



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
-----  
معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de Maintenance en Electromécanique**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière : Génie Industriel**  
**Spécialité : Maintenance – Fiabilité - Qualité**

### **Thème**

**Modélisation numérique des effets de raidisseur sur le  
comportement en rupture des plaques avec fil d'ouverture  
rectangulaire sollicitées mécaniquement**

Présenté et soutenu publiquement par :

AOUAICHIA Younes

BOURICHE Abdelhadi

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
TITAH Mouloud	Maitre de conférence	Université d'Oran 2	Président
BACHIR BOUIADJRA Bachir	Maitre de conférence	Université d'Oran 2	Encadreur
CHAREF Djilali	Maitre de conférence	Université d'Oran 2	Examineur

# REMERCIEMENTS

*Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant de m' avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.*

*Mener une recherche de thèse jusqu'à son terme est un exercice long, solitaire, rythmé d'imprévus dans son déroulement et ses résultats qui n'aurait pas été possible sans l'entourage de mon promoteur, qui m'a montré le chemin à prendre.*

*Je tiens à remercier sincèrement Monsieur "**BACHIR BOUIADJRA Bachir**", et j'adresse l'expression de ma gratitude et respect pour m'avoir encadré et dirigé ce travail, pour ses louables contributions inlassables et pour ses précieux conseils et son perpétuel dévouement.*

*Je remercie vivement Mr. "**TITAH Mouloud** " en étant président du jury sincère remerciements.*

*A Mr "**CHAREF Djilali** " Qui a accepté d'examiner ce travail.*

*Je dois un remerciement à tous les enseignants de l'Imsi pour leurs qualités scientifiques et pédagogiques.*

*Nos remerciements vont aussi à toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire et qui, à un moment ou un autre, se sont intéressées à nos recherches...*

# DEDICACE

*A ma Chère Mère,*

*A mon Père ,*

*Dont le mérite, les sacrifices et les qualités  
humaines m'ont permis de vivre ce jour.*

*A mes Frères et mes*

*sœurs ..*

*A tous les gens qui m'aiment ...*

*( Younes & Hadi)*

## **Modélisation numérique des effets de raidisseur sur le comportement en rupture des plaques avec fil d'ouverture rectangulaire sollicitées mécaniquement**

**Résumé :** Dans cette étude la méthode des éléments finie est utilisée pour analyser la distribution des contraintes de rupture dans les plaques avec fil d'ouverture rectangulaire avec différentes type de l'emplacement des raidisseurs

La distribution des contraintes dans la couche adhésive sera analysée pour estimer la durabilité de la technique de réparation par la variation du différent paramètre du raidisseur. Cette analyse permet aux concepteurs pour optimiser l'emplacement du raidisseur utilisé pour la réparation des structures. Les résultats obtenus ont montré les meilleurs emplacements du raidisseur utilisé pour la réparation des structures.

**Abstract:** In this study the finite element method is used to analyse the distribution of fracture stresses in rectangular aperture wire plates with different type of stiffener location.

The stress distribution in the adhesive layer will be analysed to estimate the durability of the repair technique by varying the different stiffener parameter. This analysis allows the designers to optimise the location of the stiffener used for the repair of the structures. The results obtained showed the best locations of the stiffener used for the repair of the structures.

الخلاصة: في هذه الدراسة تم استخدام طريقة العناصر المحدودة لتحليل توزيع ضغوط الكسر في الصفائح ذات السلك المستطيل الفتح مع أنواع مختلفة من مواقع التقوية.

سيتم تحليل توزيع الضغوط في الطبقة اللاصقة لتقدير متانة تقنية الإصلاح من خلال تغيير المعلمة المختلفة للمصلب. يسمح هذا التحليل للمصممين بتحسين موقع التقوية المستخدم لإصلاح الهياكل. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أفضل مواقع التقوية المستخدمة لإصلاح الهياكل.

## Liste des figures :

Num	Titre	N° de page.
I.1	Réparation de poutre par adjonction d'armature	5
I.2	Chemisage en béton armée (Fukuyama et Sugano 2000)	5
I.3	Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier (Priestley et al. 1994 a, 1994 b)	6
I.4	Application de plats métalliques selon le procédé Hamelin 2002)	7
I.5	Renforcement des poutres par matériaux composites	7
I.6	Différents types de réparation par précontrainte additionnelle [Fargeot B. 1997] [19]	8
II.1	Modèle unidimensionnel d'une structure renforcée par un patch composite	17
II.2	Patch composite avec une épaisseur dégressive	18
II.3	Diverses formes de patchs composites d'après	18
II.4	Structure fissurée et renforcée par un patch composite	19
II.5	Evolution du facteur d'intensité K1 en fonction de la longueur de fissure	19
II.6	Exemple d'essai sur une éprouvette fissurée et renforcée par un patch composite	20
II.7	Résultats d'un essai de fatigue sur une éprouvette fissurée et renforcée par un patch composite	20
II.8	Exemple de réparation sur un avion F 111 d'après	22
II.9	Exemple de réparation sur un avion Mirage d'après	23
II.10	Exemple de réparation sur un avion Hercules d'après	23
II.11	Exemples de patchs riveté et collé d'après	24
III.1	Domaines d'application du collage structural	28
III.2	Représentation schématique simplifiée d'une interphase adhésif/substrat	30
III.3	Logigramme d'un exemple de protocole de traitement de surface	31
III.4	Illustration de quelques défauts de collage	32
III.5	Types de rupture	33
III.6	Film adhésif AF191U	34
III.7	Cycle de cuisson de l'adhésif AF191U	35
III.8	Dégraissage des substrats dans un bain à ultrasons	36
III.9	Décapage par immersion dans une solution de NaOH	37
III.10	dissolution de la couche de tetrahydroxyaluminate de sodium avec de l'acide nitrique.	37
III.11	Traitement de surface P2.	38
III.12	Goniomètre	39
III.13	Angle de contact.	40
III.14	Cliché d'une surface dégraissée à l'acétone	41
III.15	Cliché MEB d'une Surface sablée Les cercles blancs Indiquent la position de particules De sable incrustées.	41
III.16	Cliché MEB d'une surface sablées présentant des pics fragiles	41
III.17	Esquisse du premier type des substrats	42
III.18	Esquisse du deuxième type des substrats	42

<b>III.19</b>	<b>Positionnement des éprouvettes avant cuisson</b>	<b>42</b>
<b>III.20</b>	<b>Régulateur de pression</b>	<b>42</b>
<b>III.21</b>	<b>Eprouvette avec talons collés et mouchetis</b>	<b>44</b>
<b>III.22</b>	<b>Pressage des échantillons</b>	<b>45</b>
<b>III.23</b>	<b>Maintien des positions après pressage</b>	<b>45</b>
<b>III.24</b>	<b>Observation du joint de colle des échantillons</b>	<b>46</b>
<b>III.25</b>	<b>Surface de rupture d'une éprouvette sablée</b>	<b>46</b>
<b>III.26</b>	<b>Cliché MEB d'un joint de colle quelle conditions de préparation (Traitement de surface NaOH+P2)</b>	<b>47</b>
<b>IV.1</b>	<b>Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en sens vertical</b>	<b>53</b>
<b>IV.2</b>	<b>Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) chargement en sens vertical</b>	<b>54</b>
<b>IV.3</b>	<b>Distribution du Contrainte pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en sens vertical</b>	<b>55</b>
<b>IV.4</b>	<b>Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en sens horizontal</b>	<b>56</b>
<b>IV.5</b>	<b>Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) chargement en sens horizontal</b>	<b>57</b>
<b>IV.6</b>	<b>Distribution du Contrainte pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en sens horizontal</b>	<b>58</b>
<b>IV.7</b>	<b>Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en deux sens différents</b>	<b>59</b>
<b>IV.8</b>	<b>Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) chargement en deux sens différents</b>	<b>60</b>
<b>IV.9</b>	<b>9 Distribution du Contrainte pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en deux sens différent</b>	<b>61</b>
<b>IV.10</b>	<b>Effet de l'orientation de raidisseur sur le FIC</b>	<b>62</b>
<b>IV.11</b>	<b>contraintes de cisaillement <math>\tau_{xy}</math> pour différents chargements verticaux appliquées</b>	<b>64</b>
<b>IV.12</b>	<b>contraintes de cisaillement <math>\tau_{xy}</math> pour différents chargements horizontal appliquées</b>	<b>65</b>
<b>IV.13</b>	<b>contraintes de cisaillement <math>\tau_{xy}</math> pour différents chargements en deux sens différentes appliquées</b>	<b>66</b>

**Liste des tableaux :**

<b>Num</b>	<b>Titre</b>	<b>N° de page</b>
<b>II.1</b>	<b>Exemples de réparations par patchs composites effectuées par la RAAF</b>	<b>21</b>
<b>IV.1</b>	<b>compositions chimiques de : Al2024T3</b>	<b>51</b>
<b>IV.2</b>	<b>caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés</b>	<b>51</b>

# Sommaire

<b>Introduction :</b> .....	<b>2</b>
Chapitre 01 : Généralité sur le renforcement	
<b>1.Définition renforcement:</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Les structures génie civil :..</b> .....	<b>4</b>
<b>3. Méthodes de renforcement des structures en béton armé :</b> .....	<b>4</b>
<b>a. Chemisage en béton armé :</b> .....	<b>4</b>
<b>b. Chemises en acier :</b> .....	<b>6</b>
<b>c. Tôles collées :</b> .....	<b>6</b>
<b>d. Matériaux composites :</b> .....	<b>7</b>
<b>e. Précontrainte additionnelle :</b> .....	<b>8</b>
<b>4.Les raidisseurs :</b> .....	<b>8</b>
<b>4.1. Définition :</b> .....	<b>8</b>
<b>4.2. Types de raidisseur</b> .....	<b>9</b>
<b>4.3. Sections de raidisseur</b> .....	<b>9</b>
<b>4.4. Contrôle du flambement local</b> .....	<b>9</b>
<b>4.5. Raccordement de contreventements ou de poutres transversales</b> .....	<b>10</b>
<b>4.6. Conception de raidisseurs pour le flambement local</b> .....	<b>10</b>
<b>4.7. Raidisseurs de roulement</b> .....	<b>10</b>
<b>4.8. Raidisseurs d'âme transversaux intermédiaires</b> .....	<b>11</b>
<b>4.9. Raidisseurs longitudinaux</b> .....	<b>12</b>
<b>5. Les avantages du renforcement :</b> .....	<b>13</b>
<b>5.1. Les causes qui conduisent à renforcer les structures :</b> .....	<b>13</b>

## Chapitre 02 : La réparation par patches composites dans l'aéronautique

1.	Introduction :.....	16
2.	Le phénomène de transfert d'effort substrat/patch par cisaillement de la colle :.....	16
3.	L'optimisation de la forme du patch en zone d'ancrage :.....	17
3.1.	La réparation par patches composites dans l'aéronautique :.....	18
3.2.	Le pontage de fissure :.....	18
4.	Quelques applications :.....	21
4.1.	Quel renfort composite choisir ?.....	24
4.1.1.	Renfort riveté ou collé ?.....	24
4.1.2.	Quel matériau choisir ?.....	24
5.	Conclusion :.....	26

## Chapitre 03 : Traitement des surfaces collées

1.	Le Collage.....	28
2.	Défauts de collage /Défaut d'adhésion.....	29
3.	Caractérisation des interfaces collées/influence des défauts.....	33
3.1.	Matériaux des substrats et adhésif.....	33
3.2.	Traitement de surface.....	35
3.2.1.	Le dégraissage.....	35
3.2.2.	Sablage.....	36
3.2.3.	Décapage à la soude (NaOH).....	36
3.2.4.	Décapage chimique P2.....	37
3.2.5.	Décapage avec agitation continue et maintien de la température de la solution.....	38
3.2.6.:	Contrôle de la température de la solution (60°C – 70°C).....	38
3.2.7.:	Formation de bulles de gaz fines sur la surface.....	38
3.2.8.:	Formation de bulles de gaz fines sur la surface.....	39
4.	Caractérisation de surface.....	39
4.1.	Mouillage.....	39
4.1.1.	surface dégraissée, (b) : Surface sablée.....	40
4.2.	Observation microscopique.....	40
5.	Fabrication des éprouvettes et tests de caractérisation.....	41
5.1.	Substrats et accessoires.....	41

<b>5.2. Collage.....</b>	<b>42</b>
<b>5.3. Choix d'une gamme de collage.....</b>	<b>44</b>
<b>5.4. Les avantages et les inconvénients du collage :.....</b>	<b>47</b>
<b>5.4.1. Avantages de collage.....</b>	<b>47</b>
<b>5.4.2. Inconvénients de collage.....</b>	<b>48</b>

#### Chapitre 4 : Analyse des résultats

<b>1.Introduction :.....</b>	<b>50</b>
<b>2. Matériaux :.....</b>	<b>50</b>
<b>3. Choix de l'adhésif :.....</b>	<b>51</b>
<b>4. La concentration des contraintes :.....</b>	<b>52</b>
<b>4.1. Résultat et discussion :.....</b>	<b>52</b>
<b>5 Analyse du facteur d'intensité des contraintes : .....</b>	<b>61</b>
<b>6 Analyse du contraintes de cisaillement de l'adhésive :.....</b>	<b>62</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>64</b>

## Introduction Générale :

La réparation de composants fissurés par une pièce collée a été acceptée dans les structures aérospatiales. La réparation par collage réduit le champ de contraintes à proximité de la fissure en établissant un pont entre les contraintes de la fissure et celles du composant.

La plaque fissurée et le raidisseur, permet de retarder ou d'arrêter complètement la croissance de la fissure. Fournit une efficacité structurelle élevée et prolonge la vie des composants structurels fissurés à un coût économique.

Les structures aérospatiales sont souvent soumises à des conditions de charge de fatigue. Par conséquent, l'étude du comportement de croissance des fissures dans les structures réparées par raidisseur collés a été l'objectif principal de la majorité des études moderne.

La conception du raidisseur est une tâche très difficile en raison de l'interférence entre les effets de plusieurs paramètres, notamment les propriétés mécaniques de différents matériaux (panneaux en aluminium, composites et adhésifs), les propriétés géométriques du raidisseur, ainsi que conditions du chargement. La complexité de la conception est plus forte pour le raidisseur.

Dans le cas du raidisseur, un moment de flexion est généré par le décalage de l'axe neutre du panneau en aluminium. Ce moment augmente les contraintes dans la zone fissurée et réduit ainsi l'efficacité du renforcement. La minimisation de ce moment doit impérativement passer par l'optimisation du rapport de rigidité entre le raidisseur et le panneau en aluminium.

La ductilité du métal réparé peut jouer un rôle prépondérant dans les performances du renforcement du moment où elle affecte directement la résistance à la rupture. Cet effet de la plasticité n'a pas été suffisamment analysé dans la littérature. Le but de cette thèse est d'étudier les effets d'interaction entre l'endommagement de la couche adhésive et l'endommagement dans le métal renforcé par la technique de raidisseur.

Nous avons choisi alliages aéronautique d'aluminium pour réaliser cette étude : le Al 2024 T3. Il est connu que le Al 2024 T3 a un comportement plus ductile. La thèse se compose de trois chapitres :

- Dans les deux premiers chapitres, nous avons présenté une étude bibliographique sur le collage en général et sur la technique du renforcement et réparation des structures métalliques par raidisseur et par patch en composite.
- Et enfin, dans le troisième chapitre, on a fait une description de l'approche numérique et nous avons analysé les résultats obtenues.

### **1. Définition renforcement:**

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de

Service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction

Pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui

Procurer une protection suffisante contre des sollicitations dont il n'a pas été tenu compte

Dans les calculs. Un renforcement peut être associé à une réparation.

On peut voir le renforcement dans plusieurs domaines par exemple :

- 1- Les structures aéronautiques.
- 2- Les structures génie civil.
- 3- Les structures automobiles.
- 4- Les structures navales.

### **2. Les structures génie civil :**

Deuxièmes en présente le renforcement dans les structures en génie civil :

Les dégradations du matériau béton entraînent des faiblesses qui nécessitent un renforcement de la structure pour améliorer les caractéristiques mécaniques des éléments qui la composent afin d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage et lui conférer une certaine résistance pour mieux répondre aux nouvelles conditions de sollicitations. De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les structures en béton armé. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions.

### **3. Méthodes de renforcement des structures en béton armé :**

Actuellement, plusieurs méthodes et techniques de réparation ou/et de renforcement sont proposées dans la littérature.

#### **a. Chemisage en béton armé :**

Le chemisage en béton armé consiste à augmenter considérablement les sections, par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton

d'enrobage pour favoriser l'accrochage, ce dernier sera mis en œuvre après la confection du coffrage [1][10] .

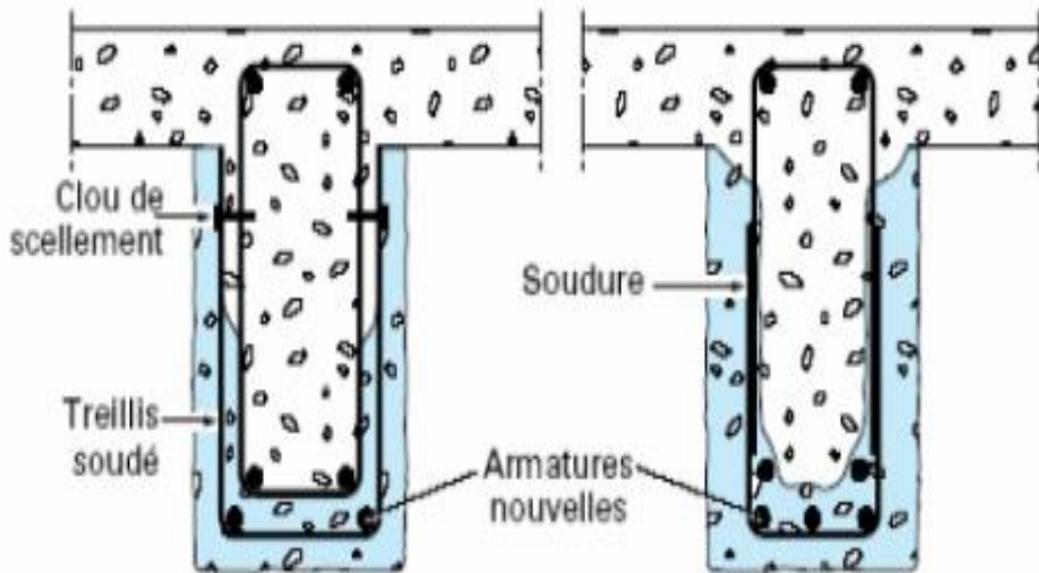


Figure I.1 : Réparation de poutre par adjonction d'armature [19]

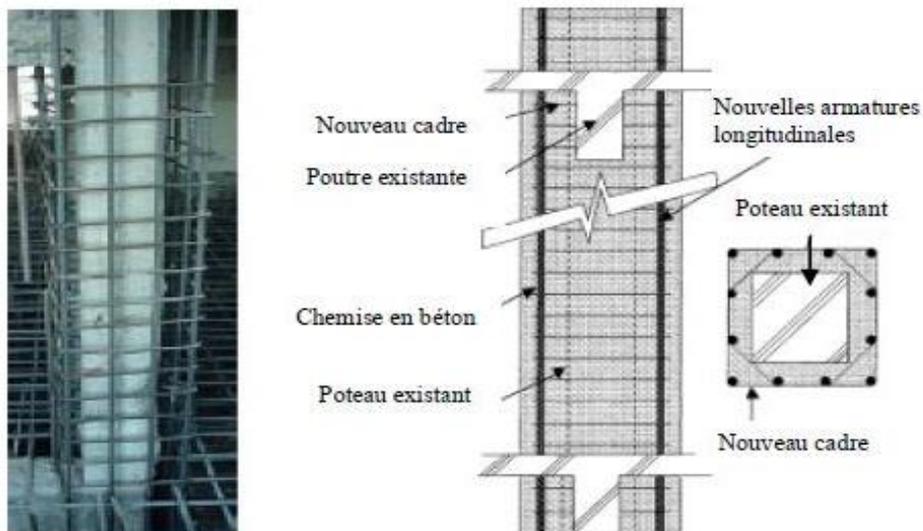
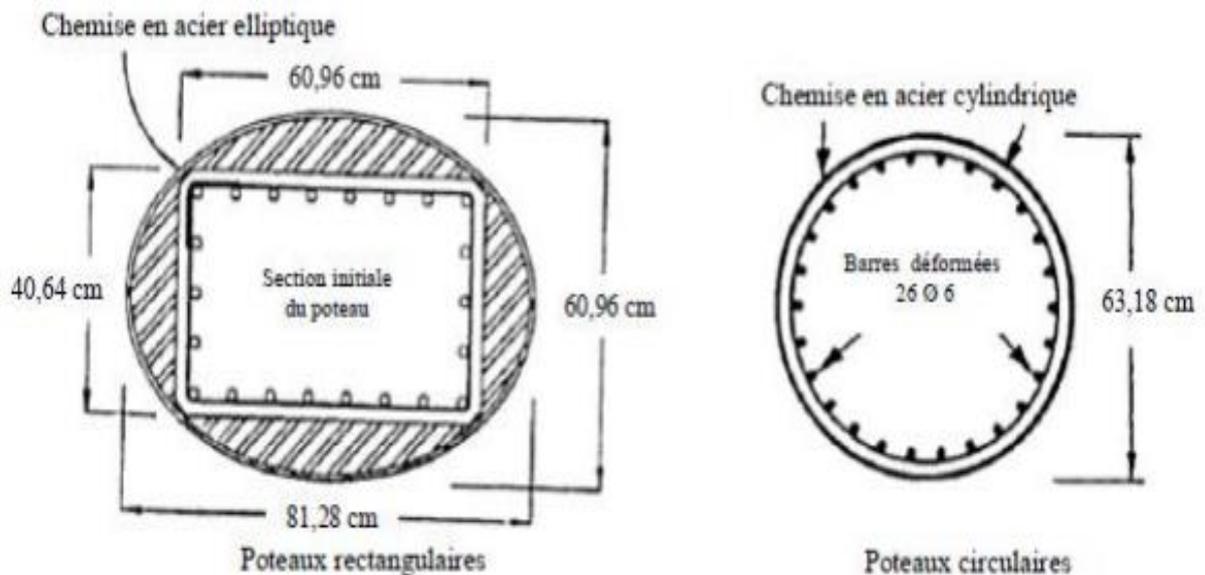


Figure I.2 : Chemisage en béton armée (Fukuyama et Sugano 2000)

### b. Chemises en acier :

Le renforcement des poteaux de sections circulaires ou rectangulaires avec des chemises en acier permet d'améliorer considérablement la résistance sismique des poteaux ainsi que leur ductilité. Les chemises en acier pourraient éventuellement être utilisées dans les installations industrielles possédant un nombre restreint de poteaux nécessitant un renforcement, vu le coût élevé de l'acier. Cependant, dans le cas des bâtiments à usage d'habitation où plusieurs poteaux doivent être renforcés, cette technique s'avère trop onéreuse [1].

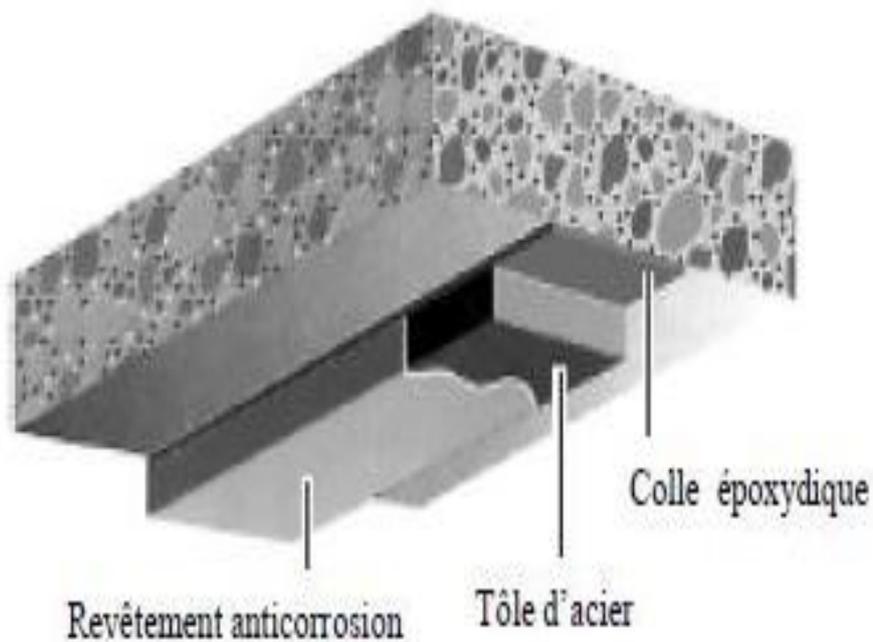


**Figure I.3:** Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier (Priestley et al. 1994 a, 1994 b) [1].

### c. Tôles collées :

Le renforcement de la structure par plats métalliques, mieux connue sous le nom de procédé l'Hermitte, consiste à réaliser un collage de tôles d'acier sur les supports de béton. La tôle joue à la fois le rôle de coffrage et d'armatures. Pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent subir toute leur préparation en usine (découpage, sablage...). L'emploi de ce mode de réparation est particulièrement

limité, à cause de sa mise en œuvre difficile et onéreuse. [1][19]



**Figure I.4 :** Application de plats métalliques selon le procédé Hamelin 2002)

### **d. Matériaux composites :**

Les techniques traditionnelles de renforcement ou de réparation ont montré leurs limites. Le recours aux matériaux composites constitue une des solutions de renforcement des structures la plus prometteuse. Les quelques exemples d'application de part le monde, ont mis en évidence l'intérêt du renforcement par les matériaux composites en termes de résistance et de durabilité [1], [18], [19].

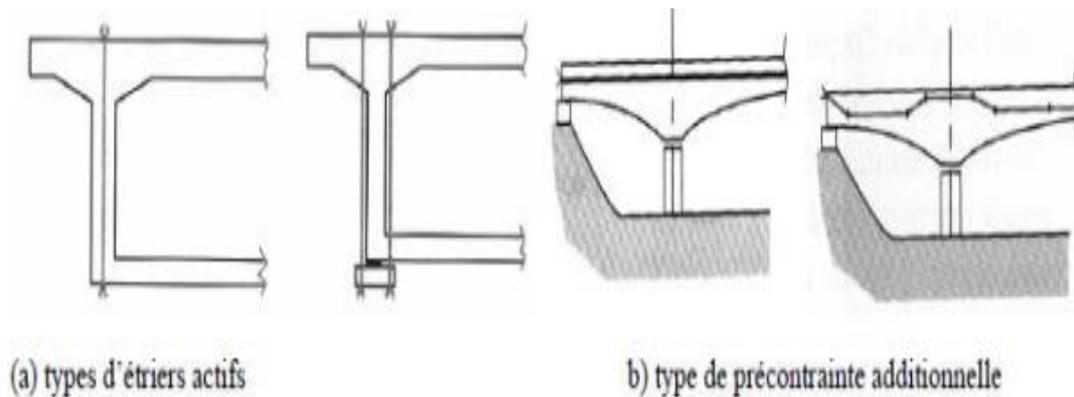


**Figure I.5 :** Renforcement des poutres par matériaux composites.

**e. Précontrainte additionnelle :**

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement, disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou pour supporter des efforts supplémentaires, suite à des modifications des conditions d'exploitation [2] [19]

Le poinçonnement : Les dalles constituent un des éléments de structure le plus classique. Du point de vue mécanique, une dalle est un élément bidimensionnel de structure plan, d'épaisseur faible par rapport à ses dimensions dans le plan, capable de transmettre des forces perpendiculaires à la surface ainsi que parallèles à son plan. Elle résiste aux efforts auxquels elle est soumise, par des mécanismes de flexion dans une ou deux directions, suivant sa géométrie et ses conditions aux limites [19],[20]



**Figure 1.6** : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle [Fargeot B. 1997] [19]

**4. Les raidisseurs :**

**4.1. Définition :**

Les raidisseurs sont des plaques ou des sections secondaires qui sont fixées aux âmes ou aux semelles des poutres pour les raidir contre les déformations hors du plan.

Presque toutes les poutres principales du pont auront des raidisseurs. Cependant, la plupart n'auront que des raidisseurs d'âme transversaux, c'est-à-dire des raidisseurs verticaux attachés à l'âme. Les raidisseurs de semelle peuvent être utilisés sur les ponts à poutres-caissons de grande portée, mais il est peu probable qu'ils soient rencontrés ailleurs.

## 4.2. Types de raidisseur

Il existe deux principaux types de raidisseurs :

- Raidisseurs d'âme longitudinaux, alignés dans le sens de la travée
- Les raidisseurs transversaux, qui sont alignés perpendiculairement à la direction de portée de la poutre.

## 4.3. Sections de raidisseur

Une variété de sections a été historiquement utilisées comme raidisseurs, mais le raidisseur plat simple est le type presque toujours utilisé dans les conceptions modernes. Les raidisseurs peuvent être fixés sur un côté de la plaque (simple face) ou sur les deux côtés (double face). Habituellement, les raidisseurs porteurs sont à double face, tandis que les raidisseurs d'âme intermédiaires sont à simple face. Les raidisseurs peuvent également être doublés, voire triplés, pour former des raidisseurs multi-jambes.

## A quoi servent les raidisseurs ?

Les raidisseurs ont une ou les deux fonctions suivantes :

Contrôle du flambement local

Raccordement de contreventements ou de poutres transversales

## 4.4. Contrôle du flambement local

Le flambement local se produit lorsqu'une section transversale est suffisamment mince pour qu'un flambage se produise dans la section transversale, en raison de la compression ou du cisaillement. Les âmes des poutres de pont sont généralement vulnérables au flambage local, mais les semelles sont généralement beaucoup plus épaisses et intrinsèquement plus résistantes au flambage.

Un flambement local peut se produire en raison d'une charge de compression transversale, par ex. une bande soumise à une réaction d'appui, une charge de compression longitudinale, par ex. de flexion ou de cisaillement.

Dans tous les cas, l'ajout d'un raidisseur relativement petit à une plaque élancée peut augmenter considérablement la résistance au flambement local.

### **4.5. Raccordement de contreventements ou de poutres transversales**

Le moyen le plus simple de contreventer des poutres en acier consiste à fixer le contreventement à des raidisseurs transversaux. Ainsi, les positions des raidisseurs coïncident presque toujours avec les positions des contreventements.

Dans un tablier en échelle, les âmes des poutres transversales peuvent être reliées directement aux raidisseurs de la poutre principale, de sorte que l'espacement des raidisseurs corresponde à l'espacement des poutres transversales. Dans un pont multipoutre avec contreventement, les éléments de contreventement sont généralement connectés aux raidisseurs de la poutre principale, de sorte que l'espacement des raidisseurs est le même que l'espacement des contreventements.

### **4.6. Conception de raidisseurs pour le flambement local**

Il y a deux étapes dans la conception des raidisseurs. La conception doit d'abord identifier où les raidisseurs sont nécessaires pour que les poutres principales soient adéquates. Ensuite, les raidisseurs eux-mêmes doivent être conçus.

### **4.7. Raidisseurs de roulement**

La clause 5.1 (2) de la norme EN 1993-1-5[1] donne un critère pour déterminer quand les raidisseurs d'appui sont obligatoires. La plupart des poutres de pont nécessiteront des raidisseurs porteurs selon ce critère. Même si les raidisseurs d'appui ne sont pas requis par cette clause, ils peuvent toujours être fournis si vous le souhaitez - cela peut bénéficier à la résistance au cisaillement telle que calculée par l'EN 1993-1-5

Aux appuis d'extrémité, si des raidisseurs d'appui doivent être fournis, une décision doit être prise quant à l'opportunité de fournir un "poteau d'extrémité rigide", comme indiqué dans l'EN 1993-1-5[1], Figures 5.1 et 9.6. Un poteau d'extrémité rigide bénéficiera de la résistance au cisaillement telle que calculée par la clause 5.3 de l'EN 1993-1-5[1]. Bien que les poutres rivetées plus anciennes au Royaume-Uni puissent avoir un détail d'extrémité de poteau d'extrémité rigide, la pratique britannique plus récente n'a pas été de fournir des poteaux d'extrémité rigides mais de fournir un « poteau d'extrémité non rigide ». Si un poteau d'extrémité rigide est requis, les exigences minimales relatives aux raidisseurs sont indiquées dans la clause 9.3.1 de l'EN 1993-1-5.

Après avoir décidé que des raidisseurs porteurs doivent être fournis, pour vérifier la conception des raidisseurs porteurs, déterminer la section effective du raidisseur conformément à la clause 9.1 (2) de l'EN 1993-1-5[1]. Notez que les raidisseurs multi-jambes doivent être divisés en sections efficaces distinctes et les charges réparties entre elles. Des conseils sur la conception des raidisseurs d'appui sont donnés à la section 8.3.2 du SCI P356.

Les charges à prendre en compte pour la conception des raidisseurs d'appui sont données dans la clause 16 de PD 6695-2[2]. La majorité de la charge sur le raidisseur sera la charge verticale due à la réaction d'appui. Il y aura une charge horizontale à prendre en compte pour résister aux forces FS comme indiqué dans la clause 10 de PD 6695-2[2], il peut également y avoir une charge horizontale du roulement s'il est fixe. Ces charges peuvent générer des moments de flexion dans la section du raidisseur.

Après avoir déterminé le chargement, vérifiez la taille du raidisseur choisie en vérifiant l'adéquation de la section effective du raidisseur pour agir comme un poteau pour la charge axiale et le moment de flexion combinés, comme requis par la clause 9.4 de l'EN 1993.

### **4.8. Raidisseurs d'âme transversaux intermédiaires**

Il est généralement nécessaire de prévoir des raidisseurs intermédiaires sur les âmes des poutres principales dans le but pratique de relier les contreventements de torsion entre les poutres. Si tel est le cas, les positions de contreventement choisies détermineront les positions d'au moins certains des raidisseurs. Cependant, pour les poutres sans contreventement, telles que les poutres transversales dans un pont à tablier en échelle, ou si un contreventement plan est utilisé, il peut n'y avoir aucune nécessité pratique pour des raidisseurs intermédiaires. L'exigence de raidisseurs d'âme transversaux intermédiaires est déterminée par la vérification de la résistance au cisaillement - cela indiquera où des raidisseurs sont nécessaires et où des raidisseurs supplémentaires à ceux du contreventement sont nécessaires.

La vérification de la résistance au cisaillement de la poutre est effectuée conformément à l'EN 1993-1-5[1], clause 5.2 (1) et 5.3 (1). Notez que la contribution à la résistance de l'âme qui provient de l'EN 1993-1-5[1] clause 5.3 (3) et de l'EN 1993-1-5[1] Annexe A.3 est fonction de l'existence et de l'espacement des raidisseurs intermédiaires. , et si ces raidisseurs intermédiaires sont classés comme rigides. Comme première étape de la

conception, il est suggéré de supposer initialement qu'il n'y a pas du tout de raidisseurs intermédiaires ; si cela s'avère que la poutre est adéquate en cisaillement, l'avantage de tout raidisseur intermédiaire pour la fixation du contreventement sera un bonus.

Si la procédure ci-dessus détermine que des raidisseurs intermédiaires sont nécessaires, le concepteur devra choisir les positions et l'espacement de ces raidisseurs et décider s'ils doivent être rigides. La vérification de la taille du raidisseur est similaire à celle des raidisseurs porteurs, en commençant par déterminer la section effective du raidisseur conformément à la clause 9.1 (2) de l'EN 1993-1-5[1]. Pour tester si le raidisseur est rigide, vérifiez que l'exigence de la clause 9.3.3 (3) de l'EN 1993-1-5[1] est satisfaite.

Les charges à prendre en compte pour la conception des raidisseurs porteurs sont données dans la clause 15 de PD 6695-2[2]. Les charges sur les raidisseurs intermédiaires sont généralement bien inférieures à celles des raidisseurs porteurs, mais les raidisseurs peuvent toujours être soumis à des forces et des moments dus à l'interaction avec poutres transversales ou contreventement. Par exemple, dans un pont à tablier en échelle, le cisaillement dans les poutres transversales entraînera une force axiale dans le raidisseur de la poutre principale. Il peut également y avoir une charge horizontale à prendre en compte à partir du contreventement qui peut générer des moments de flexion dans la section du raidisseur. Après avoir déterminé le chargement, vérifiez la taille du raidisseur choisie en vérifiant l'adéquation de la section effective du raidisseur pour agir comme un poteau pour la force axiale combinée et le moment de flexion (le cas échéant) comme requis par la clause 9.4 de l'EN 1993-1-5[1].

S'il n'y a pas de chargement direct sur le raidisseur à partir de l'un des éléments ci-dessus, il est seulement nécessaire de s'assurer que la section effective du raidisseur satisfait le critère de rigidité donné dans la clause 9.2.1 (5) de l'EN 1993-1-5[1]. Des indications supplémentaires sur la conception des raidisseurs intermédiaires sont données à la section 8.3.1 du SCI.

### **4.9. Raidisseurs longitudinaux**

Comme indiqué précédemment, la plupart des ponts n'ont pas de raidisseurs longitudinaux. Les raidisseurs longitudinaux ne doivent pas être nécessaires sur toute partie d'une section qui n'est jamais en compression ni sur toute partie de la section qui est classée dans la

classe 1, 2 ou 3 conformément à l'EN 1993-1-1[3] clause 5.2.2 (8). Même si la partie de la section est classée en classe 4, des raidisseurs longitudinaux peuvent ne pas être requis. Pour déterminer si les poutres ont une résistance à la flexion suffisante sans raidisseurs longitudinaux, la procédure doit suivre la clause 4.4 de l'EN 1993-1-5[1]. Pour déterminer si des raidisseurs longitudinaux sont nécessaires sur l'âme pour donner aux poutres principales une résistance suffisante au cisaillement, la procédure est la même que pour les raidisseurs intermédiaires, c'est-à-dire pour vérifier la résistance au cisaillement de la poutre selon EN 1993-1-5

### **5. Les avantages du renforcement :**

- la résistance, la ductilité et la déformation d'un béton renforcé sont plus élevées.
- la flexibilité des composites permet de confiner des colonnes de différentes géométries.
- Le poids de l'élément renforcé par les composites est peu modifié, vu la légèreté des composites.
- l'enveloppe de composites ne modifie pas l'apparence des colonnes ou des structures.
- Certaines composites résistent très bien aux variations de température, aux cycles de gel dégel et à l'humidité

### **5.1. Les causes qui conduisent à renforcer les structures :**

Les causes qui conduisent à renforcer la structure sont nombreuses, chaque cas doit être considéré comme un cas particulier, qui doit subir un traitement spécifique. Les causes les plus fréquentes sont :

- Accroissement des charges qui sollicitent la structure, exemple : changement d'usage de la structure, augmentation du niveau d'activité, installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels, etc.
- Défauts dans le projet ou dans l'exécution, exemple : une insuffisance de ferrailage, mauvaise disposition des armatures, matériaux de mauvaise qualité, dimensions insuffisantes des éléments structurels. etc.
- Rénovation des structures anciennes,

## Chapitre 01 : Généralité sur le renforcement

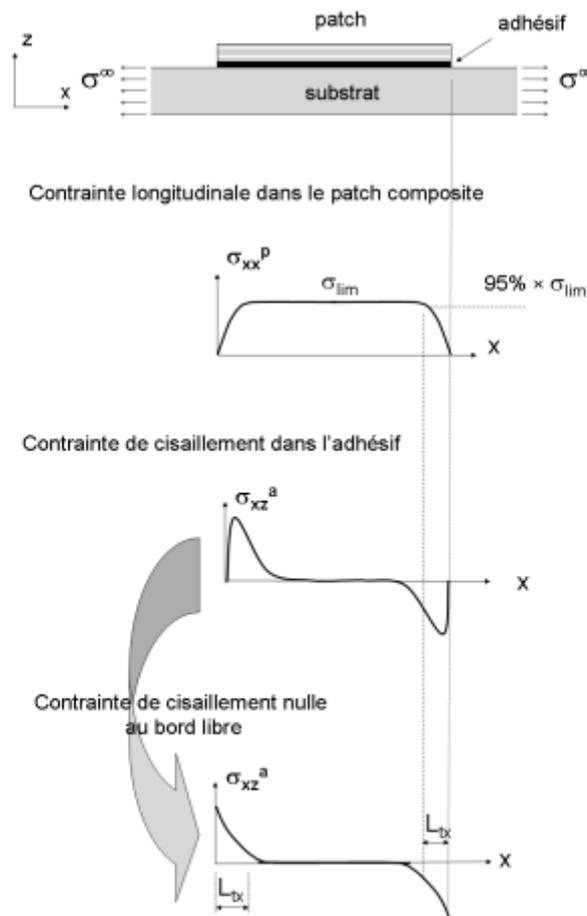
- Changement de la forme de la structure, exemple : suppression des éléments porteurs, élargissement des portées, ouverture de passages en dalles, etc.
- Dégâts dans la structure : corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton, impacts contre la structure, incendies.
- Nécessité d'améliorer les conditions en service : limiter les déformations et les flèches, réduire l'intensité des contraintes sur les armatures, diminuer la vitesse de propagation et ouvertures des fissures.

### 1. Introduction :

Le contexte de cette thèse s'inscrit dans un contexte de maintenance de structures aéronautiques, le but étant de retarder l'apparition de fissures en renforçant préventivement les structures endommagées. Très peu d'études concernent le renforcement préventif. De ce fait, des travaux antérieurs sur la réparation par patches composites ont servi de point de départ. Ce chapitre, non exhaustif, a pour but de présenter quelques-uns de ces travaux menés dans le domaine de la maintenance aéronautique afin de réparer des structures endommagées avec des matériaux composites. En effet, grâce à leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées et à leur diversité, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour réparer des structures aéronautiques vieillissantes. Leurs applications ont notamment connu un essor à la fin des années 70 [5]. Dans un premier temps, quelques travaux sur la réparation par patches composites sont présents afin de cerner les principaux mécanismes entrant en jeu. Dans un deuxième temps, des exemples d'application illustrent la pertinence du choix des matériaux composites pour réparer des zones endommagées. Finalement, une discussion sur le choix du composite utilisé est conduite dans le dernier paragraphe.

### 2. Le phénomène de transfert d'effort substrat/patch par cisaillement de la colle :

De nombreuses études ont été consacrées à l'étude théorique des contraintes dans le patch composite et dans la colle [38] [91] [29] [2] [58] [35] [34] [86] car cette dernière est souvent le point faible dans une réparation. En effet, elle est souvent à l'origine des défaillances du patch composite [21] car c'est sa rupture ou sa décohésion qui provoque le détachement du renfort composite. L'étude classique d'une structure renforcée et soumise à un essai de traction est ici rappelée.



**Fig. II.1. Modèle unidimensionnel d'une structure renforcée par un patch composite.**

### **3. L'optimisation de la forme du patch en zone d'ancrage :**

Certaines études ont été réalisées sur la forme du bord libre du patch pour limiter le pic de contrainte de cisaillement dans la colle [94]. Ces travaux ont pour but d'évaluer l'influence de la forme des bords libres du patch composite sur la diminution de ces pics (voir Figure II.2). Xiang et Raizenne [94] ont montré que des patches présentant une épaisseur dégressive amoindrissaient les contraintes dans la colle car la singularité géométrique est alors moins marquée. Ils ont par exemple optimisé l'angle et la longueur de la diminution d'épaisseur du patch composite. D'autres travaux ont été menés sur l'optimisation de la forme du patch composite [46]. La Figure II.3 présente ainsi plusieurs formes de patches étudiées [46]. Ces travaux ont montré que les patches composites arrêtant au mieux la propagation des fissures sont les patches composites en forme d'étoile.

### 3.1. La réparation par patches composites dans l'aéronautique :

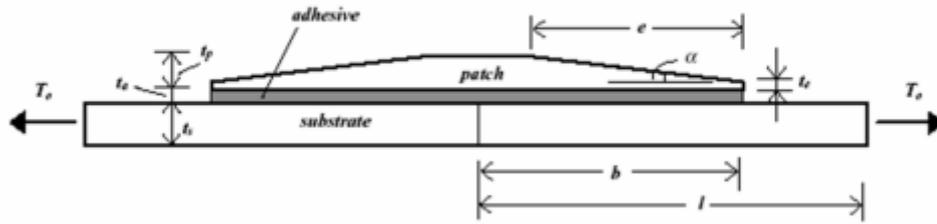


Fig. II.2. Patch composite avec une épaisseur dégressive [94].

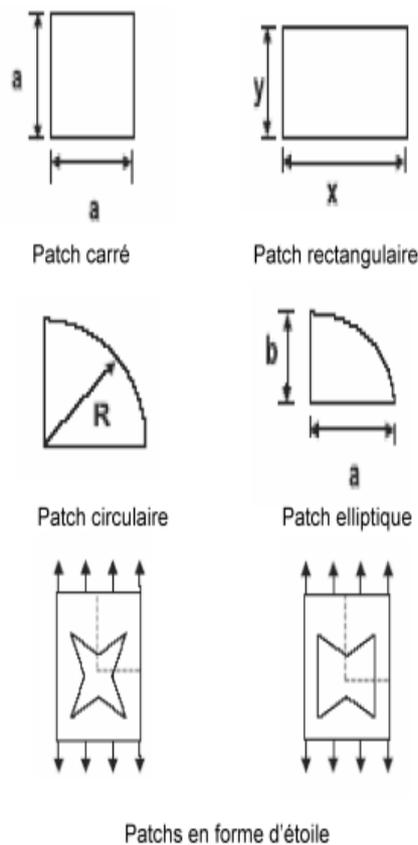


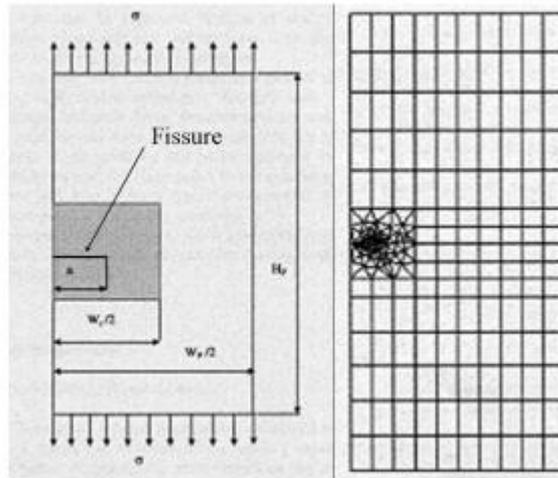
Fig. II.3. Diverses formes de patches composites d'après [46].

### 3.2. Le pontage de fissure :

Plusieurs études numériques ont été effectuées afin d'analyser le comportement des structures réparées par patches composites. Ces patches viennent se coller sur la zone endommagée afin de ponter des fissures existantes. De nombreux travaux ont été menés sur ce sujet [14] [7] [8]. La Figure II.4 montre une structure fissurée et renforcée par un patch

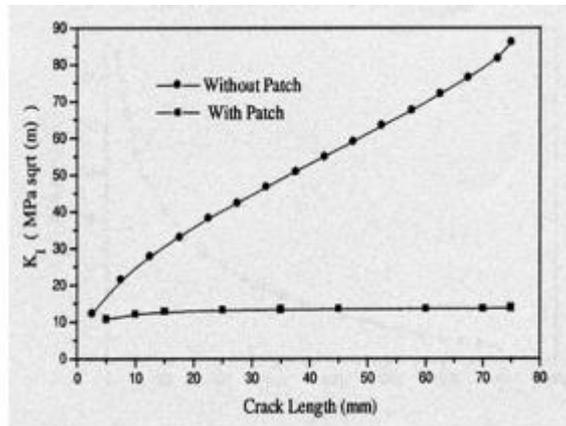
## Chapitre 02 : La réparation par patches composites dans l'aéronautique

composite et le maillage associé au modèle mécanique. Le but de cet exemple est d'étudier l'influence du patch composite sur la propagation de la fissure.



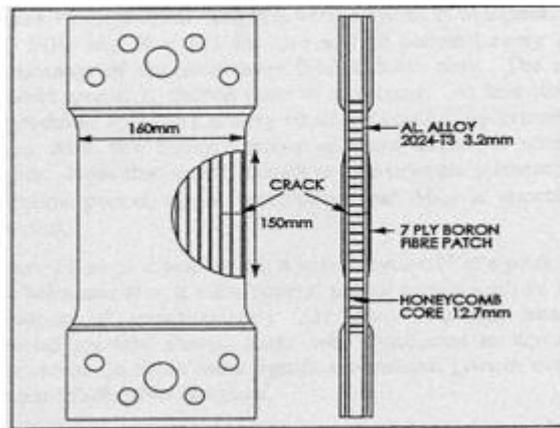
**Fig. II.4. Structure fissurée et renforcée par un patch composite [14].**

Le patch composite a pour conséquence de rigidifier la structure et de retarder la propagation de la fissure. La Figure II.5 représente le facteur d'intensité  $K_I$  en fonction de la longueur de fissure pour une éprouvette avec patch, puis sans patch.



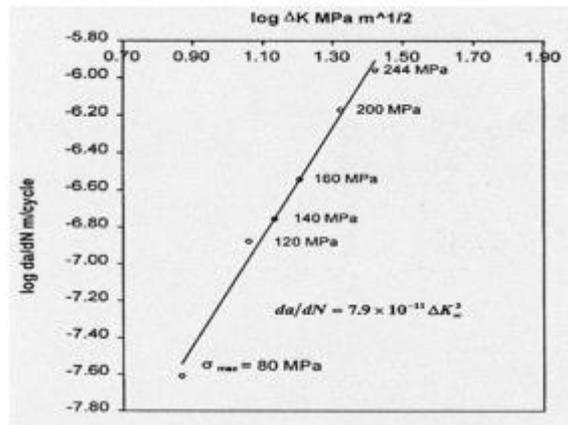
**FigII.5. Evolution du facteur d'intensité  $K_I$  en fonction de la longueur de fissure [14].**

Le patch composite a tendance à diminuer nettement  $K_I$  par rapport à une structure non renforcée, ce qui prolonge ainsi la durée de vie de la structure. Afin de valider ou non des modèles théoriques ou numériques, plusieurs études expérimentales sur la réparation par patches composites ont été effectuées. La Figure II.6 représente un essai classique tiré de la littérature [9]. Cet essai consiste à étudier le comportement en fatigue d'une structure fissurée, puis renforcée par un patch composite



**Fig. II.6. Exemple d'essai sur une éprouvette fissurée et renforcée par un patch composite [9].**

La Figure II.7 représente des résultats typiques issus de cette étude expérimentale. Elle représente le logarithme du rapport de l'incrément de la longueur de fissure  $da$  sur l'incrément du nombre de cycles  $dN$  en fonction du logarithme du facteur d'intensité  $K$ .



**Fig. II.7. Résultats d'un essai de fatigue sur une éprouvette fissurée et renforcée par un patch composite [9].**

Ces résultats montrent la linéarité du phénomène représenté sur la Figure II.7. Cette figure permet ainsi de calculer le coefficient de proportionnalité qui existe dans le cas d'une structure renforcée. D'autres travaux expérimentaux ont été réalisés afin d'évaluer la zone de transfert d'effort et de comparer les résultats trouvés avec les résultats théoriques du paragraphe 1.2.1. La plupart de ces travaux ont utilisé des jauges de déformation afin d'obtenir la distribution des déformations en surface du patch composite [28] par exemple. Les mécanismes de base sur le transfert d'effort du substrat vers le composite

## Chapitre 02 : La réparation par patches composites dans l'aéronautique

ont été présentes. Le paragraphe suivant présente quelques applications concrètes de l'utilisation de patches composites pour prolonger la durée de vie de plusieurs types d'avions.

### 4. Quelques applications :

Le but de ce paragraphe est de présenter quelques exemples d'application de patches composites visant à réparer des structures aéronautiques. Dans les années 70, la RAAF (Royal Australien Air Force) a décidé de développer l'utilisation des matériaux composites afin de renforcer des structures aéronautiques. L'AMRL (Aeronautical and Maritime Research Laboratory) a utilisé avec succès des renforts composites bore/époxyde afin de parer des problèmes de corrosion et de fatigue. Le Tableau II.1 résume les principaux travaux effectués [3] [9].

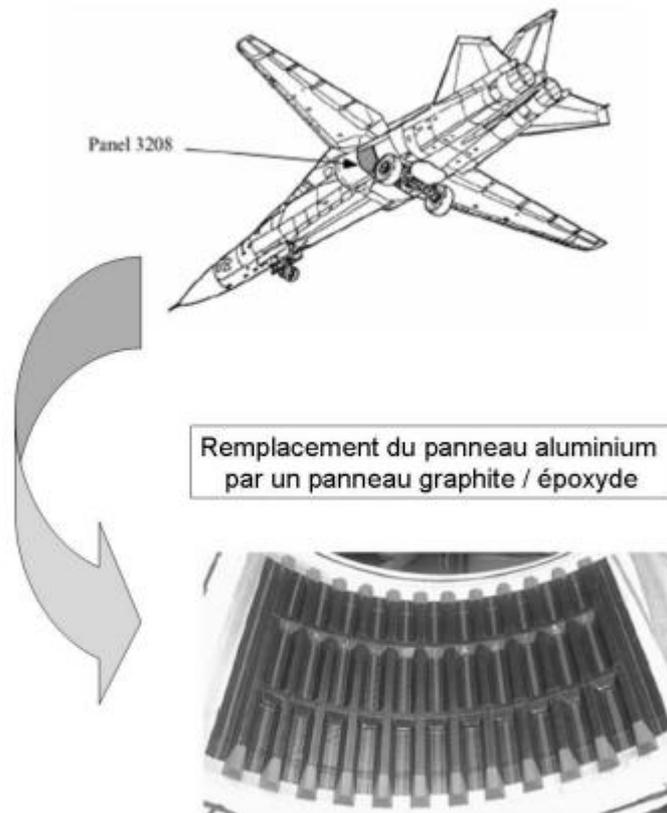
Avion	Type de dommages	Commentaires
Hercules	Corrosion	Plus de 400 réparations depuis 1975
Macchi	Fatigue	Durée de vie au moins doublée
Mirage	Fatigue	Plus de 180 réparations depuis 1979
Nomad	Corrosion	Plus de 105 000 heures de vols simulées
F 111	Corrosion	En service depuis 1980

**Tab. II.1. Exemples de réparations par patches composites effectuées par la RAAF d'après [3] [9].**

En Australie, l'utilisation de patches composites est devenue une opération classique afin de réparer des zones endommagées par la fatigue ou la corrosion. Les Figures II.8, II.9, II.10 en montrent quelques exemples. Sur la Figure II.8, l'avion représenté est un F 111. Le dommage est localisé sur un panneau situé sous l'une des ailes de l'avion. La particularité de cette réparation est qu'au lieu de venir renforcer la zone endommagée, la pièce a été directement substituée par une pièce composite graphite/époxyde. L'exemple qui suit est plus classique et concerne le Mirage III. Des fissures dues à la fatigue apparaissent sur un accès au réservoir. La Figure II.9 représente les dommages ainsi que le patch composite utilisé. Des essais de fatigue ont été effectués et ont montré que le patch composite diminuait fortement la propagation des fissures déjà présentes [9]. Cette solution a été validée par la RAAF et plus de 180 avions Mirage ont été réparés par cette procédure. Le dernier exemple concerne un endommagement dû cette fois-ci à la corrosion et concerne l'avion Hercules. Les dommages ainsi que le patch composite sont situés à l'intérieur de l'aile (voir Figure II.10). Cet exemple est intéressant du fait de sa mise en œuvre pratique.

## Chapitre 02 : La réparation par patches composites dans l'aéronautique

La procédure de réparation antérieure consistait à riveter des plaques d'aluminium sur la partie endommagée. Elle n'nécessitait l'intervention d'un ouvrier pendant six jours. L'utilisation de patches composites a été intégrée aux processus de réparation. Une fois cette intégration effectuée, cette nouvelle procédure n'utilisait qu'un seul ouvrier pendant une journée, d'où un gain important de temps et d'argent.



**Fig. II.8. Exemple de réparation sur un avion F 111 d'après [9].**

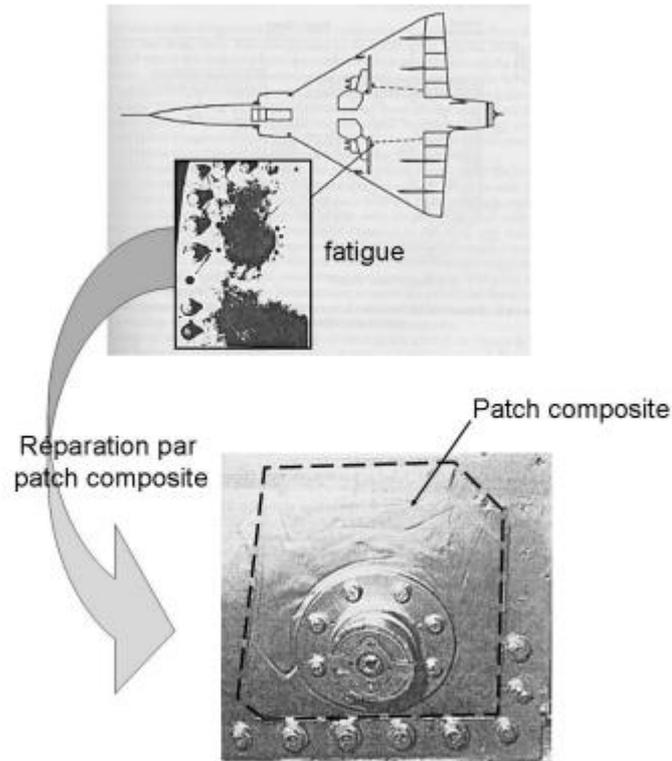


Fig. II.9. Exemple de réparation sur un avion Mirage d'après [9].

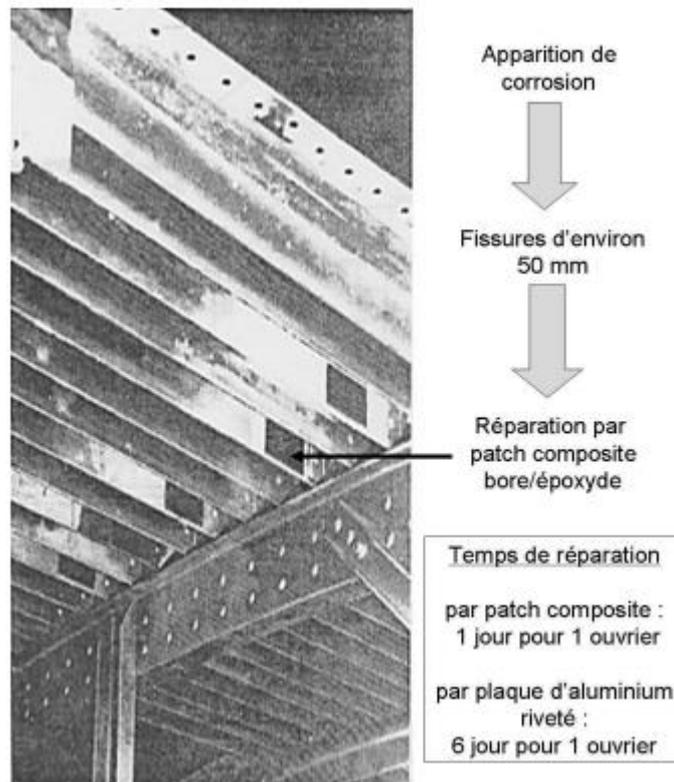
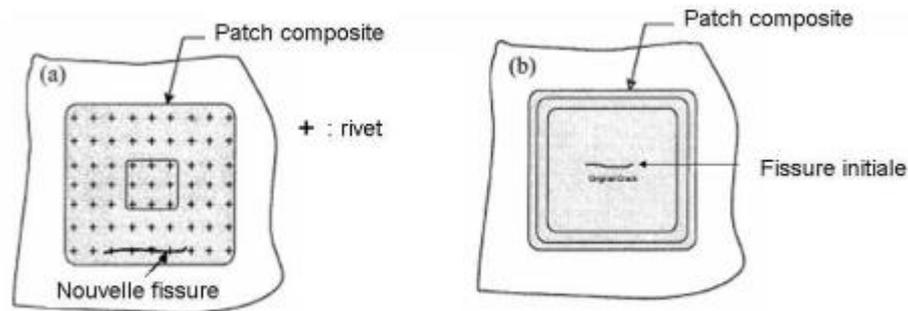


Fig. II.10. Exemple de réparation sur un avion Hercules d'après [9].

## 4.1. Quel renfort composite choisir ?

### 4.1.1. Renfort riveté ou collé ?

La question de l'utilisation de patches rivetés ou collés est ici examinée. La Figure II.11 présente les deux types de patches, l'un étant riveté, l'autre collé.



**Fig. II.11. Exemples de patches riveté et collé d'après [5].**

Le patch collé présente de nombreux avantages par rapport aux patches rivetés [5] :

- les patches collés n'entraînent pas de concentrations de contraintes, contrairement aux patches rivetés ;
- il est plus facile de contrôler les propagations de fissures avec un patch collé qu'avec un patch riveté ;
- il existe moins de risque de corrosion avec des patches collés ;
- la propagation des fissures est plus importante près des bords avec des patches rivetés ;
- le renforcement créé est plus efficace avec un patch collé.

Au vu de ces résultats, l'utilisation de patches collés a été préférée à l'utilisation de patches rivetés

### 4.1.2. Quel matériau choisir ?

Le choix du renfort est une question sensible. Les deux types de renfort principalement utilisés dans l'aéronautique sont de type carbone époxyde [31] et bore/époxyde [8]. La RAAF a employé ce dernier type de renfort avec succès dans les années 80 [9]. En France, il est actuellement interdit d'utiliser des fibres de bore qui est cancérigène. La DGA a, pour le moment, opté pour un renfort de type carbone/époxyde dans ses études préliminaires. Ce type de composite sera donc utilisé dans la suite du document pour les applications ainsi que pour l'étude expérimentale. Le principal désavantage de ce type de renfort est que son

## Chapitre 02 : La réparation par patches composites dans l'aéronautique

coefficient de dilatation est très faible dans le sens des fibres ( $2,25 \cdot 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), ce qui peut provoquer des contraintes d'origine thermique assez importantes. Il faut noter cependant que la plupart des résultats obtenus dans le cadre de cette thèse pourraient facilement être adaptés à des patches d'une autre nature. Pour des raisons de fabrication, l'orientation des plis est généralement comprise parmi quatre valeurs : 0, 45, -45, 90 degrés. Le substrat à renforcer est de l'aluminium 2024 T3. Deux types de colle permettant de solidariser le renfort au substrat sont utilisés en pratique : la colle FM et la colle Redoux. Dans notre cas, c'est la colle Redux 312 qui est utilisée. Les caractéristiques des différents matériaux sont rappelées dans le Tableau 1.2.

	<b>Composite</b>	<b>Aluminium</b>	<b>colle</b>
<i>E<sub>x</sub></i> (GPa)	<b>141</b>	<b>72</b>	<b>4.2</b>
<i>E<sub>y</sub></i> (GPa)	<b>10</b>	-	-
<i>V<sub>xy</sub></i>	<b>0.28</b>	<b>0.32</b>	<b>0.3</b>
<i>G<sub>xy</sub></i>	<b>7</b>	-	-
<i>X</i> (MPa)	<b>1786</b>	<b>440</b>	<b>70</b>
<i>X'</i> (MPa)	<b>1000</b>	-	-
<i>Y</i> (MPa)	<b>48</b>	-	-
<i>Y'</i> (MPa)	<b>150</b>	-	-
<i>S</i> (MPa)	<b>80</b>	-	-

**Tab. II.2. Propriétés mécaniques des différents matériaux.**

où *X*, *X'*, *Y*, *Y'*, *S* représente les contraintes de rupture classiques des matériaux composites [13].

### **5. Conclusion :**

Les principaux résultats des travaux menés sur la réparation par patchs composites ont été rappelés très brièvement. Ces travaux permettent d'appréhender les mécanismes qui entrent en jeu lorsqu'une structure est réparée par un patch composite. Ils ont servi de point de départ pour développer des modèles et des méthodes existantes qu'ils soient théoriques, numériques ou expérimentaux. Il existe cependant des différences entre les travaux cités et le présent travail. Les patchs composites ont été utilisés jusqu'à présent après l'apparition des fissures, que ce soit pour le Mirage, le F111 ou l'Hercules. Dans notre cas, les fissures ne sont pas encore apparues. Le but de ce travail de thèse n'est donc pas de réparer des structures fissurées mais de retarder l'apparition de ces fissures en renforçant préventivement la structure. C'est ce qui distingue le présent travail de la plupart des études sur les patchs composites publiées dans la littérature. Dans les chapitres suivants, le travail porte principalement sur l'optimisation des patchs en termes de forme et d'orientation des plis ainsi que sur le transfert d'effort entre le substrat et le patch composite.

### 1. Le Collage

Le collage structural est une technique d'assemblage de plus en plus demandée aujourd'hui dans beaucoup de domaines comme l'automobile, l'aéronautique, l'aérospatial, l'industrie navale et ferroviaire (figure III.1). Il permet d'assembler deux matériaux semblables ou différents à l'aide d'un adhésif. C'est au cours de la seconde guerre mondiale que le collage a pris un essor considérable avec la découverte des adhésifs époxydes et les résines synthétiques. Les constructeurs d'avions civils et militaires comme Boeing et Dassault ont commencé à utiliser le collage pour des pièces métalliques comme les raidisseurs, les volets, les renforts de carlingues et les pales d'hélicoptères et ce depuis les années soixante [2,3]. Dès lors, le collage n'a pas arrêté de se développer et avec l'arrivée des matériaux composites, le collage a connu encore une forte utilisation avec l'apparition de nouveaux adhésifs thermostables, résistants à la température et qui répondent aux exigences très sévères de l'industrie aéronautique et aérospatiale.



**Figure III.1 : Domaines d'application du collage structural**

L'assemblage des structures *via* les méthodes classiques comme le rivetage et

le vissage nécessite soit des perçages pour insérer des rivets, soit des échauffements locaux sous forme de zones affectées thermiquement provoquant ainsi un changement de microstructure des Matériaux. Ces derniers sont à l'origine des concentrations de contraintes ce qui engendre l'apparition des microfissures qui s'étendent sous l'application des chargements répétitifs et causer la ruine totale de toute une structure [4].

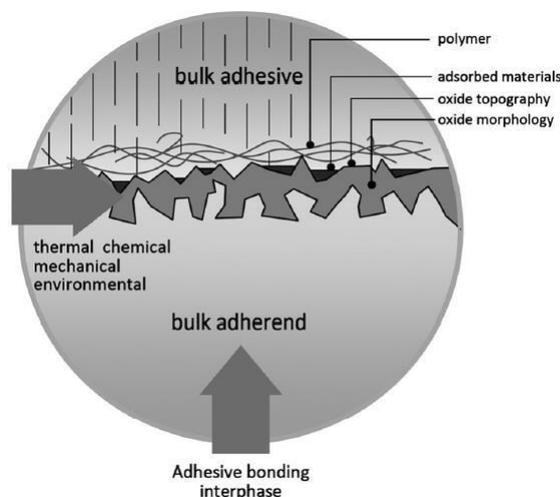
Le collage structural présente quelques inconvénients liés à la mise en œuvre lors de l'assemblage. La préparation des substrats à assembler est une étape obligatoire car elle détermine la qualité du collage donc la réussite de l'assemblage. Mais les traitements de surfaces qui sont généralement chimiques, sont coûteux et dangereux car ils nécessitent des substances chimiques toxiques pour l'être humain et pour l'environnement. De plus, le collage est réalisé à l'aide des colles thermoplastiques ou thermodurcissables. Ces matériaux ont parfois des faiblesses face à la température de service, un temps de durcissement parfois long ou encore des conditions de réticulations compliquées. Ces limites sont toutefois compensées par des avantages. Le collage permet de réduire le poids de l'assemblage, obtenir une étanchéité parfaite, une structure plus légère et une bonne répartition des charges. Il offre aussi une bonne résistance dans des milieux corrosifs et une isolation électrique, phonique et électromagnétique.

### **2. Défauts de collage /Défaut d'adhésion**

Le collage des structures métalliques ou non métalliques exige le respect d'un processus industriel bien défini afin de limiter le plus possible l'introduction des défauts de collage dans les joints de colle. Le traitement de surface et le collage sont les étapes les plus importantes de ce processus vu leur complexité. Produire une interface collée de façon reproductible et possédant des performances mécaniques optimisées est une opération délicate. En effet, de nombreux phénomènes chimiques et physiques interviennent lors d'une opération de collage pour créer une interaction forte entre un adhésif et les surfaces des substrats.

Le vrai défi des industriels c'est de pouvoir maîtriser cette interaction pour créer une interface forte et homogène, qui soit fiable et efficace en service. L'interface collée doit permettre la transmission des charges dans des

environnements parfois sévères d'où la nécessité de maîtriser la chimie de l'adhésif pour une cohésion élevée, mais également la chimie et la physique des interfaces afin de s'assurer du développement d'interactions fortes entre les deux milieux. Naturellement, la surface d'un substrat métallique présente une couche d'oxyde qui se crée en contact avec l'air. Cette couche d'oxyde est de faible adhésion et ne permet pas d'avoir des liaisons fortes entre l'adhésif et le substrat. Il existe aussi des salissures sous forme de graisses industrielles, lubrifiants et poussières qui rendent la surface difficile à coller [Barkhimer et al, 5]. La figure III.2 est un schéma simplifié d'une interphase entre un adhésif et un substrat métallique.



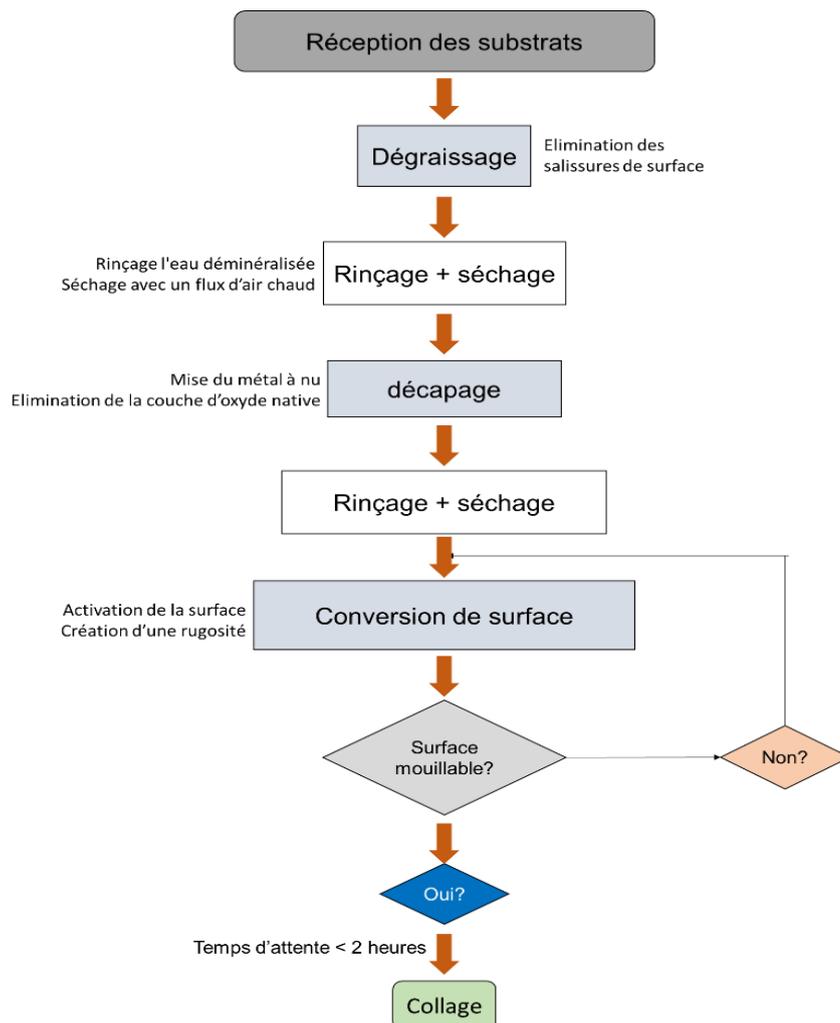
**Figure III.2. Représentation schématique simplifiée d'une interphase adhésif/substrat.**

Afin de construire une liaison forte entre un adhésif et un substrat, il est nécessaire d'appliquer un traitement de surface adéquat choisi selon le matériau des substrats, les conditions de service et la durée de vie de l'assemblage. Les principales raisons d'appliquer un traitement de surface sont :

- Augmenter les interactions moléculaires entre l'adhésif et la surface des substrats.
- Créer une morphologie de surface adaptée au collage.

La composition chimique et la morphologie de la surface sont modifiées de

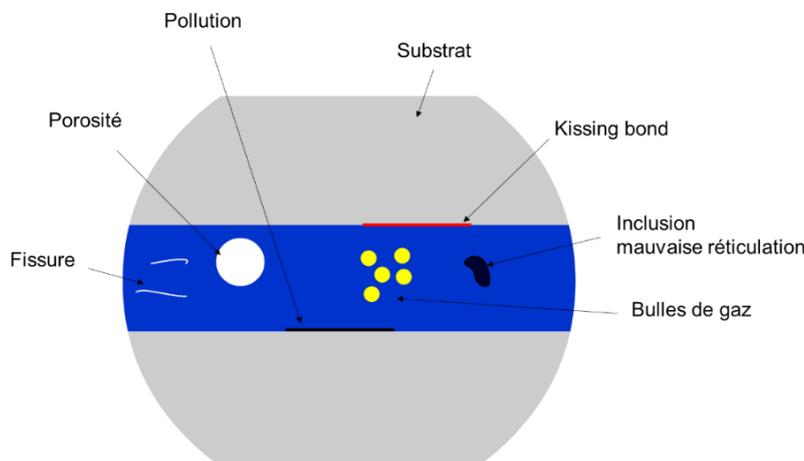
sorte que l'énergie de surface du substrat est maximisée. De nombreux procédés de traitements de surface ont été développés à cet effet et peuvent assurer diverses fonctions décrites sur la figure III.3. On distingue essentiellement 3 familles d'opérations : nettoyage/dégraissage, décapage et conversion de surface, séparées par des étapes intermédiaires obligatoires comme le rinçage et le séchage entre certaines opérations. Un contrôle de l'état de surface via des tests de mouillabilité, doit toujours être réalisé afin de vérifier son activité physico-chimique.



**Figure III.3. Logigramme d'un exemple de protocole de traitement de surface.**

En réalité, il apparaît difficile d'éviter la présence de défauts et/ou hétérogénéités susceptibles d'être produits lors de l'une des nombreuses opérations définies dans les gammes de collage et plus particulièrement durant la phase du traitement de surface. La figure III.4 est une représentation schématique simpliste des différents types de défauts qui peuvent être

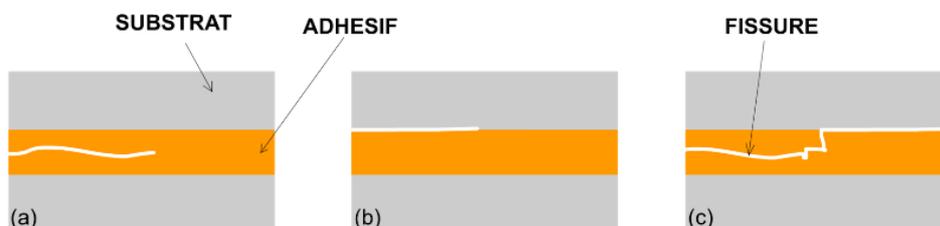
rencontrés dans une interface collée. Les défauts présents dans le joint de colle sont dits cohésifs lorsqu'ils impactent les propriétés cohésives de l'adhésif. Les défauts sont dits adhésifs lorsqu'ils dégradent l'adhésion entre la colle et les substrats [Adams et al, 7], [Maxwell et al, 8], [Davis et al, 9].



**Figure III.4. Illustration de quelques défauts de collage.**

Les défauts cohésifs peuvent être liés à la présence de porosités voire de manque de colle mais également à un mauvais mélange des constituants (résine / durcisseur) ou encore un cycle de cuisson non respecté [Baudot, 10]. Les défauts d'adhésion sont principalement dus à un mauvais traitement de surface ou à la présence de contaminants/pollution à la surface des substrats lors de la mise en œuvre. En environnement industriel, les contaminations peuvent avoir pour origine : la migration des additifs en surface comme les agents de durcissement, les lubrifiants ou les stabilisants [Horgnies, 11]. Les contaminants classiques sont les graisses, huiles, solvants, sueur, produits cosmétiques, poussières, vapeurs ou même à des empreintes des doigts. Ces contaminations de surface sont généralement éliminées préalablement à chaque opération de traitement de surface au moyen de solvant ou bain de nettoyage. Cependant, certaines substances peuvent être particulièrement difficiles à éliminer telles que les composés liés à la chimie de la silicone, très volatiles et qui s'adsorbent sur les surfaces. De même la présence de polluant en surface dégrade la qualité des traitements de surface réalisés ultérieurement dégradant de ce fait l'adhésivité finale de la surface et créant des zones de faible adhésion ou d'adhésion quasi-inexistante. Les défauts jugés les plus dangereux sont appelés « kissing bonds ». Ils décrivent un contact entre adhésif et substrat (contact) sans que des liens chimiques ou

physique ne soient pour autant établis de sorte que cette interface ne présente aucune résistance. Ces défauts font l'objet de nombreux travaux en particulier dans le domaine de l'instrumentation (acoustique, thermique, électromagnétisme ...) pour mettre au point des méthodes de contrôle non destructif pour les détecter. 12 Ces défauts qu'ils soient adhésifs ou cohésifs provoquent une rupture de l'assemblage. Le type de rupture peut être différencié selon la position du défaut en cause. Une rupture cohésive est causée par un défaut cohésif et la fissure se propage à l'intérieur de l'adhésif. Cependant, un défaut adhésif cause une rupture adhésive c'est-à-dire la fissure se propage à l'interface colle/substrat. Un troisième type de rupture, un mélange entre une rupture adhésive et cohésive peut aussi exister. La figure III.5 illustre ces trois types de ruptures.



**Figure III.5. Types de rupture**

**(a): rupture cohésive, (b) : rupture adhésive, (c) : rupture mixte .**

Étant acquis que des défauts d'adhésion sont susceptibles d'être introduits accidentellement au cours des nombreuses opérations définissant la gamme de collage, il est important dans une démarche tolérance aux dommages d'évaluer la sensibilité de la tenue mécanique de la liaison à la présence d'un tel défaut caractérisé par sa nature et sa taille.

### **3. Caractérisation des interfaces collées/influence des défauts**

Pour caractériser la sévérité d'un défaut de collage, il convient d'effectuer des essais de caractérisation mécanique sur des éprouvettes contenant des défauts types. On peut trouver des travaux mettant en œuvre une telle approche. Cependant, avant de s'intéresser au comportement des assemblages en présence de défauts, il convient de présenter les techniques les plus conventionnelles de caractérisation des assemblages collés.

#### **3.1. Matériaux des substrats et adhésif**

Les substrats utilisés dans cette étude sont réalisés en alliage d'aluminium à

haute résistance de type 7075-T6 utilisés notamment pour des applications structurales en aéronautique et aérospatial. Cet alliage contient 1.6% de cuivre, 2.5% de Magnésium, 0.23% de Chrome et 5.6% de Zinc. Il a une masse volumique de 2.8Kg/dm<sup>3</sup>, une résistance à la rupture de 565 MPa, allongement avant rupture de 11%, un module d'Young de 73 GPa et un coefficient de Poisson de 0.33. Cette nuance est retenue pour s'assurer qu'au cours des essais mécaniques sur assemblages, les substrats ne subiront aucune déformation permanente.

Dans cette étude, nous utilisons un adhésif structural époxy en film proposé par la société 3M et de désignation commerciale AF191U. Il offre une résistance mécanique et une ténacité élevées. Cette version du film adhésif n'est pas supportée, on s'affranchit ainsi pour la suite de l'étude de toute perturbation que pourrait apporter la présence d'une trame destinée à contrôler l'épaisseur du film adhésif. Selon la documentation commerciale, le module d'Young est de 2.5GPa et le coefficient de Poisson est de 0.33.



**Figure III.6. Film adhésif AF191U [46]**

Plusieurs cycles de cuisson sont proposés pour assurer la réticulation de l'adhésif. Les propriétés finales dépendent du cycle retenu (cf. figure III.7). Ainsi, le durcissement de l'adhésif peut être effectué dans une étuve ou dans un autoclave en employant une technique de moulage sous vide. La pression appliquée et la dépression produite dans la poche doivent être contrôlées avec soin. En effet, un dégazage est susceptible d'apparaître durant la cuisson, qui peut entraîner une porosité importante du film adhésif si ces paramètres ne sont pas maîtrisés. Nous avons retenu pour la suite du travail un cycle de réticulation à 177°C sous 3bar de pression en autoclave. La montée en

température est réalisée avec une pente de 4 à 5°C par minute. Pour garantir un joint adhésif homogène, un vide de 900mbar est tout d'abord appliqué pour compacter le joint. Lors de la montée en température, cette dépression est réduite à 330 mbar pour éviter l'apparition des porosités par phénomène de moussage qui nuit à la résistance de l'assemblage collé.

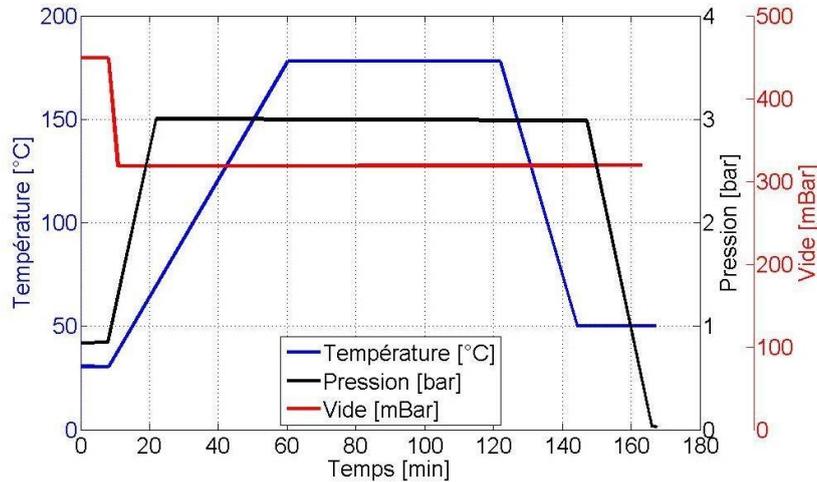


Figure III.7. Cycle de cuisson de l'adhésif AF191U [46]

### 3.2. Traitement de surface

La seule maîtrise de la qualité du film adhésif n'est pas suffisante pour produire un collage résistant. En effet, Il faut pour cela créer une interface adhésif/substrat forte de façon à assurer une rupture cohésive de l'adhésif. Pour cela il convient de définir et mettre en œuvre un protocole de traitement de surface adapté, ici aux substrats en aluminium 7075-T6. Un traitement de surface appelé FPL (Forest Product Laboratory) a été proposé par 3M pour préparer les substrats en alliage d'aluminium pour collage avec l'adhésif AF191U. Cependant, ce traitement a été banni dans l'union européenne à cause des réglementations environnementales exigées pour limiter l'utilisation du Chrome (Cr) qui est une substance toxique. À cette technique de préparation nous avons préféré la préparation dite P2 développée en substitution. Les différentes étapes ont été validées de façon à garantir la reproductibilité des fabrications ainsi que décrit ci-dessous.

#### 3.2.1. Le dégraissage

La première opération effectuée consiste en un nettoyage / dégraissage des substrats qui sont placés dans un bain d'acétone dans une cuve à ultrasons (cf.

figure 2.6) durant 10 minutes à 30°C. Les éprouvettes sont ensuite rincées à l'eau déminéralisée puis séchées avec un flux d'air tiède (30°C environ).



**Figure III.8. Dégraissage des substrats dans un bain à ultrasons**

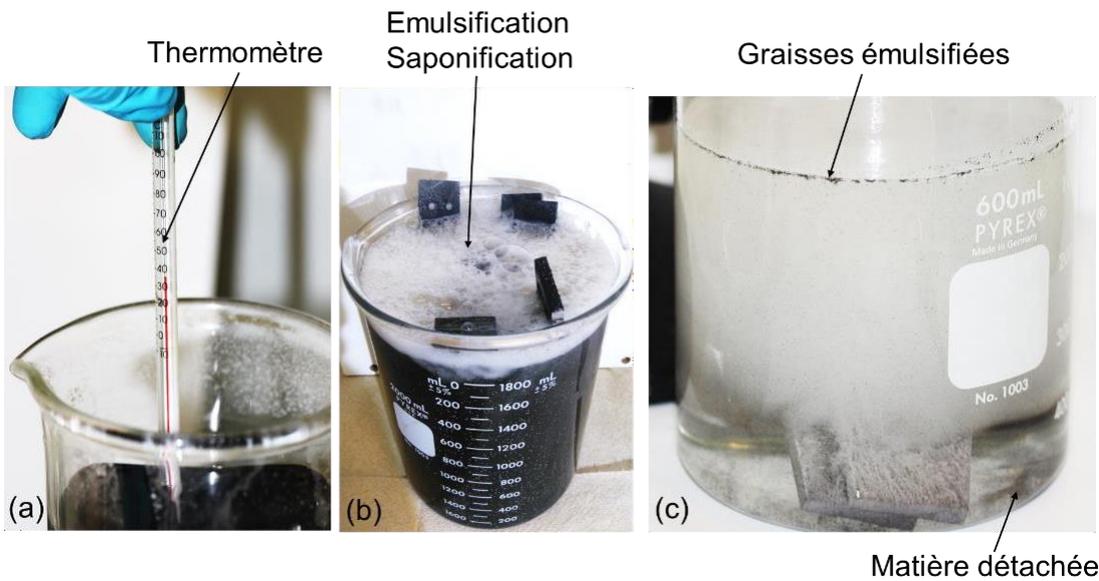
### 3.2.2. Sablage

Un lot d'éprouvettes a été décapé par sablage en projetant des grains d'alumine ( $Al_2O_3$ ) de diamètre 210 $\mu$ m (corindon blanc F80) sur la surface. Ce sablage est réalisé manuellement en utilisant une cabine Guyson Formule 1400, avec une pression 0.4MPa. Les substrats sont maintenus à une distance d'environ 20 cm de la buse jusqu'à l'obtention d'une surface uniformément sablée. Les substrats sablés sont ensuite nettoyés en suivant le protocole précédemment décrit. Un brossage avec une brosse nylon est également effectué afin d'extraire les particules d'alumines qui restent emprisonnées dans les aspérités de surface.

### 3.2.3. Décapage à la soude (NaOH)

Les substrats peuvent également être décapés par voie chimique au moyen d'une solution alcaline après avoir subi un nettoyage préalable. Cette solution est composée de 80g de pastilles de soude diluées dans 1 litre d'eau déminéralisée. Le décapage est effectué en immergeant pendant 10 minutes les substrats dans cette solution chauffée à 40°C (voir figure III.9.a). Pendant le décapage, les corps gras éventuels sont transformés en savons solubles dans l'eau grâce à l'action de la soude [Wery, 47]. Les graisses non saponifiables remontent en surface et sont émulsifiées en présence d'agents tensio-actifs (voir figure III.9.b). Finalement, les substrats subissent une défloculation permettant de détacher de la matière

solide de la surface du substrat (voir figure III.9.c).

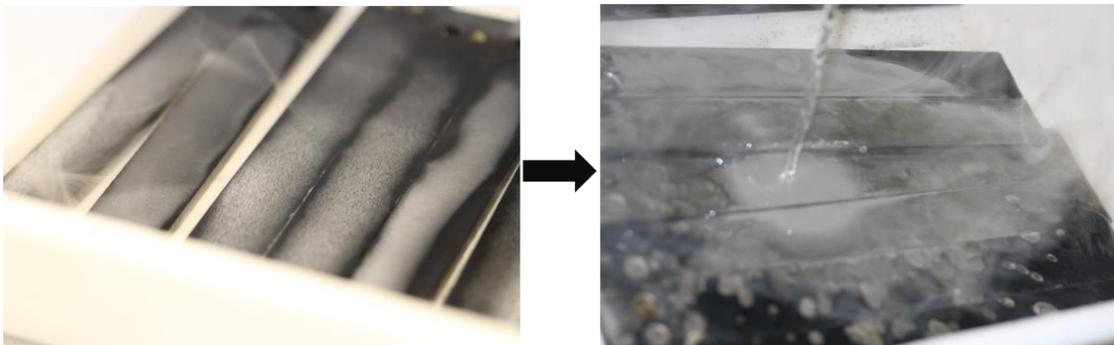


**Figure III.9. Décapage par immersion dans une solution de NaOH**

**(a) : bain décapant à base de soude à 40°C, (b) : saponification et émulsification**

**(c) : représentation des graisses émulsifiées et la matière détachée des substrats**

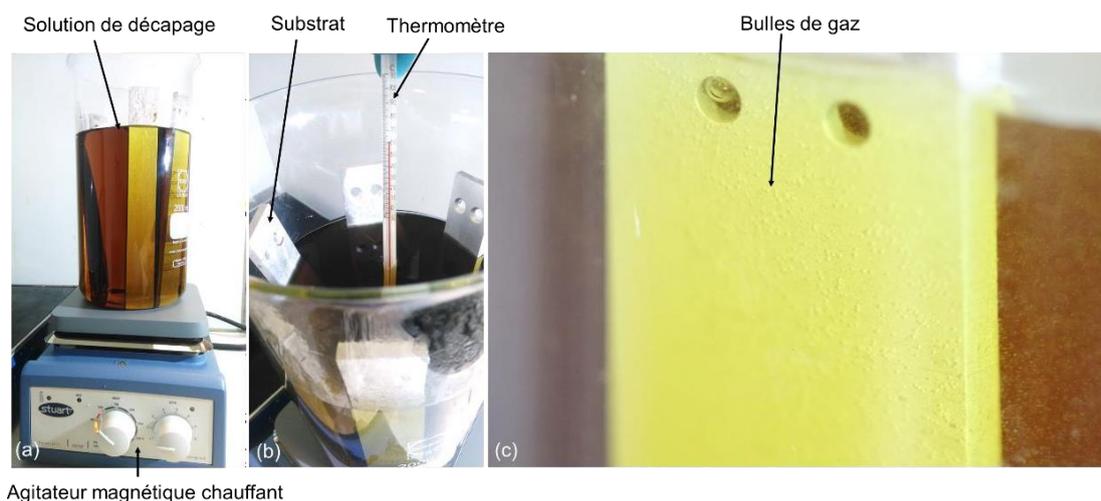
Durant le décapage, une couche noire se forme en surface de la pièce. Il s'agit de tetrahydroxyaluminate de sodium  $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$  qui se forme par la réaction de l'hydroxyde de l'aluminium  $\text{Al}(\text{OH})_3$  avec la soude. Une fois les substrats retirés du bain alcalin et rincés à l'eau, la couche noircie est dissoute en versant de l'acide nitrique 65% (voir figure III.10). Les substrats sont enfin rincés à l'eau déminéralisée et séchés avec un flux d'air tiède.



**Fig : III.10 dissolution de la couche de tetrahydroxyaluminate de sodium avec de l'acide nitrique.**

### **3.2.4. Décapage chimique P2**

Après décapage, il reste à apporter des modifications à la surface pour activer les mécanismes qui favorisent l'adhésion. Le décapage P2 est utilisé ici. Il consiste à immerger les substrats dans une solution composée d'un litre d'eau, 185mL d'acide sulfurique 85% et 127g de sulfatede fer III (45% wt H<sub>2</sub>O, 37% wt H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 15% wt Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>). La température de la solution de décapage doit être comprise entre 60°C et 70°C avec une agitation continue pour assurer une homogénéité thermique et un débullage constant de la surface. Le maintien de la température et l'agitation ont été assurés au moyen d'un agitateur magnétique chauffant (voir figure III.11.a ; figure III.11.b). Pendant le décapage, la réaction chimique de l'aluminium avec la solution de décapage provoque un dégagement de bulles de gaz fines visibles sur la surface des substrats (voir figure III.11.c). Cette étape de décapage ne peut jamais être réalisée seule. En effet, il faut auparavant appliquer les protocoles de dégraissage et décapage alcalin décrits précédemment. Le décapage met le métal à nu ce qui permet à la solution P2 de construire une couche très fine active, de haute énergie de surface et qui possède une bonne résistance à la corrosion. Après avoir sorti les substrats du bain décapant contenant la solution P2, ils ont été rincés avec de l'eau déminéralisée puis séchés avec de l'air tiède. La surface obtenue est très sensible et il faut veiller à ne pas la contaminer.



**Figure III.11. Traitement de surface P2.**

### **3.2.5. Décapage avec agitation continue et maintien de la température de la solution**

### **3.2.6. : Contrôle de la température de la solution (60°C –**

70°C)

**3.2.7. : Formation de bulles de gaz fines sur la surface**

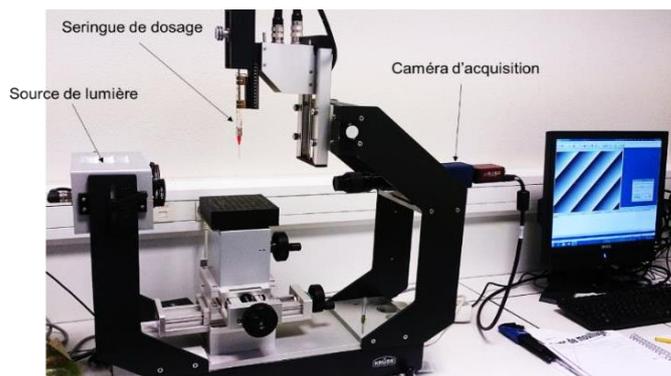
**3.2.8. : Formation de bulles de gaz fines sur la surface**

#### **4. Caractérisation de surface**

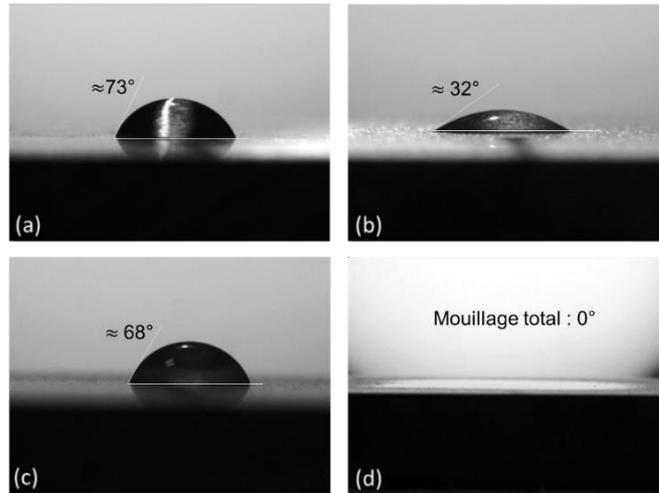
En collage, le traitement de surface sert à améliorer l'état de surface pour qu'elle adhère à l'adhésif. C'est pour cette raison que la surface à coller doit être chimiquement active et physiquement appropriée. L'activation chimique de la surface est contrôlée en observant la mouillabilité de la surface avec un liquide. La morphologie de la surface est également observée au microscope électronique à balayage, une rugosité adaptée favorise l'ancrage mécanique et améliore de ce fait l'adhésion colle / substrat.

##### **4.1. Mouillage**

Des mesures d'angle de contact ont été effectuées sur des échantillons après les différents traitements de surface, en utilisant la méthode de la goutte posée sur un goniomètre « Krüss DSA30 » (cf. figure III.12). Le mouillage des surfaces a été effectué avec de l'eau déminéralisée car elle possède une très forte tension de surface. Les résultats des essais de mouillage sont présentés dans la figure III.12 ainsi que les angles de contacts mesurés avec le logiciel « Drop Shape Analysis ». Ces résultats mettent bien en évidence l'augmentation de l'activité physico-chimique après le traitement NaOH+P2.



**Figure III.12. Goniomètre**



**Figure III.13 : Angle de contact.**

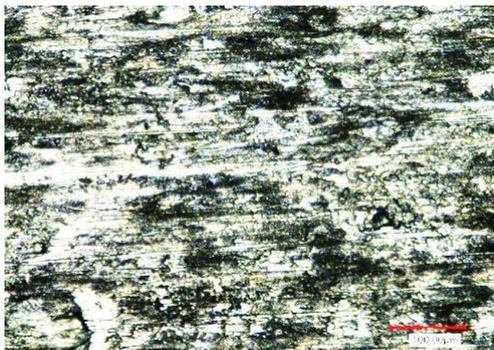
#### **4.1.1. surface dégraissée, (b) : Surface sablée**

(c) : surface décapée avec NaOH, (d) : surface décapée NaOH + P2

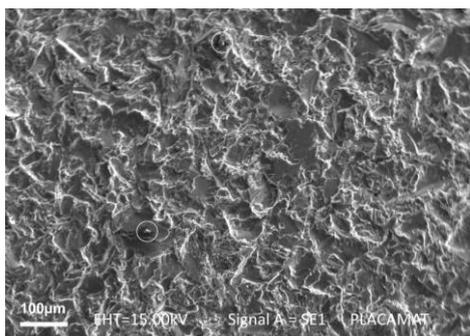
On observe en particulier une mouillabilité totale de la surface traitée P2. En effet, si la présence du liquide en surface est toujours visible, l'angle de contact est nul du fait de l'étalement très important du liquide. Sur les surfaces dégraissées à l'acétone, sablées et décapées, le liquide ne s'étale pas mais forme une goutte dont l'angle de contact révèle la faible activité de la surface. Ces essais de mouillage fournissent une indication de la qualité d'adhésion de la surface et confirment que le substrat traité avec la solution P2 présente une meilleure mouillabilité donc probablement une meilleure adhésion.

#### **4.2. Observation microscopique**

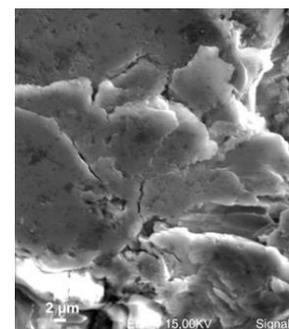
La surface du substrat après dégraissage à l'acétone a été observée avec un microscope optique (figure III.14). On observe que la couche d'oxyde d'aluminium native ne se décroche pas après un dégraissage à l'acétone. Cette couche solide est hétérogène et elle présente une faible énergie de surface et ne favorise pas le collage. La surface sablée quant à elle, a été observée avec un microscope électronique à balayage (MEB). Une rugosité importante (III.15) a été observée en présence de pics très vifs parfois fragiles (figure III.16) et des particules de sable incrustées dans les creux. Une analyse chimique de la surface a été effectuée également montrant la présence de quelques traces de Titane (Ti) ce qui montre que même avec un rinçage intensif, la surface peut encore contenir encore des traces de sable. En effet, le sable a été utilisé pour sabler des substrats en alliage de titane.



**Figure III.14. Cliché d'une surface dégraissée à l'acétone**



**Figure III.15. Cliché MEB d'une  
Surface sablée.  
Les cercles blancs  
Indiquent la position de particules  
De sable incrustées.**

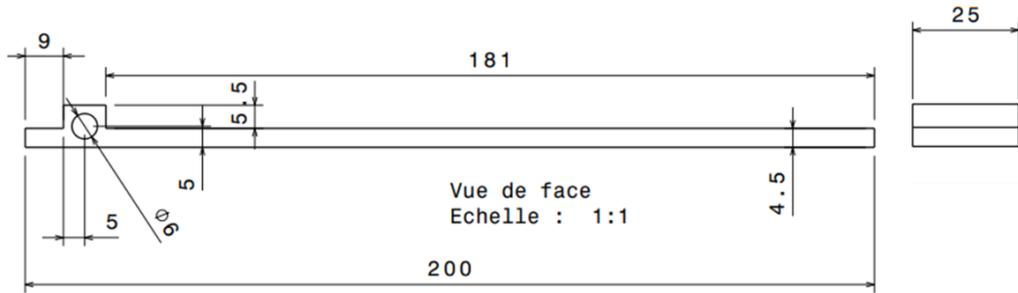


**Figure III.16 Cliché MEB  
d'une surface sablée présentant  
des pics fragiles**

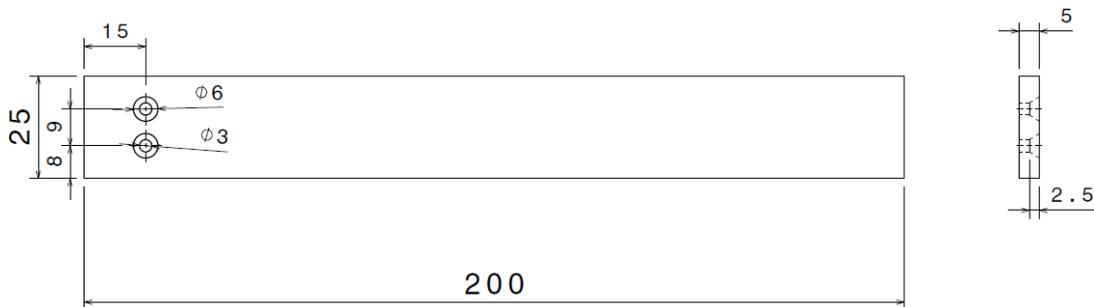
## **5. Fabrication des éprouvettes et tests de caractérisation**

### **5.1. Substrats et accessoires**

Plusieurs géométries de substrats ont été employées pour réaliser les différentes éprouvettes DCB supports de ce travail (cf. figure III.17; figure III.18). Les substrats sont de largeur 25mm et de longueur 200mm. Dans la partie utile de l'éprouvette, l'épaisseur est de 5mm. Dans un premier cas, le substrat est produit à partir d'une plaque de 10mm d'épaisseur ce qui permet d'intégrer à la géométrie de la pièce, le passage de goupille qui permet la fixation à la machined'essai. Dans le second cas, le substrat est percé de deux trous chanfreinés qui permettent le passage de vis avec lesquels sont fixés des talons rapportés. Techniquement, les substrats restent très similaires. On notera cependant que dans le second cas (fixation des talons par vissage), l'axe des goupilles de fixation est plus éloigné de la fibre neutre du substrat que dans le premier cas.



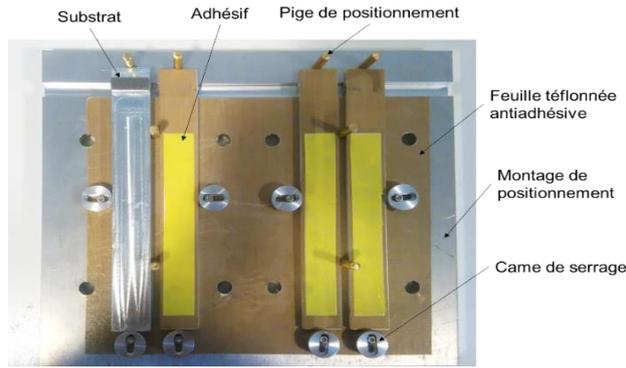
**Figure III.17. Esquisse du premier type des substrats**



**Figure III.18. Esquisse du deuxième type des substrats**

## 5.2. Collage

L'application du film adhésif est réalisée immédiatement après le traitement P2 pour limiter tout risque de contamination des surfaces. Il est découpé en bandes de largeur 20 mm et de longueur 140 mm correspondant à la taille de la zone à coller. Pour délimiter la zone à coller, des masques de film antiadhésifs sont réalisés au préalable en utilisant une table de découpe et placés sur les substrats. Ce système de masquage joue également le rôle de cale d'épaisseur et assure le confinement de l'adhésif durant la cuisson. Le film adhésif est déposé progressivement, les bulles potentiellement emprisonnées après opération de dépose sont retirées au moyen d'un rouleau débulleur.

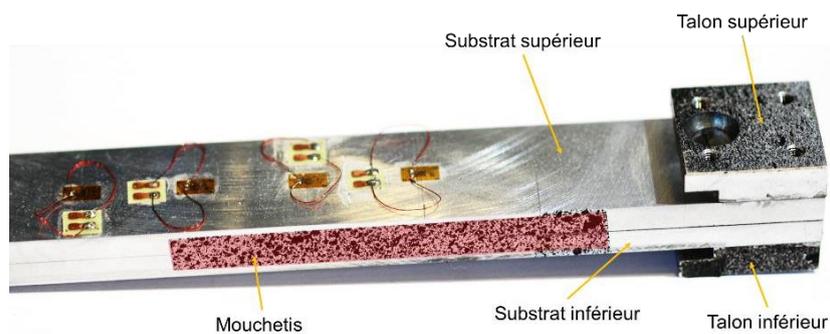


**Figure III.19. Positionnement des éprouvettes avant cuisson**

Les substrats sont placés sur un montage présenté sur la figure III.19 qui assure le positionnement relatif correct des substrats supérieurs et inférieurs avant, puis durant la cuisson. L'ensemble est placé dans un système de mise sous vide équipé d'un régulateur permettant de réguler la dépression de 0 à 900mBar (figure III.20). La cuisson est réalisée dans une étuve ou dans un autoclave. Dans le premier cas, seule la température est régulée, l'autoclave permet de réguler en outre la dépression dans la poche à vide ainsi que la pression extérieure. Le cycle de cuisson utilisé est présenté sur la figure III.19 Après cuisson, l'excès de colle qui fuit sur les côtés de l'éprouvette est retiré par ponçage puis polissage. Enfin, l'éprouvette peut être instrumentée au moyen de jauges de déformation et préparée en vue de mesures par corrélation d'image (voir figure III.20).



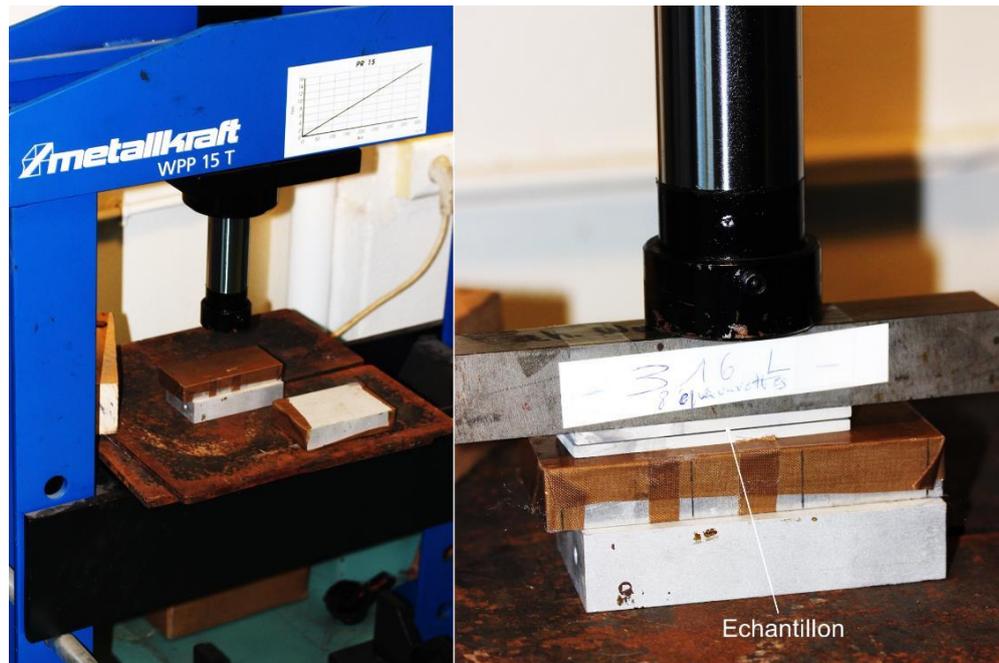
**Figure III.20. Régulateur de pression**



**Figure III.21. Eprouvette avec talons collés et mouchetis**

### **5.3. Choix d'une gamme de collage**

Durant la cuisson en autoclave, une pression de 3 bar est recommandée de même qu'un vide ne dépassant pas 300 mbar dans la poche à vide. La documentation technique de l'adhésif AF191 indique qu'une cuisson hors autoclave est possible. Cependant les premiers tests réalisés conduisant à la formation d'une couche de colle présentent des porosités importantes voire des manques de colle. Il nous a semblé que le compactage apporté par la pression de l'autoclave pouvait manquer dans la gamme de collage utilisée. Pour compenser ce compactage, les deux substrats après accostage ont été placés sous une presse de capacité 10 T dont l'effort appliqué à l'échantillon est ajusté pour que le film soit soumis à une pression de 3 bar (cf. Figure III.21). D'autres systèmes de serrage type pinces ou serre-joints (cf. Figure III.22) ont également été testés sans possibilité dans ce cas de contrôler la pression imposée. L'effort de la presse est maintenu pendant un minimum de 2 minutes laissant à l'adhésif le temps de se relaxer. La position après pressage a été maintenue avec des étaux.

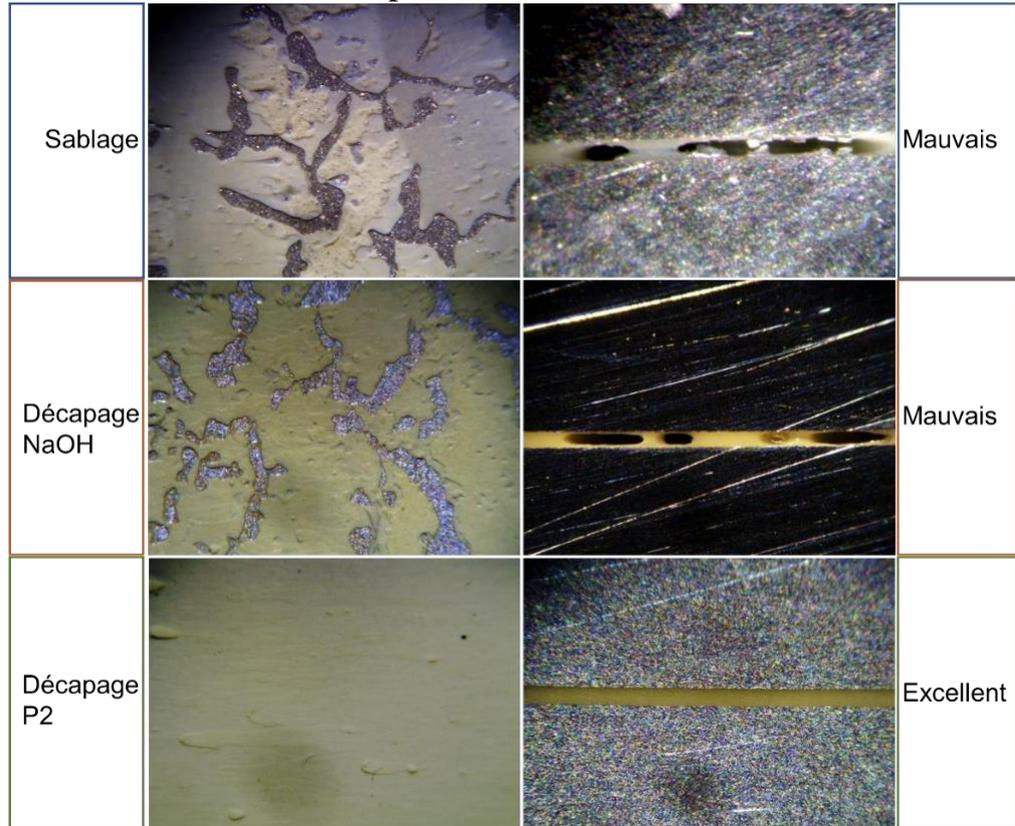


**Figure III.22. Pressage des échantillons**



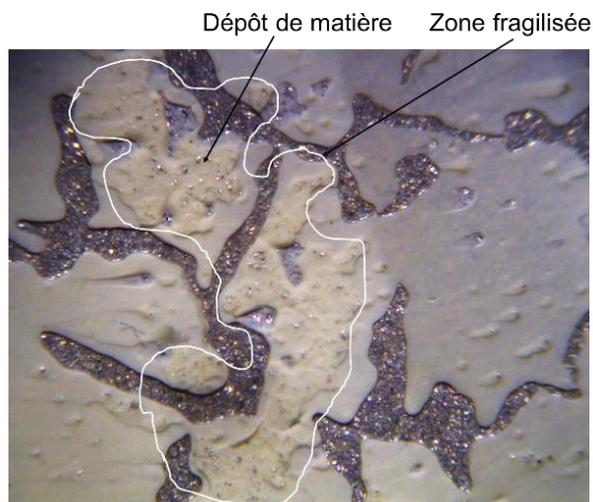
**Figure III.23. Maintien des positions après pressage**

Des collages de petites dimensions ( $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ) ont été effectués en respectant les étapes décrites précédemment. Le but était de contrôler l'efficacité des préparations de surface (sablage + dégraissage, décapage NaOH, préparation P2). Après collage, les substrats sont séparés par clivage ou tronçonnés et polis pour observation du film d'adhésif sur la tranche. Les résultats de ces tests sont présentés sur la figure III.23.



**Figure III.24. Observation du joint de colle des échantillons**

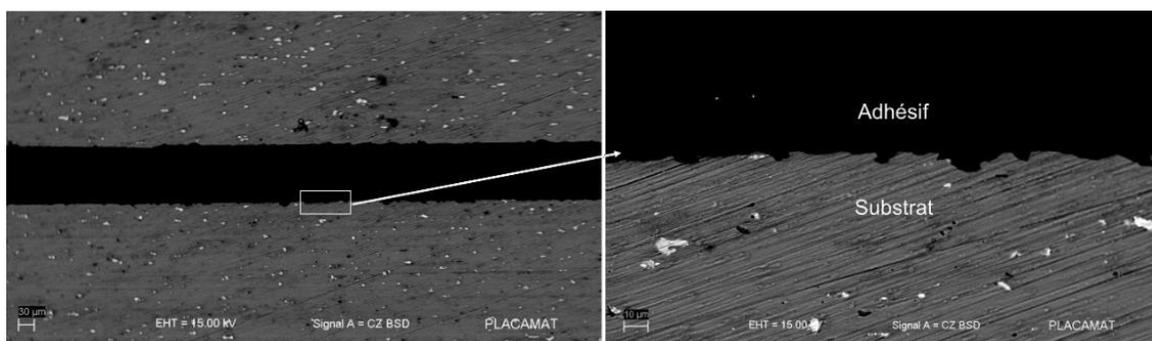
Dans le cas des surfaces sablées, on observe des porosités importantes du joint de colle mais également des ruptures adhésives voire cohésives interfaciales dans le substrat liées au détachement de particules de sablage incrustées en surface (cf. figure III.24). De même on constate que le mouillage de l'adhésif sur la surface décapée à la soude est insuffisant.



**Figure III.25. Surface de rupture d'une éprouvette sablée**

## Chapitre 03 : Traitement des surfaces collées

A l'inverse, la préparation P2 produit un film exempt de porosité y compris au niveau de l'interface où on observe qu'il remplit les aspérités de surface (cf. figure III.25). Cette observation permet également de contrôler l'épaisseur du joint de colle qui est d'environ 100  $\mu\text{m}$  conformément à l'épaisseur du film de masquage utilisé.



**Figure III.26. Cliché MEB d'un joint de colle**  
**conditions de préparation**

**(Traitement de surface NaOH+P2)**

### **5.4. Les avantages et les inconvénients du collage :**

#### **5.4.1. Avantages de collage**

Le collage est une technique d'assemblage performante et les avantages sont nombreux. Cette technique est utilisée par de nombreuses industries : automobile, bâtiment, électroménager, électronique, loisirs, aéronautique, mécanique ...

- Le collage est une technique universelle puisqu'à priori il est possible de tout coller, si nous conditionnons convenablement les surfaces à assembler.
- Le collage altère peu les substrats puisque seul le traitement de surface des substrats intervient (dans le sens où le décapage dégrade la surface mais moins que le perçage).
- Le collage permet d'obtenir une meilleure répartition des contraintes, due au transfert de charge continu. Ceci implique une meilleure tenue aux chocs, aux vibrations.
  
- Le collage permet d'assembler des matériaux composites, sans en rompre les fibres.
- Le collage diminue le risque de corrosion galvanique entre deux métaux différents.

## Chapitre 03 : Traitement des surfaces collées

- Le collage permet de réduire le poids de la structure assemblée (comparée à une structure boulonnée).
- Le collage permet d'obtenir des structures lisses (avantage aérodynamique).
- Le collage permet d'assembler entre eux des matériaux différents sans précaution particulière (corrosion).

### 5.4.2. Inconvénients de collage

Les colles ont une tenue limitée en température. Dans le cas de l'aéronautique, l'intervalle de température de travail est  $-50^{\circ}\text{C}$   $+70^{\circ}\text{C}$  ; par conséquent, cela ne semble pas être un problème.

- Le collage résiste mal au vieillissement humide. L'humidité diminue l'adhésion en s'infiltrant aux interfaces ; elle dégrade aussi la résine et diminue ses performances mécaniques. Il convient donc d'isoler la zone collée par un joint étanche.
- Le collage exige une préparation des surfaces soignée et précise, ce qui peut être contraignant dans une chaîne d'assemblage.
- Le temps de prise des colles peut être incompatible avec les cadences industrielles.
- Le collage ne permet pas un démontage aisé des structures assemblées. Les techniques utilisées (chauffage, refroidissement, utilisation de solvant, cisaillement) peuvent altérer les substrats.
- Les colles possèdent une mauvaise conductivité électrique pour évacuer les courants de Foucault sur avion.
- De plus, l'épaisseur de colle doit être maîtrisée au niveau de l'assemblage, afin de prédire la tenue de l'assemblage obtenu. Cette maîtrise de l'épaisseur représente une contrainte industrielle supplémentaire.

### 1. Introduction :

Notre étude entre dans ce contexte et porte sur une analyse numérique par la méthode des éléments finis tridimensionnels, du renforcement par raidisseur métallique réparation d'une structure métallique fissurée.

La méthode des éléments finis est largement utilisée pour l'analyse des problèmes d'ingénierie, non seulement en raison de son aptitude à résoudre une variété de problèmes physiques formulés en termes d'équations aux dérivées partielles, mais aussi en raison de sa capacité à gérer des géométries complexes et des conditions aux limites. Pour une analyse par éléments finis, le domaine physique est subdivisé en éléments de forme géométrique simple afin de discrétiser la géométrie du domaine en respectant scrupuleusement les frontières internes et externes.

La structure étant modélisée par des éléments briques iso-paramétriques à huit nœuds en utilisant le code de calcul par éléments finis Abaqus. Le maillage de l'éprouvette utilisée dans le modèle 3D en éléments finis. Un maillage régulier est effectué pour toute la structure. Ce maillage reste le même pendant tout le calcul afin d'éviter toute influence du maillage sur les résultats. Le collage parfait est créé entre la plaque et le raidisseur en fusionnant les nœuds des éléments. Le fait de fusionner les nœuds a pour conséquence d'avoir le même maillage pour la structure et pour le raidisseur.

Dans ce chapitre, il est question de présenter quelques résultats numériques concernant le renforcement par un raidisseur métallique sur le modèle géométrique rectangulaire. Le but est d'analyser l'écart entre les différents emplacements pour le calcul de la répartition des contraintes au niveau de la plaque renforcée.

### 2. Matériaux :

Deux matériaux essentiels entrent dans la procédure de renforcement ; ce sont les alliages d'aluminium constituant des éprouvettes renforcées et non renforcées et l'adhésif Araldite 2015 qui assemble l'aluminium de la structure à renforcée. L'aluminium 2024T3 est thermiquement traité à la température de 351°C et laminé à froid. Il est relativement mou et plus ductile ; il résiste bien à la fatigue traction-traction. Les compositions chimiques de l'alliage d'aluminium 2024T3 données par le fournisseur sont présentées dans le tableau IV.1.

	%									
	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Other
2024T3	90.7-	Max	3.8-	Max	1.2-	0.3-	Max	Max	Max	Max
	94.7	0.1	4.9	0.5	1.8	0.9	0.5	0.15	0.25	0.15

**Tableau IV.1 : compositions chimiques de : Al2024T3**

Ces propriétés concordent avec celles données par le fournisseur, représentées sur le tableau IV.2.

Propriétés	Al 2024T3	Araldite
	Module de Young Longitudinal(GPa)	72
Module de Young Transversal (GPa)	72	2.52
Coefficient de Poisson longitudinal	0.33	0.36
Coefficient de Poisson Transversal	0.33	0.36
Dureté	29.5	-
Dilatation jusqu'à la rupture	18	-
Module de cisaillement	26.9	0.954
Limite élastique	370	-

**Tableau IV.2 : caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés**

### 3 Choix de l'adhésif :

L'adhésif utilisé est l'araldite 2015 époxy. C'est un adhésif bi-composant avec la résine époxyde plus un durcisseur ; les propriétés obtenues de cet adhésif sont :

Module de Young  $E=2.52\text{Gpa}$

Coefficient de Poisson  $\nu=0.36$

Limite élastique  $\sigma_e=25\text{Mpa}$

Les surfaces collées ont été préparées d'après la méthode spécifiée par Bell.

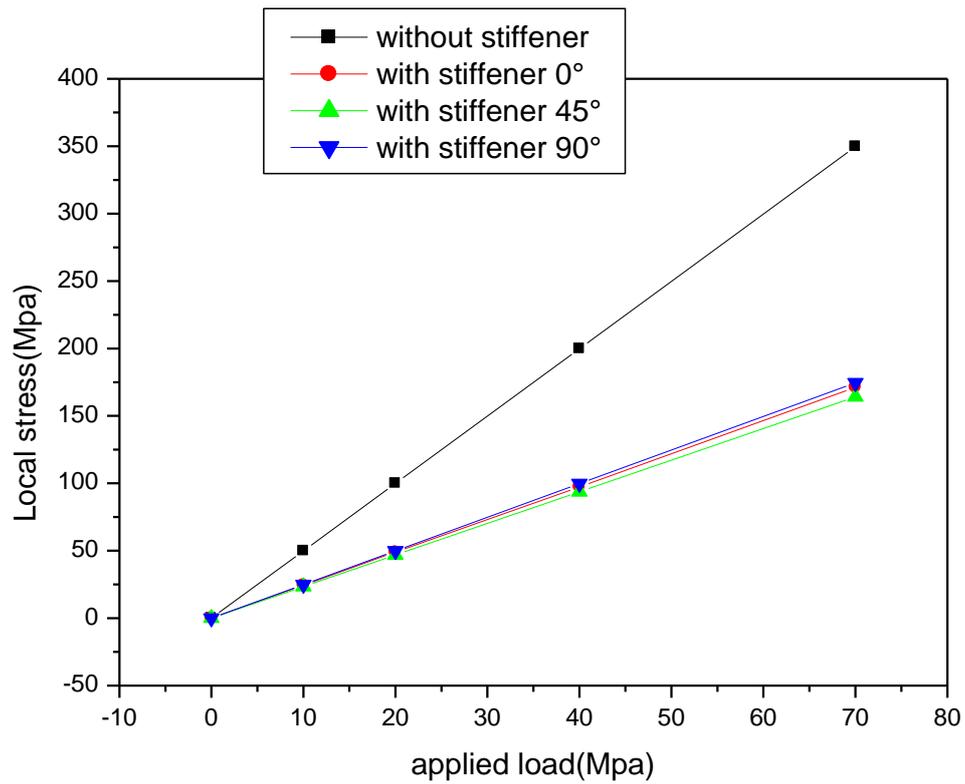
### 4 La concentration des contraintes :

#### 4.1. Résultat et discussion :

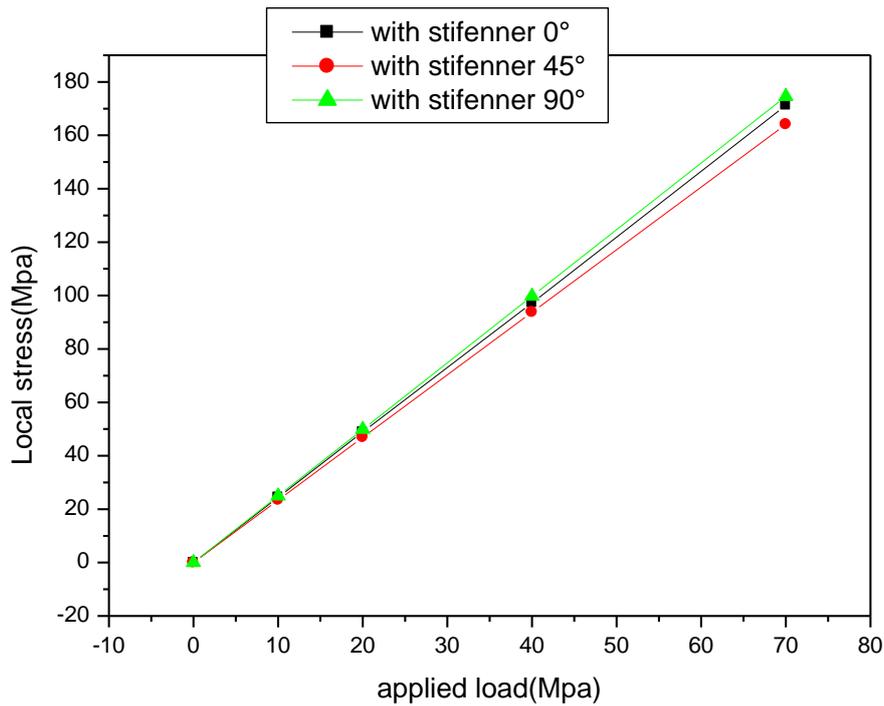
La figure (Fig IV.1) représente la variation de la contrainte maximale enregistrée en fonction du chargement pour différents emplacements du raidisseur. D'après les graphes on constate que la relation entre la contrainte maximale et le chargement est linéaire, la même remarque pour les contraintes (Fig IV.2) tout en constatant que le rapport de variation des contraintes par rapport au chargement est différent pour les trois emplacements du raidisseur, pour un chargement de 70Mpa, le facteur de concentration de contrainte ( $K_t$ ) diminue d'environ 51,05% pour l'emplacement de  $0^\circ$ , 53,08% pour l'emplacement de  $45^\circ$  51,07% pour l'emplacement de  $90^\circ$  par rapport à la plaque qui non pas renforcée.

On note aussi que l'emplacement du raidisseur a un effet sur la contrainte max enregistré dans la plaque renforcé, à chaque augmentation de la contrainte appliqué, les résultats obtenus sont plus élevés.

Ce comportement peut s'expliquer par le fait que, plus le raidisseur occupe une surface dans le coin supérieur de l'entaille, plus le transfert de contraintes à travers la couche adhésive est important.



**Fig IV.1** Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en sens vertical



**Fig IV.2 Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) chargement en sens vertical**

La figure IV.3 présente la répartition de la contrainte pour différentes valeurs de la charge des plaques sous chargement en sens vertical. On voit clairement d'après ces figures que la concentration des contraintes suit la ligne de chargement et est d'une grande valeur dans les environs de l'entaille. Les valeurs du facteur de concentration de contrainte sont :

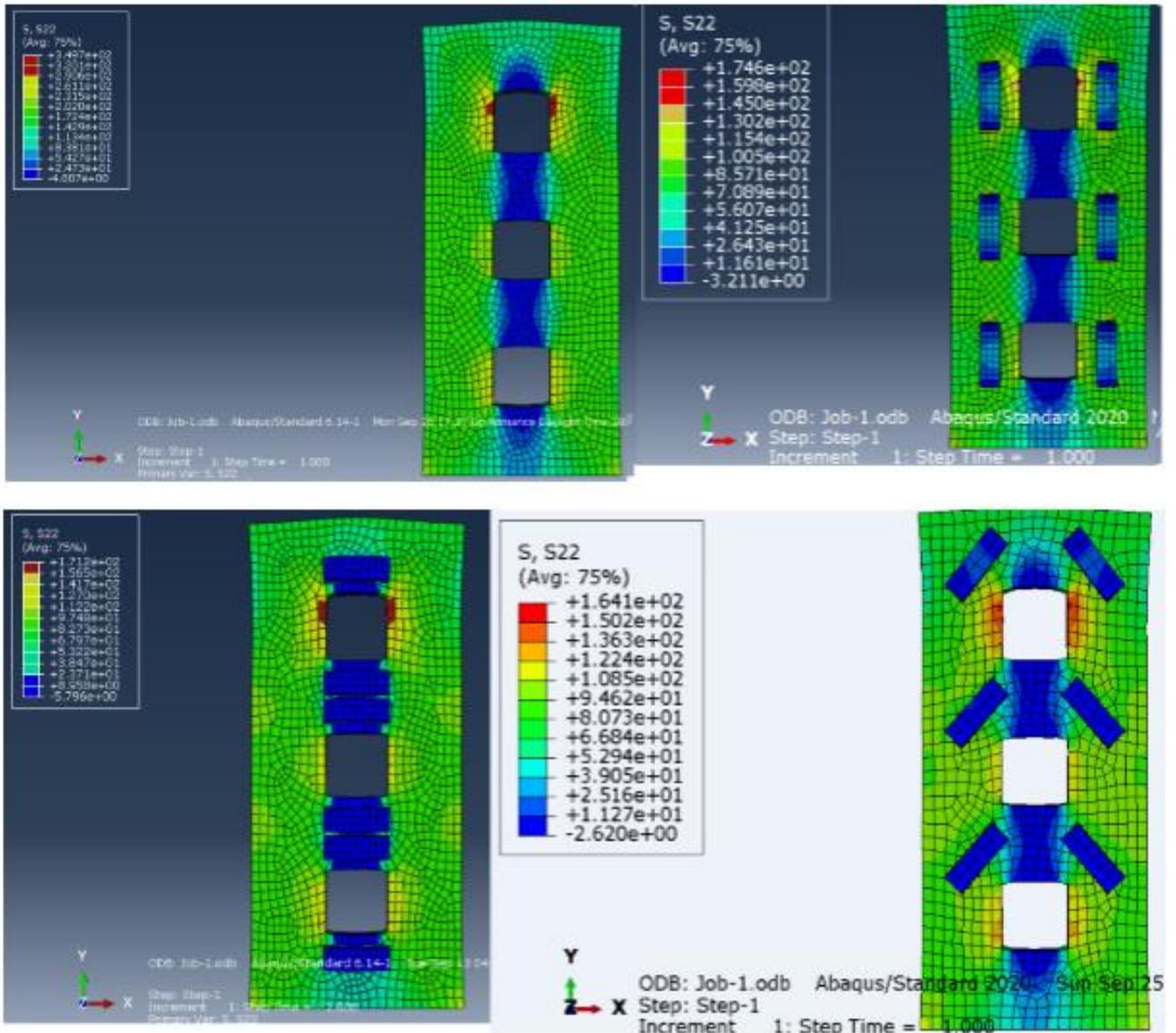
$K_t=4,99$  pour les plaques qui ne sont pas renforcées par un raidisseur

$K_t=2,44$  pour les plaques renforcées par un raidisseur orienté d'un angle de  $0^\circ$

$K_t=2,42$  pour les plaques renforcées par un raidisseur orienté d'un angle de  $45^\circ$

$K_t=2,94$  pour les plaques renforcées par un raidisseur orienté d'un angle de  $90^\circ$

Le meilleur emplacement pour les raidisseurs est l'orientation de  $45^\circ$  car la zone où se concentrent les contraintes c'est la zone surface dans le coin supérieur de l'entaille.



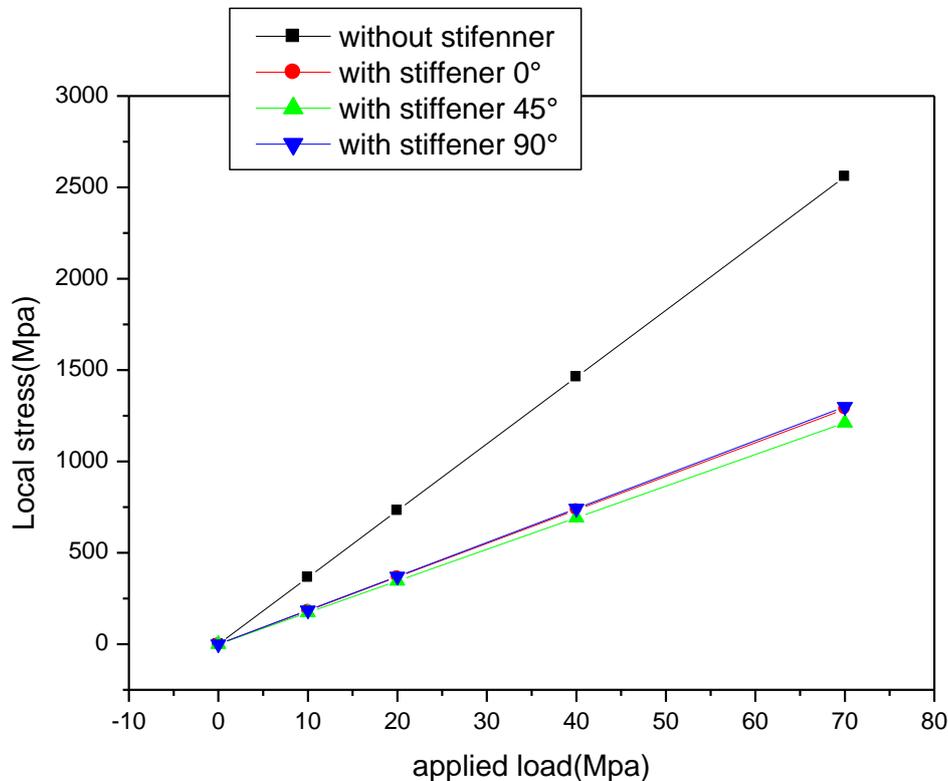
**Fig IV.3 Distribution du Contrainte pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en sens vertical**

Les figures IV.4 et IV.5 présente la variation de la contrainte maximale enregistrée en fonction du chargement pour différentes emplacements du raidisseur sous chargement en sens horizontal. On peut noter que la contrainte max enregistré augmente suivant l'augmentation du chargement appliqué.

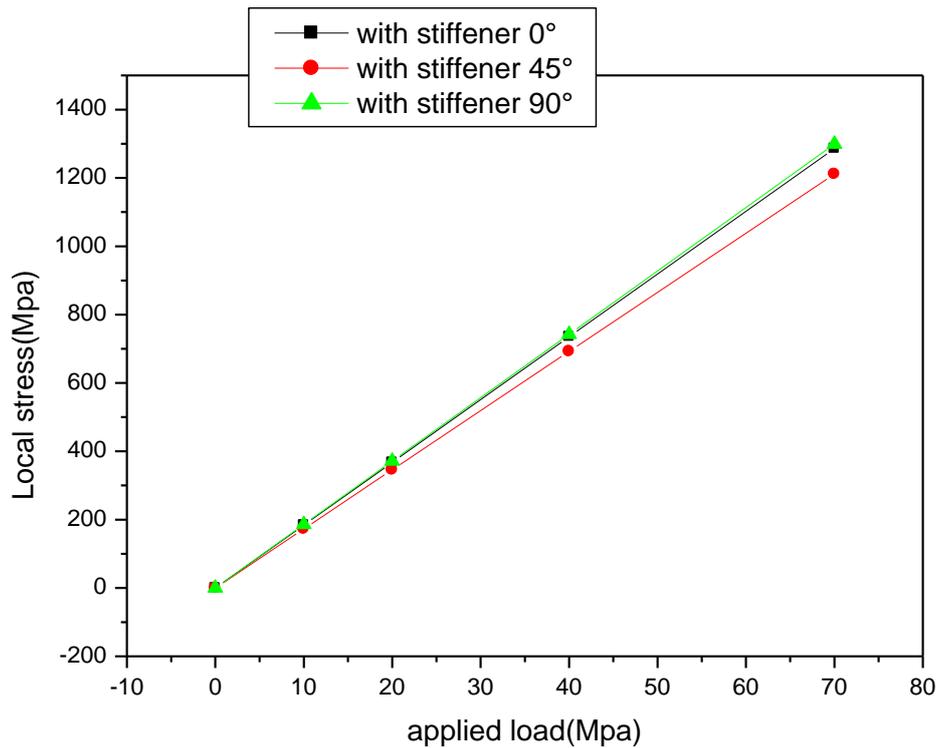
pour un chargement de 70Mpa, le facteur de concentration de contrainte ( $K_t$ ) diminue d'environ 49,73% pour l'emplacement de  $0^\circ$ , 52,66% pour l'emplacement de  $45^\circ$  49,22% pour l'emplacement de  $90^\circ$  par rapport à la plaque qui non pas renforcée.

On note aussi que l'emplacement du raidisseur a un effet sur la contrainte max enregistré dans la plaque renforcé, à chaque augmentation de la contrainte appliqué, les résultats obtenus sont plus élevés.

On remarque que les différentes emplacements du raidisseur présentent des valeurs de contraintes max pratiquement identiques pour les différentes valeurs de la charge appliqué, Cette égalité est valable pour les valeurs de chargement inférieur à 20Mpa en y apparaissant qu'il y a un écart claire de contrainte max sur la plaque renforcé et l'emplacement de raidisseur d'un angle 45° ça reste le meilleur emplacement.



**Fig IV.4** Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en sens horizontal



**Fig IV.5 Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) chargement en sens horizontal**

La figure IV.6 présente la répartition de la contrainte pour différentes valeurs de la charge des plaques sous chargement en sens horizontal. On voit clairement d'après ces figures que la concentration du contraintes et suivre la ligne de chargement et être d'une grande valeur dans les environs de l'entaille. Les valeurs du facteur de concentration de contrainte sont :

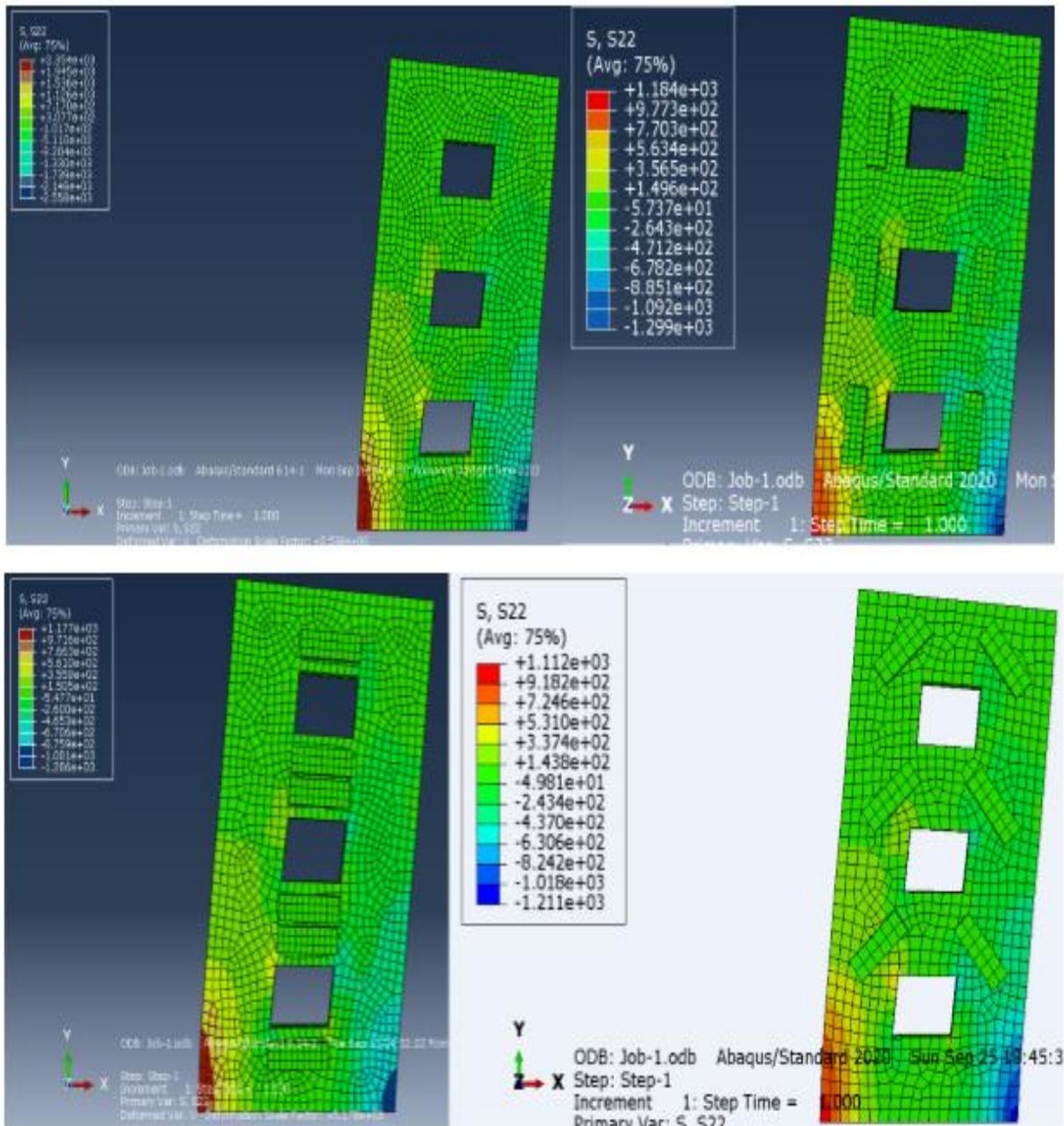
$K_t=36,54$  pour les plaques qui non pas renforcée par un raidisseur

$K_t=18,37$  pour les plaques renforcées par un raidisseur orienté d'un angle de  $0^\circ$

$K_t=17,3$  pour les plaques renforcées par un raidisseur orienté d'un angle de  $45^\circ$

$K_t=18,55$  pour les plaques renforcées par un raidisseur orienté d'un angle de  $90^\circ$

Le meilleur emplacement pour les raidisseurs est l'orientation de  $45^\circ$  car cette dernière éliminé au maximum l'effet de l'entaille rectangulaire sur la concentration des contraintes.



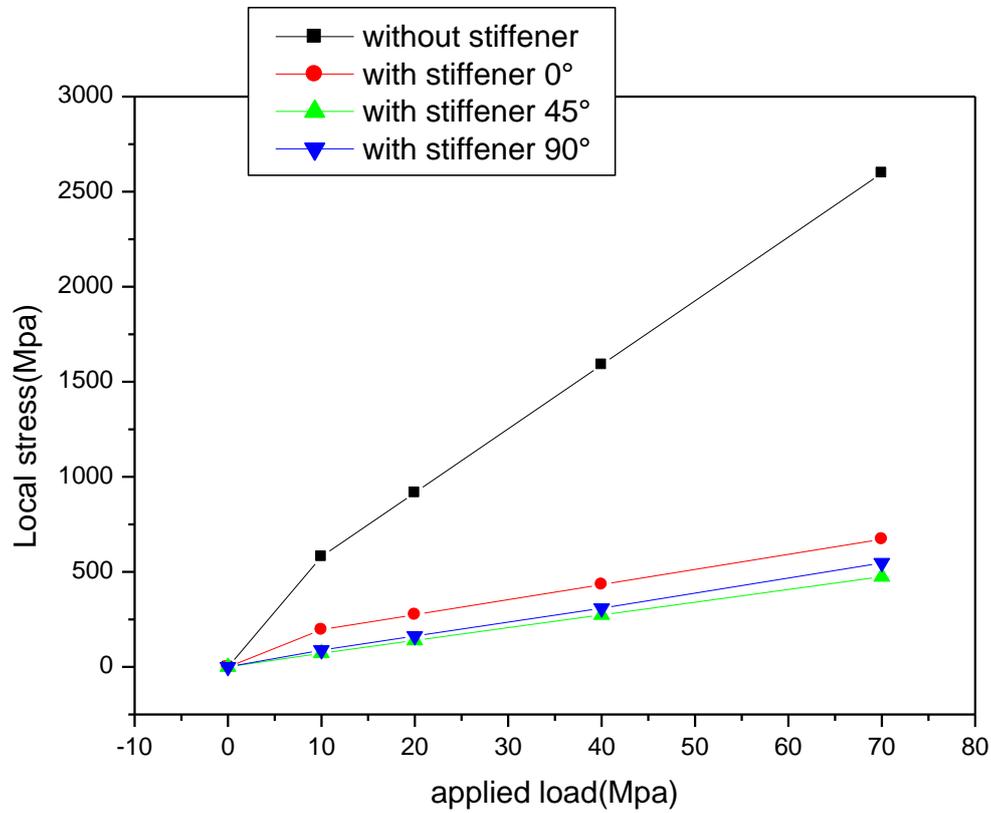
**Fig IV.6 Distribution du Contrainte pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en sens horizontal**

Les figures IV.7 et IV.8 présente la variation de la contrainte maximale enregistrée en fonction du chargement pour différentes emplacements du raidisseur sous chargement en deux sens différents. On peut noter que la contrainte max enregistré augmente suivant l'augmentation du chargement appliqué.

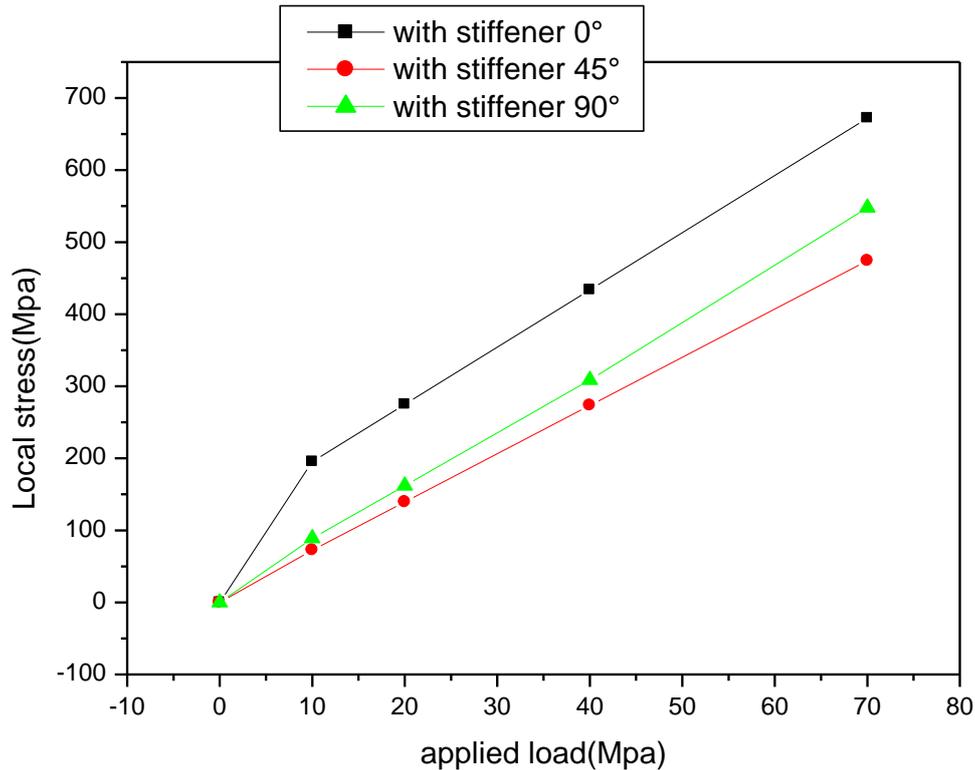
pour un chargement de 70Mpa, le facteur de concentration de contrainte ( $K_t$ ) diminue d'environ 74,14% pour l'emplacement de  $0^\circ$ , 81,85% pour l'emplacement de  $45^\circ$  78,92% pour l'emplacement de  $90^\circ$  par rapport à la plaque qui non pas renforcée.

## Chapitre 4 : Analyse des résultats

Dans ce cas de chargement la différence entre les trois cas est bien visible ceci est dû à la valeur élevée des pressions absorbées par le raidisseur, comme nous savons aussi que la charge exercée sur la plaque augmenté également de ce cas.



**Fig IV.7** Contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en deux sens différents



**Fig IV.8 Contrainte de cisailment pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) chargement en deux sens différents**

La figure IV.9 présente la répartition de la contrainte pour différentes valeurs de la charge des plaques sous chargement en sens vertical. On voit clairement d'après ces figures que la concentration du contraintes et suivre la ligne de chargement et être d'une grande valeur dans les environs de l'entaille. Les valeurs du facteur de concentration de contrainte sont :

$K_t=37,11$  pour les plaques qui non pas renforcée par un raidisseur

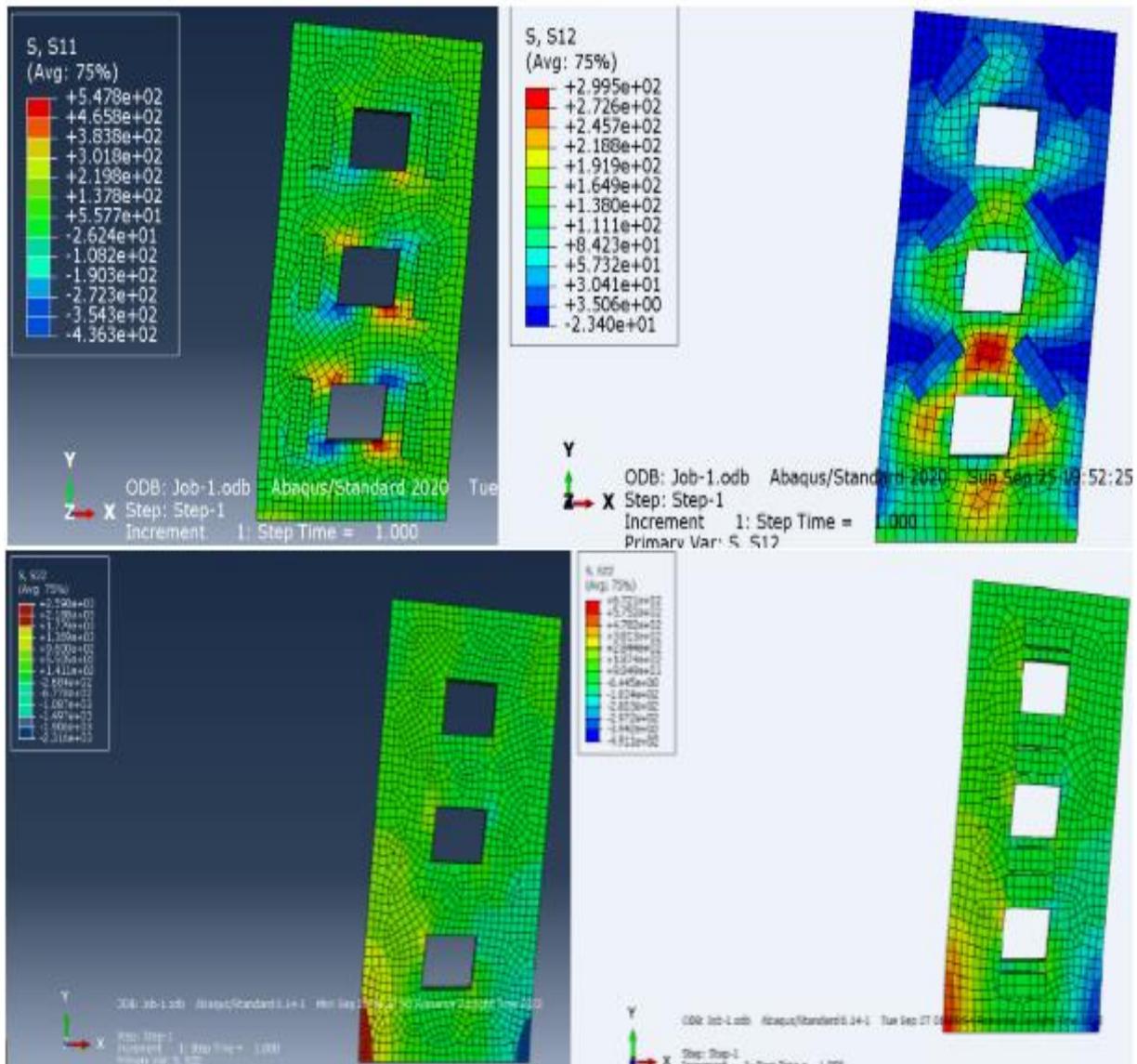
$K_t=9,60$  pour les plaques renforcées par un raidisseur orienté d'un angle de  $0^\circ$

$K_t=6,77$  pour les plaques renforcées par un raidisseur orienté d'un angle de  $45^\circ$

$K_t=8,21$  pour les plaques renforcées par un raidisseur orienté d'un angle de  $90^\circ$

Le meilleur emplacement pour les raidisseurs est l'orientation de  $45^\circ$  car cette dernière travaillé bien et sollicité aux charges dans les deux coté.

On note également que les deux côtés opposes ont enregistré les valeurs les plus élevées, mais avec deux signes différents (traction et compression).



**Fig IV.9 Distribution du Contrainte pour différentes valeurs de la charge des plaques renforcées (en fonction de l'emplacement du raidisseur) et non pas renforcée chargement en deux sens différent**

### 5 Analyse du facteur d'intensité des contraintes :

Nous avons commencé notre étude par l'analyse de l'effet de l'emplacement du raidisseur sur la variation du facteur d'intensité de contraintes en tête de fissure.

Afin d'analyser les effets de l'orientation du raidisseur, nous avons tracé sur la figure IV.10 la variation du FIC en fonction de la longueur de fissure pour différentes orientations du raidisseur respectivement.

Dans les deux cas on constate que la courbe de variation du FIC prend une allure asymptotique.

## Chapitre 4 : Analyse des résultats

Les résultats de cette figure montrent clairement que l'orientation de raidisseur  $90^\circ$  présente un meilleur emplacement et considérable effet comparé à l'orientation  $0^\circ$  et  $45^\circ$ . La réduction du FIC pour l'orientation  $90^\circ$  peut être estimée de 25% par rapport à l'orientation  $0^\circ$ , quelle que soit la longueur de la fissure. Cette réduction est due au fait que les contraintes sont doublement absorbées par le raidisseur car la fissure propage sur la zone de l'emplacement de raidisseur.

On remarque d'abord que les valeurs de FIC ont été réduites de manière significative par la présence du raidisseur. En effet, la valeur de ce FIC pour une longueur de la fissure de 10 mm a resté constante jusqu'à la longueur 14mm (figure4.10). Cette réduction est due à l'absorption des contraintes par le raidisseur. La réduction des contraintes autour de la pointe de la fissure réduit considérablement les valeurs de FIC. Cette réduction dépendra bien sûr la propagation de fissure sur la zone de l'emplacement de raidisseur.

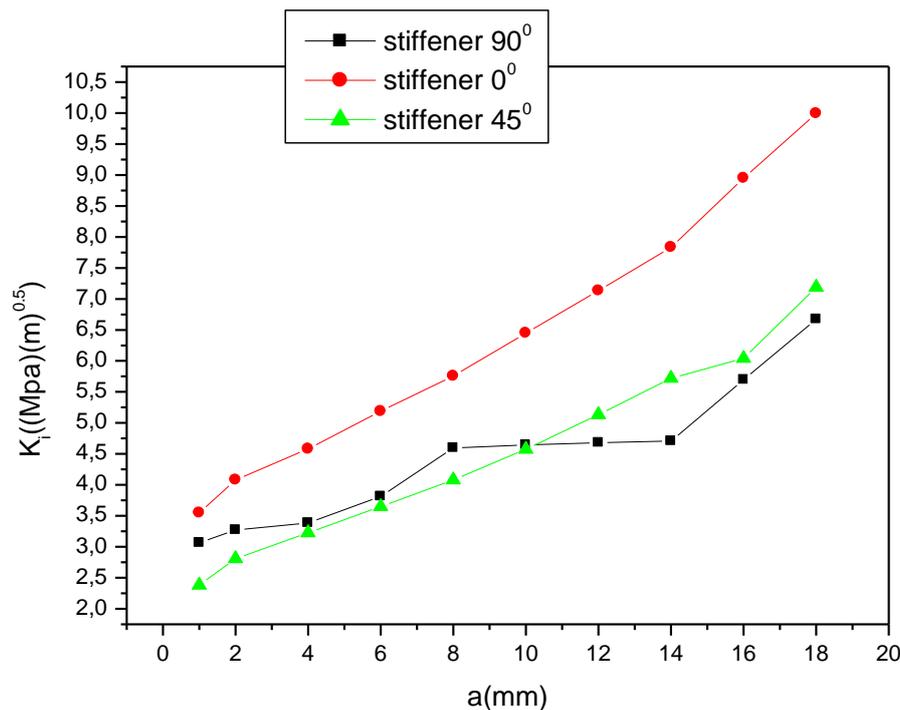


Fig IV.10 Effet de l'orientation de raidisseur sur le FIC

### 6 Analyse du contraintes de cisaillement de l'adhésive :

La durabilité du renforcement peut être estimée par les contraintes de cisaillement de l'adhésif. En effet, le risque de rupture de l'adhésion est plus faible quand les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive sont faibles. Dans cette partie du travail, nous avons

## Chapitre 4 : Analyse des résultats

analysé la distribution des contraintes adhésives afin d'estimer la durabilité du renforcement. La distribution des contraintes a été évaluée sur la longueur de la couche adhésive.

L'adhésif est l'élément le plus faible dans un system de renforcement par raidisseurs, ça résistance au cisaillement joue un rôle important dans la performance du raidisseur. De ce fait on va observer dans cette étude l'effet de la charge appliquée a la plaque renforcée sur la distribution de la contrainte de cisaillement dans l'adhésif. Les figures (fig. IV.11- IV.12- IV.13) représentent la variation de la contrainte de cisaillement  $\tau_{xy}$  en fonction de la charge appliquée.

On peut voir que la variation de l'emplacement du raidisseur a un effet significatif sur la distribution des contraintes adhésives surtout pour l'emplacement 45°.

L'emplacement 45° il est considéré comme la meilleure position dans tous les cas étudiés.

L'adhésive fonction bien et n'est pas à l'abri de la déchirure si la contraintes appliquée inférieur à 40 Mpa pour tous les type de chargements de l'emplacement 45°.

La contrainte de cisaillement de l'adhésive dépasse la limite élastique presque d'une valeur négligée uniquement pour l'emplacement 45°.

On peut voir aussi que les contraintes de cisaillement de l'adhésive ne dépasse pas la limite élastique pour tous les cas de l'emplacement du raidisseur dans le cas d'un chargement en sens vertical.

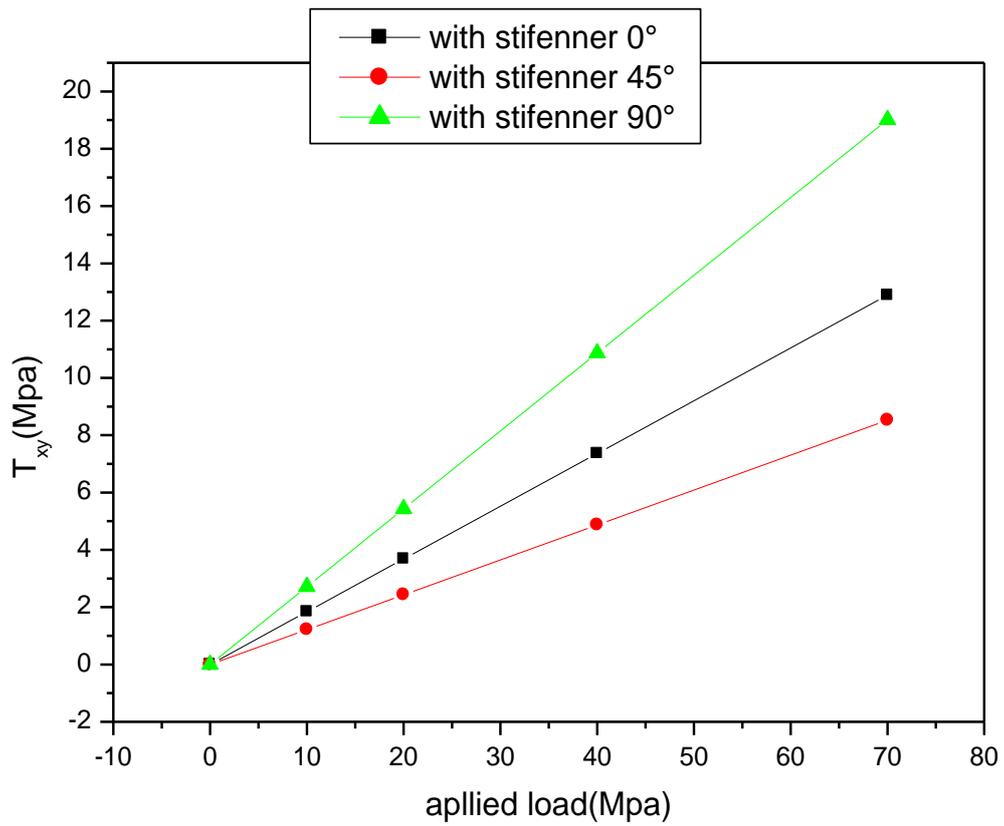
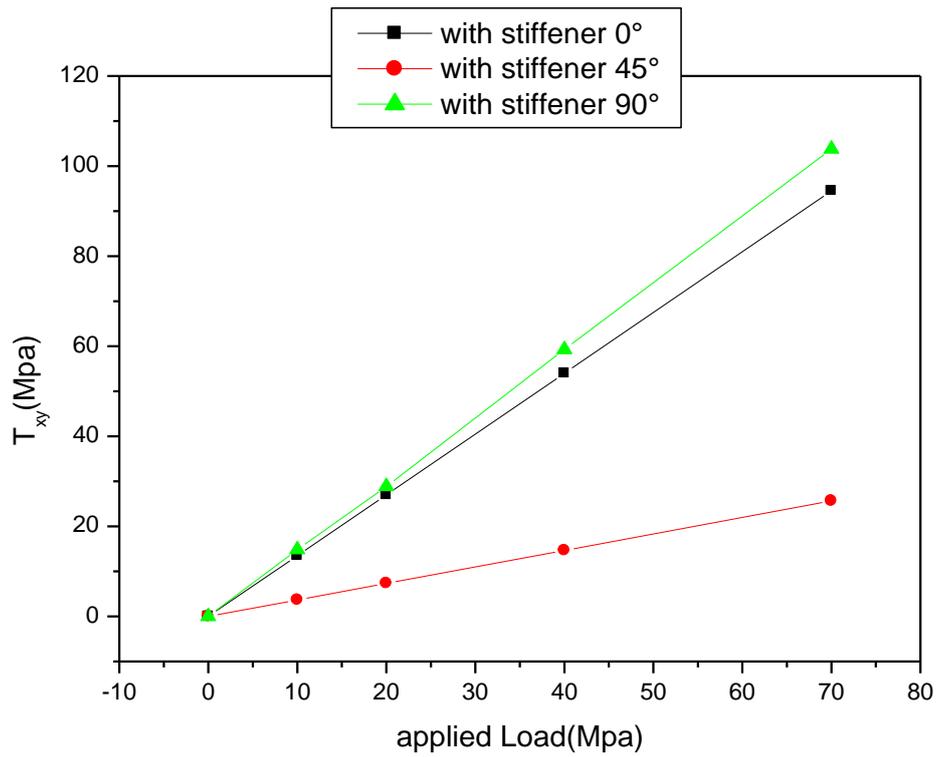


Fig IV.11 contraintes de cisaillement  $\tau_{xy}$  pour différents chargements verticaux appliqués



**Fig IV.12 contraintes de cisaillement  $\tau_{xy}$  pour différents chargements horizontal appliquées**

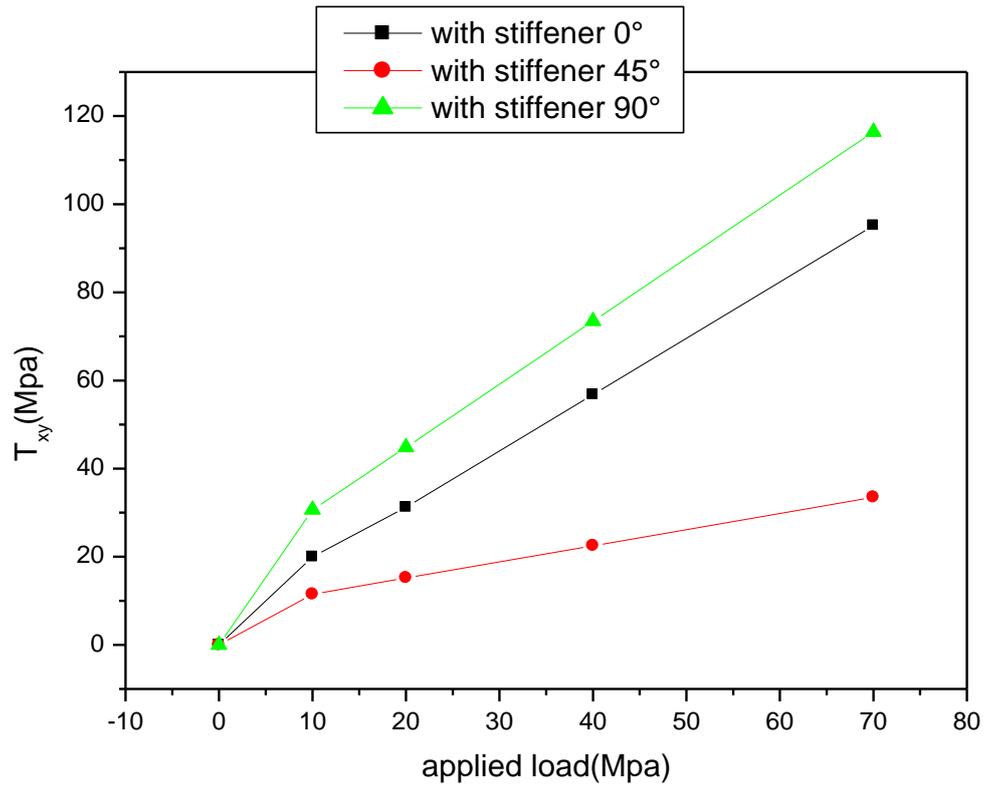


Fig IV.13 contraintes de cisaillement  $\tau_{xy}$  pour différents chargements en deux sens différentes appliquées

## Conclusion

Cette étude a été menée dans le but analyser les effets de l'emplacement des raidisseurs dans des matériaux renforcés et sur endommagement de la couche adhésive liant la structure renforcée par le raidisseur.

L'objectif de notre mémoire est l'étude de l'influence de l'emplacement du raidisseur placé sur une plaque avec un fil d'ouverture rectangulaire sur la réduction des contraintes dans la plaque et sur l'adhésif.

A cet effet, on a procédé à des simulations numériques par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel (Abaqus)

. Les effets des paramètres de l'emplacement du raidisseur ont été mis en évidence. Les résultats obtenus nous permettent de déduire les conclusions suivantes :

L'analyse par éléments finis nous a permis de nous initier à l'apprentissage d'un nouveau logiciel de calcul en l'occurrence le code ABAQUS, outil puissant, utile et d'une grande efficacité.

L'optimisation du raidisseur collés est obtenue en variant les emplacements les contraintes appliquées les sens de chargements ...etc.

Les enseignements à tirer de l'analyse des emplacements du raidisseur est que le chargement constitue les principaux paramètres à modifier pour obtenir des emplacements optimaux c'est-à-dire une augmentation la résistance de la plaque renforcée accompagné d'un choix économique.

Dans une première analyse il était question de faire une comparaison entre les emplacements du raidisseur, dans ce cas il a été constaté que la réduction du facteur d'intensité de la contrainte dans un emplacement de  $45^\circ$  est largement supérieure à celle dans un emplacement de  $0^\circ$  et  $90^\circ$ .

Pour la contrainte de cisaillement dans l'adhésif il a été noté que la concentration de la contrainte de cisaillement, cas d'un emplacement de  $45^\circ$ , se trouve dans les bornes de l'adhésif.

Pour mieux savoir si l'emplacement d'un raidisseur orienté d'un angle de  $45^\circ$  est en mesure d'améliorer l'efficacité du raidisseur par rapport à tous les cas étudiés.

- La quantification de la propagation du décollement de la couche adhésive par une grandeur physique telle que le facteur de concentration des contraintes pour essayer de prédire avec précision la durée de vie en fatigue des fissures renforcées par raidisseur métallique.

# Référence bibliographique :

[1] BENZAID Riad "Contribution à l'Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton" ; université Constantine, thèse de doctorat 2010 - 288p .

[2] GULRAUD Patrick "Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton" ; Solution béton ; Construction Moderne /Annuel Ouvrage d'art ; 2011 – pp 15 – 22 .

[10] MERDAS Abde-elghani "Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA" ; université de Constantine, thèse de magister 2005 – 135p.

[19] ROCHDI El Houssain "Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites" ; université Lyon 1, thèse de doctorat 2004 -232p.

[20] GUIDOTTI Roberto "Poinçonnement des planchers dalles avec colonnes superposées fortement sollicité" ; ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE N°4812, thèse de doctorat; 2010 – 226p .