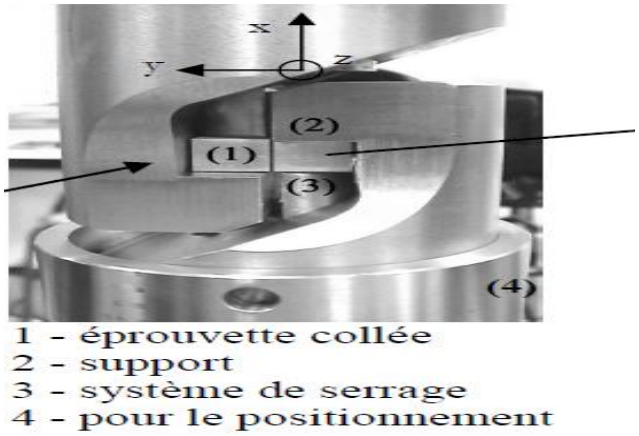


Fig.43 : Dispositif TAST

Alors afin d'obtenir des résultats expérimentaux plus fiables sur le comportement de la colle sous des sollicitations de cisaillement, le montage TAST peut être mis en application, et afin de limiter les effets de bords des becs sont d'une part usinés dans les substrats, proche de la surface de collage, et d'autre part un support rigide a été proposé pour limiter l'influence de la flexion du montage. De plus, un avantage supplémentaire de cet essai est associé aux petites dimensions des éprouvettes collées utilisées section nominale du plan moyen du joint de colle est de S_{min} = 10 x 25 mm^2 et les substrats ont une hauteur de 10 mm, (contrairement au dispositif Arcan).

Les premiers résultats obtenus à partir d'un dispositif prototype sont prometteurs. De plus, ce dispositif est bien adapté à l'étude de l'influence du vieillissement de colle ; en effet, il utilise des petits échantillons pouvant être découpés facilement dans des plaques collées ayant été exposées à un vieillissement. Pour cet essai, le déplacement relatif des substrats est analysé par corrélation d'images permettant ainsi d'obtenir une information sur la déformation du joint de colle (DT/EP), DT représente le déplacement relatif des deux extrémités du joint de colle et EP, représente l'épaisseur du joint de colle. La figure 7 présente des résultats pour la colle considérée en utilisant la contrainte moyenne pour simplifier la présentation ; les essais ont été réalisés avec une épaisseur du joint de colle de 0,2 mm.

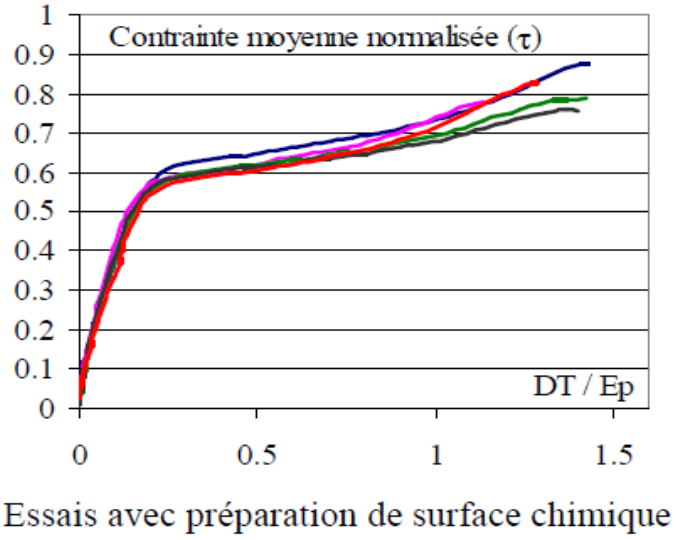


Fig.43 : Distribution des contraintes suivant le Dispositif TAST

Remarque :

Une comparaison des résultats en cisaillement pour plus d'un essai et pour ces deux dispositifs d'essais a montré des différences. Une analyse fine de l'essai TAST a fait constater que les effets de bord sont très importants. L'utilisation de la démarche de conception du montage Arcan (limitation des effets de bord et maîtrise de la répartition des contraintes dans le joint de colle) a permis de proposer des modifications de l'essai TAST permettant une analyse plus « fiable » du comportement de la colle.

CONCLUSION:

Nous avons remarqué que les études menées jusqu'à nos jours, montrent que pour des efforts ou des contraintes donnés ***f****, d'intensité de (X) MPa, qu'au niveau des essais de traction, le déplacement normal est insignifiant et il n'a pas pu atteindre le quarantième pour cent de l'épaisseur de la colle.*

L'assemblage atteindre la limite rupture, et cède, dans une petite zone à comportement linéaire.

Dans les mêmes essais, pour des intensités amplifiées de contraintes de cisaillement, ont donné naissance à une zone élastoplastique pour un déplacement tangentiel 40 fois plus important que celui dans la direction normale.

D'autre part, il a été clairement vu et constaté qu'au niveau de l'essai de cisaillement pur (γ= 90°) nous remarquons deux zone de comportement :

Le premier linéaire élastique.

Le second non linéaire (élasto-plastique) ou le déplacement transversal a pu dépasser et largement la borne du déplacement normal et atteindre le seuil de l'épaisseur de la colle avant de voir naitre la zone de rupture, mais pour une contrainte moins intense.

A cet effet, nous constatons que la plasticité de l'adhésif intervient comme un défaut nuisible) retardant la rupture du joint de colle, quelque soit le mode de chargement ou la vitesse de sollicitations, mais en réalité l'endommagement est un fait réel, nuisible et que la plasticité de la colle en est la cause et dès son appariation, elle annonce la rupture du joint collé.

CHAPITRE VI

Calcul et analyse des résultats

VI.1 : Réparation des fissures par patch composite :

Dans la plupart des réparations, l'utilisation de patch unidirectionnel est optimal, car il fournit l'efficacité la plus élevée du renfort, dans la direction de chargement et minimise la rigidité inutile dans d'autres directions.

L'inconvénient principal des patchs en composite résulte de la différence des coefficients de dilatation thermique entre le composite et le métal, d'où la création des contraintes résiduelles.

Les contraintes résiduelles ainsi installées, sont de tension dans le métal à réparer qui est dans notre cas l'aluminium 2024 T3 et de compression dans le composite qui est dont notre cas le Boron/époxy.

Ces contraintes sont particulièrement nuisibles et préjudiciables, quand les températures de traitement ou d'élaboration et de fonctionnement des adhésifs sont largement déférentes.

Ces contraintes augmentent avec l'augmentation de l'écart entre les coefficients de dilatation thermique du substrat et du patch. Ou l'utilisation d'un patch unidirectionnel en matériaux composite peut entraîner un niveau très élevé des contraintes résiduelles lorsqu'il est collé à l'aluminium.

Pour ce, et afin de contrecarrer ce phénomène, il ya lieu de procéder à la réduction de plus d'une façon de contraintes résiduelles dans une réparation :

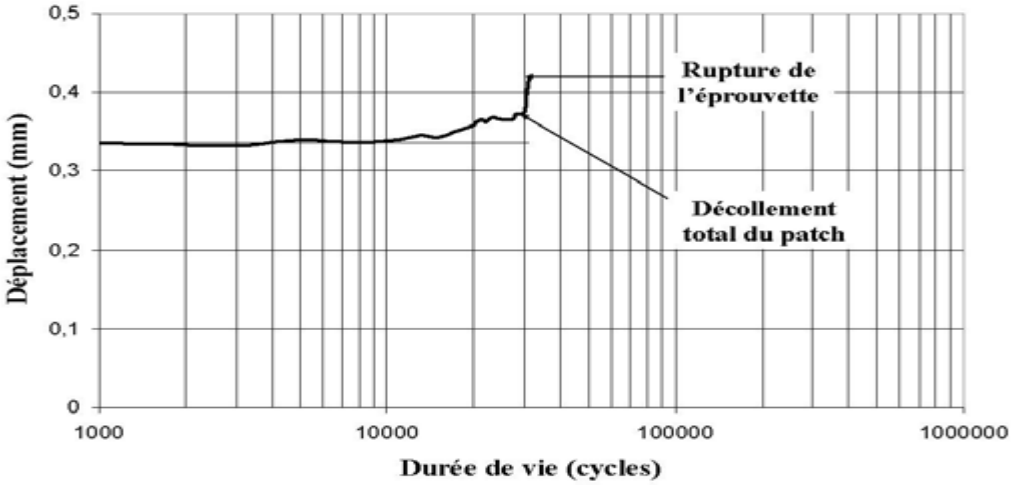
- Choisir un patch qui à un coefficient de dilatation plus proche que le substrat aluminium.
- La réduction de la température de polymérisation des adhésifs de manière à maintenir les niveaux de contraintes résiduelles aussi bas que possible en choisissant des colles qui travaille à de faibles températures.

La qualité de la tenue en fatigue de la partie réparée est limitée par celle de la colle qui est souvent le point faible dans un assemblage car elle engendre le détachement du renfort composite.

VI.2 : Les contraintes de cisaillement dans la colle

La colle en sa qualité d'un matériau polymère, sa tenue en fatigue est limitée et la tenue de l'assemblage en dépond essentiellement. Il apparait donc primordiale de déterminer la contrainte de cisaillement dans la colle puis de comparer cette valeur à la résistance à la rupture de la colle pour pouvoir choisir une colle avec des paramètres mécaniques et intrinsèques adéquats.

Les figures ci dessous représentent l'élongation d'une éprouvette au cours des essais de fatigue pour deux niveaux de contraintes différents, où on remarque que l'augmentation de la contrainte entraîne le décollement total du patch, d'où en enregistre l'effet de **l'intensité de contrainte** sur la tenue de l'assemblage collé.



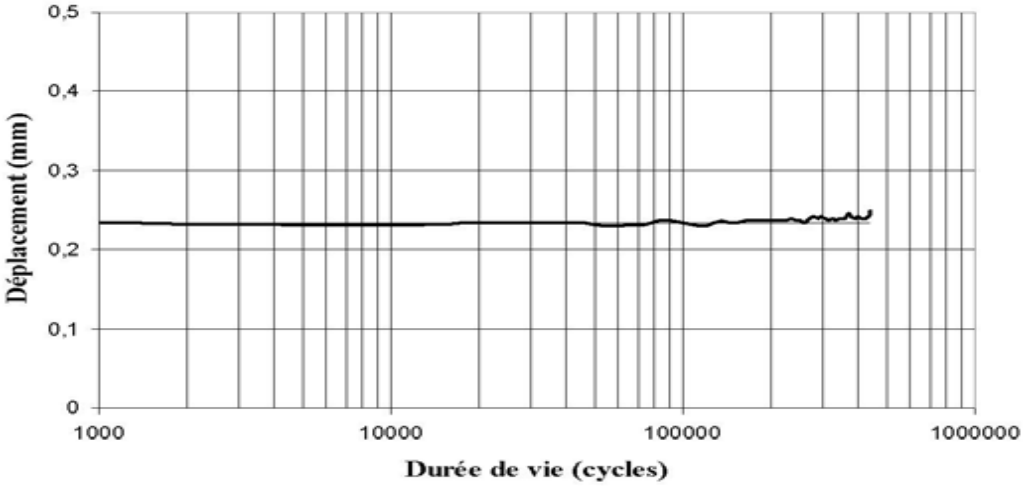
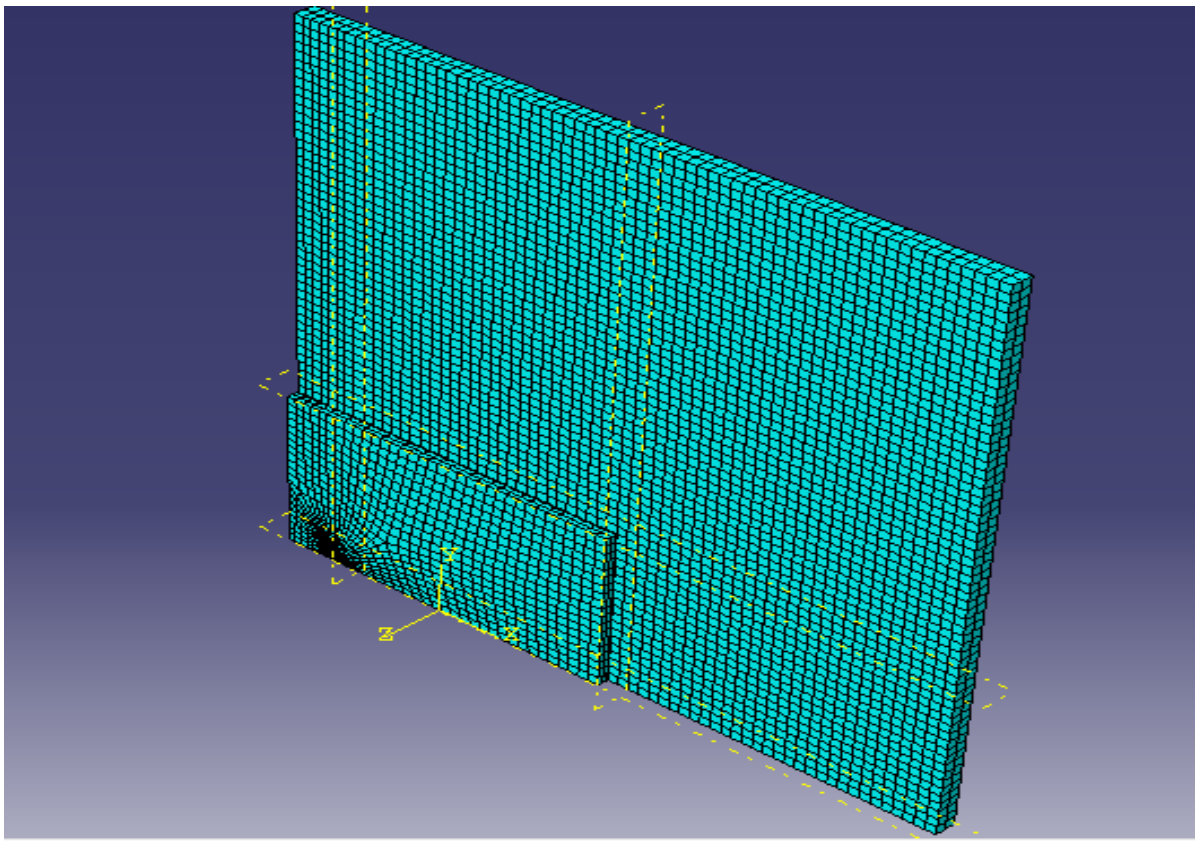


Fig.44 : Elongation de l'éprouvette au cours des essais de fatigue pour deux niveaux de contraintes 195 MPa et 280 MPa.

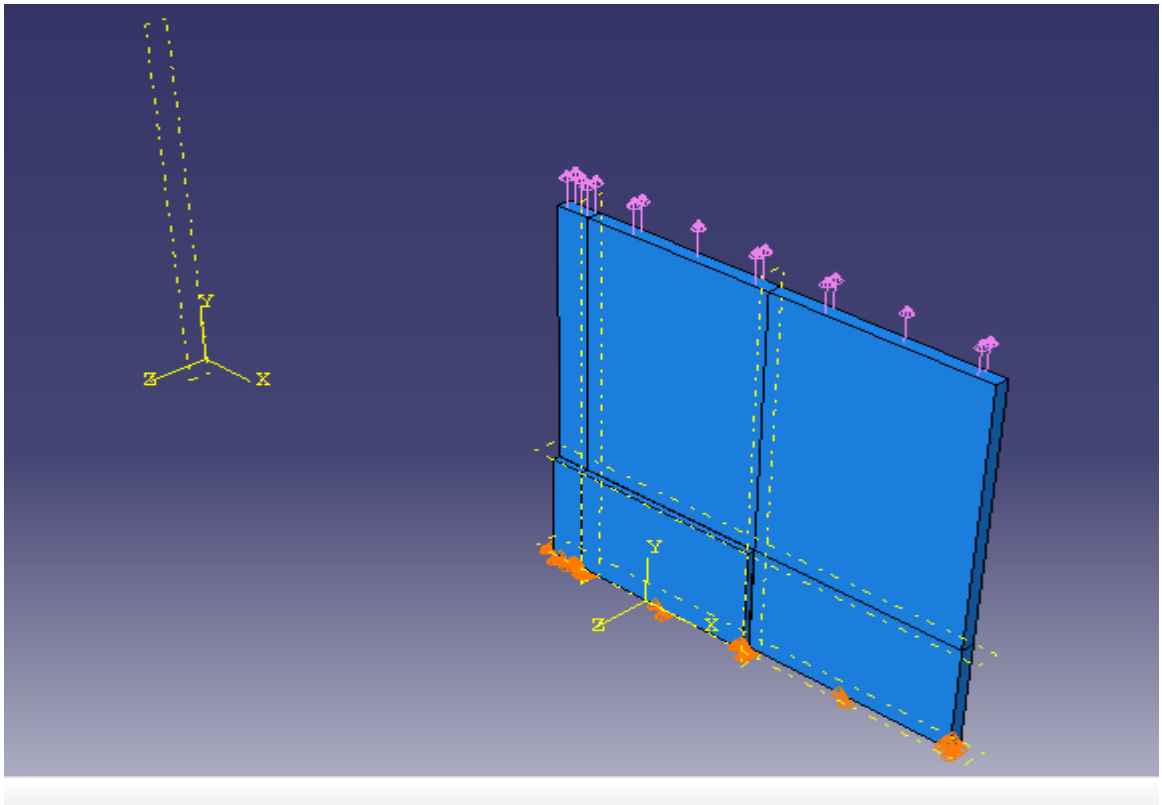
Les colles travaillent principalement en cisaillement, en particulier celles qui pourraient tenir à plus de 80 MPa.

Les éprouvettes en aluminium renforcées par des patchs composites soumises à une contrainte de traction de 195 MPa, la colle tenait (car on n'atteignait pas la contrainte à rupture en cisaillement dans la colle) et que pour les essais à 280 MPa, les éprouvettes cassaient de façon prématurées car la contrainte à rupture en cisaillement de la colle était atteinte.

Attention il ne faut pas confondre les contraintes appliquées dans l'alu (280 MPa ou 195 MPa) et les contraintes à rupture en cisaillement supportées par la colle (environ 100 MPa)



Le model géométrique et maillage choisis pour la plaque aluminium, la colle et le patch composite.



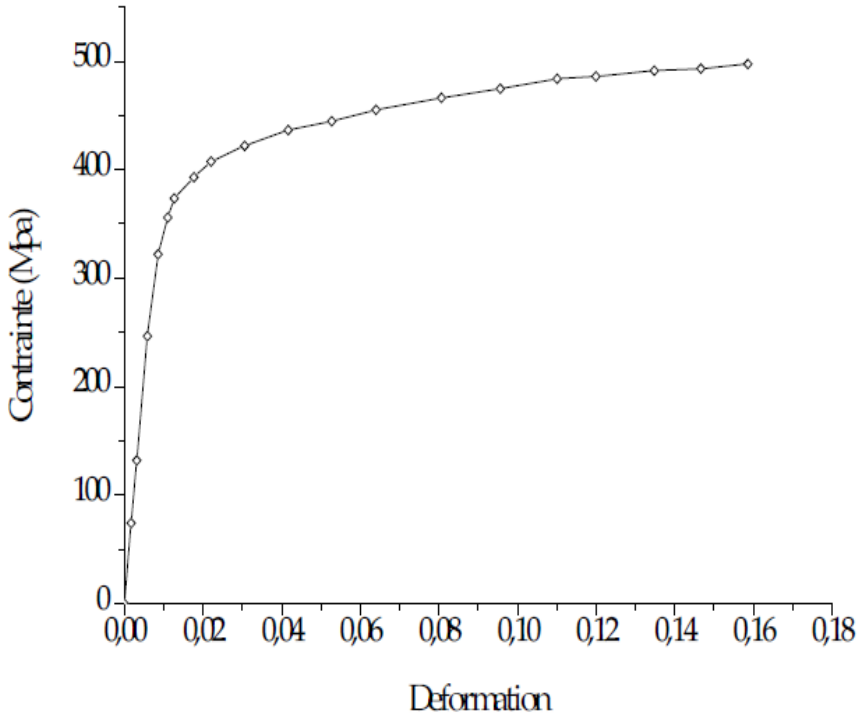
Conditions aux limites et charges appliquée

VI.3 : Modèle géométrique pour un calcul numérique.

Le modèle géométrique étudié dans notre cas se compose de :

VI.3.1 : Une plaque est en aluminium 2024 T3 comportant une fissure centrale de taille 2a et réparée par un patch en matériau composite. Les caractéristiques mécaniques de cette structure sont regroupées sur le **tableau1**. Elle est caractérisée par ses dimensions : hauteur H = 254 mm, sa largeur L = 254 mm et son épaisseur Ep= 4mm.

Sur la figure 44 est représentée la variation de la déformation de cette plaque en fonction de la contrainte appliquée en tension.



La figure 44 : Courbe de contrainte-déformation en traction pour l'Aluminium 2024T3

Tableau 01 : Propriétés mécaniques de la plaque Al 2024 T3

Module de Young longitudinal	E1 :72 GPa
Module de Young transversal	E2 : 72 GPa
Coefficient de Poisson longitudinal	ν12 :0.30

VI.3.2 : Un patch en matériau composite boron-époxy de dimensions Hc = 75 mm, Lc = 130 mm et Epc = 2 mm. Les propriétés mécaniques de ce matériau de réparation sont illustrées sur le **tableau 02.** Les renforts du composite sont orientés suivant la longueur de la plaque et dans une direction parallèle au chargement.

Tableau 2 : Propriétés mécaniques du patch composite : Boron / époxy

Module de Young longitudinal	E1 :200 GPa
Module de Young transversal	E2 : 25 GPa
Module de Young transversal	E3 : 25 GPa
Coefficient de Poisson longitudinal	ν12 :0.21
Coefficient de Poisson transversal	ν13 : 0.21
Coefficient de Poisson transversal	ν23 :0.21
Module de cisaillement	G12 : 7.2 GPa
Module de cisaillement	G13 : 5.5 GPa
Module de cisaillement	G23 : 5.5GPa

VI.3.3 : Une colle.

La plaque endommagée et le matériau composite (patch) sont conjointement liés entre eux à l'aide d'une colle (adhésif) type FM 73. L'épaisseur de collage est de 0.2 mm. Cette colle set caractérisée par son module de Young 2010 MPa et son coefficient de paisson ν =0.43

L'ensemble est soumis à des efforts de traction uni-axiale. Les contraintes et les déformations obtenues à partir de ces efforts sont données par le tableau 3. **La figure 45** montre la relation contraintes-déformation de cette colle.

Contraintes (MPa)	40.79121	41.54565	41.97639	42.40712	42.83786	43.2686	43.69933	44.13007	44.56081
Déf. plastique (mm)	0	0.00045	0.00091	0.00136	0.00181	0.00226	0.00272	0.00317	0.00362

Contraintes (MPa)	44.99154	45.42228	45.85302	46.28375	46.71449	47.14523	47,57596	48.0067
Déf. Plastique (mm)	0.00408	0.00453	0.00498	0.00543	0.00589	0.00634	0.00679	0.00725

Tableau 03 : Déformations résultant des efforts mécaniques

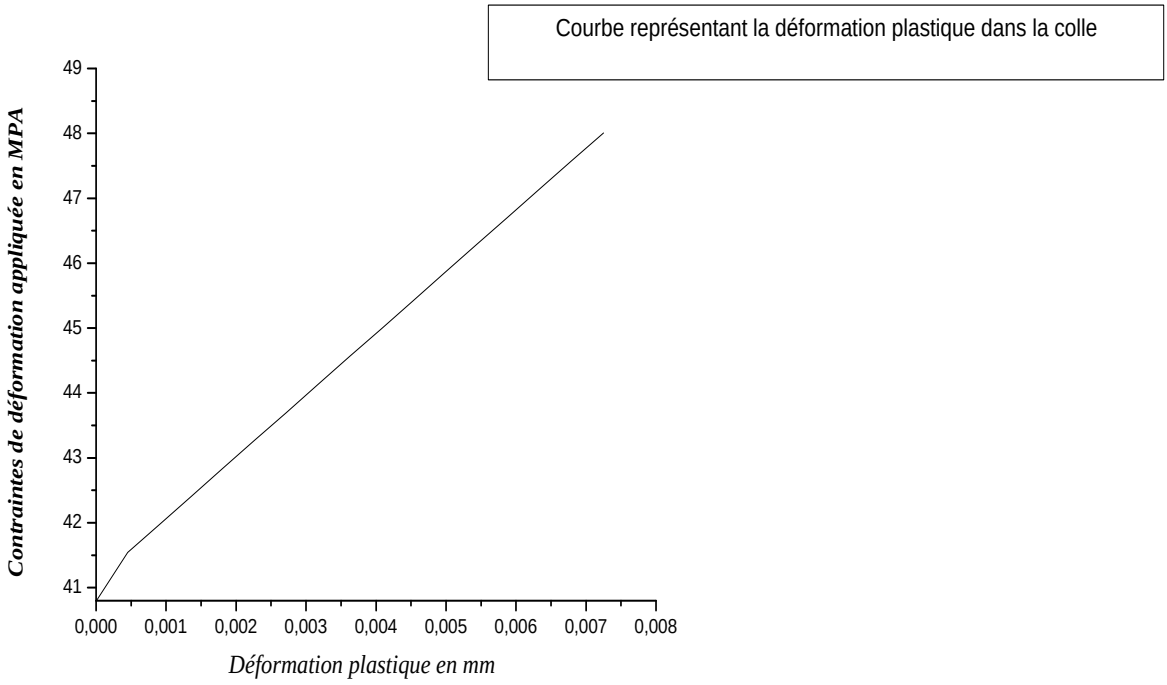


Fig. 45 : Courbe contraintes-déformations dans la colle

VI.3.4 : Mise en charge de la plaque :

La plaque est soumise à des sollicitations de tension d'amplitude 80 MPa. Les propriétés mécaniques de la plaque du patch ainsi que de l'adhésif sont introduit pour le lancement de la note de calcul

La structure étant modélisée par des éléments cubiques à huit nœuds.

Le maillage de l´éprouvette utilisée dans le modèle 3D d'éléments finis

Le patch composite est en forme rectangulaire identique à celle de la colle.

Un maillage régulier est effectué pour toute la structure.

Le collage parfait est créé entre la plaque et le patch composite en fusionnant les nœuds des éléments. Le fait de fusionner les nœuds a pour conséquence d'avoir le même maillage pour toute la structure.

La fissure centrale est localisée au milieu de la plaque afin d'entrainer une singularité géométrique provoquant une concentration de contraintes.

D'autre part, un maillage raffiné est effectué autour de la fissure. Le nombre total d'éléments de la structure est égal à 28500. La taille du côté d'un élément loin de la fissure est égale à 0,016 mm pour toute la structure et 0,004 mm au voisinage de la fissure.

VI.4 :-Analyse et interprétation des résultats-

VI.1 : Introduction

Le calcul en éléments finis nous permettra d'estimer les contraintes dans la colle, le substrat en aluminium et le composite. Nous nous intéressons dans notre travail au comportement (déformation) de l'adhésif. Autrement dit, de la déformation de la colle sur la performance de la réparation.

Pour ce faire, nous avons analysé numériquement le niveau de la distribution des contraintes normales et tangentielles induites mécaniquement dans l'adhésif. Et les déformations ou les contraintes en tête de fissure par l'analyse du **facteur de concentration de contrainte** ou **l'intégrale J**.

La **figure 46,** montre la répartition de la contrainte normale de Von Mises, σ_y engendrée dans la colle.

Nous remarquons que les contraintes les plus fortes sont localisées au voisinage prés de la zone de fissuration et sur le bord. Loin de ces deux parties, les contraintes sont d'un niveau plus bas. Ces concentrations de contraintes de part et d'autre, s'expliquent clairement au niveau de la fissure par la naissance effective des contrainte suite à l'ouverture de la fissure et le travaille de la colle pour contrecarrer cette ouverture, de l'outre coté de la plaque cette contrainte peut être expliquée par la présence de la force repartie de chargement de 80 MPa.

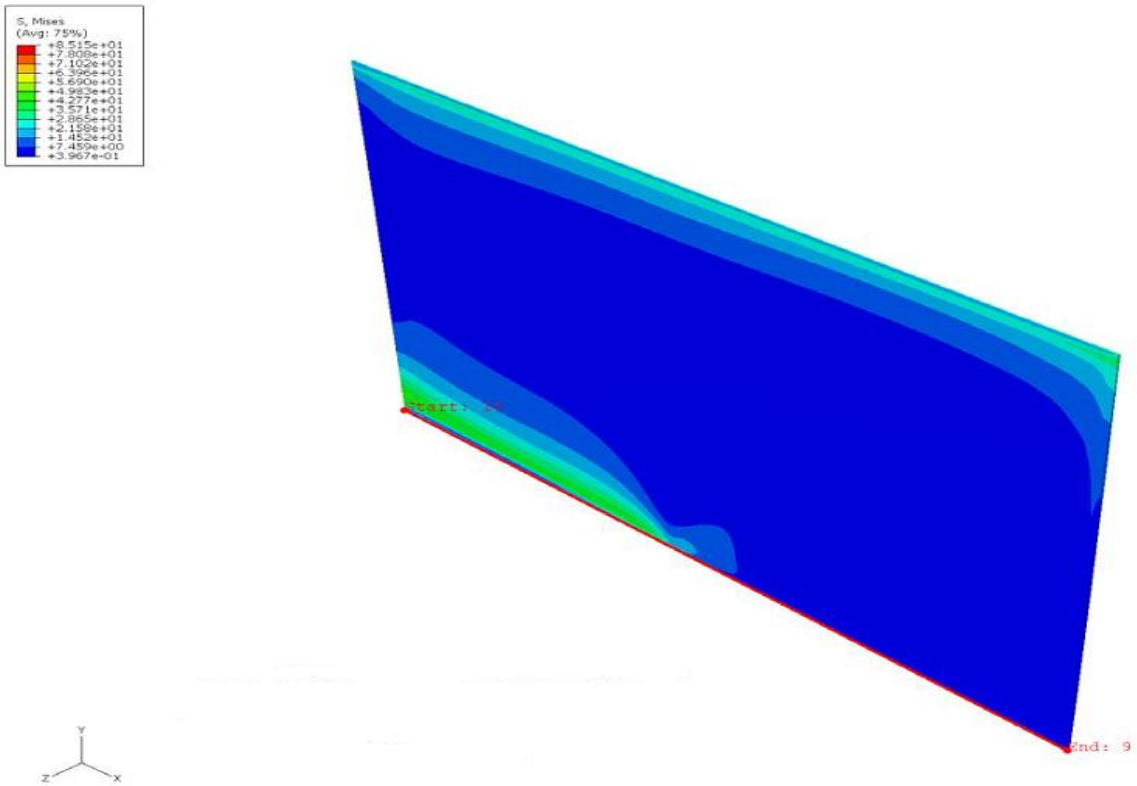


Fig. 46 : Niveau de distribution de la contrainte normale σ_y dans la colle

-Analyse et interprétation des résultats-

VI.4.2 : Distribution des contraintes tangentielles τ_{XZ} suivant la ligne y

Nous remarquons suivant la ligne y, la contrainte tangentielle τ_{XZ} est beaucoup plus prononcée sur la partie de la colle couvrant le front de la fissure puis elle prend une allure descendante en allant vers la partie la plus éloignée dans le sens des y, cette valeur reprend une valeur modérément élevée en s'approchant du coté libre de la colle.

Nous remarquons que cette contrainte τ_{XZ} induite dans l'adhésif a atteint une valeur maximale du coté front de fissuration puis elle décroit, en chutant progressivement, s'annulant, puis elle augmente en valeur absolue dans l'adhésif prés de son bord, comme le montre la **figure 47**.

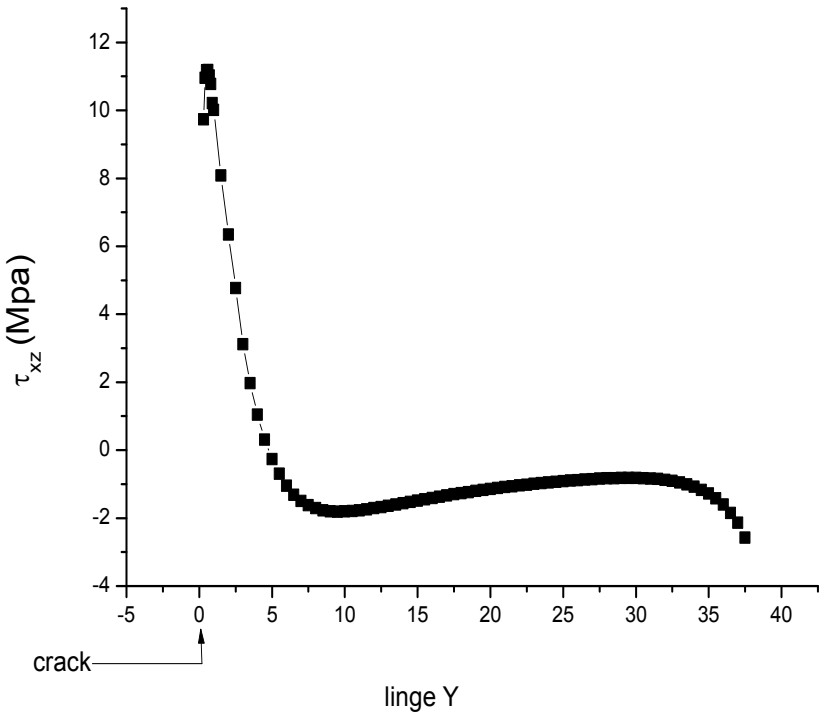


Fig. 47 : Variation des contraintes tangentielles τ_{XZ} en fonction de la distance Tête de fissure –bord libre de la colle suivant l'axe des Y

VI.4.3 : Distribution des contraintes tangentielles τ_{yz} suivant la ligne y

Nous remarquons suivant la ligne y la contraintes τ_{yz} a pris une valeur modérée au front de la fissure et en s'annulant presque au même point

Sur la **figure 48,** est représentée la variation de la contraintes de cisaillement engendrée dans la colle en fonction de la distance du front de fissure –bord de l'adhésif.

Nous observons que suivant le plan YOZ, les contraintes induites sont d'un comportement différent que celui illustré sur la **figure 47**. En effet les contrainte le plus importantes sont localisées au voisinage des pointes de fissures et non prés du bord des l'adhésif . Le niveau de ces contraintes est beaucoup plus marqué que celui des autres contraintes normales et tangentielles.

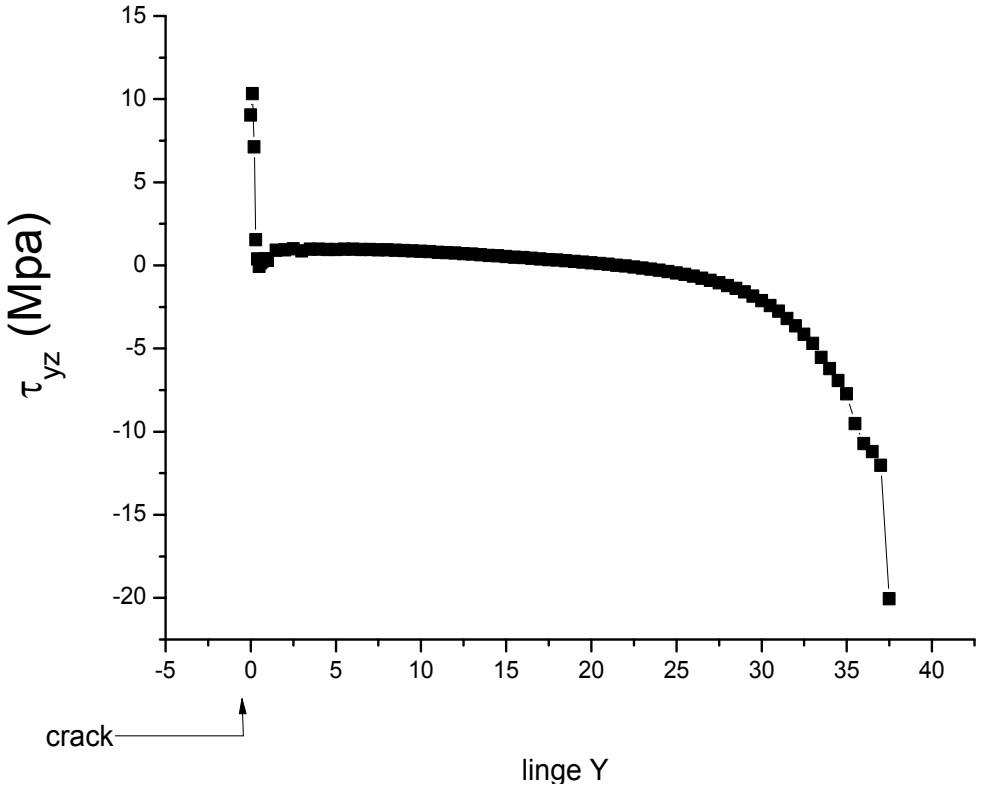


Fig. 48 : Variation des contraintes tangentielles τ_{yz} en fonction de la distance Tête de fissure –bord libre de la colle suivant l'axe des Y

VI.4.4 : Distribution des contraintes normale σ_{yy} suivant la ligne y

Pour une meilleure représentation de la répartition des contraintes normales σ_{yy} induites mécaniquement dans la colle. Nous avons représenté sur la **figure 49,** la variation de la contrainte normale σ_{yy} engendrée dans la colle en fonction de la distance front de fissure - bord de l'adhésif. Cette figure montre clairement que les contraintes les plus intenses se situent prés de la tête de fissure. C'est dans cette partie que l'adhésif est le plus fortement sollicité. Loin de cette zone, la colle est totalement relaxée de ces contraintes, puis elles s'amplifient de nouveau prés du bord. Ce comportement illustre qu'au voisinage très proche des têtes des fissures, l'adhésif est soumis à des contraintes σ_{yy} de fortes amplitudes

Une deuxième montée en intensité de contrainte est observée de l'autre cote de la colle (bord libre), ce qui renforce la théorie prédisant que la contrainte au niveau du joint adhésif s'annule à l'intérieur du joint et prend des valeurs significatives sur les frontières, une théorie annoncée et avancée par plus d'un chercheur.

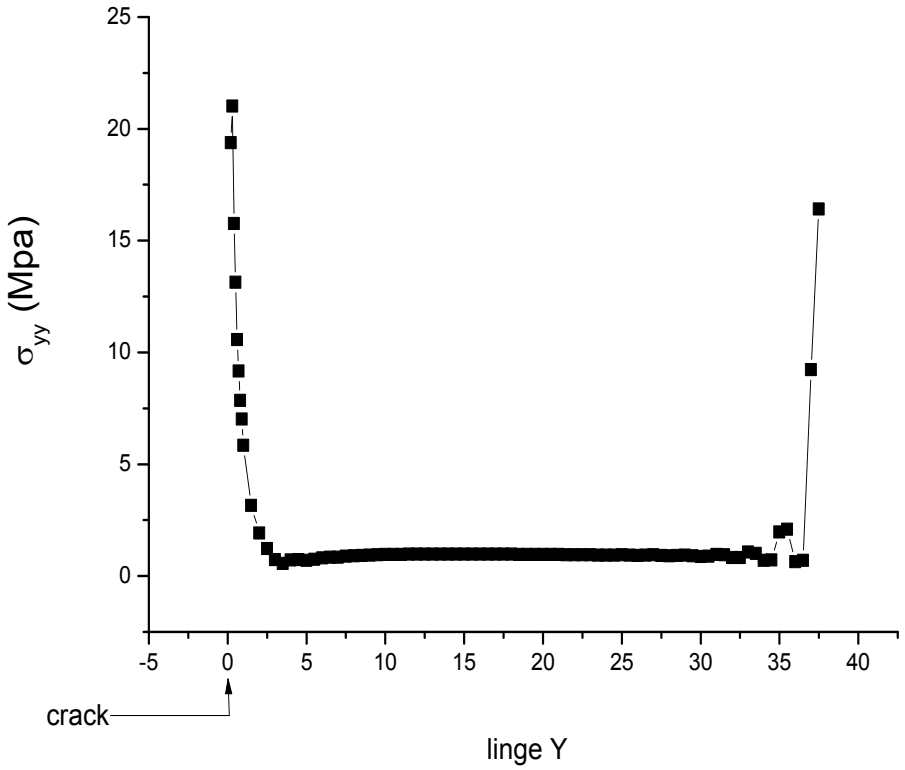


Fig. 49 : Variation de la contraintes normale σ_{yy} induite dans l'adhésif en fonction de la distance tête de fissure –bord libre de la colle suivant l'axe des Y

VI.4.5 : Distribution des contraintes normale σ_{zz} suivant la ligne y

Un comportement quasiment similaire que celui illustré sur la **figure 50** est observé dans la variation des contraintes normale σ_{zz} prés de la zone de fissuration. Les contraintes les plus intenses sont localisées dans la colle prés de la tête de fissure et prés du bord du collage. Loin de ces zones, la colle est vierge de toute contrainte.

-Ces comportement similaire ou presque, de la colle, suite à la naissance des contrainte σ_{zz} et σ_{yy}, suivant l'axe des y, semble être expliquée par le fait que la colle est un matériau isotrope, et que son comportement est presque similaire dans toutes les directions.

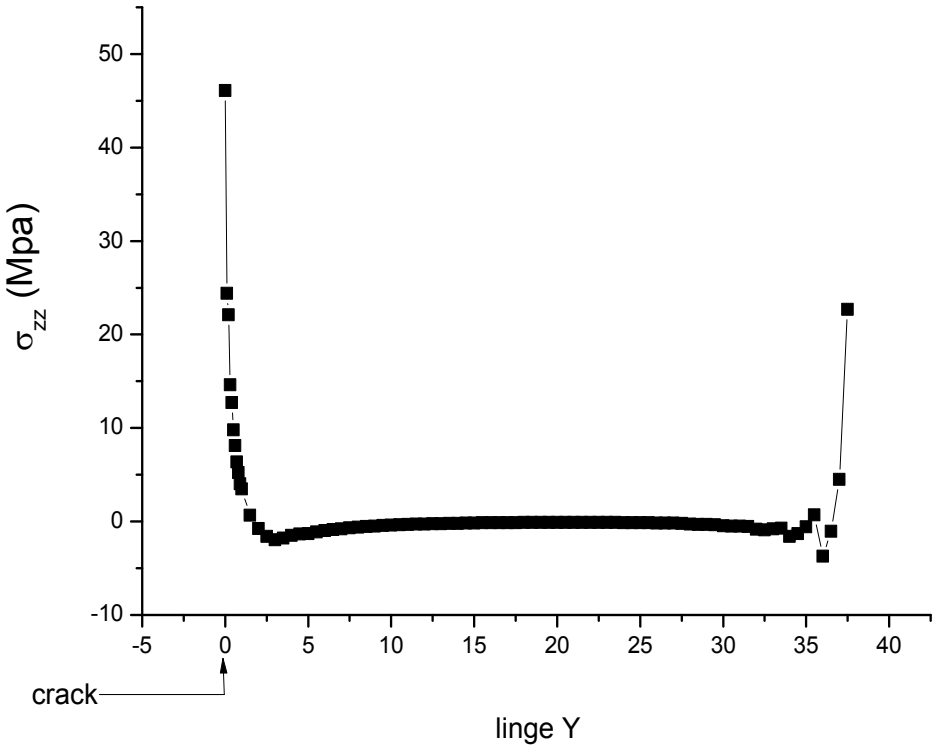


Figure 50 : Variation de la contrainte normale σ_{zz} induite dans la colle en fonction de la distance du front de fissure suivant l'axe des Y

VI.5 : - Effet de la taille de la fissure-

VI.5.1: Distribution des contraintes normale σ_{zz} et σ_{yy} suivant la ligne y. *(en fonction de la taille de fissure)*

Les résultats illustrés sur les **figures 51** et **52** confirment les résultats obtenus précédemment. En effet, la partie de l'adhésif la plus fortement sollicitée par l'énergie en pointe de fissure est localisée à son voisinage très proche. Ces figures montrent clairement que les contraintes normales σ_{zz} σ_{yy} engendrés dans l'adhésif sont étroitement liées à la taille de la fissure à réparer.

Un accroissement de cette fissure entraine une intensification de ces contraintes dans l'adhésif, prés du front de fissuration de la colle fortement sollicitée, le niveau des contraintes chute considérablement *(l'amplitude des contraintes tend vers zéro)*.L'effet de la croissance de la fissure réparée, sur l'intensité des contraintes induites prés du bord de l'adhésif est peu marqué.

Comme il semble que chaque fois la taille de la fissure prend des valeurs modérées, les contraintes prennent des valeurs presque similaires, que se soit au front de la fissure ou sur le bord libre de la colle, telle qu'on le voit sur le graph (en noir) pour une taille de fissure de 10 mm, et ce, pour les deux contraintes normales, suivant l'axe des Y et suivant l'axe des Z.

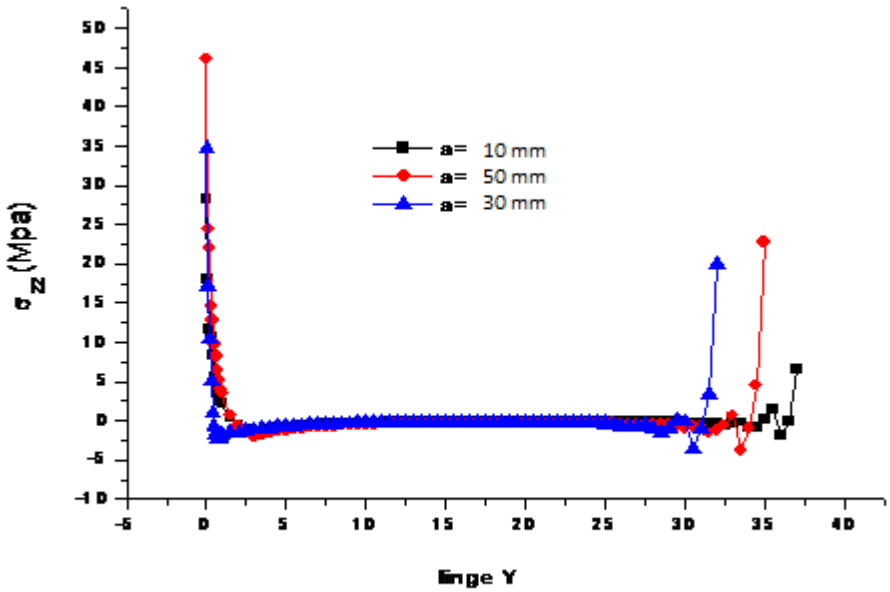


Fig. 51 : Variation de la contraintes normale σ_{zz} induite dans la colle en fonction de la taille de fissure réparée suivant l'axe des Y

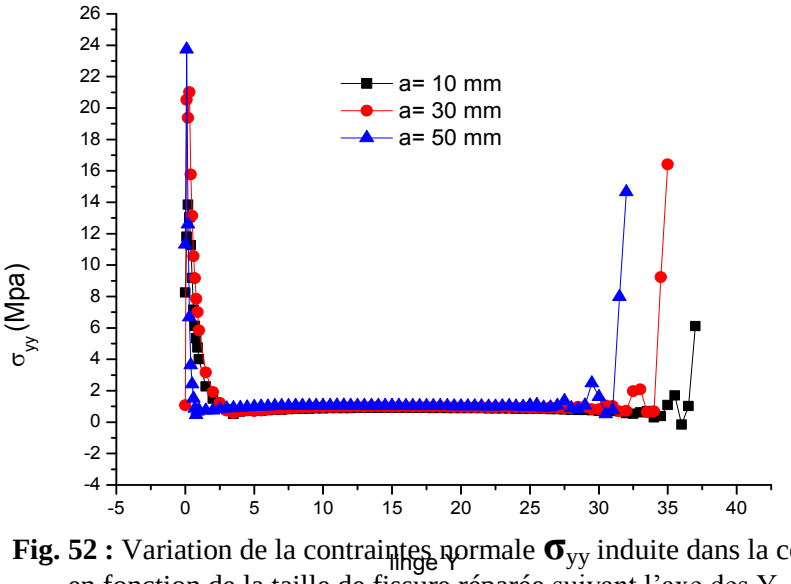


Fig. 52 : Variation de la contraintes normale $\boldsymbol{\sigma}_{yy}$ induite dans la colle en fonction de la taille de fissure réparée suivant l'axe des Y

VI.5.2 : Distribution des contraintes tangentielles $\boldsymbol{\tau}_{xz}$ suivant la ligne y. *(en fonction de la taille de fissure)*

Sur la **figure 53** est illustrée la variation de contrainte tangentielle τ_{xz} induite dans les plans XOZ de l'adhésif, en fonction de la croissance de la fissure réparée. Tout comme les contraintes normales, un développement de la fissure réparée entraine une intensification de ces contraintes de cisaillement, prés du front de fissuration.

Loin de cette zone le niveau de ces contraintes est peu sensible à la croissance de la fissure réparée.

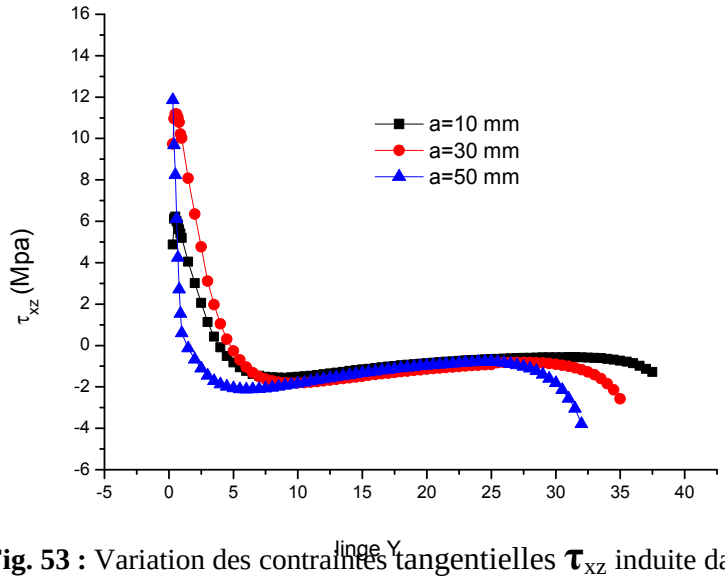


Fig. 53 : Variation des contraintes tangentielles $\boldsymbol{\tau}_{xz}$ induite dans la colle en fonction de la taille de fissure réparée suivant l'axe des Y

VI.5.3 : Distribution des contraintes tangentielles τ_{yz} suivant la ligne y. *(en fonction de la taille de fissure)*

Sur la **figure 54** est illustrée la variation des contraintes tangentielle τ_{yz} induites dans les plans YOZ de l'adhésif, en fonction de la croissance de la fissure réparée. Tout comme les contraintes normales, un développement de la fissure réparée entraine aussi quant à elle une intensification plus frappante de ces contraintes de cisaillement, prés du front de fissuration.

C'est à dire que la contrainte au front de la fissure augmente considérablement avec la taille de la fissure à réparer.

Loin de cette zone les niveaux de ces contraintes sont relativement peu sensibles à la croissance de la fissure réparée.

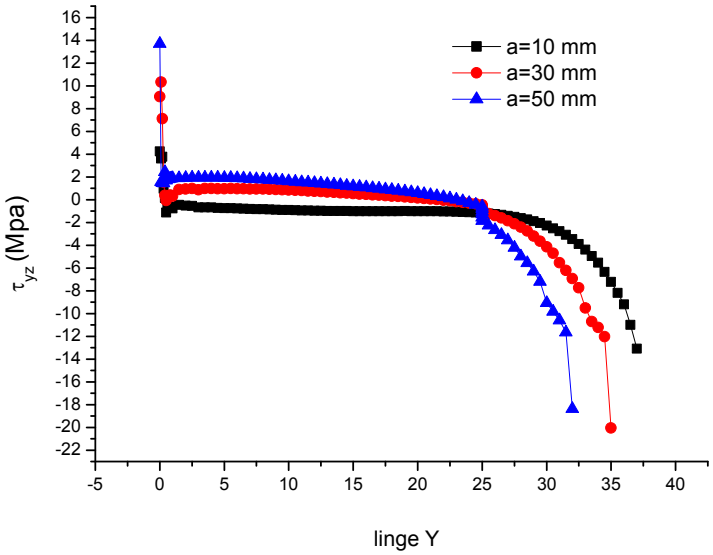
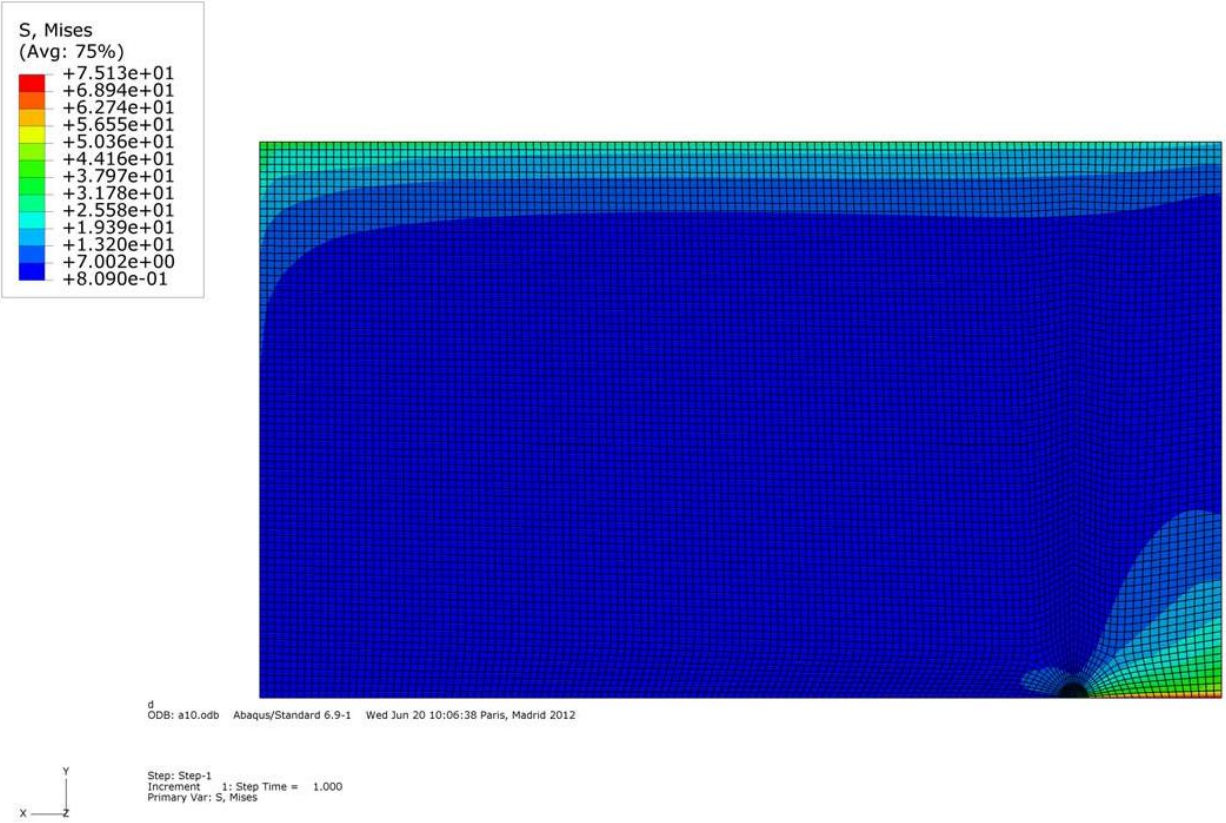


Fig. 54 : Variation des contraintes tangentielles τ_{yz} induite dans la colle en fonction de la taille de fissure réparée suivant l'axe des Y

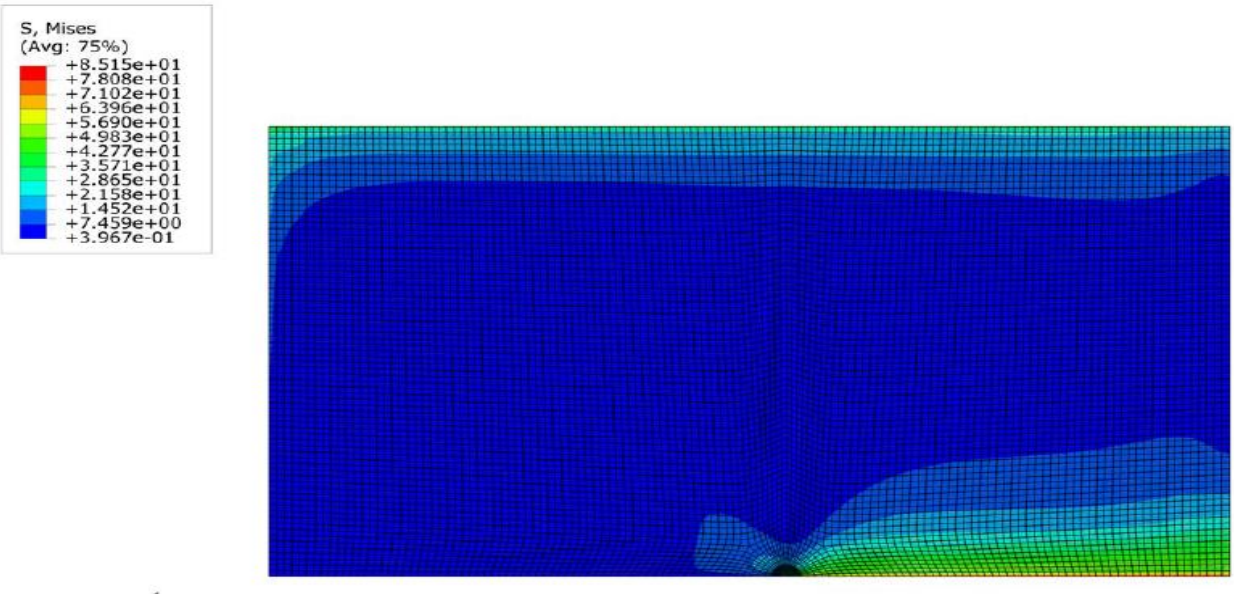
En conclusion : Les résultats ainsi obtenus montrent que les contraintes induites dans l'adhésif dépondent fortement de la taille de la fissure réparée.

VI.6 : Examen des Contraintes selon Von Mises :

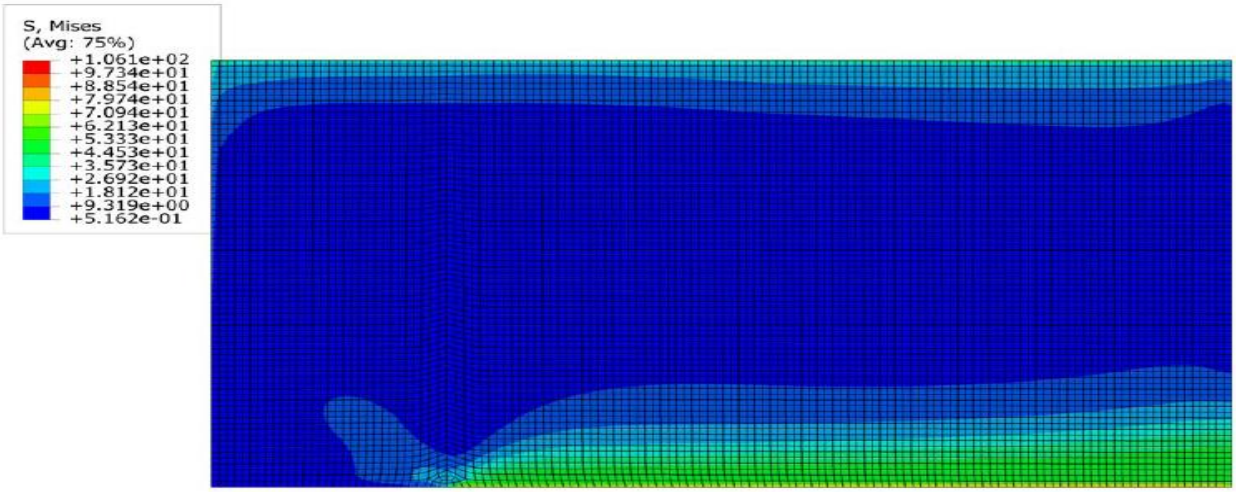
Les résultats illustrés sur la **figure 55** confirment ceux représentés sur les **figures 51** à **52.** En effet, un développement de la fissure réparée entraine une amplification de la contrainte équivalente de Von Mises dans l'adhésif au voisinage de la fissure réparée. Cette **figure 55** montre nettement que les contraintes localisées au bord de l'adhésif sont pratiquement indépendantes de la taille de la fissure réparée



Contrainte équivalente de Von Mises dans l'adhésif *(fissure de 10 mm)*



Contrainte équivalente de Von Mises dans l'adhésif *(fissure de 30 mm)*



Contrainte équivalente de Von Mises dans l'adhésif *(fissure de 50 mm)*

Fig 55 : Effet de la taille de la fisure reparée sur le niveau de la distribution de la contrainte equivalente de von mises induites dans l'adhesif

VI.6.1 : Distribution des contraintes tangentielles τ_{xz} suivant la ligne X.

Sur la **figure 56** est illustrée la variation des contraintes tangentielle τ_{xz} induite dans les plans XOZ de l'adhésif, nous remarquons une progression de la valeur de la contrainte tangentielle en partant d'une valeur négative du bord libre jusqu'à atteindre une valeur maximale au front de fissure puis elle chute en même point jusqu'à atteindre une valeur nulle, au-delà de ce point aucune contrainte n'est a signaler jusqu'au bord libre du joint.

Ce qui montre que la contrainte a pris une allure tout a fait légitime et prévue et ce, en partant d'une valeur la moins basse possible du coté libre du joint jusqu'à atteindre au front de fissure une valeur maximale.

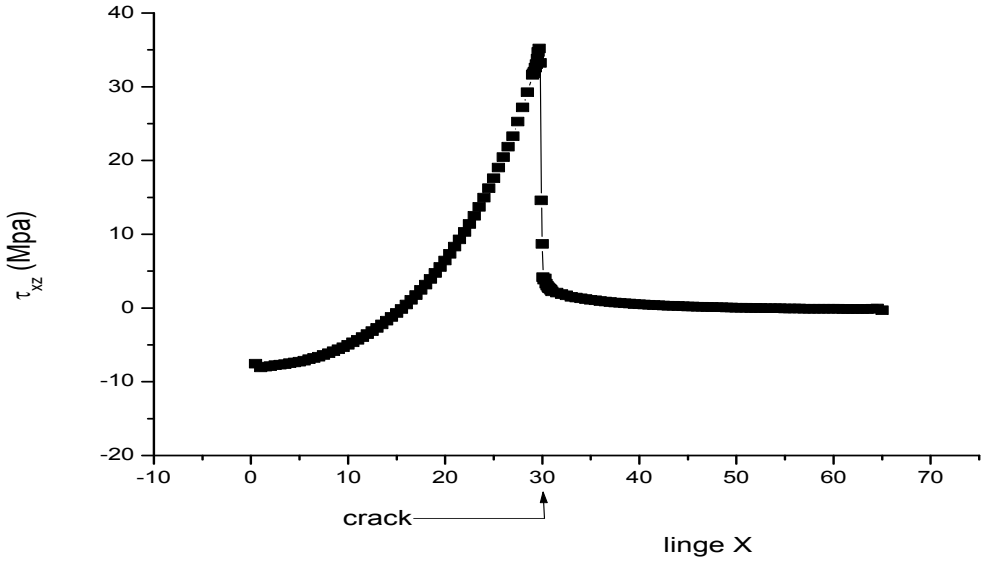


Fig. 56 : Variation des contraintes tangentielles τ_{xz} induite dans la colle

en fonction de la distance tête de fissure –bord libre de la colle suivant l'axe des X

VI.6.2 : Distribution des contraintes tangentielles τ_{yz} suivant la ligne X.

Sur la **figure 57** est illustrée la variation des contraintes tangentielle τ_{yz} induite dans le plan YOZ de l'adhésif suivant l'axe des X, nous remarquons une progression de la valeur de la contrainte tangentielle en partant d'une valeur négative en valeur absolue du bord libre jusqu'à atteindre une valeur nulle au front de fissure puis elle garde la même valeur nulle, jusqu'à l'autre bord libre du joint.

Cette valeur importante en valeur absolue est induite du faite que la colle manifeste une réaction pour contrecarrer l'éloignement des lèvres de la fissure au début de l'ouverture de la fissure, cette dernière contrainte, et du faite de la présence de la colle s'éteint progressivement jusqu'à atteindre le front de fissure pour s'annuler.

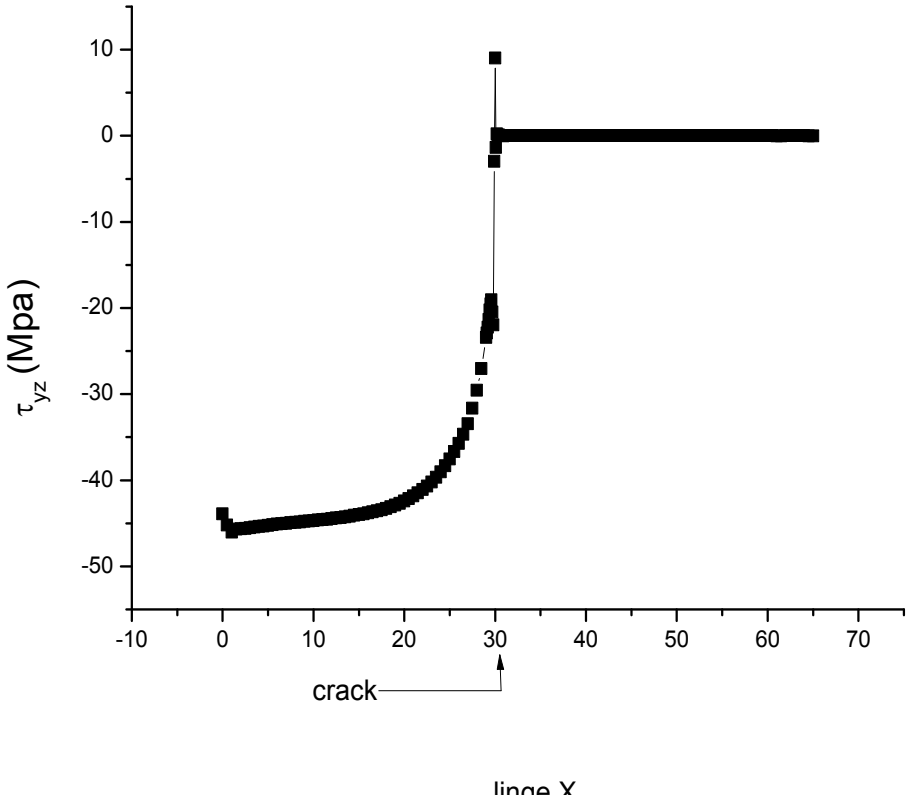


Fig. 57 : Variation des contraintes tangentielles τ_{yz} induite dans la colle en fonction de la distance tête de fissure –bord libre de la colle suivant l'axe des X

VI.6.3 : Distribution des contraintes normale σ_{yy} suivant la ligne X.

Le graph de la variation de la contrainte normale σ_{yy} engendrée dans la colle en fonction de la distance front de fissure - bord de l'adhésif suivant l'axe des X montre clairement que les contraintes les plus intenses se situent prés de la tête de fissure, et il semble que l'adhésif est le plus fortement sollicité en cette partie. Cette valeur décroit progressivement jusqu'à l'atteinte 'une valeur nulle a proximité du front de la fissure, cette valeur nulle est ensuite stable, invariable jusqu'au bord libre de la colle. Ce comportement illustre qu'au voisinage proche est seulement au voisinage très proche des têtes des fissures, l'adhésif est soumis à des contraintes σ_{yy} de fortes amplitudes

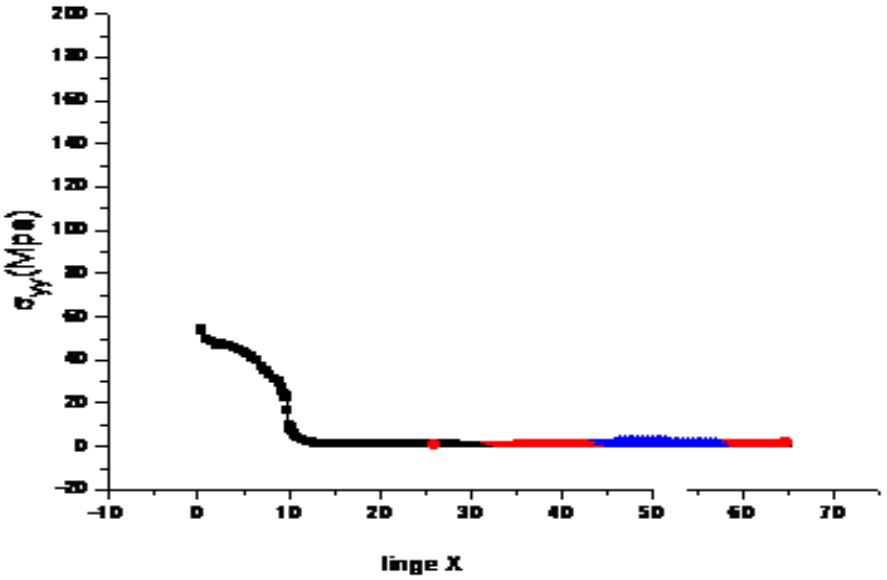


Fig. 58 : Variation des contraintes normale σ_{yy} induite dans la colle en fonction de la distance tête de fissure –bord libre de la colle suivant l'axe des X

VI.6.4 : Distribution des contraintes tangentielles τ_{xz} et τ_{yz} suivant la ligne X.

La remarque est a apercevoir pour l'effet de la taille de la fissure suivant l'axe des X, car nous remarquons des comportements et des allures identiques pour la distribution des contraintes tangentielles τ_{yz} et τ_{xz}, d'où on peut en conclure que suivant les résultats ainsi obtenus les contraintes induites dans l'adhésif dépondent fortement de la taille de la fissure réparée.

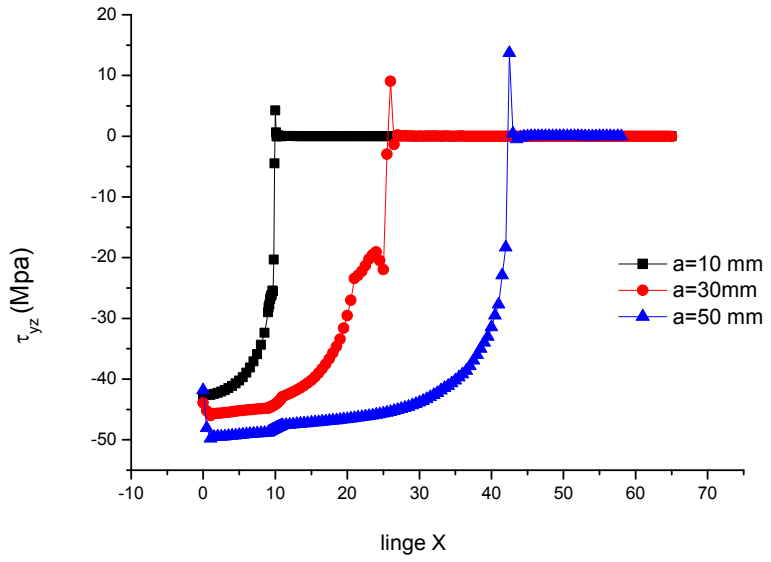


Fig. 59 : Variation des contraintes tangentielles τ_{yz} suivant la ligne X en fonction de la taille de fissure**.**

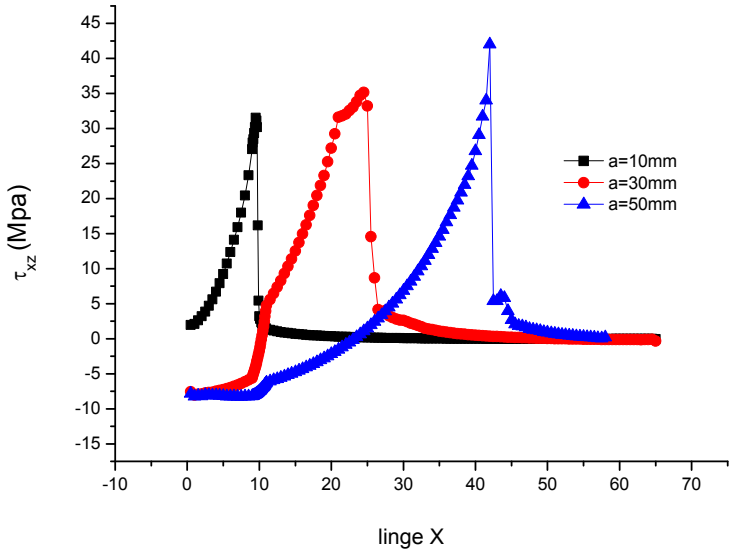


Fig. 60 : Variation des contraintes tangentielles τ_{yz} suivant la ligne X en fonction de la taille de fissure.

Annexe

VI.7 : L'intégral J et facteur d'intensité de contrainte

La quantification de la résistance d'un matériau à l'amorçage ou à la propagation des fissures est interprété ou exprimé par ces deux grandeurs, le facteur d'intensité de contrainte et l'intégral J. Autrement dit, pendant qu'une fissure se développe, une énergie de déformation est restituée par le matériau environnant.

La fissure se développe rapidement quand le taux de restitution de l'énergie de déformation lié à la propagation de la fissure est suffisant pour provoquer la progression de la fissure dans le sens de la longueur, aussi cette dernière devient-elle une fissure capable de s'auto-propager. Cette valeur critique du taux de restitution d'énergie de déformation dépend de plusieurs coefficients, entre autre, de l'énergie absorbée lors de la déformation plastique. De la on peut dire que plus le taux critique de restitution d'énergie de déformation est grand, plus un matériau sera résistant à la progression instable d'une fissure.

VI.7.1 : Comportement élastoplastique

Décrire le comportement du front de la fissure peut se faire par l'interprétation des résultats du **facteur d'intensité de contrainte** pour les matériaux à comportement élastique, au niveau du front de la fissure ou par les valeurs de **L'intégrale J,** qui est un des paramètres de la mécanique de la rupture non linéaire et qui peut être employer pour décrire l'évaluation de la rupture ductile en présence de grandes déformations élastoplastiques en tout point de la pièce a réparer.

L'utilisation de l'aluminium A2024 T3, en sa qualité d'un matériau ductile par excellence, pour faire le prototype de réparation des fissures élevées des matériaux employés dans les structures aéronautiques, sachant que le fuselage des véhicules aéronautiques et en aluminium A2024 T3, fait que l'approche de l'intégrale J est peut être pris en considération comme facteur d'évaluation très répondu en mécanique de la rupture.

Conventionnellement, cette intégrale J peut être décomposée en deux termes :

$J = J_e + J_p$

J_e **,** est l'intégrale en comportement élastique

J_p La difficulté réside dans son évaluation en comportement élastoplastique.

De plus et afin d'enrichir notre étude il nous a semblé essentiel et nous avons vu très utile de voir les effets de plus d'un facteur ou paramètres sur le comportement de la fissure par l'interprétation des valeurs de l'intégral J, et ce, en modifiant les paramètres caractérisant la colle ou le patch composite.

VI.7.1.A: Effet de l'épaisseur de l'adhésif

Les adhésifs utilisés dans l'ensemble des essais numériques pour la réparation des structures endommagées par patch sont souvent appliquées pour supporter un niveau élevé des contraintes appliquées. L'effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la distribution des efforts sur la couche d'adhésif est très important et joue un rôle déterminant sur la performance et la tenue mécanique des plaques réparées.

L'analyse porte sur l'effet de l'épaisseur d'adhésif sur la variation de l'intégrale J, pour une fissure réparée.

L'énergie de rupture est inversement proportionnelle à l'épaisseur de l'adhésif où l'adhésif doit permettre le transfert des contraintes de la plaque vers le patch.

Son épaisseur doit être optimisée, une faible épaisseur transmis presque totalement les contraintes qui lui sont transmises de la fissure et de sa pointe, alors qu'elle peut les absorber une fois son épaisseur atteint un certain pourcentage de l'épaisseur du patch composite

On remarque que la valeur de l'intégrale J est en parfait progression ou en progression proportionnelle avec l'épaisseur de l'adhésif, à ce titre, nous confirmons que l'épaisseur de l'adhésifs doit être optimisée pour pouvoir prendre en charge les efforts qui lui seront transmises de la plaque vers le patch composite.

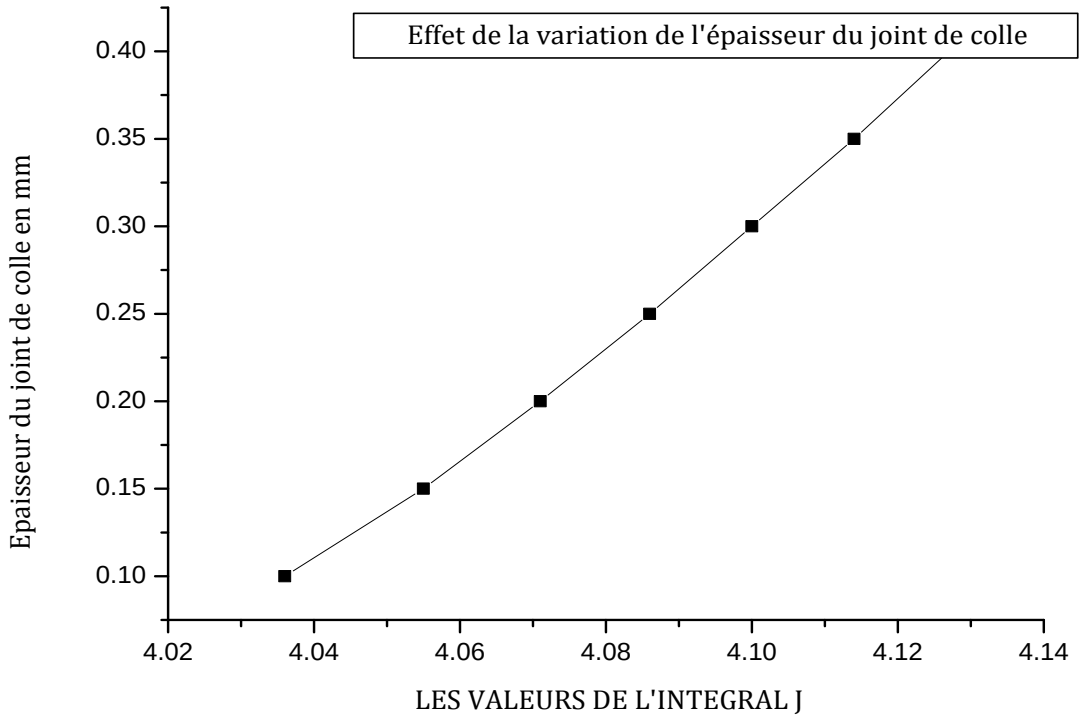


Fig. 61 : Effet de la variation de l'épaisseur de la colle sur la tenue de l'assemblage

VI.7.1.B : Effet de l'épaisseur du patch

Cet effet est clairement visible sur la figure 57, où nous remarquons les valeurs de l'intégrale J varient selon une allure asymptotique pour une large gamme d'épaisseur, cette variation chute considérablement en dessous de l'épaisseur de 1 mm, est c'est l'épaisseur recommandée par la majorité des praticiens et fabriquant qui préconisent un grammage de 1 mm pour une surface bien préparée. *(Voir IV.6.2. Consommation ou grammage, page 51).* En effet une épaisseur plus importante de l'épaisseur du patch implique une diminution de la valeur de l'intégrale J.

Les résultats tirés sur comportement de l'assemblage collés à partir de six points différents pour six épaisseurs différentes du patch composite en allant de 0,1 mm à 2,25 mm (10 fois plus épaisse que la colle) , montrent et vérifient cette théorie.

Nous pouvons aussi dire au-delà d'une certaine épaisseur et comme nous l'avons explique dans la partie bibliographique, qu'il y a risque d'arrachement du patch par la très grande déférence entre les coefficients de dilation de la colle et celle du patch composite.

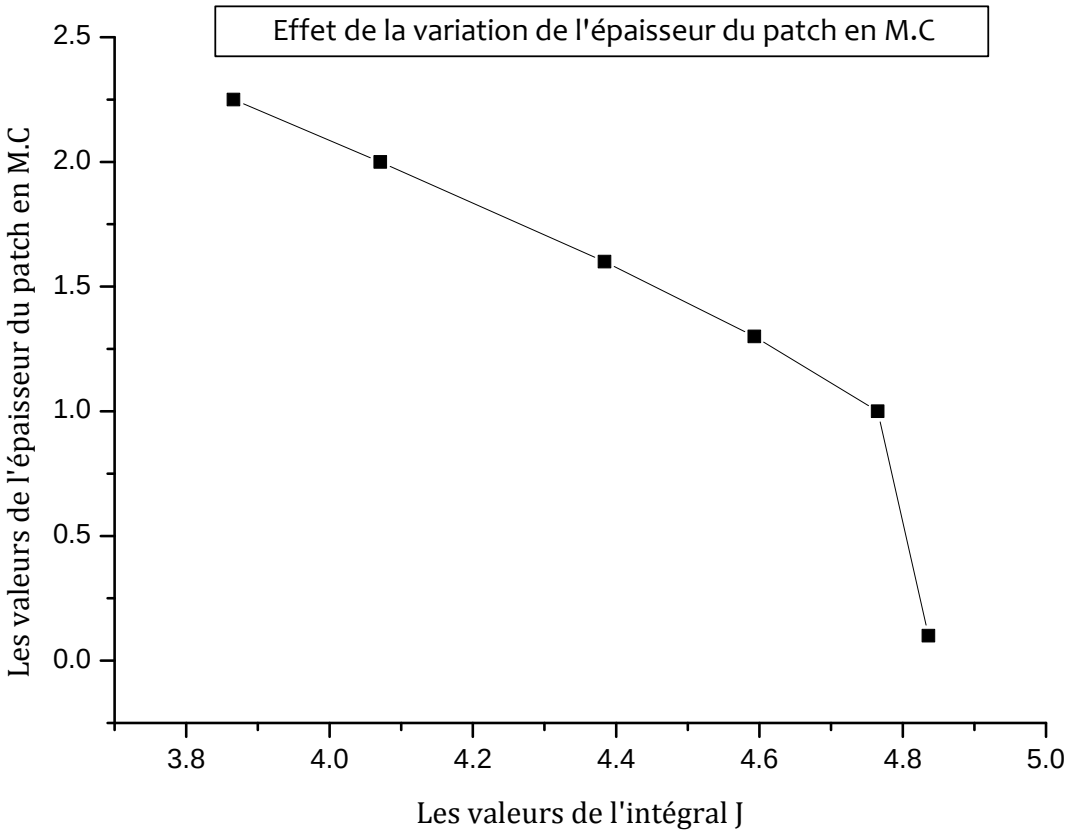


Fig. 62 : Effet de la variation de l'épaisseur du patch composite sur la tenue de l'assemblage

VI.7.1.C : Effet de la variation du coefficient de poisson de la colle.

La courbe de la figure ci-dessous montre que la propriété élastique ou élastoplastique des colles est une qualité du premier ordre pour réussir l'assemblage, en effet, en augmentant les valeurs du coefficient de poisson est une qualité caractéristiques des matériaux élastiques on voit une diminution significative des contraintes sollicitant la plaque fissurée et réparée.

Pour ce, nous pensons qu'il recommandé de choisir une colle a coefficient de poisson le plus élevé possible pour réussir son joint collé.

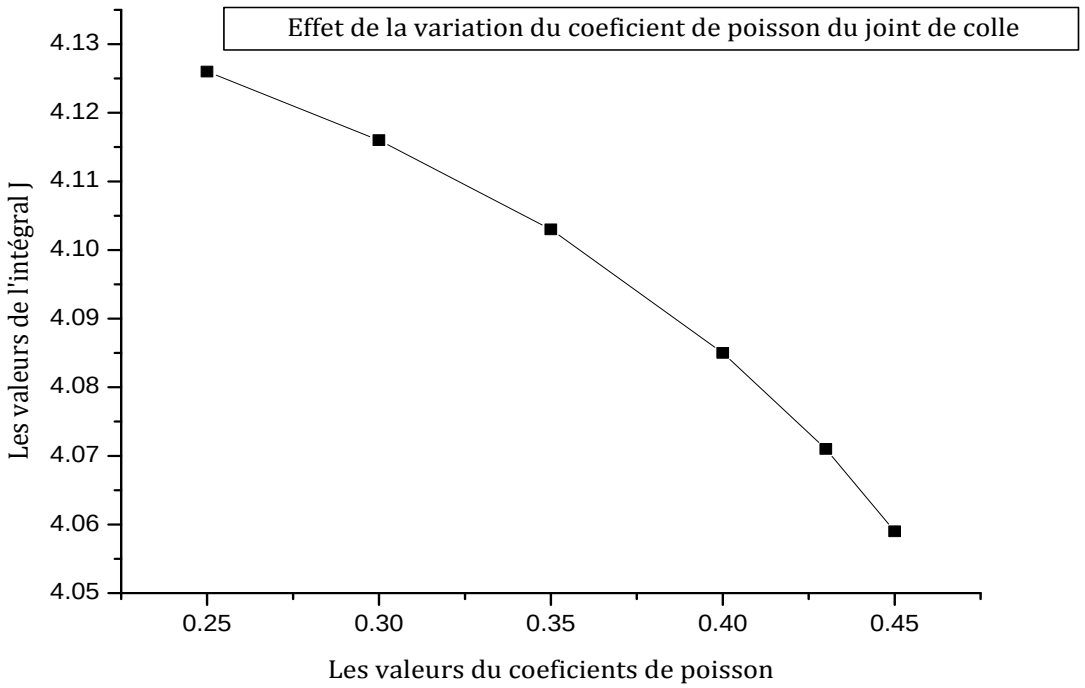


Fig. 63 : Effet de la variation du coefficient de poisson de la colle

VI.7.1.D : Effet de la variation de la force appliquée

L'effet de variation de l'intensité de la force appliquée de 80 Mpa à 320 Mpa est nettement observé comme l'indique le graph de la **figure 59**. Nous pouvons constater qu'une augmentation de la force appliquée sur la plaque entraîne systématiquement un accroissement de la valeur de l'intégrale J où ce qui conduit l'augmentation du champ de contraintes et déformation en pointe de fissure, entraînant ainsi une augmentation de l'énergie de rupture. Une telle augmentation peut provoquer l'endommagement ou la rupture brutale de la structure.

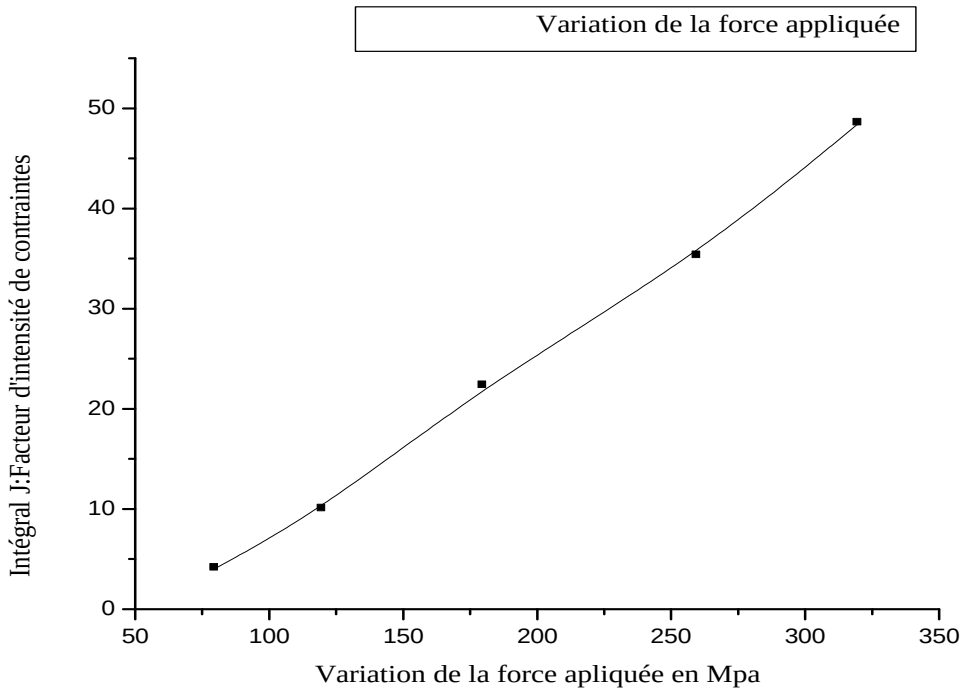


Fig. 64 : Effet de la variation de l'intensité de l'effort appliqué à la plaque sur la tenue de l'assemblage

VI.7.1.E : Effet de la variation du module d'élasticité longitudinale de la colle.

Contrairement à la réalité observée pour le graph de la figure 58, nous constatons que la courbe la figure 60 modélisant la variation des contraintes en fonction du module d'élasticité longitudinale de la colle, a pris deux allure : la première grave et importante de 500 MPa à 2500 MPa, la seconde est moins frappante a allure asymptotique au delà de 2500 MPa.

Pour ce, nous pensons qu'il recommandé de choisir une colle a module d'élasticité a valeur modérée pour réussir son joint collé.

Mais entre ces deux caractéristiques on ne peut pas trouver une colle une colle ayant une valeur importante pour le coefficient de poisson et ayant une valeur modérée pour le module de Young.

A ce titre, il primordiale de choisir un colle ayant des caractéristiques moyennes et appropriées afin de réussir son joint collé.

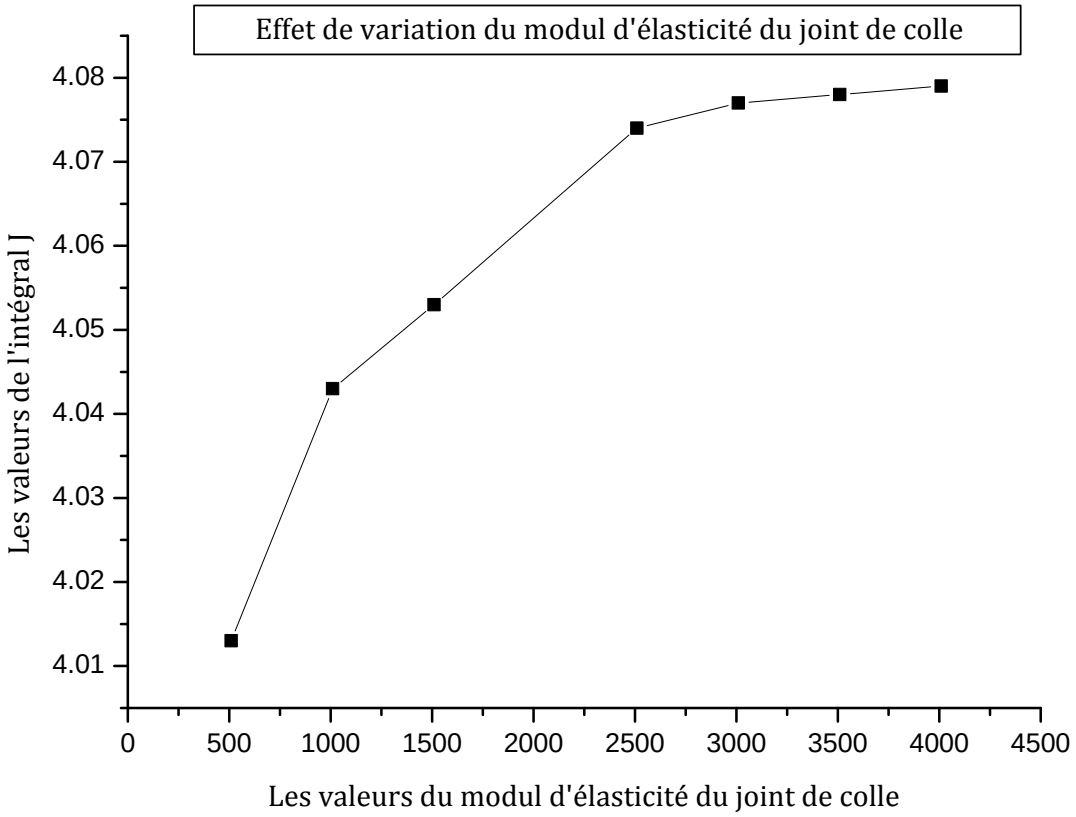


Fig.65. Effet de la variation du module d'élasticité longitudinale de la colle.

Conclusion :

Les résultats obtenus dans ce travail montrent que :

- *Les contraintes en pointe de fissures, réparées par patch en matériaux composite à l'aide d'un adhésif, sollicitent mécaniquement la colle ;*
- *Les contraintes induites dans ce cas, sont des contraintes normales et tangentielles ;*
- *Les contraintes normales les plus fortes sont localisées au voisinage très proche du front de la fissuration, loin de cette zone, l'adhésif est totalement relaxé de ces contraintes ;*
- *Le bord de l'adhésif est le siège de la concentration des contraintes normales et tangentielles bien que l'intensité de ces dernières est moins prononcée ;*
- *Loin du bord et du front de la fissuration, l'adhésif n'est soumis pratiquement à aucun effort. Dans cette partie, l'intensité de contraintes tend vers des valeurs nulles ;*
- *L'adhésif au voisinage de la zone de fissuration est fortement sollicité mécaniquement, quand la taille de la fissure croit. La croissance de la fissure réparée induit des contraintes normales de très forte amplitude dans l'adhésif. Ces contraintes sont localisées prés de la tête des fissures et du bord de l'adhésif.*
- *La partie centrale de l'adhésif ; loin de la zone endommagée est vierges de toute contrainte. L'adhésif rempli sa fonction de transfert des contraintes de la plaque vers le patch.*
- *Le niveau des contraintes normales et tangentielles induites dans l'adhésif sont liés étroitement à la taille de la fissure réparée ;*
- *L'amplitude des contraintes localisées dans l'adhésif prés de son bord, semble ne pas dépondre de la croissance de la fissure réparée, et il semble qu'elles sont peut être fonction de l'amplitude de la force entrainant la déchirure de la fissure;*
- *Les contraintes équivalentes de Von mises, induite au voisinage du front de fissuration sont d'autant plus importante que la taille de la fissure réparée croit.*

Etude numérique et expérimentale de la technique de réparation des structures aéronautiques par patch en composite, cas de l'Aluminium 2024-T3 réparée par composite Carbone/Epoxyde, de K. Madani. Thèse de Doctorat, Université de SBA UDL, 2007.

Modélisation du décollement et analyse du comportement d'une plaque en Aluminium fissure et réparée par collage A. Amiri. Thèse de Doctorat d'Etat : UDL SBA 2006

Étude de la modélisation de la pose et de la tenue mécanique des assemblages par déformation plastique de Sébastien Fayolle, Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'école nationale supérieure des mines de paris

Techniques de l'ingénieur, Durabilité des assemblages collés

Dossier techniques de l'ingénieur, Durabilité des assemblages colles -approche prédictive

Dossier techniques de l'ingénieur Assemblage des matériaux par collage Bernard MONASSE, Docteur ès-Sciences, Maître de Recherche, CEMEF-CNRS UMR 7635, École des Mines de Sophia-Antipolis

Dossier techniques de l'ingénieur familles d'adhésifs et caractérisation d'un collage structural, par Gilbert VILLOUTREIX Docteur ès sciences physiques Chantal BRETTON Professeur des Universités au CNAM, Docteur en sciences des matériaux du Conservatoire national des arts et métiers (CNAM)

Mécanique de la rupture par Jean-Luc ENGERAND Ingénieur de l'École Polytechnique et de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace

Cours de Mécanique des Matériaux composites J. Molimard, EMSE 2004

Analyse et modélisation du comportement élasto-viscoplastique d'un adhésif dans un assemblage R. Créac'hcadec1, J.Y. Cognard1 et L.Sohier2

Cours sur la Méthode des éléments finis Hervé Oudin.

Durabilité des assemblages colles, aspects mécaniques et physico-chimiques, Thèse de Sébastien CHAUFFAILLE présentée à l'université bordeaux 1, Ecole doctorale des sciences physiques et de spécialité, Mécanique et ingénierie,

Essais de rupture par Dominique FRANÇOIS Directeur adjoint du Laboratoire de mécanique, sols, structures, matériaux. École centrale de Paris. Centre national de la recherche scientifique CNRS-URA 850.

Fatigue des matériaux composites à matrice polymère et fibres longues par Claude BATHIAS Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers Directeur de l'Institut des Technologies et des Matériaux Avancés

Etude du comportement mécanique de patchs composites utilisés pour le renforcement de structures métalliques aéronautiques, par Jean-Denis MATHIAS, Université BLAISE PASCAL - Clermont II Ecole Doctorale Sciences pour l'ingénieur de Clermont-Ferrand Thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Spécialité : mécanique du solide

Mécanique de la rupture par Jean-Luc ENGERAND, Ingénieur de l'École Polytechnique et de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace Chef du Département Technique à la société Messier-Bugatti

Etude en fatigue de structures en aluminium renforcées par patchs composites, thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université Clermont II, par Marie-Laetitia pastor

Analyse par la méthode des éléments finis tridimensionnelle de l'étendue de la zone plastique en tête de fissure réparée par patch en composite, Thèse Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Spécialité : Génie Mécanique Option : Sciences des Matériaux Présentée Par OUDAD Wahid

Structures en matériaux composites (T I), par Jean-Jacques BARRAU Professeur à l'Université Paul-Sabatier Toulouse et Didier GUEDRA DEGEORGES Chef du département Ingénierie des Structures Centre Commun de Recherche EADS

Familles d'adhésifs et caractérisation d'un collage structural (T I), par Chantal BRETTON Docteur en sciences des matériaux du Conservatoire national des arts et métiers (CNAM) Professeur des Universités au CNAM et Gilbert VILLOUTREIX Docteur ès sciences physiques

Collage des composites Caractéristiques et choix des adhésifs (T I), par Philippe COGNARD Ingénieur de l'École supérieure de physique et chimie de la ville de Paris Ancien directeur commercial à la société Bostik Findley Expert près les tribunaux

Fatigue des alliages ferreux Définitions et diagrammes (T I), par Jian LU Professeur en génie mécanique à l'Université de technologie de Troyes (UTT) Directeur du département Génie des systèmes mécaniques et du Laboratoire des systèmes mécaniques et d'ingénierie simultanée (LASMIS)

Lois de comportement des métaux Élastoplasticité.(T I), Viscoplasticité par Dominique FRANÇOIS Professeur honoraire École Centrale de Paris

Effet du décollement sur le comportement d'une fissure renforcée par un patch en composite Djamel Ouinas, 2Belabbes Bachir Bouiadjra, 2Boualem Serier & 2Mohamed Belhouari, 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007.

Étude et optimisation de la réparation des composites stratifies par collage des patchs externes thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université de bourgogne, par PENGCHENG Cheng

Analyse des paramètres de rupture d'une plaque en aluminium fissurée réparée par un patch elliptique en composite en mode I et mode mixte. Poster de Djamel OUINAS Bachir Belabbes Bouiadjra Boualem Serier Mohamed Belhouari

Analyse paramétrique dans le collage des structures planes en matériaux composites, Bounazef Mokhtar, Adda Bedia El Abes, Belbachir Saadia laboratoires des materiaux et hydraulogie université de sidi belabbes

Sommaire

Notions de la mécanique 2
Contraintes (unités : N/mm2 ou MPa) : 2
Déformations : 2
Homogénéité : 2
Isotropie: 2
Élasticité : 2
Plasticité : 2
Malléabilité : 2
Résumé: 3
Tableau des figures 6
INTRODUCTION 9
I. LES DIVERSES PROPRIETES DES MATERIAUX 11
I.1 PROPRIETES MECANIQUES DES MATERIAUX 11
I.1.A LES TROIS CLASSES DE MATERIAUX 11
II. FACTEURS FAVORISANT LA NAISSANCE DES FISSURES: 11
II.A : LA FATIGUE 11
II.B : PRESENCE DES CONTRAINTES RESIDUELLES 11
II.B .1 : Tension et compression 12
II.B .2 : Facteurs donnant naissance aux contraintes résiduelles : 12
CHAPITRE I : Collage naissance et évolution: 13
I.INTRODUCTION AU COLLAGE : 15
I.01 : NAISSANCE ET EVOLUTION: 15
I.02.**A** : INCONVENIENTS. 16
I.0**2.B** : LES AVANTAGES. 16
I.0**3** : THEORIES DE L'ADHESION 16
I.03-1 : Théorie mécanique : 17
I.03-2 : Théorie électrique : 17
I.03-3 : Théorie chimique : 17
I.03-4 : Théorie de la diffusion : 17
I.03-5 : Théorie thermodynamique : 17
I.04 : NOTIONS CARACTERISTIQUES DES ADHESIFS 17
I.04-1 : Préparation des surfaces 17
I.04-2 : Le Mouillage *(ou mouillabilité)*: 18
I.04-3 : Rugosité. 20
I.04-4 : Autres précautions, Coefficients de dilatation 21
I.04-5 : Temps d'application 21

I.05 : TYPES D'ADHESIFS : 21
I.05-1 : Les adhésifs structuraux 21
I.05-2 : Les Polyuréthanes 22
I.05-2 : Les Epoxydes 23
I.05-3 : Les Acryliques 24
I.05-5 : Les Anaérobies 25
I.05-6 : Les Anaérobies réactivables aux UV. 26
I.05-7 : Les Acryliques modifiées. 26
I.05-8 : Les Thermofusibles ou Hot-Melts. 26
I.05-9 : Les colles en dispersion aqueuse 27
I.05-10 : Les Rubans adhésifs. 28
I.06 : PRESENTATION DE QUELQUES AUTRES COLLES EXISTANTES 29
I.06-1 : Le Collage humide. 29
I.06-2 : Le Collage thermo-fusible. 29
I.06-3 : Le Collage contact. 29
I.06-4 : Le Collage par réactivation. 30
I.06-5 : X-Réactivation solvants 30
I.06-6 : Y-Réactivation chaleur 30
I.06-7 : Le Collage avec évaporation des solvants. 30
I.06-8 : La Polymérisation 30
I.07 : LES PARAMETTRE IMPORTANT DANS L'ASSEMBLAGE 29
I.08 : COLLAGE STRUCTURAL (LA METHODE INNOVANTE D'ASSEMBLAGE) 31
I.08-01 : L'utilité des colles structurelles 31
CHAPITRE II : LES MATERIAUX COMPOSITES 31
II.1 : LES HYPOTHESES D'HOMOGENEITE ET D'ISOTROPIE 33
II.1.1 : Homogénéité 33
II.1.2 : Isotropie 34
II.2: Approche expérimentale du comportement d'un pli 35
II.2.1 : Traction longitudinale 35
II.2.2: Traction transversale 36
II.2.3 : Cisaillement longitudinale/transverse 37
II.2.4 : Comportement dans une direction quelconque 37
II.3 : QUELQUES MODELES ELASTIQUES LINEAIRES ANISOTROPES 38
II.3.1: Le pli unidirectionnel en contraintes planes 38
II.3.2: Cas général en 3D 39
A : Modèle isotrope transverse 39
B : Modèle orthotrope 40

CHAPITRE III: INTRODUCTION AUX ESSAIS MECANIQUES POUR LE COLLAGE DES STRUCTURES AVEC DES COMPOSITES……41

III.1: INTRODUCTION..... 43

III.2 : LA CONCEPTION D'UN JOINT COLLÉ..... 43

III.3 : DIFFERENTS CAS D'ASSEMBLAGE DES COMPOSITES 44

III.4 : PARAMETRES QUI INFLUENT SUR LA RESISTANCE DES ASSEMBLAGES 45

III.4.1: Paramètres matériaux 45

III.4.2: Paramètres de conception..... 45

III.4.3: Modes de sollicitations mécaniques 45

III.4.4: Caractéristiques de l'adhésif et du joint 45

III.4.5: Environnement 46

III.4.6: Effets thermiques, dilatations différentielles..... 46

III.4.7: Différences de rigidité..... 46

III.4.8 : La rigidité de l'adhésif. 46

III.5: LE CHOIX DU MATERIAU COMPOSITE UTILISE :..... 46

III.6 : MODES DE SOLLICITATIONS DANS UN JOINT COLLE..... 47

1. Des Contraintes Normaux : 47

2. Des Contraintes Cisaillement : 47

3. Des Contraintes de pelage : 47

4. Des Contraintes de clivage : 47

III.7 : LES DIFFERENTS TYPES D'ASSEMBLAGES COLLÉS..... 48

III.8 : CARACTERISTIQUES DE MISE EN ŒUVRE DES COLLES..... 49

III.8.1. Épaisseur minimale-maximale 49

III.8.2. Consommation ou grammage..... 50

III.8.3. Temps de gommage, temps d'attente avant assemblage 50

III.8.4. Temps ouvert..... 51

III.8.5. Temps d'assemblage fermé 51

III.8.6. Tack ou adhérence immédiate..... 51

III.8.7. Durée de vie des structures collées..... 51

III.9 : LA CONCENTRATION DES CONTRAINTES (MECANIQUE CLASSIQUE)..... 51

III.10 : MECANIQUE DE LA RUPTURE..... 52

Introduction 52

III.10.1 : Mécanique linéaire et non linéaire de la rupture 53

III.10.2 : Modes de rupture..... 54

III.10.3 : LES PARAMETRES INFLUANT SUR LES CONTRAINTES QUI SE MANIFESTENT DANS UN JOINT COLLE ET AINSI SUR LE COMPORTEMENT DES FISSURES : 55

III.11 : ADHERENCE SUR DIFFERENTS SUPPORTS 56

1 : Résistance au pelage..... 56

2. Résistance au cisaillement 57
3. Résistance à la traction 58
III.12. LES METHODES DE CALCUL 58
2 : Essai Arcan : 60
2.1 : Essai de traction-cisaillement 61
3 : Essai Arcan Modifié 62
4 : Essai Tast .....…65
Conclusion ……..66
CHAPITRE VI : CALCUL ET ANALYSE DES RESULTATS……67
VI.1 :Réparation des fissures par patch composite ……68
VI.2 :Les contraintes de cisaillement dans la colle……68
VI.3 :Modèle géométrique pour un calcul numérique. ……71
VI.3.1 : La plaque……71
VI.3.2 : Le patch……71
VI.3.3 : La colle……72
VI.3.4 : Mise en charge de la plaque..……73
VI. 4 :Analyse et interprétation des résultats……74
VI. 4.1 :Introduction……74
VI. 4.2 :Distribution de contraintes τxz suivant la ligne Y ……75
VI. 4.3 :Distribution de contraintes τyz suivant la ligne Y ……76
VI. 4.4 :Distribution de contraintes σyy suivant la ligne Y ……77
VI. 4.5 :Distribution de contraintes σzz suivant la ligne Y ……78
VI. 5 :Effet de la taille de la fissure-……79
VI. 5.1 : Distribution de contraintes normale σzz et σyy suivant la ligne X……79
VI. 5.2 : Distribution de contraintes tangentielles τxz suivant la ligne X……80
VI. 5.3 : Distribution de contraintes tangentielles τyz induite suivant la ligne X……81
VI. 6 : Examen des Contraintes selon Von Mises ……81
-Contrainte équivalente de Von Mises dans l'adhésif (fissure de 10 mm) ……82
-Contrainte équivalente de Von Mises dans l'adhésif (fissure de 30 mm) ……82
-Contrainte équivalente de Von Mises dans l'adhésif (fissure de 50 mm) ……83
VI. 6.1 : Distribution de contraintes tangentielles τ_{xz} suivant la ligne X ……83
VI. 6.2 : Distribution de contraintes tangentielles τ_{yz} suivant la ligne X ……84
VI. 6.3 : Distribution de contraintes normale σ_{yy} suivant la ligne X ……85
VI. 6.4 : Distribution de contraintes tangentielles τ_{yz} et τ_{xz} suivant la ligne X ……85
Annexe : ……87
VI. 7 : L'intégral J et facteur d'intensité de contrainte……88
VI. 7.1 : Comportement élastoplastique……88

VI. 7.1.A : Effet de l'épaisseur de l'adhésif: ……89

VI. 7.1.B : Effet de l'épaisseur du patch: …….90

VI. 7.1.C : Effet de la variation du coefficient de poisson de la colle. : ……91

VI. 7.1.D : Effet de la variation de la force appliquée: ……91

VI. 7.1.E : Effet de la variation du module d'élasticité longitudinale de la colle :……92

Conclusion : ……94

Bibliographie:…….96

Sommaire : ……..……..……..……...97