

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT  
SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

**Thèse**

**En vue de l'obtention du diplôme de docteur 3eme  
cycle**

**Présenté par**

**BAGHDADI Mohammed**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Mécanique des Matériaux**

**Intitulé**

**Analyse paramétrique de la réparation par  
patch composites**

**Soutenu le : 06 / 02 /2021**

**Devant le jury composé de :**

|                      |            |                            |                        |
|----------------------|------------|----------------------------|------------------------|
| Mr Bouelem SERIER    | Professeur | UDL-SBA                    | Président              |
| Mr Belaid MECHAB     | Professeur | UDL-SBA                    | Examineur              |
| Mr Benali BOUTABOUT  | Professeur | UDL-SBA                    | Examineur              |
| Mr Nouredine DJEBBAR | MCA        | Université de Chlef        | Examineur              |
| Mr Khacem KADDOURI   | Professeur | UDL-SBA                    | Directeur de thèse     |
| Mr Frédéric LEBON    | Professeur | Université d'AIX Marseille | Co- directeur de thèse |

**Année Universitaire : 2020-2021**

Liste des figures

Liste des tableaux

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Introduction générale.....1

## Chapitre I

### Introduction à la mécanique de la rupture

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| I.1. Introduction .....                                                  | 7  |
| I.2. Concept de la mécanique linéaire et non linéaire de la rupture..... | 8  |
| I.2.1. Cas de la Rupture fragile.....                                    | 8  |
| I.2.2. Cas de la rupture Ductile .....                                   | 8  |
| I.3. Différents modes de rupture .....                                   | 10 |
| I.4. Critères de rupture .....                                           | 11 |
| I.4.1. Facteur d'intensité de contraintes .....                          | 11 |
| I.4.2. Taux de restitution d'énergie.....                                | 13 |
| I.4.3. Ouverture de fissure (CTOD) .....                                 | 15 |
| I.5. Forme et taille de la zone plastique en pointe de fissure .....     | 16 |
| I.5.1. Approche d'Irwin .....                                            | 17 |
| I.5.2. Approche de Dugdale .....                                         | 18 |
| I.6. Conclusion .....                                                    | 19 |

## Chapitre II

### Méthode des éléments finis appliquée à la mécanique de la rupture

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| II.1. Introduction.....                                        | 21 |
| II.2. Méthode des éléments finis .....                         | 21 |
| II.2.1. Méthode des éléments finis en élasticité linéaire..... | 22 |
| II.3. Modélisation de la singularité.....                      | 22 |
| II.3.1. Élément propose par Byskov .....                       | 22 |
| II.3.2. Élément au quart de nœud .....                         | 22 |
| II.3.3. Élément propose par Benzeley .....                     | 24 |
| II.3.4. Élément propose par Blackburn :.....                   | 25 |

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| II.3.5. Elément propose par Hellen : .....                    | 25 |
| II.3.6. Elément propose par Stern et Beckler : .....          | 25 |
| II.3.7. Elément propose par Head .....                        | 25 |
| II.4. Evaluation du facteur d'intensité de contrainte .....   | 26 |
| II.4.1. Méthode de perturbation [84] .....                    | 26 |
| II.4.2. Méthode de l'intégrale J .....                        | 27 |
| II.4.3. Méthodes des déplacements des lèvres de fissure ..... | 29 |
| II.4.4. Méthode d'extrapolation du déplacement .....          | 30 |

### Chapitre III : Rappel de la technique de réparation par patch composites des structures des aéronefs

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1. Introduction .....                                                            | 31 |
| III.2. Généralités sur le collage.....                                               | 32 |
| III.2.1. Définition du collage.....                                                  | 32 |
| III.2.2. Techniques de collage .....                                                 | 32 |
| III.2.2.1. Etapes du collage.....                                                    | 34 |
| III.3. Comparaison entre différents assemblages (collage, attachement mécanique) ... | 36 |
| III.3.1. Assemblage par collage.....                                                 | 37 |
| III.3.1.1. Avantages.....                                                            | 37 |
| III.3.1.2. Inconvénients .....                                                       | 37 |
| III.3.2. Assemblage mécanique par rivetage.....                                      | 38 |
| III.3.2.1. Avantages .....                                                           | 38 |
| III.3.2.2. Inconvénients .....                                                       | 38 |
| III.4 Généralités sur les caractéristiques et le comportement de la colle.....       | 39 |
| III.4.1. Polymères.....                                                              | 39 |
| III.4.2. Adhésifs structuraux .....                                                  | 40 |
| III.4.2.1. Adhésifs époxydes (Adhésifs structuraux) .....                            | 41 |
| III.4.2.1.1. Comportement des colles époxydes.....                                   | 42 |
| III.4.2.1.2. L'adhésif Redux 312 .....                                               | 44 |
| III.4.3. Adhésifs Non-structuraux.....                                               | 44 |
| III.5. Réparation par patch composites.....                                          | 45 |
| III.5.1. Types de patch utilisé dans la réparation des structures métalliques.....   | 46 |
| III.5.2. Effet de la réparation par patch dur .....                                  | 46 |
| III.5.3. Optimisation de la forme du Patch .....                                     | 49 |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.5.4. Quelques exemples d'application de la réparation par patch .....                    | 50 |
| III.6. Défauts des assemblages collés et les méthodes d'amélioration de cette technique..... | 52 |
| III.6.1. Défauts et modes de rupture d'un assemblage collé .....                             | 52 |
| III.6.2. Techniques d'amélioration des assemblages collées .....                             | 53 |
| III.7. Avantages d'un patch en composite.....                                                | 54 |

## Chapitre IV: Modélisation par la MEF des structures des aéronefs endommagées par fissuration et réparées par patch composites

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| IV.1. Présentation du logiciel de calcul utilisé..... | 56 |
| IV.1.1. Modèle géométrique.....                       | 56 |
| IV.1.2. Modèle numérique .....                        | 58 |
| IV.2. Résultats et discussion .....                   | 61 |

### Partie IV.2.1 : Interaction patch-contraintes dans la plaque et dans la couche adhésive

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.2.1.1. Interaction dimensions du patch-contraintes plaque et dans l'adhésif.....                                       | 63 |
| IV.2.1.2. Interaction forme du patch-contraintes normales de tension .....                                                | 67 |
| IV.2.1.2.1. Patches avec conservation de la surface de recouvrement et ses épaisseurs (Surface invariable) .....          | 67 |
| IV.2.1.2.2. Patches avec variation de la surface de recouvrement et conservation de l'épaisseur (surface variable). ..... | 69 |
| IV.2.1.2.3. Patches avec variation de la surface de recouvrement et de l'épaisseur (volume invariable) .....              | 71 |
| IV.2.1.3. Interaction forme du patch-contraintes de cisaillement dans l'adhésif.....                                      | 73 |
| IV.2.1.3.1. Patch avec conservation de la surface de recouvrement et de son épaisseur (Surface invariable) .....          | 75 |
| IV.2.1.3.2. Patch avec variation de la surface de recouvrement et conservation de son épaisseur (surface variable) .....  | 78 |
| IV.2.1.3.3. Patch avec variation de la surface de recouvrement et de l'épaisseur (volume invariable) .....                | 81 |
| IV.2.1.4. Interaction épaisseur du patch-contraintes dans la plaque et dans l'adhésif.....                                | 84 |
| IV.2.1.4.1. Patch à épaisseur invariable .....                                                                            | 84 |
| IV.2.1.4.2. Patch à épaisseur variable .....                                                                              | 87 |
| IV.2.1.5. Interaction nature du patch-contraintes dans la plaque et dans l'adhésif.....                                   | 98 |

|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| IV.2.1.6. Interaction orientation des fibres du patch-contraintes dans la plaque et dans l'adhésif..... | 104 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

**Partie IV.2.2 : Interaction adhésif-contraintes dans la plaque et dans la couche adhésive**

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| IV.2.2.1 Interaction nature de l'adhésif-contraintes dans la plaque et dans l'adhésif | 109 |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| IV.2.2.2 Interaction épaisseur de l'adhésif-contraintes dans la plaque et dans l'adhésif | 113 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

**Partie IV.2.3 : Interaction plaque-contraintes dans la plaque et dans la couche adhésive**

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| IV.2.3.1. Interaction épaisseur de la plaque-contraintes ..... | 117 |
|----------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| IV.2.3.2. Interaction module de Young la plaque-contraintes ..... | 126 |
|-------------------------------------------------------------------|-----|

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| <b>CONCLUSION GENERALE</b> ..... | 129 |
|----------------------------------|-----|

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| Références Bibliographiques ..... | 134 |
|-----------------------------------|-----|

**LISTE DES FIGURES**

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>FIGURE I.1.</b> RUPTURE FRAGILE .....                                                                                                            | 8  |
| <b>FIGURE I.2.</b> RUPTURE DUCTILE . ....                                                                                                           | 9  |
| <b>FIGURE I.3.</b> LA COURBE CONTRAINT DEFORMATION POUR MATERIAU FRAGILE ET DUCTILE.                                                                | 10 |
| <b>FIGURE I.4.</b> DIFFERENTS MODES DE RUPTURE . ....                                                                                               | 10 |
| <b>FIGURE I.5.</b> CONTRAINTES PRES DE L'EXTREMITÉ D'UNE FISSURE.....                                                                               | 11 |
| <b>FIGURE I.6.</b> INTERPRETATION DU TAUX DE RESTITUTION D'ENERGIE.....                                                                             | 14 |
| <b>FIGURE I.7.</b> DEFINITION DU CTOD. ....                                                                                                         | 15 |
| <b>FIGURE I.8.</b> CORRECTION DE LA ZONE PLASTIQUE (IRWIN).....                                                                                     | 18 |
| <b>FIGURE I.9.</b> MODELE DE LA ZONE PLASTIQUE DE DUGDALE.....                                                                                      | 19 |
| <b>FIGURE II.1.</b> ELEMENT AU QUART DE NŒUD.....                                                                                                   | 22 |
| <b>FIGURE II.2.</b> ELEMENT TRIANGULAIRE ISOPARAMETRIQUE PROPOSE PAR BLACKBURN.....                                                                 | 25 |
| <b>FIGURE II.3.</b> ELEMENT FINI QUADRATIQUE A 12 NŒUDS .....                                                                                       | 26 |
| <b>FIGURE II.4.</b> CHEMIN DE CONTOUR $\Gamma$ POUR L'EVALUATION DE L'INTEGRALE $J$ .....                                                           | 27 |
| <b>FIGURE II.5.</b> FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTE EVALUE PAR EXTRAPOLATION. ....                                                                | 30 |
| <b>FIGURE III.1 :</b> RESULTATS D'UNE ENQUETE SUR LES DEFAUTS DANS LA BASE DE LA RAAF .                                                             | 33 |
| <b>FIGURE III.2.</b> DIFFERENTS MODES DE SOLLICITATIONS MECANQUES.....                                                                              | 34 |
| <b>FIGURE III.3.</b> EXEMPLE D'UNE PREPARATION DE SURFACE PAR SABLAGE.....                                                                          | 35 |
| <b>FIGURE III.4:</b> QUALITE DU MOUILLAGE D'UNE SURFACE (MODELE DE YONG) .....                                                                      | 35 |
| <b>FIGURE III.5.</b> EXEMPLES DE PATCHS RIVETES ET COLLES .....                                                                                     | 36 |
| <b>FIGURE III.6.</b> PHOTO ELASTICITE DU JOINT COLLE .....                                                                                          | 37 |
| <b>FIGURE III.7.</b> PHOTO ELASTICITE D'UNE LIAISON BOULONNEE .....                                                                                 | 39 |
| <b>FIGURE III.8.</b> LES DIFFERENTS ETATS D'UN POLYMERE .....                                                                                       | 40 |
| <b>FIGURE III.9.</b> LES MODELES RHEOLOGIQUES COURANTS.....                                                                                         | 43 |
| <b>FIGURE III.10.</b> CYCLE DE MISE EN ŒUVRE DE LA REDUX 312.....                                                                                   | 44 |
| <b>FIGURE III.11.</b> REPARATION DES BORDAGES EN ALUMINIUM PAR PATCHS COMPOSITES .....                                                              | 45 |
| <b>FIGURE III.12.</b> REPARATION D'UN CHASSIS DU VEHICULE F1 PAR PATCHS COMPOSITES [128]                                                            | 46 |
| <b>FIGURE III.13.</b> MODELE D'UN STRUCTURE FISSUREE ET REPAREE PAR PATCH.....                                                                      | 47 |
| <b>FIGURE III.14.</b> EFFET DU PATCHAGE : .....                                                                                                     | 48 |
| <b>FIGURE III.15.</b> GEOMETRIE DE L'EPROUVETTE ET CHAMP DE CONTRAINTE AUTOUR DE LA FISSURE.<br>.....                                               | 48 |
| <b>FIGURE III.16.</b> RESULTATS D'UN ESSAI DE FATIGUE SUR UN EPROUVETTE FISSUREE ET RENFORCEE<br>PAR UN PATCH COMPOSITE. ....                       | 49 |
| <b>FIGURE III.17.</b> PATCH COMPOSITE AVEC UNE EPAISSEUR DEGRESSIVE. ....                                                                           | 49 |
| <b>FIGURE III.18.</b> DIVERSES FORMES DE PATCHS COMPOSITES. ....                                                                                    | 50 |
| <b>FIGURE III.19.</b> REPARATION EXECUTEE SUR UN F 111.....                                                                                         | 51 |
| <b>FIGURE III.20.</b> REPARATION EXECUTEE SUR UN MIRAGE.....                                                                                        | 51 |
| <b>FIGURE III.21.</b> REPARATION EXECUTEE SUR UN HERCULES.....                                                                                      | 51 |
| <b>FIGURE III.22.</b> DEFAUTS TYPQUES D'UN ASSEMBLAGE COLLE .....                                                                                   | 52 |
| <b>FIGURE III.23. (A)</b> LES TYPES DE RUPTURE POUR UN JOINT COLLE, <b>(B)</b> RUPTURE ADHESIVE ET<br>COHESIVE, <b>(C)</b> RUPTURE DU SUBSTRAT..... | 53 |
| <b>FIGURE III.24.</b> VUE EN COUPE D'UN ASSEMBLAGE STRUCTURAL.....                                                                                  | 54 |
| <b>FIGURE IV.1 :</b> MODELE GEOMETRIQUE DE LA STRUCTURE ANALYSEE. ....                                                                              | 57 |
| <b>FIGURE IV.2:</b> MAILLAGE DE LA STRUCTURE.....                                                                                                   | 59 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>FIGURE IV.3:</b> CONDITIONS AUX LIMITES IMPOSEES A L'ASSEMBLAGE PATCH/ADHESIF/PLAQUE                                                                                                                                                                            | 60 |
| <b>FIGURE IV.4 :</b> VARIATIONS DU FIC EN FONCTION DE LA TAILLE DE LA FISSURE ET DE LA CONTRAINTE APPLIQUEE .....                                                                                                                                                  | 61 |
| <b>FIGURE IV.5 ::</b> EFFET DE LA LARGEUR DU PATCH ET DE LA CONTRAINTE APPLIQUEE SUR LE FIC EN TETE DE FISSURE REPAREE, A=18MM .....                                                                                                                               | 64 |
| <b>FIGURE IV.6 :</b> EFFET DE LA LARGEUR DU PATCH SUR LES CONTRAINTES DE CISAILEMENT MAXIMALES DANS L'ADHESIF CONTRAINTE APPLIQUEE = 150 MPa, A =18MM. ....                                                                                                        | 65 |
| <b>FIGURE IV.7 :</b> EFFET DE LA HAUTEUR DU PATCH ET DE LA CONTRAINTE APPLIQUEE SUR LE FIC EN TETE DE FISSURE REPAREE, A=18MM .....                                                                                                                                | 65 |
| <b>FIGURE IV.8.</b> EFFET DE LA HAUTEUR DU PATCH SUR LES CONTRAINTES DE CISAILEMENT MAXIMALES DANS L'ADHESIF CONTRAINTE APPLIQUEE = 150 MPa, A =18MM. ....                                                                                                         | 66 |
| <b>FIGURE IV.9:</b> DIMENSIONS ET FORMES DE PATCHS COMPOSITES AVEC CONSERVATION DE LA SURFACE DE RECOUVREMENT DU PACH ET DE SON EPAISSEUR .....                                                                                                                    | 68 |
| <b>FIGURE IV.10 :</b> EFFET DE LA FORME DU PATCH SUR LE FACTEUR D 'INTENSITE DE CONTRAINTES EN POINTES DE FISSURES REPAREES, CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa, SURFACE DE RECOUVREMENT INVARIABLE (CONSERVATION DE LA SURFACE DE RECOUVREMENT ET DE L'EPAISSEUR) ..... | 69 |
| <b>FIGURE IV.11 :</b> DIMENSIONS ET FORMES DE PATCHS ,(VARIATION DE LA SURFACE DE RECOUVREMENT ET CONSERVATION DE L'EPAISSEUR) .....                                                                                                                               | 70 |
| <b>FIGURE IV.12 :</b> EFFET DE LA FORME DU PATCH SUR LE FACTEUR D 'INTENSITE DE CONTRAINTES EN POINTES DE FISSURES REPAREES, CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa, SURFACE VARIABLE (VARIATION DE LA SURFACE DE RECOUVREMENT ET CONSERVATION DE L'EPAISSEUR). ....         | 71 |
| <b>FIGURE IV.13 :</b> DIMENSIONS ET FORMES DE PATCHS, VOLUME CONSTANT (VARIATION DE LA SURFACE DE RECOUVREMENT ET DE L'EPAISSEUR) .....                                                                                                                            | 72 |
| <b>FIGURE IV.14 :</b> EFFET DE LA FORME DU PATCH SUR LE FACTEUR D 'INTENSITE DE CONTRAINTE EN POINTES DE FISSURES, VOLUME CONSTANT (VARIATION DE LA SURFACE DE RECOUVREMENT ET DE L'EPAISSEUR) .....                                                               | 73 |
| <b>FIGURE IV.15.</b> CHEMIN D'EVALUATION DES CONTRAINTES DE CISAILEMENT INDUITES DANS LA COUCHE ADHESIVE .....                                                                                                                                                     | 75 |
| <b>FIGURE IV.16 :</b> EFFET DE LA FORME DU PATCH SUR LE NIVEAU DES CONTRAINTES DE CISAILEMENT DANS L'ADHESIF LE LONG DU CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE, CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa, A=18MM .....                                                            | 77 |
| <b>FIGURE IV.17 :</b> EFFET DE LA FORME DU PATCH SUR LE NIVEAU DES CONTRAINTES MAXIMALES DE CISAILEMENT DANS L'ADHESIF, CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa.....                                                                                                          | 78 |
| <b>FIGURE IV.18 :</b> EFFET DE LA FORME DU PATCH SUR LE NIVEAU DES CONTRAINTES DE CISAILEMENT DANS L'ADHESIF LE LONG DU CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE : CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa, A=18MM .....                                                           | 80 |
| <b>FIGURE IV.19 :</b> EFFET DE LA FORME DU PATCH SUR LE NIVEAU DES CONTRAINTES MAXIMALES DE CISAILEMENT DANS L'ADHESIF, CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa.....                                                                                                          | 81 |
| <b>FIGURE IV.20 :</b> EFFET DE LA FORME DU PATCH SUR LE NIVEAU DES CONTRAINTES DE CISAILEMENT DANS L'ADHESIF LE LONG DU CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE, CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa, A=18MM .....                                                            | 83 |
| <b>FIGURE IV.21 :</b> EFFET DE LA FORME DU PATCH SUR LE NIVEAU DES CONTRAINTES MAXIMALES DE CISAILEMENT DANS L'ADHESIF : CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa.....                                                                                                         | 84 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>FIGURE IV.22 :</b> EFFET DE L'ÉPAISSEUR DU PATCH SUR LE FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTES EN MODE I.....                                                                                                                                                   | 85  |
| <b>FIGURE IV.23 :</b> EFFET DE L'ÉPAISSEUR DU PATCH SUR LES CONTRAINTES MAXIMALES DE CISAILEMENT DANS L'ADHÉSIF : CONTRAINTE APPLIQUÉE = 150 MPa, A=18MM, PLAQUE FIXÉE.....                                                                                    | 86  |
| <b>FIGURE IV.24 :</b> PATCH DE XIANG ET RAIZENNE[42].....                                                                                                                                                                                                      | 88  |
| <b>FIGURE IV.25 :</b> PATCHS DÉVELOPPÉS À PARTIR D'UN PATCH RECTANGULAIRE ET DIMENSIONS UTILISÉES (VOLUME CONSTANT).....                                                                                                                                       | 89  |
| <b>FIGURE IV.26 :</b> VARIATION DU FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTE, EN FONCTION DE LA TAILLE DE LA FISSURE RÉPARÉE PAR PATCHS À ÉPAISSEURS VARIABLES ET À VOLUME CONSTANT : CONTRAINTE APPLIQUÉE = 150MPa. ....                                              | 89  |
| <b>FIGURE IV.27 :</b> MODÈLE DU PATCH DÉVELOPPÉ (PATCH EN ESCALIER DIGRESSIF) $V_{\text{PATCH}} = 1600\text{mm}^3$ .....                                                                                                                                       | 90  |
| <b>FIGURE IV.28 :</b> FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTE EN FONCTION DE LA TAILLE DE LA FISSURE RÉPARÉE PAR LE MODÈLE DE XIONG ET RAIZENNE ET LES MODÈLES DÉVELOPPÉS, CONTRAINTE APPLIQUÉE = 150MPa, $V_{\text{PATCH}} = \text{CONSTANT}$ .....                 | 91  |
| <b>FIGURE IV.29 :</b> CONTRAINTES DE CISAILEMENT DANS LE JOINT ADHÉSIF OBTENU PAR LE MODÈLE DE XIONG ET RAIZENNE ET LES MODÈLES DÉVELOPPÉS, $\Sigma_{\text{APP}} = 150\text{MPa}$ , $V_{\text{PATCH}} = \text{CONSTANT}$ .....                                 | 92  |
| <b>FIGURE IV.30 :</b> CONTRAINTES DE CISAILEMENT LE LONG DU CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE, OBTENUES PAR LES MODÈLES DE XIONG ET RAIZENNE ET LES MODÈLES DÉVELOPPÉS, A = 18MM, CONTRAINTE APPLIQUÉE = 150 MPa, $V_{\text{PATCH}} = \text{CONSTANT}$ ..... | 93  |
| <b>FIGURE IV.31:</b> PATCHS DÉVELOPPÉS À PARTIR D'UN PATCH RECTANGULAIRE ET DIMENSIONS UTILISÉES (VOLUME RÉDUIT).....                                                                                                                                          | 94  |
| <b>FIGURE IV.32 :</b> FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTE EN TÊTES DE FISSURE RÉPARÉE PAR LE MODÈLE DE XIONG ET RAIZENNE ET LES MODÈLES DÉVELOPPÉS, $\Sigma_{\text{APP}} = 150 \text{ MPa}$ , (VOLUME DU PATCH RÉDUIT).....                                      | 95  |
| <b>FIGURE IV.33 :</b> CONTRAINTES DE CISAILEMENT MAXIMALES OBTENUES PAR LE MODÈLE DE XIONG ET RAIZENNE ET DES MODÈLES DÉVELOPPÉS, CONTRAINTE APPLIQUÉE = 150 MPa, (VOLUME DU PATCH RÉDUIT).....                                                                | 96  |
| <b>FIGURE IV.34 :</b> CONTRAINTES DE CISAILEMENT LE LONG DU CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE OBTENUE PAR LE MODÈLE DE XIONG ET RAIZENNE ET DES MODÈLES DÉVELOPPÉS, , CONTRAINTE APPLIQUÉE = 150 MPa, (VOLUME DU PATCH RÉDUIT).....                          | 97  |
| <b>FIGURE IV.35:</b> FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTES EN TÊTE DE FISSURE RÉPARÉE PAR PATCHS À VOLUME CONSTANT ET À VOLUME RÉDUIT.....                                                                                                                        | 98  |
| <b>FIGURE IV.36 :</b> EFFET DE LA NATURE DU PATCH SUR LE DU FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTES : A=18MM.....                                                                                                                                                   | 99  |
| <b>FIGURE IV.37 :</b> EFFET DE LA RIGIDITÉ DU PATCH SUR LE FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTES D'UNE FISSURE RÉPARÉE, CONTRAINTE APPLIQUÉE = 150 MPa,.....                                                                                                      | 100 |
| <b>FIGURE IV.38 :</b> EFFET DE LA NATURE DU PATCH SUR LES CONTRAINTES DE CISAILEMENT DANS L'ADHÉSIF PRÉLEVÉES LE LONG DU CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE , CONTRAINTE APPLIQUÉE = 150 MPa, A=18MM.....                                                     | 102 |



|                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>FIGURE IV.39.</b> NIVEAU ET DISTRIBUTION DES CONTRAINTES DANS LA COUCHE ADHESIVE LIANT UN PATCH CARBONE-EPOXY A LA PLAQUE FISSUREE, , CONTRAINTE APPLIQUEE = 150 MPa, A=18MM.....                                                                  | 103 |
| <b>FIGURE IV.40 :</b> EFFET DU MODULE D'ELASTICITE DU PATCH SUR LES CONTRAINTES MAXIMALES DE CISAILLEMENT DANS L'ADHESIF, , CONTRAINTE APPLIQUEE = 150 MPa, A=18MM.....                                                                               | 104 |
| <b>FIGURE IV.41 :</b> EFFET DE L'ORIENTATION DES PLIS DU PATCH COMPOSITE SUR LE FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTES POUR DIFFERENTES FISSURES REPAREES : CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa .....                                                            | 105 |
| <b>FIGURE IV.42 :</b> EFFET DE L'ORIENTATION DES PLIS DU PATCH COMPOSITE SUR LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT MAXIMALES DANS L'ADHESIF EN FONCTION POUR DE DIFFERENTES FISSURES REPAREES,.....                                                         | 106 |
| <b>FIGURE IV.43 :</b> EFFET DE L'ORIENTATION DES PLIS DU PATCH COMPOSITE SUR LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT DANS L'ADHESIF RELEVES LE LONG DU CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE,.....                                                              | 107 |
| <b>FIGURE IV.44:</b> EFFET DE LA NATURE DU JOINT ADHESIF SUR FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTES EN FONCTION POUR DE DIFFERENTES TAILLES DE FISSURES REPAREES : CONTRAINTE APPLIQUEE = 150 MPa .....                                                   | 111 |
| <b>FIGURE IV.45 :</b> EFFET DE LA NATURE DU JOINT ADHESIF SUR LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT MAXIMALES DANS L'ADHESIF EN FONCTION POUR DE DIFFERENTES TAILLES DE FISSURES REPAREES : CONTRAINTE APPLIQUEE = 150 MPa .....                            | 111 |
| <b>FIGURE IV.46 :</b> EFFET DE LA NATURE DE L'ADHESIF SUR LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT GENEREES LE LONG DU CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE CONTRAINTE APPLIQUEE = 150 MPa, A = 18MM.....                                                       | 112 |
| <b>FIGURE IV.47 :</b> EFFET DE L'EPaisseur DE L'ADHESIVE SUR LE FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTE, A=18MM .....                                                                                                                                       | 114 |
| <b>FIGURE IV.48 :</b> EFFET DE L'EPaisseur DE L'ADHESIVE SUR LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT MAXIMALES DANS L'ADHESIF E : CONTRAINTE APPLIQUEE = 150 MPa, A=18MM.....                                                                                 | 115 |
| <b>FIGURE IV.49 :</b> EFFET DE L'EPaisseur DE L'ADHESIVE SUR LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT DANS L'ADHESIVE GENEREES LE LONG DE CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE : CONTRAINTE APPLIQUEE = 150MPa, A=18MM .....                                    | 116 |
| <b>FIGURE IV.50 :</b> EFFET DE L'EPaisseur DE LA PLAQUE FISSUREE REPAREE PAR SIMPLE PATCH SUR FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTE DE LA FACE REPAREE POUR DE DIFFERENTS CHARGEMENTS, A=18MM, E <sub>PATCH</sub> = 2 MM.....                             | 119 |
| <b>FIGURE IV.51 :</b> EFFET DE L'EPaisseur DE LA PLAQUE SUR FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTES DE LA FACE NON REPAREE POUR DE DIFFERENTS CHARGEMENTS INTENSITE DE CONTRAINTE : A=18MM, E <sub>PATCH</sub> = 2MM .....                                 | 119 |
| <b>FIGURE IV.52 :</b> EFFET DE L'EPaisseur DA PLAQUE REPAREE PAR SIMPLE PATCH SUR LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT DANS L'ADHESIF RELEVES LE LONG DE CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE E <sub>PATCH</sub> =2MM, CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa, A=18MM | 120 |
| <b>FIGURE IV.53 :</b> EFFET DE LA SIMPLE ET DOUBLE REPARATION SUR LE FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTE DE LA FACE REPAREE : CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa, A=18MM....                                                                                  | 123 |
| <b>FIGURE IV.54 :</b> EFFET DE LA SIMPLE ET DOUBLE REPARATION SUR LE FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTE DE LA FACE NON REPAREE : CONTRAINTE APPLIQUEE =150MPa, A=18MM.                                                                                 | 123 |

- FIGURE IV.55 :** EFFET DE LA SIMPLE ET DOUBLE REPARATION ET DE L'ÉPAISSEUR DE LA PLAQUE FISSURÉE SUR LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT DANS L'ADHÉSIF RELEVÉES LE LONG DU CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE :  $E_{\text{PATCH}} = 2\text{MM}$ , CONTRAINTE APPLIQUÉE  $= 150\text{MPa}$ ,  $A = 18\text{MM}$ ..... 124
- FIGURE IV.56 :** EFFET DE LA SIMPLE ET DOUBLE REPARATION ET DE L'ÉPAISSEUR DE LA PLAQUE FISSURÉE SUR LE FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTES :  $E_{\text{PATCH}} = 2\text{MM}$ , CONTRAINTE APPLIQUÉE  $= 150\text{MPa}$ ,  $A = 18\text{MM}$  ..... 125
- FIGURE IV.57 :** EFFET DE LA SIMPLE ET DOUBLE REPARATION SUR LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT DANS L'ADHÉSIF RELEVÉES LE LONG DU CHEMIN DE PROPAGATION DE LA FISSURE:  $E_{\text{PATCH}} = 2\text{MM}$ , CONTRAINTE APPLIQUÉE  $= 150\text{MPa}$ ,  $A = 18\text{MM}$ ..... 126
- FIGURE IV.58 :** EFFET DE LA DOUBLE REPARATION LE FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTE RELEVÉ LE LONG DE L'ÉPAISSEUR DE LA STRUCTURE FISSURÉE, :  $E_{\text{PATCH}} = 2\text{MM}$ , CONTRAINTE APPLIQUÉE  $= 150\text{MPa}$ ,  $A = 18\text{MM}$  ..... 126
- FIGURE IV.59 :** EFFET DE LA RIGIDITÉ DE LA PLAQUE FISSURÉE SUR LE FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTE EN POINTE DE FISSURE DE LA FACE NON RÉPARÉE :  $E_{\text{PATCH}} = E_{\text{PLAQUE}} = 2\text{MM}$ , CONTRAINTE APPLIQUÉE  $= 150\text{MPa}$ ,  $E_{\text{PLAQUE}} = 2\text{MM}$ ,  $A = 18\text{MM}$ ..... 127
- FIGURE IV.60 :** EFFET DE LA RIGIDITÉ DE LA PLAQUE FISSURÉE SUR LES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT DANS LA COLLE PRÈS DE LA FISSURE RÉPARÉE,  $E_{\text{PATCH}} = E_{\text{PLAQUE}} = 2\text{MM}$ , CONTRAINTE APPLIQUÉE  $= 150\text{MPa}$ ,  $A = 18\text{MM}$  ..... 128

Liste des tableaux

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>TABLEAU III.1.</b> ENERGIES DE SURFACE POUR QUELQUE MATERIAU .....                                 | 36  |
| <b>TABLEAU III.2.</b> LE TENU MECANIQUE DES POLYMERES.....                                            | 40  |
| <b>TABLEAU III.3.</b> PROPRIETES MECANQUES DES COLLES EPOXYDES . ....                                 | 42  |
| <b>TABLEAU III.4.</b> PROPRIETES MECANQUES DE LA REDUX.....                                           | 44  |
| <b>TABLEAU III.5.</b> EXEMPLES DE REPARATIONS PAR PATCHS EFFECTUEES PAR LA RAAF.....                  | 50  |
| <b>TABLEAU IV.1 :</b> CONSTANTES ELASTIQUES DE DIFFERENTS COMPOSANTS DE LA STRUCTURE<br>ANALYSEE..... | 57  |
| <b>TABLEAU IV.2:</b> NOMBRE ET TAILLE D'ELEMENTS DANS LE MAILLAGE .....                               | 58  |
| <b>TABLEAU IV.3 :</b> MODULES D'ELASTICITES DES MATERIAUX DE REPARATION UTILISES.....                 | 98  |
| <b>TABLEAU IV.4 :</b> SEQUENCES D'EMPILEMENTS DES PLIS DU PATCH COMPOSITE.....                        | 105 |
| <b>TABLEAU IV.5</b> PROPRIETES MECANQUES DES DIFFERENTS ADHESIFS .....                                | 110 |

# *Remerciements*

*Ce travail a été mené dans le laboratoire de recherche de Mécanique Physique des Matériaux (LMPM). Créé officiellement par décret en juillet 2007, et domicilié à l'université Djillali LLABES de Sidi Bel-Abbès.*

*Ce laboratoire spécialisé en endommagement des matériaux avancés.*

*Mon directeur de thèse **Mr. KADDOURI Khacem** Professeur à l'université de Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes et le co-directeur **Mr. LEBON Frédéric** Professeur à l'université d'Aix-Marseille (France).*

*Avant tout je voudrais remercier « **ALLAH** » de m'avoir donné la patience et la volonté pour réaliser ce travail.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements et ma profonde reconnaissance envers **Mr. SERIER Boualem** directeur de laboratoire et Professeur à l'université de Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes, pour son exigence de clarté et de rigueur qui m'ont beaucoup apporté.*

*Je voudrais aussi exprimer mes remerciements et ma profonde reconnaissance envers à mon directeur de thèse **Mr. KADDOURI Khacem**, pour la confiance qu'il m'a témoignée, ainsi que pour son soutien tout au long de l'élaboration de ce travail. Il a dirigé ce travail, a guidé mes premiers pas dans la recherche et a suivi l'évolution de ma thèse avec beaucoup d'intérêt, je le remercie infiniment.*

*Je remercie également **Mr. LEBON Frédéric** pour sa disponibilité au cours de mon stage au sein de son laboratoire, de sa générosité et amabilité qui vont rester dans mon esprit et mon cœur.*

*Ma gratitude va tout autant aux membres des jurys, **Mr. BLAID Mechab**, **Mr. BOUTABOUT Benali** et **Mr. DJEBBAR Nouredine** pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.*

*J'exprime ma sincère gratitude à Monsieur le Professeur **Mr. SERIER Boualem**, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse.*

*Je tiens à remercier le **Dr. SALEM Mokadem** enseignant à l'université de Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes pour ses précieux conseils et aides.*

*Je traduis par la même occasion ma reconnaissance à tous les enseignants du département de Génie Mécanique.*

# Dédicaces

*J'ai toujours pensé faire ou offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme efforts, rien que pour me voir réussir, et voilà, l'occasion est venue.*

*A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.*

*A mes chers parents **BAGHDADI Miloud** et **DIANI Rebiha**;*

*A ma petite famille, Ma femme **TEHAMI. A**, mes fils **Anas Ayoub Abdessamad** et **Ibrahim Louay**;*

*A mes chers sœurs et frères **Noureddine, Ilyes,.....** et ma petite sœur **Ritag***

*A tous ceux qui m'aiment et m'estiment j'adresse mes sentiments les plus chaleureux.*

### RESUME

**Nom de L'établissement universitaire :** Université Djillali Liabes

**Intitulé de laboratoire :** Laboratoire Mécanique

**Physique des Matériaux (LMPM)**

**Nom de la ville :** Sidi Bel-Abbes (Algérie)

**Nom :** BAGHDADI

**Prénom :** Mohammed

#### **Titre du sujet : Analyse paramétrique de la réparation par patches composites**

L'efficacité de la réparation est non seulement étroitement liée aux paramètres géométriques et mécaniques du patch composite, mais également aux paramètres géométriques et mécaniques du joint adhésif et de la structure réparée elle-même.

Ce travail rentre dans ce contexte et a pour objectif l'analyse, par l'utilisation du concept de la mécanique linéaire de la rupture, de la performance de la réparation et de la durabilité des structures d'aéronefs en **Al 2024-T3** fissurées et réparées par patch composite. Cette performance est analysée en termes de réduction de l'énergie mécanique en pointes de fissures (Facteur d'intensité de contrainte FIC) et des contraintes de cisaillement dans toute la couche adhésive. Pour atteindre cet objectif la méthode des éléments finis (Code de Calcul-ABAQUS) est utilisée.

Les résultats obtenus montrent effectivement que les caractéristiques géométriques et mécaniques du patch composite, de l'adhésif et de la structure à réparer déterminent la durée de vie et la fiabilité de la réparation.

Le patch, conjointement collé à la face fissurée, permet de retarder considérablement la cinétique de propagation de la fissure. La forte réduction du facteur d'intensité de contraintes en pointes de fissures réparées est caractéristique de ce retardement.

Ce travail met l'accent sur l'influence des paramètres ci-dessous sur l'efficacité et la qualité de la réparation. Ces dernières sont étudiées d'un point de vue réduction de l'énergie de rupture en mode d'ouverture (mode le plus dangereux) en têtes de fissures réparées et des efforts tangentiels dans la couche adhésive.

- Le patch, défini par ses modules d'élasticité et de son épaisseur
- La forme du patch et de son épaisseur (La forme volumique)
- La forme surfacique du patch ;
- L'adhésif, défini par son module de cisaillement et son épaisseur ;
- La plaque réparée définie par son module de Young et son épaisseur ;
- L'effet bénéfique de la double réparation des structures épaisses ;
- L'originalité de ce travail réside dans le développement d'une forme de patch permettant une forte réduction du facteur d'intensité de contraintes et une meilleure relaxation des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive.

**MOTS CLÉS.** Patch composite ; Matériaux composites ; facteur d'intensité de contrainte ; contrainte de cisaillement ; Forme de patch ; Adhésif ; Fissure.

## ABSTRACT

**Name of University Institution:** Djillali Liabes University

**Name:** BAGHDADI

**Laboratory title:** Mechanical Laboratory Materials Physics (LMPM)

**First name:** Mohammed

**City name:** Sidi Bel-Abbes (Algeria)

**Topic Title:** Parametric analysis of the composites patch repair

The efficiency of the repair is not only closely related to the geometric and mechanical parameters of the composite patch, but also to the geometric and mechanical parameters of the adhesive joint and of the repaired structure itself.

This work fits in this context and aims to analyze, through the use of the concept of linear fracture mechanics, the repair performance and durability of Al 2024-T3 aircraft structures cracked and repaired by composite patch. This performance is analyzed in terms of reduction of mechanical energy in crack points (stress intensity factor) and shear stresses in all adhesive layer. To achieve this objective the finite element method (Abaqus) is used.

The results obtained effectively show that the geometric and mechanical characteristics of the composite patch, of the adhesive and of the structure to be repaired determine the service life and reliability of the repair.

The composite patch glued to the cracked structures, makes it possible to considerably delay the kinetics of the crack propagation. The strong reduction in the stress intensity factor in repaired crack heads is characteristic of crack propagation.

This work emphasizes the influence of the parameters below on the efficiency and quality of the repair. The latter are studied from the point of view of reduction of the fracture energy in opening mode (the most dangerous mode) in repaired crack heads and of the tangential stresses in the adhesive layer.

- The patch, defined by its elasticity modulus and its thickness
- The shape of the patch and its thickness (The volume shape)
- The surface shape of the patch;
- The adhesive, defined by its shear modulus and its thickness;
- The repaired plate defined by its Young's modulus and its thickness;
- The beneficial effect of double repair patch of thick structures;
- The originality of this work lies in the development of a new patch shapes allowing at the same time, the reduction of the stress intensity factor and the better relaxation of the shear stresses in the adhesive layer.

**KEYWORDS.** Composite patch; Composite materials; Stress intensity factor; shear stress; Patch shape; Adhesive; Crack.



## المخلص

اللقب: بغدادي  
الاسم: محمد

اسم المؤسسة الجامعية: جامعة الجبالي اليابس  
عنوان المختبر: مختبر الميكانيك وفيزياء المواد (LMPM)  
اسم المدينة: سيدي بلعباس (الجزائر)

## عنوان الموضوع: التحليل المعلمي (البارا متري) للإصلاح بواسطة المواد المركبة ملصقة

لا ترتبط كفاءة الإصلاح بواسطة المادة المركبة اللاصقة ارتباطاً وثيقاً بالمعلومات الهندسية والميكانيكية للرقعة المركبة فحسب، بل ترتبط أيضاً بالمعلومات الهندسية والميكانيكية للوصل اللاصق والهيكل الذي تم إصلاحه. يتلاءم هذا العمل مع هذا السياق ويهدف إلى التحليل ودراسة، من خلال استخدام مفهوم ميكانيكا الكسر الخطي، أداء إصلاح ومتانة هياكل طائرات AI 2024-T3 المتصدعة أو المتشققة والتي تم إصلاحها بواسطة التصحيح المركب. يتم تحليل هذا الأداء من حيث تقليل الطاقة الميكانيكية في نقاط التصدع (عامل شدة الإجهاد) وإجهادات القص في جميع الطبقة اللاصقة. لتحقيق هذا الهدف يتم استخدام طريقة العناصر المنتهية (Abaqus) تظهر النتائج التي تم الحصول عليها بشكل فعال أن الخصائص الهندسية والميكانيكية للرقعة المركبة والمادة اللاصقة والهيكل المراد إصلاحه تحدد عمر الخدمة وموثوقية الإصلاح. تجعل الرقعة، الملصقة على الوجه المتشقق، من الممكن تأخير حركية انتشار الصدع إلى حد كبير. يعد الانخفاض القوي في عامل شدة الإجهاد في نقاط الشقوق التي تم إصلاحها من سمات هذا التأخر في انتشار الصدع. يؤكد هذا العمل على تأثير المعلومات أدناه على كفاءة وجودة الإصلاح. تمت دراسة الأخير من وجهة نظر تقليل طاقة الكسر في وضع الفتح (الوضع الأكثر خطورة) في رؤوس الشقوق التي تم إصلاحها وإجهادات القص في الطبقة اللاصقة.

- الرقعة المواد المركبة الملصقة محددة بمعامل المرونة معامل يونغ وسمكها
- شكل وسماعة الرقعة (شكل الحجم)
- شكل سطح الرقعة.
- المادة اللاصقة المحددة بمعامل القص وسمكها.
- اللوحة التي تم إصلاحها محددة بمعامل المرونة (معامل يونغ) الخاص بها وسمكها ؛
- التأثير المفيد لرقعة الإصلاح المزدوجة للهيكل السميكة.
- تكمن أصالة هذا العمل في تطوير شكل رقعة جديد (المواد المركبة الملصقة) يسمح بتخفيض قوي لعامل شدة الإجهاد في رؤوس الشقوق وتخفيف أفضل لإجهادات القص في الطبقة اللاصقة.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة الملصقة؛ عامل شدة الإجهاد. وإجهادات القص؛ شكل التصحيح لاصق؛ صدع.

# ***INTRODUCTION GENERALE***

### Présentation et définition de la problématique

Les conditions environnementales et les forces mécaniques multiaxiales sont les principales causes des dommages structurels des avions. Ce phénomène est un problème qui limite la durée de vie de telles structures. Pour améliorer la durabilité des structures aéronautiques endommagées par fissuration, en termes de ralentissement de la propagation de la fissure voire son arrêt et pour des raisons économiques, la réparation par patch composite s'avère être une solution pertinente, efficace, efficiente, rapide et moins coûteuse [1-4]. Le temps de la réparation est un facteur économique de grande importance, sa diminution réduit la durée de l'arrêt de l'aéronef.

La réparation par patch composite apparaît comme solution alternative plus avantageuse que les techniques conventionnelles classiques de réparation mécaniquement fixées par rivetage ou par soudage. Parmi ces avantages figurent la résistance à la fatigue et à la corrosion, une rigidité élevée et une faible densité. En outre, le patch collé n'engendre pas de zones de concentration de contraintes comme le fait la réparation par rivetage [5]. Rappelons que la méthode de rivetage conventionnelle est à l'origine de contraintes supplémentaires par effet d'entaille, ce qui favorisera la génération et la propagation de fissures de fatigue. L'interaction du champ de contraintes de l'entaille et de fissure (trou de rivetage) exacerbera ce phénomène. Par conséquent, la technique de réparation par collage comprend l'utilisation de joints adhésifs pour lier la zone fissurée au patch composite et éliminer ce phénomène. Plusieurs études [2-4] et [6-9] ont conduit à une caractérisation expérimentale et analytique de cette technique.

La réparation par patch composites peut réduire l'énergie de rupture au point de fissure en relâchant l'intensité de la contrainte fortement localisée, qui est causé par la singularité provoquée par la fissure, et en réduisant l'ouverture de ses lèvres [10]. Cette technique présente aussi l'avantage de combiner des formes irrégulières et complexes, qui permet un meilleur transfert de charges de la partie fissurée vers le patch composite à travers la couche adhésive.

Rose [11] a établi les fondements d'une démarche analytique pour l'analyse de la réparation par patch collé, en utilisant l'analogie à une inclusion ainsi que la solution d'Eshelby d'une inhomogénéité, des solutions analytiques ont été formulées [12,13]. Il est clair qu'une telle démarche facilite les études paramétriques et les analyses de sensibilité. Cependant, ces solutions sont loin d'être applicables pour la plupart des formes complexes telles que celles des structures des aéronefs.

Les méthodes numériques et tout particulièrement celles des éléments finis demeurent les techniques numériques les plus adaptées pour franchir cette contrainte. Par conséquent, la méthode des éléments

finis MEF est toujours l'outil numérique le plus couramment utilisé pour analyser le comportement mécanique de la réparation sur les structures fissurées.

L'évaluation de la performance de la réparation par patchs composite collés en termes d'estimation du degré de réduction du facteur d'intensité de contraintes, a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches basés sur le concept de la mécanique linéaire de la rupture. On cite quelques-uns: Poole [14], Alderliesten [15], Qing et al [16], Aminallah et al [17], M'hamdia et al [18], Gkilas et al [19], Ouinas[20], Ouinas et al [21- 25], Bachir Bouiadjra et al [26 - 29], Benyahia et al [30], Fékirini et al [31], Lena et al [32], Mathias [33], Belhouari et al [34] et Linxia Gu et al [35].

Le comportement mécanique des structures en général et celui des aéronefs en particulier, réellement élasto-plastique, ce comportement a été très peu étudié. Il est clair, que dans ce cas, l'énergie en pointes de fissures sera relaxée sous forme de déformation plastique. Cette dernière est généralement à l'origine du ralentissement voir de l'arrêt de la fissure. L'étendue de la zone plastiquement déformée est étroitement liée à l'intensité du champ de contraintes localisées aux fronts de fissuration. Ainsi, M'hamdia [36] a montré que le comportement élastoplastique des structures aéronautiques permet le ralentissement de la cinétique des fissures réparées par patchs composites. Albedah et al. [37] ont étudié le comportement des fissures initiées dans des structures ductiles réparées par patch composite, leurs résultats montrent que la taille de la zone plastique autour de la fissure diminue d'une façon significative lors d'utilisation du patch cela est dû au fait qu'une partie des contraintes locales a été absorbée par le patch composite.

La durabilité et la fiabilité des structures réparées par patchs composites dépendent essentiellement du comportement mécanique de la couche adhésive. Celle-ci constitue le maillon le plus faible de la structure et est pratiquement la cause essentielle de l'endommagement de la réparation par le processus du décollement. La compréhension des mécanismes de type de dégradation de la réparation n'est encore que très superficielle. Le décollement est un phénomène assez complexe dont les mécanismes physiques restent encore très mal connus. Il dépend pratiquement des paramètres mécaniques et géométriques du patch, de la colle, et surtout des contraintes de cisaillement induites, lors de la réparation et de la mise en service, dans la couche adhésive. Cette dernière est soumise à des efforts de cisaillement et doit pouvoir résister à de telles sollicitations afin de palier à sa ruine et à la dégradation de la réparation. A cet effet, le comportement mécanique de la colle est un facteur déterminant de la qualité de la réparation. Les pics de contraintes de cisaillement dans le liant semblent être responsables du décollement. Ainsi, Lucas et col [38] ont proposé, pour la réduction des pics de contraintes de cisaillement transverses, l'utilisation d'un joint de colle composé de deux adhésifs l'un résistant à des températures moins 55°C et l'autre résistant à plus 200°C. Chiu et col [39] ont montré que l'adhésif FM

73 présente un comportement viscoélastique linéaire. Ce dernier est étroitement lié à la température à laquelle les efforts sont appliqués. Il a noté cependant, Xu et col [40] indique que le comportement des colles époxydes présentent une non linéarité des résultats obtenus en fonction de l'intensité des efforts appliqués. Kaye et col [41] ont proposé pour minimiser les pics de contraintes de cisaillement dans la colle, l'introduction d'une garniture sous forme d'escalier (bourrelet) autour du bord libre de la zone collée. Xiong et Raizenne [42] Wang et al [43] pour relaxer les contraintes de cisaillement dans ce liant, proposent un patch à épaisseur dégressive.

La dégradation de la réparation est généralement causée par la ruine de la couche adhésive conduisant ainsi au décollement structure-patch composite. Ce comportement a fait l'objet de plusieurs travaux utilisant la théorie de la zone endommagée pour expliquer les mécanismes du décollement. Cette théorie est basée d'abord sur la formation et le développement d'une zone endommagée et puis sur la propagation de fissure, amorcée dans cette zone, ayant atteint une taille critique sous des charges plus intenses. Ainsi Crombe et al [44] et Sheppard et al [45] proposent un modèle pour prédire la dégradation de la colle, dans ce cas, la rupture de ce liant n'aura lieu que si la contrainte induite dans l'adhésif franchit une contrainte seuil. Ces auteurs relèvent que cet endommagement ne se produit pas par la propagation de la fissure réparée, mais plutôt par l'amorçage et le développement de nouvelles fissures dans le film adhésif. Ce modèle a été développé par Ban et al [46], le rapport de la zone endommagée, caractérisé par le rapport entre la somme des surfaces calculées ou la déformation à la rupture est atteinte et la surface du joint de colle, a été proposé par Ban et al [46] comme critère de prédiction de la dégradation du film adhésif. Ces auteurs ont observé que le film de colle "type époxy FM 73", se détache des surfaces assemblées lorsque ce rapport tend vers une valeur seuil égale 0,247. Ibrahim et al [47] ont étudié l'endommagement de la couche adhésive utilisée pour la réparation par patch composite des structures des avions fissurées. En se basant sur le modèle de la zone d'endommagement de l'adhésif, Papanikos et al [48] ont indiqué que la décohésion de la jonction (décollement), initié au bord supérieur du patch, conduit à une réduction trop importante de l'aire effective de l'adhérence. Ce comportement peut conduire à la rupture catastrophique de l'assemblage patch-plaque. Magalhaes et al. [49] ont conclu que le décollement se développe à l'intérieur de la colle au voisinage proche de l'interface adhésif-adhérent. L'observation par ces auteurs d'une couche adhésive fine sur la surface collée permet de dire que le décollement résulte d'une rupture cohésive de l'adhésif. Rezgani et al [50] ont mis en évidence l'effet de la dégradation par hygrothermique du composite sur la durabilité et la fiabilité de la réparation en termes de variation du facteur d'intensité de contraintes. Ils ont conclu que ce critère de rupture s'intensifie avec un accroissement de l'absorption d'eau par le patch composite. Une même analyse a été conduite par Aminallah et al [51], l'effet du vieillissement hygrothermique du patch composite et de l'adhésif. Ils indiquent que l'étendue de la zone plastique est d'autant plus importante que le taux

d'absorption de l'humidité dans le patch et l'adhésif est important. L'absorption d'eau conduit à une réduction de la force d'adhérence entraînant la dégradation de la réparation. Dans ce même contexte, Apalak et al. [52], en se basant sur la théorie de la zone endommagée, ont mis en évidence les effets des contraintes thermiques dans le joint de colle. Ainsi, ils concluent que la dégradation peut être initiée soit dans le patch ou dans l'adhésif d'une réparation trempée.

La forme géométrique du patch, l'orientation des plis et la séquence d'empilement ont fait l'objet de plusieurs études. Rendre la réparation performante et durable, en termes de réduction de l'énergie de rupture en têtes de fissures réparées et des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive, revient à trouver une forme de patch adéquate. Ainsi, Kumar et al. [53], en analysant l'effet des formes rectangulaire, carrée, elliptique et étoile, sur la stabilité de la structure fissurée, montrent qu'une réparation utilisant un patch en forme étoile est plus efficace. M'hamdia et al [54] ont montré qu'une nouvelle forme de patch en "H" et en double flèches obtenues à partir d'un patch initialement rectangulaire, favorise la stabilité de la fissure réparée par une minimisation du facteur d'intensité de contraintes. Bouchiba et al [55] ont développé une nouvelle méthode d'optimisation de la forme des patches afin d'améliorer l'efficacité de la réparation des plaques fissurées. Ces auteurs visaient à minimiser trois objectifs : le facteur d'intensité de contraintes, le volume du patch et les contraintes de cisaillement dans le joint adhésif. Cette méthode a permis l'identification de familles de formes optimales. Kumar et al. [53] en incluant l'épaisseur du patch rectangulaire comme variable du problème, ces auteurs ont clairement mis en exergue la possibilité de concevoir des patches avec une bonne performance tout en réduisant le volume, ce qui conduit à un gain de masse. Pratiquement tous ces travaux utilisaient des patches composites unidirectionnels. Néanmoins, dans le cas de la réparation des structures fissurées soumises à des efforts biaxiaux ou d'une déviation de la fissure amorcée, les composites stratifiés, comme matériaux de réparation, constituent une solution de choix. L'effet des stratifiés sur la qualité de la réparation a fait l'objet de plusieurs travaux. Parmi lesquels, Cheng [56], Hautier [57], Wang [58].

Ce travail rentre dans ce contexte et a pour objectifs :

### **Objectifs du travail**

Cette étude vise à :

- Analyser les effets des paramètres géométriques (largeur, hauteur, épaisseur) et mécaniques du patch, sur la performance de la réparation en termes de réduction du facteur d'intensité de contraintes en têtes de fissures réparées et de relaxation des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive responsable de la dégradation de la réparation ;

- Réaliser une optimisation paramétrique, en fonction de la taille de patch, pour minimiser simultanément ces deux grandeurs physiques ;
- Optimiser l'épaisseur du patch composite en fonction de la rigidité de la structure fissurée et de son épaisseur pour la réduction des contraintes normales dues à la singularité de la fissure et des contraintes de cisaillement dans la colle ;
- Analyser l'effet de la forme de patch composite sur l'efficacité et la durabilité de la réparation d'un point de vue minimisation de l'énergie élastique de rupture "FIC" en pointes de fissures réparées et des contraintes tangentielles dans la couche adhésive et développer une nouvelle forme permettant la relaxation de ces paramètres et minimiser les effets néfastes dus à une épaisseur élevée du patch ;
- Etudier le rôle des composites stratifiés, orientation des plis et les séquences d'empilement sur l'efficacité et la fiabilité de la réparation en vue de minimiser le facteur d'intensité de contraintes aux fronts de fissures réparées et les contraintes tangentielles dans la colle ;
- Procéder à une optimisation de l'épaisseur et du module de cisaillement de l'adhésif pour une réduction à la fois de l'énergie de rupture en têtes de fissures réparées (facteur d'intensité de contraintes) et des contraintes de cisaillement dans le film adhésif ;
- Analyser les effets de la plaque réparée, définie par son module de Young et son épaisseur, sur les deux grandeurs physiques (FIC et la contrainte de cisaillement dans l'adhésif)
- Analyser l'effet de la double réparation interne et externe dans le cas des structures épaisses sur la qualité et la durée de la réparation d'un point de vue relaxation des contraintes normales dues à la singularité de la fissure réparée et des contraintes tangentielles dans la colle assurant la jonction zone fissure-patch composite et le transfert d'énergie mécanique de cette zone vers le matériau de réparation.

Pour atteindre ces objectifs fixés, ce travail est structuré comme suit :

### Structuration du travail

Cette étude est composée, conformément aux objectifs préalablement visés, d'une introduction générale : portant exclusivement sur une analyse bibliographique constituant un support scientifique de qualité pour la compréhension de la technique de la réparation. Elle constitue de façon générale une synthèse des principaux travaux de recherche actuels relatifs à la réparation par patch composite. Ceci permettra une analyse comparative entre ces travaux et ceux obtenus dans le cadre de cette étude ;

Et de quatre chapitres disposés comme suit :

- Le chapitre I : consiste en une étude bibliographique, afin de rappeler les notions de la mécanique de la rupture et de présenter les outils nécessaires à cette étude ;
- Le chapitre II : consiste en une étude bibliographique sur la méthode des éléments finis appliquée à la mécanique de la rupture ;
- Le chapitre III : donne un aperçu sur l'application de la technique de réparation, des zones endommagées par fissuration, par patches composites dans le domaine de l'aéronautique.
- Le chapitre IV : est entièrement consacré à la modélisation numérique tridimensionnelle par la méthode des éléments finis de la performance, en termes de l'énergie de rupture en pointes de fissures réparées défini par FIC (Facteur d'intensité de contraintes) en fonction de la taille de la fissure, les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive le long d'une ligne virtuelle notée « Path », et les contraintes de cisaillement maximales dans toute la couche adhésive.

Enfin, ce travail est clôturé par une conclusion générale regroupant les différents résultats obtenus.



*CHAPITRE I*  
*INTRODUCTION A LA MECANIQUE*  
*DE LA RUPTURE*

---

## Chapitre I

### Introduction à la mécanique de la rupture

#### I.1. Introduction

Les fissures peuvent généralement être présentes dans toutes les structures mécaniquement sollicitées. Elles peuvent exister sous forme de défauts de base dans le matériau ou peuvent se développer durant le processus d'élaboration des matériaux ou pendant leur mise en service. Ces défauts de fissuration sont la cause essentielle de la plupart des dommages par ruptures des structures et des éléments de machines soumises à des efforts statiques ou dynamiques.

Le concept de la mécanique de la rupture a généralement pour but l'analyse du comportement des fissures existantes dans toutes les structures industrielles supportant des efforts mécaniques simples ou complexes.

L'approche de la mécanique linéaire de la rupture concerne les matériaux dont le comportement est élastique linéaire. Compte tenu de cette linéarité, et de la possibilité d'appliquer les théorèmes de superposition, les calculs sont relativement simples à réaliser.

Dans le cadre des travaux portant sur les matériaux à comportement fragiles tels les matériaux céramique (exemple du verre), les chercheurs du milieu du 20<sup>ème</sup> siècle ont conduit au développement d'une grandeur scalaire, notée  $K$ , caractéristique des champs de contraintes et de déformations au voisinage très proche du défaut de fissuration. Cette grandeur a permis l'établissement d'un critère  $K_c$  ( $K$  critique) comme paramètre intrinsèque du matériau pour l'analyse de l'amorçage et de la propagation de la fissure. Ce critère a pu être relié à l'énergie libérée par la fissure au cours de sa croissance.

Au cours des années 70, de nombreux travaux de recherches ont été consacrés au développement d'un paramètre permettant d'étendre le concept de la mécanique de la rupture au comportement élastoplastique des matériaux [59,60]. Parmi les différents paramètres, l'intégrale de contour  $J$ , développé par Rice [61], a connu un large succès en raison de la facilité de sa mise en œuvre et de ses propriétés numériques, à savoir une énergie obtenue par simple intégrale de contour, indépendante de celui-ci.

L'interprétation analytique de cette intégrale, a permis à Begley et Landes [62] d'associer ce paramètre  $J$  à un critère critique d'amorçage  $J_c$ , qui fut étendu à la propagation ductile par la suite via les courbes de résistance à la déchirure  $J$  en fonction de la croissance du défaut de fissuration  $\Delta a$ .

Ces différents paramètres de rupture sont exprimés soit en termes de contraintes en front de fissure soit en termes d'énergie de toute la structure fissurée.

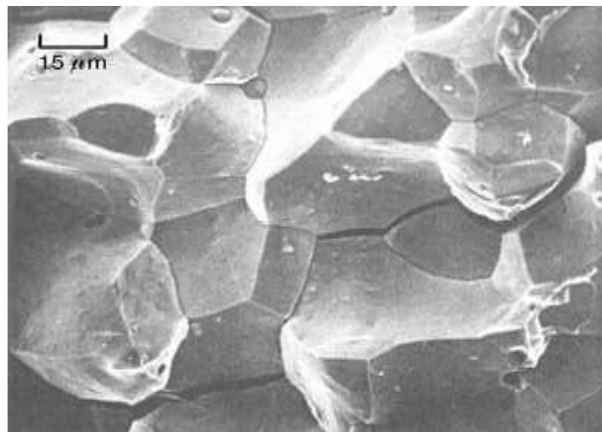
## I.2. Concept de la mécanique linéaire et non linéaire de la rupture

Selon le comportement mécanique du matériau durant la propagation d'une fissure, deux types de ruptures sont possibles :

- Rupture fragile caractérisée par une absence de la déformation plastique significative obéit à la mécanique linéaire de la rupture ;
- Rupture ductile, en présence de déformation plastique non négligeable obéissant à la mécanique non linéaire de la rupture.

### I.2.1. Cas de la Rupture fragile

Dans le cas de la rupture fragile d'un matériau, on observe généralement un site d'amorçage unique sur un défaut à partir duquel se propage une fissure principale par clivage jusqu'à sa rupture (fig. I.1). Lors d'une rupture fragile, le comportement macroscopique du métal reste élastique.



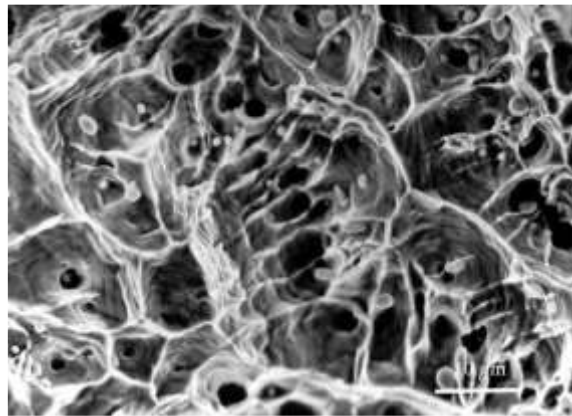
**Figure I.1.** Rupture fragile [63]

### I.2.2. Cas de la rupture Ductile

La rupture ductile dans le cas des métaux est un mécanisme d'endommagement très différent de la rupture fragile. C'est d'abord un mécanisme qui se produit lorsque le métal est macroscopiquement en plasticité. De nombreuses cavités se développent de par l'hétérogénéité de la microstructure, ensuite, du fait de la déformation plastique, ces cavités grossissent puis coalescent (fig. I.2). La rupture se produit par coalescence de microfissures ou de cavités.

La rupture ductile est presque toujours un moindre mal, contrairement à la rupture fragile qui a un caractère soudain et brutal et a des effets imprévus en raison de la propagation spontanée et rapide de la fissure. En revanche, la présence d'une déformation plastique signale l'imminence d'une rupture et rend donc possible l'application de mesures préventives [64].

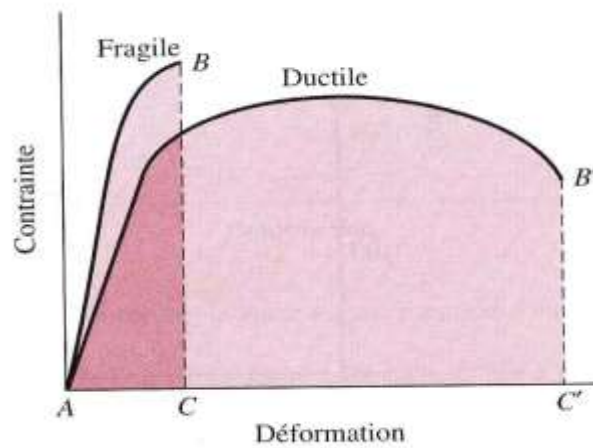
Une rupture ductile nécessite une plus grande énergie de déformation, car les matériaux à comportement ductile sont généralement plus tenaces. Sous l'action d'une contrainte de traction, la plupart des métaux et de leurs alliages, à l'état d'équilibre thermodynamique, sont ductiles, tandis que les céramiques sont particulièrement fragiles que les polymères, en fonction de leur nature, sont exposés aux deux types de rupture (fig. I.3) [64].



**Figure I.2.** Rupture ductile [63].

Les mécanismes de la rupture ductile se fait en plusieurs étapes :

- Après le début de la striction, de petites cavités se forment dans la section transversale ;
- A mesure que la déformation se poursuit, ces cavités se développent, se coalescent pour donner naissance à une fissure elliptique dont le grand axe est perpendiculaire à la direction de la contrainte appliquée ;
- La fissure se développe davantage le long de la direction parallèle à son axe principal, en raison de cette coalescence des cavités ;
- Enfin, lorsque la fissure atteint une taille critique, sa propagation rapide sur le périmètre de la striction conduit à la rupture par déformation de cisaillement selon un angle d'environ  $45^\circ$  à l'axe de traction, angle pour lequel la scission est maximale.

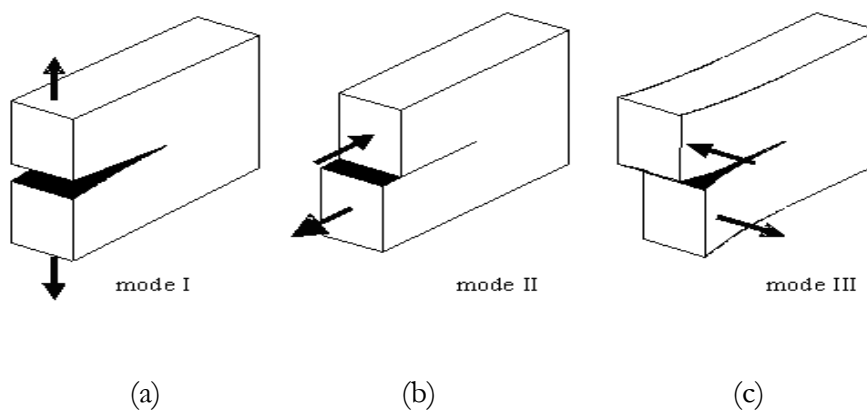


**Figure I.3.** La courbe contrainte déformation pour matériau fragile et ductile [64].

La mécanique de la rupture se propose de décrire les étapes d'amorçage et de propagation de la fissuration. La mécanique linéaire de la rupture s'applique aux matériaux ayant un comportement élastique obéissant à la loi de Hooke. Même si des corrections liées à la présence d'une zone plastifiée près d'une zone de concentration de contraintes (entaille, fissure) ont été proposées par la suite, ces analyses reposant sur l'hypothèse que la plasticité reste confinée ne sont valables que pour des structures dont le comportement est globalement élastique.

### I.3. Différents modes de rupture

La fissuration se manifeste par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties appelées lèvres de la fissure ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants illustrés schématiquement sur la figure I.4.



**Figure I.4.** Différents Modes de rupture [65].

- Mode I (mode par ouverture) : les lèvres de la fissure se déplacent dans des directions opposées et perpendiculairement au plan de fissure (fig. I.4a) ;
- Mode II (cisaillement plan) : les lèvres de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de fissure (fig. I.4b) ;
- Mode III (cisaillement anti-plan) : les lèvres de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure (fig. I.4c).

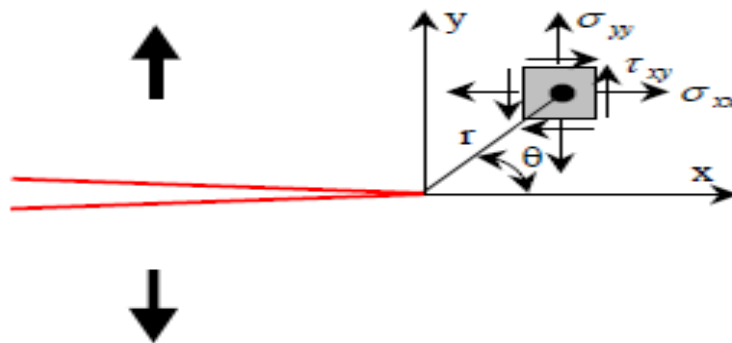
#### I.4. Critères de rupture

En mécanique linéaire élastique de la rupture, trois principaux critères de rupture sont utilisés, le premier proposé par Griffith (1920) [66] est basé sur une approche énergétique, le second proposé par Irwin (1960) [65], est défini à partir du champ local de contraintes au front de fissuration, et le troisième développé par Wells [67], est basé sur le déplacement d'ouverture en tête de fissure noté CTOD.

##### I.4.1. Facteur d'intensité de contraintes

Irwin [65], en considérant un solide de comportement élastique linéaire contenant une fissure. (fig. I.5) montre que le champ de contraintes au voisinage de la fissure peut être défini uniquement par un paramètre  $K$  appelé facteur d'intensité de contrainte. La rupture peut intervenir lorsque  $K$  atteint une valeur critique  $K_c$ . En utilisant les fonctions de Westergaard [68], il est possible de décrire le champ de contraintes à une distance  $r$  de la pointe de la fissure (fig. I.5). L'expression générale de ce champ est de la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (I.1)$$



**Figure I.5.** Contraintes près de l'extrémité d'une fissure [69].

Où :  $r, \theta$  sont les coordonnées polaires du point considéré,  $K$  est le facteur d'intensité de contraintes, qui vaut ici :  $\sigma \sqrt{\pi a}$  et contient à la fois l'information sur l'intensité de chargement et sur la taille du défaut de fissuration.

Comme le facteur d'intensité de contraintes  $K$  définit le champ de contraintes au voisinage de la fissure, Irwin [65] a postulé que la condition  $K \geq K_c$  est une condition de rupture inévitable et représentait un critère de rupture, ce facteur se déduit à partir de la relation :

$$K = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (I.2)$$

$\sigma$  est la valeur atteinte par la contrainte appliquée loin de la fissure, et  $Y$  est un facteur géométrique (Coefficient de correction, appelé facteur de forme. Ce dernier prend en compte les dimensions finies et la géométrie de l'éprouvette ainsi que la taille de la fissure. Ce paramètre est donné pour chaque type d'éprouvette sous forme d'une fonction polynomiale de  $(a/w)$ , où  $w$  est la largeur de l'éprouvette et «  $a$  » la taille de la fissure.

Le critère  $K$  qui fait la synthèse à lui seul de la géométrie de la pièce fissurée, de la longueur de la fissure et du niveau du chargement appliqué, est appelé facteur d'intensité de contraintes. Les facteurs  $K_I$ ,  $K_{II}$  et  $K_{III}$  sont définis respectivement pour les modes I, II et III décrits par les expressions I.3, I.4 et I.5. Les champs de contraintes s'expriment à l'aide des facteurs d'intensité des contraintes

**En mode I :**

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{cases} \quad (I.3)$$

**En mode II :**

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{cases} \quad (I.4)$$

**En mode III :**

$$\begin{cases} \tau_{x\tau} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \tau_{y\tau} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (I.5)$$

#### I.4.2. Taux de restitution d'énergie

Au cours de ses travaux sur la théorie de la rupture fragile, Griffith [66] a introduit le taux de restitution d'énergie, noté  $G$ , correspondant à l'énergie libérée au cours de la propagation d'une fissure dans un solide parfaitement élastique. Selon Griffith, la rupture intervient au moment où une énergie suffisante est restituée pour la création de nouvelles surfaces de rupture. Cette énergie provient de l'énergie élastique stockée dans le matériau et de l'énergie potentielle du système de chargement. Griffith [66] considère un solide d'épaisseur  $B$ , contenant une fissure de longueur  $2a$ , soumis à un chargement  $F$ . L'énergie libre totale du corps fissuré s'écrit :

$$U = U_0 + U_s + U_E - W \quad (I.6)$$

Où:

$U_0$ : est l'énergie de déformation du corps non fissuré ;  $U_s$ : l'énergie de surface due à la formation de la fissure ;  $U_E$ : la variation d'énergie de déformation élastique due à l'introduction de la fissure et  $W$ : est la variation du travail externe du système.

En fonction de l'énergie libre totale, Griffith a exprimé un critère de rupture sous la forme :

$$\begin{aligned} \frac{dU}{da} < 0 & : \text{Fissure instable ;} \\ \frac{dU}{da} = 0 & : \text{Fissure en équilibre ;} \\ \frac{dU}{da} > 0 & : \text{Fissure stable.} \end{aligned}$$

L'énergie  $U_0$  est indépendante de la fissure ;  $U_E$  et  $W$  sont fonctions du mode de chargement. L'énergie de surface  $U_s$  est égale à  $\frac{4a}{h}\gamma_0$  ; où  $\gamma_0$  est l'énergie superficielle spécifique. Le taux de restitution d'énergie est défini par :

$$G = \frac{1}{B} \frac{\partial(U_E - W)}{\partial a} \quad (I.7)$$

Le paramètre  $G$  est représenté par l'aire entre les deux courbes  $P = f(\Delta)$  correspondant aux fissures de longueurs «  $a$  » et «  $a + da$  ». Si l'on considère un accroissement de la fissure d'une longueur  $da$ , pour



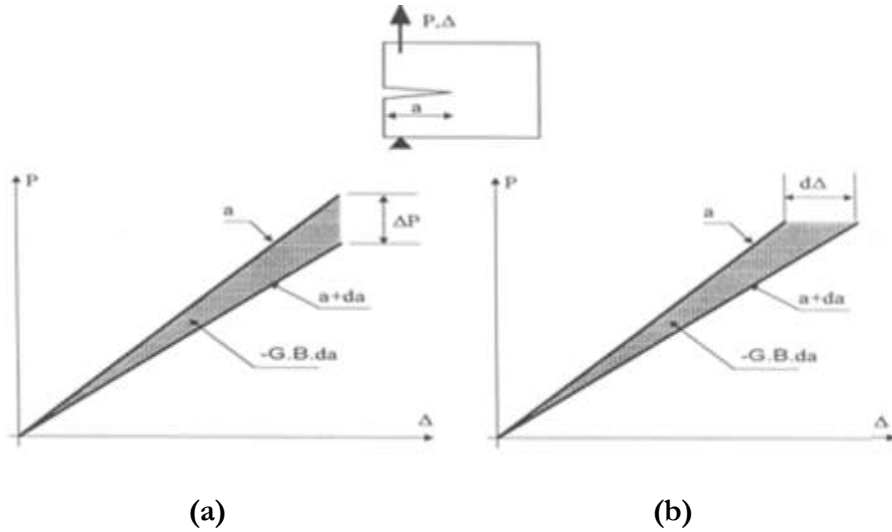
un déplacement constant, on peut alors observer une diminution de la charge  $\Delta P$  comme l'indique la figure I.6.a. La variation de l'énergie du système est uniquement une diminution de l'énergie de déformation, soit :

$$\delta W = 0 \quad \text{et} \quad \delta U_E = -\frac{1}{2} \Delta \delta P \quad (\text{I.8})$$

La figure I.6.b illustre le même comportement que celui représenté par la figure I.6.a avec une charge constante. La propagation de la fissure entraîne une augmentation du déplacement  $d\Delta$ . Dans ce cas, l'énergie de déformation croît ( $\delta U_E = -\frac{1}{2} P d\Delta$ ). La variation du travail correspondant est donnée par la relation :  $\delta W = P d\Delta$

D'où :

$$\delta(U_E - W) = -\frac{1}{2} P d\Delta \quad (\text{I.9})$$



**Figure I.6.** Interprétation du taux de restitution d'énergie. [66]

La rupture se produit lorsque l'énergie totale atteint un optimum. Elle survient, pour une contrainte appliquée donnée, lorsque la taille de la fissure tend vers une valeur critique «  $a_c$  ». Dans ce cas, la valeur de l'énergie ( $G$ ) correspond au taux de restitution de l'énergie critique «  $G_c$  » dont la valeur pour un matériau fragile est égale à deux fois l'énergie superficielle spécifique «  $G_c = 2\gamma_0$  ».

Dans le contexte élastique linéaire de la mécanique de la rupture, le taux de restitution d'énergie et le facteur d'intensité de contrainte sont liés par la relation de type :

$$G = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \quad (\text{I.10})$$

Avec :  $E' = E$  en contrainte plane et

$E' = E / (1+\nu^2)$  en déformation plane ;

$\mu$  et  $\nu$  sont respectivement le module de cisaillement et le coefficient de Poisson.

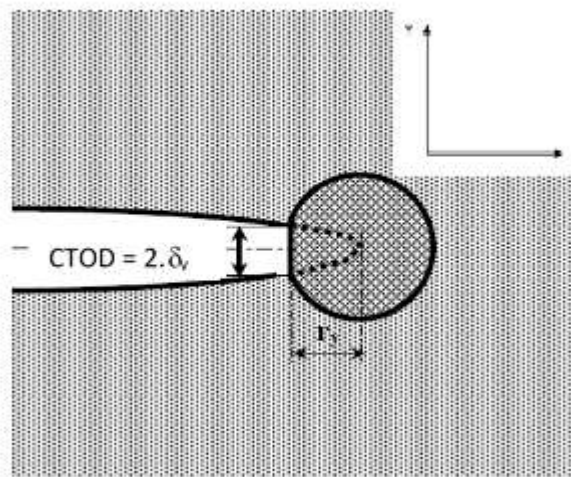
Les deux paramètres, facteur d'intensité de contraintes et taux de restitution d'énergie, sont essentiels pour la mécanique de la rupture, ils ne sont valides que pour un comportement élastique linéaire. Cependant, en rupture ductile, la prise en compte du comportement réel élastoplastique du matériau est nécessaire pour définir des paramètres représentatifs des phénomènes dissipatifs tels que la plasticité.

#### I.4.3. Ouverture de fissure (CTOD)

Wells [67] a remarqué lors d'une étude sur la ténacité d'un acier très ductile que la déformation en pointe de fissure est d'autant plus importante que le matériau est tenace, ces résultats l'ont conduit à proposer le déplacement d'ouverture en pointe de fissure noté CTOD comme critère de mesure de la ténacité à la rupture. Selon Wells le CTOD est défini par :

$$\text{CTOD} = 2. \delta_y \quad (\text{I.11})$$

Où :  $\delta_y$  est le déplacement de la fissure suivant l'axe y défini sur la figure I.7.



**Figure I.7.** Définition du CTOD. [67]

L'analyse proposée par Wells tente de relier le CTOD au facteur d'intensité de contrainte  $K$  lorsqu'on est en régime de plasticité confinée. Irwin [70] a exprimé le déplacement des lèvres de la fissure pour les trois modes de rupture I, II et III par :

$$\begin{aligned}
u &= K_I \frac{\chi+1}{\mu} \left( \frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \\
v &= K_{II} \frac{\chi+1}{\mu} \left( \frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \\
w &= K_{III} \frac{\chi+1}{\mu} \left( \frac{r}{2\pi} \right)^{1/2}
\end{aligned} \tag{I.12}$$

Où :

- $K_I$ ,  $K_{II}$  et  $K_{III}$  sont les facteurs d'intensité de contraintes en mode I, II et III.
- $u$ ,  $v$  et  $w$  sont respectivement les déplacements des lèvres de fissure suivant  $x$ ,  $y$  et  $z$ .
- $\chi = 3-4\nu$  en déformation plane
- et  $\chi = (3-\nu) / (1+\nu)$  en contrainte plane.
- $\nu$  est le coefficient de Poisson.

Plus tard, lorsque Rice [61] a introduit l'intégrale  $J$ , il a étudié analytiquement la relation entre le CTOD et le paramètre  $J$  dont l'expression est la suivante :

$$J = \sigma_0 (\text{CTOD}) \tag{I.13}$$

Shih [71] a utilisé cette relation dans le cas d'un matériau obéissant à une loi de comportement de type Remberg-Osgood. Il a montré que le coefficient de linéarité entre le CTOD et  $J$  ne correspond pas à la limite élastique  $\sigma_0$ , mais au produit  $\sigma_0$  par un facteur  $\chi$ . La relation I.12 devient alors :

$$J = \chi \cdot \sigma_0 \cdot \text{CTOD} \tag{I.14}$$

Où :  $\chi$  est un coefficient qui dépend du matériau.

Plusieurs travaux expérimentaux [72-74] ont également porté sur la validité d'une telle relation. Il est important de noter que la définition du CTOD, recentrée dans la plupart de ces travaux, diffère de celle de Rice [66]. Ainsi, tous ces résultats analytiques et expérimentaux, montrent bien qu'il existe une relation linéaire entre  $J$  et l'ouverture de la fissure CTOD. La valeur du coefficient de proportionnalité diffère d'une étude à l'autre.

### I.5. Forme et taille de la zone plastique en pointe de fissure

Généralement les matériaux solides développent des zones de déformation plastique lorsque la limite élastique est franchie localement au voisinage proche du front de fissure. Toutefois, si on s'approche très près du front de la fissure, c'est-à-dire lorsque  $r$  tend vers 0, le calcul théorique montre que les contraintes vont tendre vers l'infini. En fait, la contrainte appliquée ne peut dépasser la limite

d'élasticité du matériau qui va commencer à se plastifier à proximité du front de la fissure, créant ainsi une zone plastique. Réellement les contraintes à l'extrémité d'une fissure restent finies car le rayon au fond de fissure n'est pas nul. Ces contraintes dépassent la limite d'élasticité du matériau et la déformation plastique qui en résulte, conduit à une relaxation des contraintes à l'extrémité de la fissure. La mécanique linéaire de la rupture devient progressivement imprécise à mesure que la taille de la zone plastifiée qui se forme à l'extrémité de la fissure, devient importante. Des corrections simples à la mécanique linéaire de la rupture sont proposées lorsque cette taille reste raisonnable. Au-delà d'une certaine plastification, le facteur d'intensité de contrainte n'est plus adapté à la description des champs des contraintes et des déplacements à l'extrémité de la fissure. Ainsi, en d'autres paramètres sont pris en considération. Il est important de connaître la taille de la zone plastique au fond de fissure, compte tenu des limites d'application de la mécanique linéaire de la rupture. Plusieurs auteurs ont tenté d'évaluer la forme et la taille de la zone plastifiée en bout de fissure en se basant sur les critères classiques de l'élasticité ou par des calculs numériques par la méthode des éléments finis.

### I.5.1. Approche d'Irwin

Irwin [75] a été parmi les premiers chercheurs à avoir contribué à la correction des équations de la mécanique linéaire de la rupture prenant en compte la zone plastique au front de la fissure. Si la taille de cette zone demeure assez petite, elle n'a pour effet que de décaler la distribution singulière des contraintes d'une quantité  $r_y$  appelée correction de plasticité ou correction d'Irwin et est définie comme suit :

$$r_y = \frac{1}{\alpha\pi} \left( \frac{K}{\sigma_e} \right)^2 \quad (\text{I.15})$$

Avec :

$\alpha = 2$  : en contrainte plane.

$\alpha = 6$  : en déformation plane.

Cette quantité  $r_y$  s'ajoute à la longueur réelle de la fissure.

A partir de la valeur  $r_y$ , Irwin définit un facteur d'intensité de contraintes plastiques :

$$K_I^* = \sigma \sqrt{\pi \cdot (a + r_y)} \quad (\text{I.16})$$

Les critères de Tresca ou de Von Mises permettent de déterminer avec précision la forme de la zone plastique. Irwin [75], suppose que la forme de la zone plastifiée de dimension  $r_p$  est de forme circulaire. La taille de cette zone peut être estimée comme la distance  $r_y$  entre le fond de la fissure et le point où la contrainte dépasse la limite d'élasticité  $\sigma_e$ . Irwin considère l'existence d'une fissure fictive de profondeur  $a + r_y$  (où « a » est la longueur réelle de la fissure) qui a son extrémité au centre d'une zone plastique de rayon  $r_y$ , au bout de cette fissure fictive, et suppose un comportement élastoplastique parfait ( $\sigma_y = \sigma_e = \text{const}$ ) à l'intérieur de cette zone (Figure. I.8).

En fait, si l'on adopte les critères de Tresca et de Von Mises, on obtient une forme sensiblement différente qui, de plus, varie dans l'épaisseur de la pièce puisqu'à la surface règne un état de contraintes planes alors qu'à cœur l'on se rapproche davantage d'un état de déformations planes. En conséquence, la zone plastifiée doit décroître graduellement depuis la surface jusqu'au cœur.

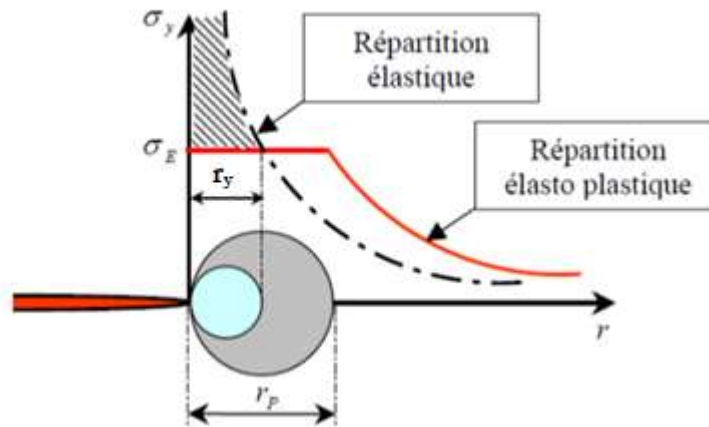


Figure I.8. Correction de la zone plastique (Irwin). [75]

### I.5.2. Approche de Dugdale

Dugdale [76] a proposé un modèle de bande pour la zone plastique dans des conditions de contraintes planes. La figure I.9 illustre le modèle de Dugdale, qui considère une fissure de longueur  $a + r$  avec des contraintes de compression d'intensité égale à celle de la limite d'élasticité  $\sigma_e$ , qui s'exercent sur la longueur « r » près de chacune des extrémités de la fissure. La longueur « r » représente la taille de la zone plastique. Le phénomène de fermeture de fissure est provoqué par des contraintes internes puisqu'elles tendent à fermer la fissure. Lorsqu'on charge une structure fissurée, une zone plastique se forme à l'extrémité de la fissure. Lors de la décharge, le reste de la structure, reste élastique, exerce alors

sur la zone plastique des contraintes de compression  $\sigma_e$ . Le rayon de la zone plastique selon le modèle de Dugdale s'exprime par

$$R_d = \frac{\pi}{8} \left[ \frac{K(1)}{\sigma_e} \right]^2 \quad (I.17)$$

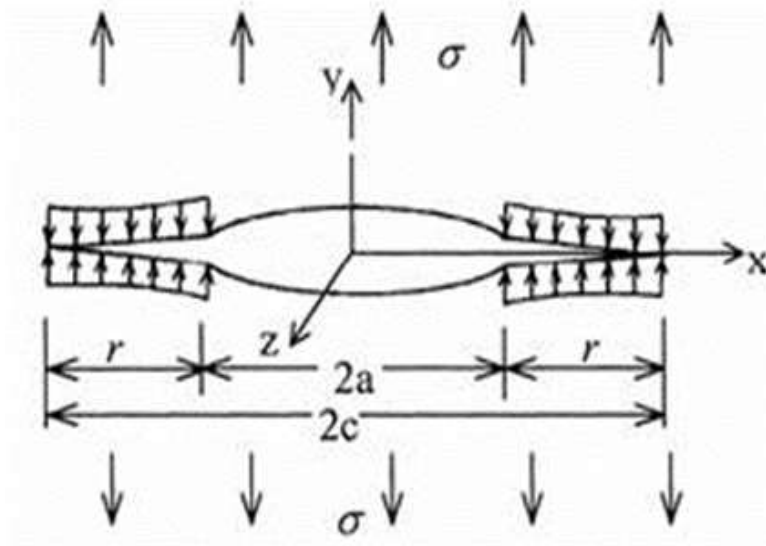


Figure I.9. Modèle de la zone plastique de Dugdale. [76]

## I.6. Conclusion

Le comportement à la rupture d'une structure fissurée peut être décrit soit par l'approche globale basée sur un bilan énergétique soit par l'approche locale basée sur le champ de contraintes en pointe de fissure. Dans l'hypothèse du comportement élastique linéaire, les différentes expressions du taux de restitution d'énergie «  $G$  » permettent, d'une part, d'avoir des relations avec le facteur d'intensités de contrainte «  $K$  » et d'autre part, une caractérisation expérimentale simple. Si ces deux paramètres «  $K$  » et «  $G$  » sont essentiels pour la mécanique de la rupture, elles ne restent valables que pour un comportement élastique linéaire. Cependant, la prise en compte du comportement réel des structures est nécessaire pour définir d'autres paramètres de rupture tenant compte de l'effet de la plasticité.

Le concept de l'intégrale «  $J$  » a permis l'extension de la mécanique de la rupture au comportement élastoplastique des matériaux. Les caractéristiques attractives de l'intégrale «  $J$  » sont à l'origine du succès de ce paramètre. De nombreuses normes proposent des grandeurs caractérisant l'amorçage et la propagation stables de la fissure.

Au point de vue expérimental, certains travaux ont montré que l'intégrale « $J$ » peut être liée linéairement à l'ouverture de la fissure CTOD ; ces travaux confirment la loi de Rice. Cependant, la valeur du coefficient de proportionnalité diffère d'un auteur à l'autre., à la base de ces paramètres plusieurs critères de bifurcation établis, permettent une meilleure caractérisation à la rupture des matériaux.

***CHAPITRE II***  
***METHODE DES ELEMENTS FINIS***  
***APPLIQUEE A***  
***LA MECANIQUE DE LA RUPTURE***



## Chapitre II

### Méthode des éléments finis appliquée à La mécanique de la rupture

#### II.1. Introduction

La résolution par voie analytique sur n'importe quelle structure est généralement impossible. On doit donc faire appel à des méthodes approchées dont la formulation demande l'utilisation de l'outil informatique (Ordinateur-Des codes de calcul).

La méthode des éléments finis, est l'une de ces méthodes approchées ; elle est l'une des techniques approximatives pour l'analyse des structures mono, bi et tridimensionnelle grâce à l'évolution de l'informatique. Elle fut un outil de travail efficace pour l'analyse des problèmes mécaniques afin de connaître le comportement statique ou dynamique des systèmes et la répartition des contraintes et des déformations dans les solides. Les problèmes traités par la méthode des éléments finis sont de l'ordre de difficulté supérieure, ce qui nécessite une discrétisation de la structure en éléments finis, et cela selon la précision et le type du problème traité.

La méthode des éléments finis fait appel à des connaissances en mécanique des milieux continus et les lois de comportement en analyse numérique et, enfin en informatique appliquée.

Lorsque les frontières d'une structure ont une surface complexe, l'erreur sera inévitable, (erreur de discrétisation géométrique). Elle peut être réduite en diminuant la taille des éléments, ou en utilisant des éléments à des frontières plus complexes.

La mécanique de la rupture par fissuration suppose l'existence des fissures initiales créées lors de l'élaboration du matériau, ou lors de la mise en forme ; en pointe de ces fissures, la méthode des éléments finis utilise des éléments dans lesquels les fonctions de formes sont compatibles avec la singularité du champ de déplacement.

#### II.2. Méthode des éléments finis

L'utilisation de la méthode des éléments finis sur un domaine donné pour déterminer une fonction inconnue (contrainte, déplacement...) nécessite la description du domaine considéré en un nombre fini de sous domaines appelés éléments finis, et le système continu sera remplacé par un système discrétisé équivalent.

Les éléments utilisés pour la discrétisation, peuvent être unidimensionnels, bidimensionnels, et tridimensionnels. Ces éléments sont liés les uns aux autres en un nombre fini de points appelés nœuds qui se trouvent aux coins et le long de la frontière de ces éléments.

### II.2.1. Méthode des éléments finis en élasticité linéaire

L'objectif de la méthode des éléments finis est d'obtenir la relation liant les déplacements  $\{u\}$  aux forces nodales  $\{F\}$  [77], tel que :

$$\{F\} = [K] \{u\} \quad (\text{II.1})$$

Où :  $[K]$  représente la matrice de rigidité.

Cette dernière s'écrit :

$$[K] = h \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] \det J d\xi d\eta \quad (\text{II.2})$$

### II.3. Modélisation de la singularité

Souvent dans une structure fissurée pour avoir une bonne précision dans une analyse par éléments finis conventionnels, un maillage plus raffiné est requis dans la région du front de fissure, mais le taux de convergence devient très bas, donc pour éviter un maillage raffiné de discrétisation des structures fissurées il est préférable d'utiliser des éléments spéciaux en pointe de fissure ayant des fonctions de formes compatibles avec la singularité du champ de déplacement.

#### II.3.1. Élément proposé par Byskov

En 1970, Byskov [78] a proposé un élément sous forme d'un polygone contenant une fissure droite qui doit être ensuite assemblée avec des éléments triangulaires standards, mais cet élément est devenu inutile suite à la découverte de Henshel et Shaw

#### II.3.2. Élément au quart de nœud

Barsoum, Henshell et Shaw [79-80] ont utilisé des quadrilatères isoparamétriques et ont déplacé certains nœuds se trouvant au milieu du côté pour les amener au quart, ou encore confondre les nœuds 1,7,8 pour obtenir un élément triangulaire figure II.1.

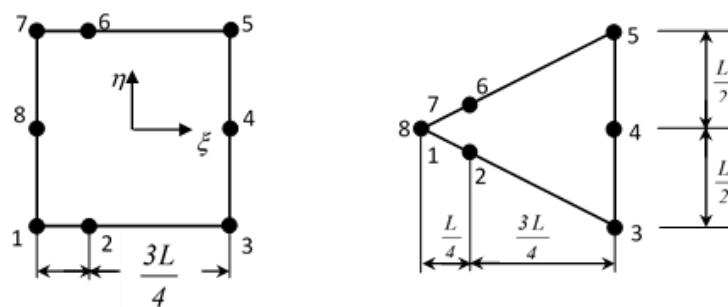


Figure II.1. Élément au quart de nœud [79]

Avec ces transformations on peut modéliser la singularité  $\frac{1}{\sqrt{r}}$  des champs de déformations sur la frontière 1-3 définie par  $\eta = -1$ . Les fonctions de formes des nœuds le long de cette frontière sont données par la relation :

$$\begin{cases} N_1 = -\frac{1}{2}\xi(1-\xi) \\ N_2 = (1-\xi^2) \\ N_3 = \frac{1}{2}\xi(1+\xi) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Pour une représentation isoparamétrique les coordonnées  $x$  et  $y$  sont définies par :

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} N_i & 0 \\ 0 & N_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

A partir des équations II.3 et II.4, et pour  $n=3$ , on obtient :

$$x = -\frac{1}{2}\xi(1-\xi)x_1 + (1-\xi^2)x_2 + \frac{1}{2}(1+\xi)x_3 \quad (\text{II.5})$$

Prenons comme origine le nœud 1 et notons  $L$  la longueur de la frontière 1-3, on aura donc :

$$x_1 = 0, \quad x_2 = \frac{L}{4}, \quad x_3 = L. \quad (\text{II.6})$$

Par conséquent l'équation II.6 se réduit à :

$$x = \frac{L}{4}(1-\xi^2) + \frac{1}{2}\xi(1+\xi)L \quad (\text{II.7})$$

ou bien :

$$\xi = -1 + 2\sqrt{\frac{x}{L}} \quad (\text{II.8})$$

Le déplacement le long de la frontière 1-3 s'exprime par :

$$u = -\frac{1}{2}\xi(1-\xi)u_1 + (1-\xi^2)u_2 + \frac{1}{2}\xi(1+\xi)u_3 \quad (\text{II.9})$$

En remplaçant  $\xi$  par sa valeur dans l'équation II.10, et en remplaçant  $x$  par  $r$  on aura ainsi l'expression du déplacement le long de la frontière 1-3 :

$$u = u_1 + (4u_2 - u_3 - 3u_1)\sqrt{\frac{r}{L}} + (2u_3 + 2u_1 - 4u_2)\frac{r}{L} \quad (\text{II.10})$$

Par les mêmes opérations on détermine le déplacement  $v$ , on aura donc :

$$v = v_1 + (4v_2 - v_3 - 3v_1)\sqrt{\frac{r}{L}} + (2v_3 + 2v_1 - 4v_2)\frac{r}{L} \quad (\text{II.11})$$

### II.3.3. Élément proposé par Benzeley

L'élément singulier proposé par Benzeley (1974) [81] est un élément isoparamétrique quadratique enrichi. Il utilise des fonctions de forme standard du type

$C_0$ , en plus des fonctions de déplacement prenant en compte la singularité  $\frac{1}{\sqrt{r}}$ , s'écrivent sous la

forme suivante :

$$u^- = K_I Q_{I1} + K_{II} Q_{II1} \quad (\text{II.12})$$

$$v^- = K_I Q_{I2} + K_{II} Q_{II2} \quad (\text{II.13})$$

Où :  $K_I$  et  $K_{II}$  sont les facteurs d'intensité de contraintes et les  $Q(r, \theta)$  correspondant à :

$$Q_{I1} = \frac{1}{\mu\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ \frac{k-1}{2} + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \sqrt{r} \quad (\text{II.14})$$

$$Q_{II1} = \frac{1}{\mu\sqrt{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[ \frac{k+1}{2} + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \sqrt{r} \quad (\text{II.15})$$

$$Q_{I2} = \frac{1}{\mu\sqrt{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[ \frac{k+1}{2} - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \sqrt{r} \quad (\text{II.16})$$

$$Q_{II2} = \frac{1}{\mu\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ -\frac{k+1}{2} + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \sqrt{r} \quad (\text{II.17})$$

avec :

$$k = \begin{cases} \frac{(3-\nu)}{(1+\nu)} : \text{en contrainte plane} \\ 3-4\nu : \text{en déformation plane} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

L'incorporation de tels champs dans une analyse numérique peut être réalisée en procédant d'une façon classique en identifiant les paramètres nodaux avec les déplacements dans l'équation suivante :

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \dots + K_I Q_{I1} + K_{II} Q_{II1} \quad (\text{II.19})$$

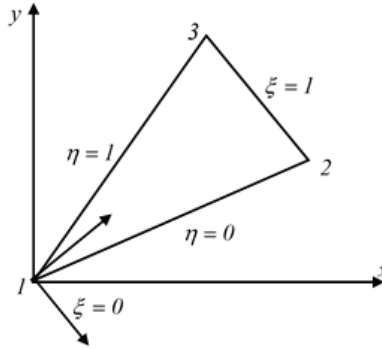
Ainsi les fonctions de formes s'expriment aussi en fonction des variables nodales  $u_i$ , ainsi des paramètres  $K_I$  et  $K_{II}$ .

### II.3.4. Élément proposé par Blackburn :

Blackburn [82] a présenté un élément triangulaire avec un champ de déformation singulier figure II.2, la fonction de déplacement utilisée est :

$$u(\xi, \eta) = b_1 + \frac{b_2\xi + b_3\eta + b_4\xi\eta}{\sqrt{\xi + \eta}} + b_5\xi + b_6\eta \quad (\text{II.20})$$

$b_i$  : peuvent être interprétés comme des déplacements nodaux.



**Figure II.2.** Élément triangulaire isoparamétrique proposé par Blackburn. [82]

### II.3.5. Élément proposé par Hellen :

Hellen a proposé un élément similaire à celui de Blackburn, dont la fonction de déplacement est donnée comme suite :

$$u(\xi, \eta) = b_1 + b_2\xi + b_3\eta + \frac{b_4\xi + b_5\eta}{\sqrt{\xi + \eta}} + b_6 \frac{\xi\eta}{\xi + \eta} B \quad (\text{II.21})$$

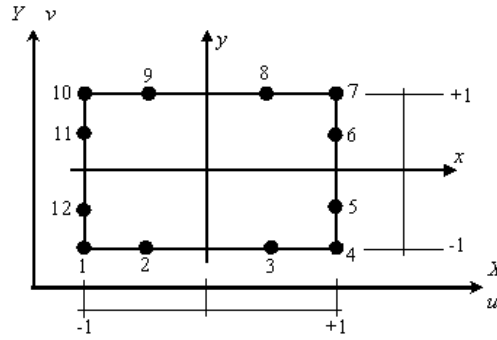
### II.3.6. Élément proposé par Stern et Beckler :

La fonction de déplacement utilisée pour ce type d'élément proposé par Stern et Beckler [83] est :

$$u(\xi, \eta) = b_1 + \frac{b_2\xi + b_3\eta}{\sqrt{\xi + \eta}} + b_4 \frac{\xi\eta}{(\xi + \eta)^{3/2}} + b_5\xi + b_6\eta \quad (\text{II.22})$$

### II.3.7. Élément proposé par Head

Head [84] a utilisé un élément enrichi iso-paramétrique de 12 nœuds dont l'un des nœuds d'angle correspond à la pointe de fissure, figure II.3.



**Figure II.3.** Elément fini quadratique à 12 nœuds

Pour cet élément le champ de déplacement est donné comme suite :

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 xy + \dots + \alpha_{12} y^3 x + K_I f_1 + K_{II} g_1 \quad (\text{II.23})$$

$$v = \alpha_{13} + \alpha_{14} x + \alpha_{15} y + \alpha_{16} x^2 + \alpha_{17} xy + \dots + \alpha_{24} y^3 x + K_I f_2 + K_{II} g_2 \quad (\text{II.24})$$

En introduisant les fonctions de forme, le champ de déplacement peut s'écrire alors comme étant :

$$u(x, y) = \sum N_i u_i + K_I \left[ f_1(x, y) - \sum_{i=1}^{i=12} N_i f_{1i} \right] + K_{II} \left[ g_1(x, y) - \sum_{i=1}^{i=12} N_i g_{1i} \right] \quad (\text{II.25})$$

$$v(x, y) = \sum N_i v_i + K_I \left[ f_2(x, y) - \sum_{i=1}^{i=12} N_i f_{2i} \right] + K_{II} \left[ g_2(x, y) - \sum_{i=1}^{i=12} N_i g_{2i} \right] \quad (\text{II.26})$$

Où les indices sur  $f_{1i}$ ,  $g_{1i}$ , indiquent que  $f_1$ ,  $g_1$ , sont évaluées au nœud «  $i$  ».

#### II.4. Evaluation du facteur d'intensité de contrainte

Après la modélisation de la singularité au front de fissure, et la formulation de la méthode des éléments finis en déplacement nœaux, le facteur d'intensité de contrainte a été évalué à partir de quatre méthodes les plus usuelles :

##### II.4.1. Méthode de perturbation [84]

Cette méthode a été proposée par Parks (1974) et Hellen (1977), elle consiste à faire déplacer d'un faible incrément «  $\delta a$  » le nœud de pointe de fissure en ne perturbant que les éléments contenant ce nœud.

Selon Hellen la variation de l'énergie potentielle est donnée comme suite :

$$\delta W_{pot} = W_{pot1} - W_{pot2} \quad (\text{II.27})$$

avec :

$$W_{pot1} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i)^2}{K_{ii}} \quad (\text{II.28})$$

$$W_{pot2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i + \delta P_i)^2}{K_{ii} + \delta K_{ii}} \quad (\text{II.29})$$

tel que :  $P_i$  et  $K_{ii}$  sont respectivement le vecteur charge et la rigidité à l'état initial de la fissure.

$P_i + \delta P_i$  et  $K_{ii} + \delta K_{ii}$  sont les quantités équivalentes à l'état de la fissure à l'extension.

Connaissant la variation de la matrice de rigidité  $\delta K$  il est facile de calculer  $G = \frac{\partial W_{pot}}{\partial a}$  puis calculer  $K$ .

L'avantage de cette méthode est qu'un seul calcul est nécessaire, ce calcul est très économique et peut être utile en bidimensionnel et tridimensionnel, par contre à cause du raffinement du maillage en pointe de fissure, l'accroissement de fissure  $\delta a$  doit être choisi entre  $\frac{1}{100}$  et  $\frac{1}{10}$  de la dimension de l'élément de pointe.

#### II.4.2. Méthode de l'intégrale J

Cette méthode est considérée comme une approche d'évaluation directe de l'énergie libérée, elle ne nécessite qu'un seul calcul. Cette forme intégrale connue sous le nom de l'intégrale  $J$  se présente sous la forme suivante :

$$J = \int_{\Gamma} W dy - T_i^d \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \quad (\text{II.30})$$

Elle peut être exprimée en fonction du facteur d'intensité de contraintes par la relation suivante :

$$J = \frac{(k+1)}{8\mu} K_I^2 \quad (\text{II.31})$$

Pour calculer cette intégrale, considérons  $\Gamma$ , reliant les points de Gauss de coordonnées locales  $\xi = \xi_p$  des éléments entourant la pointe de fissure, figure II.4.

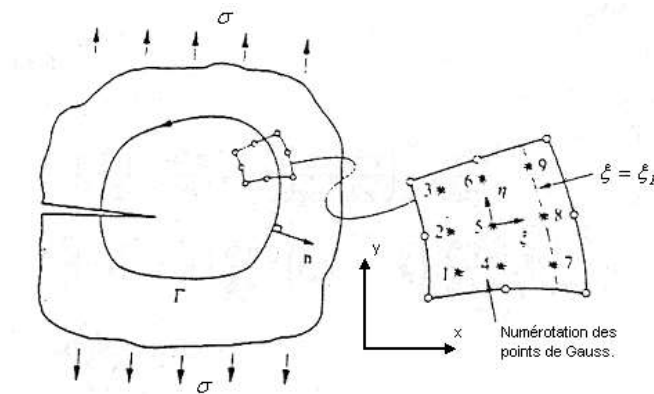


Figure II.4. Chemin de contour  $\Gamma$  pour l'évaluation de l'intégrale  $J$  [85].

Pour évaluer numériquement l'intégrale  $J$ , chaque terme de l'équation II.35 doit être décomposé de la manière suivante :

Soit :

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta}\right)^2} d\eta \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$$dy = \frac{\partial y}{\partial \eta} d\eta \quad (\text{II.33})$$

Pour un problème plan l'énergie de déformation est donnée par :

$$W = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + 2\tau_{xy} \gamma_{xy} + \sigma_y \varepsilon_y) \quad (\text{II.34})$$

de même le vecteur des forces de traction est donné par :

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_x n_1 + \tau_{xy} n_2 \\ \tau_{xy} n_1 + \sigma_y n_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

alors :

$$T \frac{\partial u}{\partial x} = \left[ (\sigma_x n_1 + \tau_{xy} n_2) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + (\tau_{xy} n_1 + \sigma_y n_2) \frac{\partial v}{\partial x} \quad (\text{II.36})$$

Finalement en substituant les équations II.37, II.38, II.39 et II.40 dans l'équation II.35 on obtient :

$$J = \int_{-1}^{+1} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \sigma_x \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{xy} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial y} \right] - \left[ (\sigma_x n_1 + \tau_{xy} n_2) \frac{\partial u}{\partial x} + (\tau_{xy} n_1 + \sigma_y n_2) \frac{\partial v}{\partial x} \right] \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \eta}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta}\right)^2} \right\} d\eta = \int_{-1}^{+1} I d\eta \quad (\text{II.37})$$

Après intégration numérique par la méthode de Gauss, cette intégrale se transforme en une somme donnée par :

$$J = \sum_{q=1}^n I(\xi_p, \eta_p) W_q \quad (\text{II.38})$$

où :



$n$  : est le nombre de degrés de liberté.

$W_q$  : Points de Gauss.

Après avoir déterminé l'intégrale  $J$  numériquement, on calcule la valeur du facteur d'intensité de contraintes à partir de l'équation II.36 on aura :

$$K_I = \left( \frac{8\mu J}{1+k} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{II.39})$$

### II.4.3. Méthodes des déplacements des lèvres de fissure

Le champ des déplacements en pointe de fissure est comme suite :

$$u = \frac{K_I}{4\nu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{K_{II}}{4\nu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2k+3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (\text{II.40})$$

$$v = \frac{K_I}{4\nu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2k+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{K_{II}}{4\nu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2k-3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (\text{II.41})$$

En mode I d'ouverture, les équations I.57 se réduisent à :

$$u = \frac{K_I}{4\nu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (\text{II.42})$$

$$v = \frac{K_I}{4\nu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[ (2k+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (\text{II.43})$$

Connaissant le déplacement  $v$  des nœuds situés sur les lèvres de la fissure ( $\theta = \pi$ ), on peut calculer le facteur d'intensité de contraintes  $K_I$  par la formule suivante :

$$K_I = \frac{E^*}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2r}} v \quad (\text{II.44})$$

avec :

En contrainte plane :

$$E^* = E \quad (\text{II.45})$$

En déformation plan :

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (\text{II.46})$$

## II.4.4. Méthode d'extrapolation du déplacement

De l'expression II.44 et II.45, on obtient les relations suivantes :

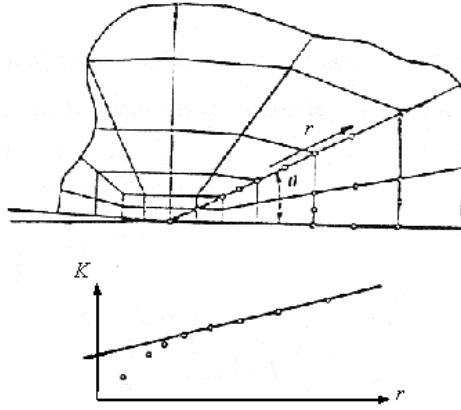
$$\left. \begin{aligned} K_I \left[ (2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] &= 4\mu \sqrt{\frac{2\pi}{r}} u \\ K_I \left[ (2k+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] &= 4\mu \sqrt{\frac{2\pi}{r}} v \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.47})$$

$$\left. \begin{aligned} K_{II} \left[ -(2k+3) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] &= 4\mu \sqrt{\frac{2\pi}{r}} u \\ K_{II} \left[ -(2k-3) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] &= 4\mu \sqrt{\frac{2\pi}{r}} v \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.48})$$

En remplaçant les valeurs de  $u$ ,  $v$  et  $r$  d'un certain nombre de points nodaux situés sur une ligne radiale émanant de pointe de fissure, figure II.5.

Les facteurs d'intensité de contraintes à la pointe de fissure, peuvent être obtenus par :

$$K = \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij} \sqrt{2\pi r} \quad (\text{II.49})$$



**Figure II.5.** Facteur d'intensité de contrainte évalué par extrapolation.[86]

***CHAPITRE III :***  
***RAPPEL DE LA TECHNIQUE DE***  
***REPARATION PAR PATCH***  
***COMPOSITES DES STRUCTURES***  
***DES AERONEFS***

## **Chapitre III : Rappel de la technique de réparation par patch Composites des structures des avions**

### **III.1. Introduction**

La technique de réparation par patch fait partie de la maintenance des structures endommagées et tout particulièrement des structures des avions, son objectif primaire est d'assurer les meilleures conditions de vol pour les avions militaires ou civils préalablement endommagés. Actuellement, de nouvelles techniques de réparation se sont développées utilisant les matériaux composites pour réduire la vitesse de propagation des fissures en augmentant la durée de vie de telles structures. En effet, grâce à leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées et à leur diversité, les matériaux composites et les adhésifs 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.

Les méthodes utilisées pour l'assemblage des structures mécaniques sont classées en deux catégories : mécanique (boulonnage, rivetage...) et physico-chimique (soudage, collage...).

Pour les réparations mécaniques (boulons, rivets), il est nécessaire de percer des trous dans les pièces à assembler selon la méthode mécanique conventionnelle, ce qui non seulement créera de nouveaux bords libres, mais produira également une zone plus faible mécaniquement du fait de la rupture des renforts. De plus, dans les joints boulonnés ou rivetés [87], la charge est transmise par le contact entre le boulon / rivet et le matériau composite, une fois que la charge transmise devient importante, ces interfaces seront plus endommagées. Par conséquent, l'assemblage mécanique classique est facile à réaliser mais n'est pas souhaitable si l'on cherche à optimiser la performance de l'assemblage [88].

Pour pallier à ce grand inconvénient, les patches composites sont conjointement liés à la zone endommagée à l'aide d'un adhésif. Cette technique est actuellement largement exploitée surtout en aéronautique de par les avantages qu'elle fournit.

A cet effet, le collage, les problèmes structurels de vieillissement des structures des avions et les conditions de maintenance (réparation) doivent être définis afin de mettre en évidence les performances de réparation par patch qui est le but de ce travail.

### III.2. Généralités sur le collage

#### III.2.1. Définition du collage

L'AFNOR [89] définit le collage comme suit :

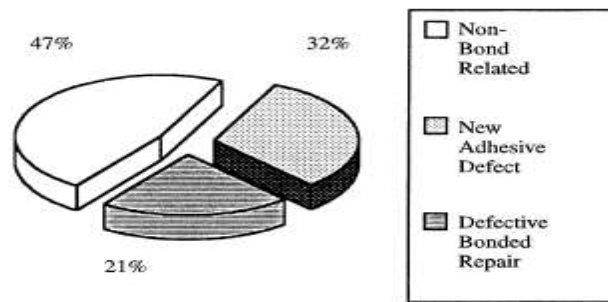
- Le collage est un assemblage d'objets au moyen d'un adhésif. C'est un procédé physico-chimique ;
- L'adhésif est une substance non métallique capable d'unir des matériaux par collage des surface (adhésion), la jonction ayant une résistance interne adéquate (cohésion) ;
- Le collage consiste ainsi en l'adhésion de deux parties (adhérent ou substrat) par l'intermédiaire d'un troisième corps (adhésif). Qui est le plus souvent un matériau polymère [90-91]. Cet adhésive est chargé d'assurer la transmission des efforts. Il est nécessaire d'obtenir un niveau d'adhésion satisfaisant entre adhérent et adhésif afin que l'assemblage soit performant et durable.

Depuis plus de cinquante ans, les adhésifs sont utilisés en aéronautique pour le fuselage et les ailes [92-94]. Ils sont aussi utilisés pour le renforcement des structures navales [95] et dans le génie civil [96]. C'est à cette époque qu'est apparue la notion de collage structurale. Ce collage est une jonction capable, en tant que partie intégrante d'une structure, de représenter un niveau déterminé de résistance lorsqu'elle est soumise à une combinaison de contraintes pendant une durée spécifiée. La combinaison des contraintes peut, par exemple, comprendre des forces de pelage et de cisaillement, des charges fluctuantes, une exposition à l'environnement et une charge constante, Les adhésifs capables de former des jonctions structurales sont couramment appelés (adhésifs-structuraux) [97-98]

#### III.2.2. Techniques de collage

Le concept de l'utilisation de composites liés (collés) comme moyen de maintenir les structures aérospatiales contre le vieillissement a été introduit en Australie il y a une cinquantaine d'années (1970). Depuis lors, il a été utilisé avec succès dans de nombreuses situations nécessitant une réparation. Ces applications ne sont pas limitées à l'Australie le Canada, le Royaume-Uni, les États-Unis et la France bénéficient également de l'utilisation de cette technologie.

L'expérience de la Royal Australien Air Force (RAAF) dans l'utilisation des patches pour renforcer les structures aérospatiales montre que 53% des défaillances majeures sont liées à la liaison (joint de colle) (fig. III.1). Par conséquent, l'utilisation d'adhésifs structuraux nécessite une compréhension complète des mécanismes qui sont à l'origine du phénomène d'adhésion et de la cohésion [93-97]



**Figure III.1 :** Résultats d'une enquête sur les défauts dans la base de la RAAF.[98]

Afin de tester ses propriétés mécaniques et donc sa résistance en situation réelle, différents types d'assemblages collés ont été étudiés. Par exemple, les joints à simple et double recouvrement, les joints massiques et annulaires en torsion et les joints massiques sollicités en traction [99]. Le choix de la géométrie utilisée correspond à un compromis entre la simplicité d'élaboration, le type de sollicitations envisagé et la nature des résultats souhaités, qualitatives ou quantitatives. Ainsi, on s'attachera moins aux problèmes de répartition de contraintes si on ne souhaite faire que du comparatif.

Le choix du type d'assemblage peut également être déterminé en utilisant des méthodes industrielles ou des méthodes standardisées et référencées par "the American Society for Testing and Materials (ASTM)", par exemple [99].

L'évaluation des performances et de la durabilité d'un assemblage collé s'effectue :

- Soit par des tests mécaniques destructifs. Il y a ensuite la question de mesurer la force maximale ou du paramètre de déplacement à la rupture. Le paramètre mesuré représentera l'adhérence (la force ou le travail qui doit être fourni au système pour séparer les deux composants).

La rupture peut être adhésive, c'est-à-dire si elle se produit à l'interface adhésif / substrat. Elle peut être cohésive, c'est-à-dire si elle se produit à l'intérieur de l'adhésif (ou du substrat). La valeur mesurée de la rupture est une caractéristique intrinsèque au matériau. Les principales sollicitations mécaniques sont la traction, le cisaillement, le clivage ou le pelage (fig. III.2).

- Soit par des Contrôles Non Destructifs (CND), citons par exemple la caractérisation d'assemblages collés par ultrasons.

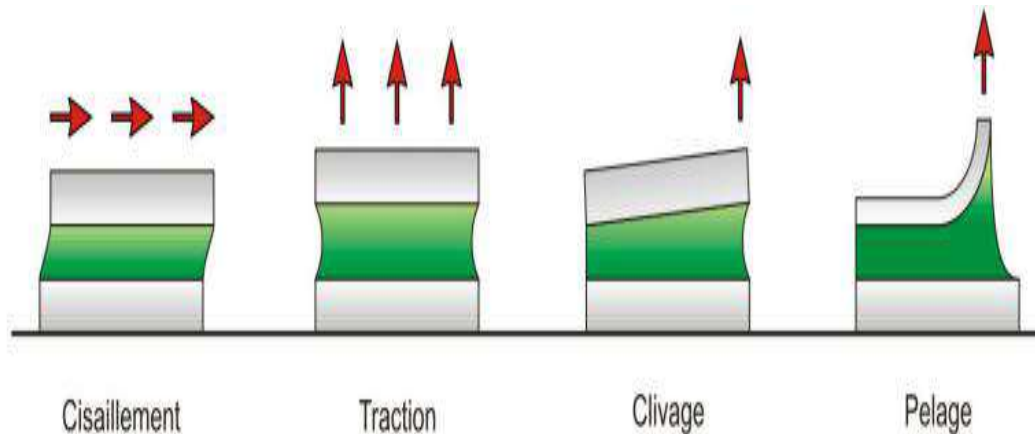


Figure III.2. Différents modes de sollicitations mécaniques des adhésifs [100]

#### III.2.2.1. Etapes du collage

Dans la littérature, la technique de collage peut être résumée en trois étapes principales :

##### a) Préparation de surface

Les surfaces sont préparées pour optimiser l'adhésion [101-103]. Les méthodes industrielles de préparation de surface peuvent être mécaniques (sablage, abrasion, ultrason), chimique (nettoyage aux solvants, nettoyage alcalin, décapages chimiques primaires) ou physico-chimique (flamme, traitement corona, traitement plasma, exposition aux ultraviolets) [104].

Les traitements de surfaces agissent sur les points suivants :

- Elimination des contaminants à la surface du substrat
- Elimination des couches d'oxydes métalliques fragilisées et reformation d'autres plus actives et plus solides [105-106]
- Augmentation de la surface de contact moléculaire entre substrat et adhésif,
- Activation de la surface des substrats à faible mouillabilité [107]

Le choix du traitement de surface dépend du substrat, de l'adhésif et des propriétés souhaitées. La figure III.3 montre la surface traitée par sablage par exemple.



Figure III.3. Exemple d'une préparation de surface par sablage [98]

### b) Mouillage

L'adhésif est appliqué sous forme liquide, cette étape est appelée mouillage. Elle permet l'adhésion par contact entre le substrat et l'adhésif (fig. III.4). Pour que la surface ait une bonne qualité, l'adhésif doit avoir une bonne mouillabilité, lorsque la gouttelette est déposée sur la surface, elle va s'étaler et former un angle ( $\theta$ ) avec la surface solide. Les énergies d'interface libre  $\gamma_{SV}$ ,  $\gamma_{LV}$  et  $\gamma_{SL}$ , où (SV, LV et SL) représentent l'interface solide/vapeur, l'interface liquide/vapeur et l'interface solide/liquide respectivement)

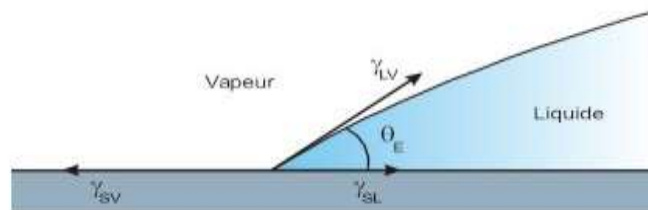
Les équations de Young et de Laplace décrivent l'équilibre thermodynamique de la goutte dans son environnement :

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos(\theta) \quad (\text{III.1})$$

Où  $\gamma_{SV}$  est l'énergie libre de surface du solide ayant adsorbé de la vapeur de la goutte de liquide. Le travail thermodynamique réversible d'adhésion  $W_{SL}$  correspond au travail nécessaire pour séparer une unité de surface de deux phases constituant une interface. Il est défini par l'équation de Dupré :

$$W_{SL} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (\text{III.2})$$

Où  $\gamma_1$  est l'énergie de surface du liquide  $\gamma_{LV}$ ,  $\gamma_2$  sont les énergies de surface du solide dans le vide  $\gamma_S$  et  $\gamma_{12}$  sont les énergies libres interfaciales  $\gamma_{SV}$



$$\text{Equilibre : } \cos(\theta) = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (\text{équation de Yong 1805})$$

$$\text{Mouillage parfait} \quad \begin{cases} \theta \rightarrow 0 \\ \cos(\theta) \rightarrow 1 \end{cases} \quad \gamma_{SV} > \gamma_{LV}$$

Figure III.4: Qualité du mouillage d'une surface (modèle de Yong) [108]



| Matériaux                                  | Energie de surface (m.J.m <sup>-2</sup> ) |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Fer                                        | 2000                                      |
| Aluminium                                  | 840                                       |
| Composite Carbon-époxy                     | 58                                        |
| Polytétrafluoréthylène PTFE (Téflon, Vitor | 18                                        |
| Adhésifs                                   | 20 à 35                                   |

**Tableau III.1.** Energies de surface pour quelques matériaux [109]

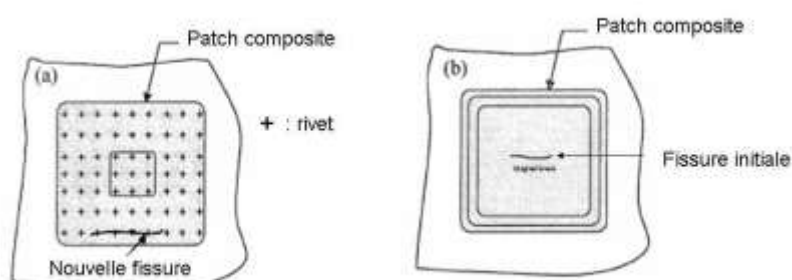
Le tableau montre que pour certains matériaux (comme le Téflon), le collage ne peut être effectué sans préparations permettant d'augmenter l'énergie de surface.

### c) Durcissement

Il s'agit de l'étape de durcissement ou de réticulation pour les adhésifs thermodurcissables. Dans cette étape, les forces de cohésion semblent rendre le composant solide. Le durcissement peut être réalisé par des moyens physiques (évaporation du solvant, pression de fusion, refroidissement) ou chimiques (mélange de plusieurs composants, chauffage (durcissement par traitement thermique), humidité, absence d'air, activation par rayonnement ultraviolet).

### III.3. Comparaison entre différents assemblages (collage, attachement mécanique)

Afin de mieux comprendre la différence entre la liaison adhésive et la connexion mécanique (connexion par boulon, rivetage ...), nous listons les avantages et les inconvénients de ces deux technologies. La figure III.5 montre un exemple de patch riveté et patch collée sur une plaque fissurée.

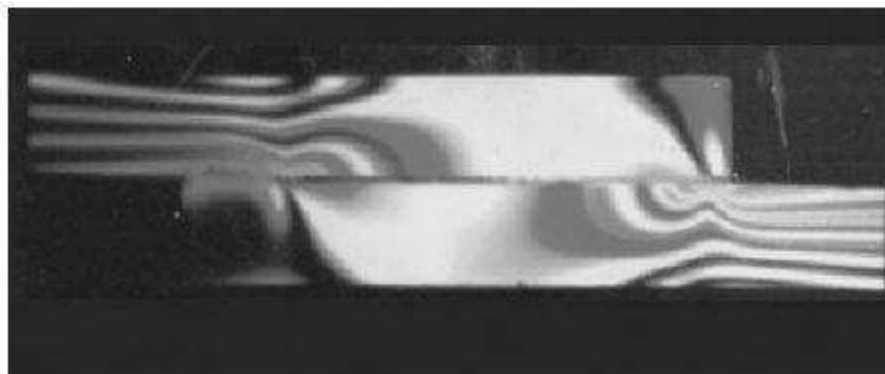


**Figure III.5.** Exemples de patches rivetés et collés [110]

### III.3.1. Assemblage par collage

#### III.3.1.1. Avantages

- Utilisé par de nombreux domaines : automobile, bâtiment, électroménager, électronique, loisirs, aéronautique, mécanique ...
- Le collage est une technique générale, car on peut tout coller à priori, si nous ajustons correctement la surface à assembler.
- Le collage altère peu les substrats, car il n'implique que le traitement de surface du substrat (dans un sens, le décapage détériorera la surface, mais moins que le perçage).
- Grâce au transfert de charge continu, le collage permet d'obtenir une meilleure répartition des contraintes (fig. III.6), cela signifie une meilleure résistance aux chocs et aux vibrations.
- Le collage réduit le poids de la structure assemblée (par rapport à la structure boulonnée).
- Le collage peut également jouer un rôle d'étanchéité (mastic).
- Le collage permet d'obtenir des structures lisses (avantage aérodynamique).
- Bon design du point de vue esthétique.
- Le collage permet d'assembler entre eux des matériaux différents sans précaution particulière (corrosion).



**Figure III.6.** Photo élasticité du joint collé [111]

#### III.3.1.2. Inconvénients

- Difficulté à contrôler précisément l'épaisseur et la qualité du joint ;
- Impossibilité de démonter le joint ;
- Nécessité d'une bonne préparation des surfaces des substrats à coller ;

- Mauvaise résistance au pelage. Nécessité de travailler en cisaillement ;
- Sensibilité à l'humidité et à la température ;
- Durabilité limitée du joint collé ;
- Dégradation importante sous l'action de certains solvants ou agents d'oxydation ;
- Longueur éventuelle du cycle de polymérisation ;
- Complexité de la conception du joint et du choix d'un adhésif.

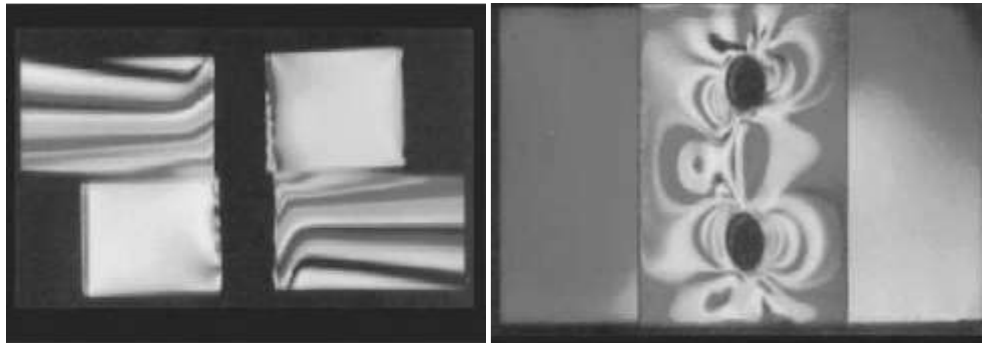
### III.3.2. Assemblage mécanique par rivetage

#### III.3.2.1. Avantages

- L'assemblage mécanique par rivetage est une technique d'assemblage rapide et précise ;
- Il est bien maîtrisé ;
- Il permet un contrôle facile et maîtrisé des structures assemblées ;
- Il permet d'assembler tous types de matériaux ;
- L'assemblage mécanique peut réaliser un transfert de charge élevée, adapté aux substrats épais ;
- Il fournit des composants avec une bonne conductivité électrique.

#### III.3.2.2. Inconvénients

- L'assemblage mécanique altère les substrats, du fait du perçage. Il y a concentration de contraintes au niveau du trou, ce qui augmente les risques de fissures (fig. III.7) ;
- Ce n'est que lorsque la taille de la fissure dépasse la tête de la vis que ces fissures peuvent être identifiées ;
- Il ne permet pas d'obtenir des joints étanches, il est donc nécessaire d'ajouter par exemple du mastic ;
- Utilise uniquement des composants spéciaux (tels que des vis à tête fraisée) pour obtenir une surface lisse.



Vue de coté

Vue de dessus

**Figure III.7.** Photoélasticité d'une liaison boulonnée [111]

### III.4 Généralités sur les caractéristiques et le comportement de la colle

Un adhésif est généralement composé de résines synthétiques polymères ou de résines d'origine naturelle et de produits inorganiques. A ces composants de base sont ajoutés des additifs et modificateurs qui gouvernent les caractéristiques chimiques et physiques du produit ou encore permettent d'agir sur les conditions de mise en œuvre. Une distinction est généralement faite entre les adhésifs "dits" structuraux et non structuraux. Cette différence est encore très subjective, principalement liée à la zone d'application de l'adhésif. Les adhésifs structuraux ont une résistance mécanique et une rigidité plus élevée que les adhésifs non structuraux. On peut également classer les adhésifs selon leurs natures, thermodurcissable ou thermoplastique, par leur rigidité, et par leur état avant durcissement ou encore leur conditionnement et moyen de mise en œuvre.

Les applications dites non structurales sont celles qui nécessitent une faible résistance mécanique ou qui ne sont que temporairement fixées (réversibles).

#### III.4.1. Polymères

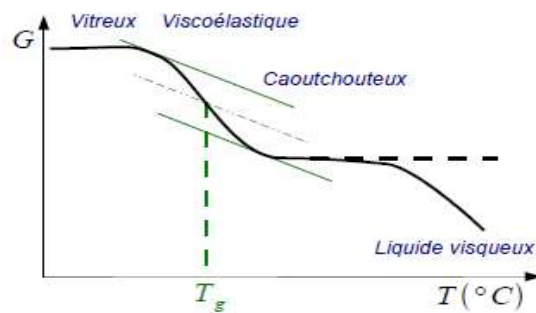
Le mot polymère vient du grec « polus » plusieurs, et « meros » parties. Les polymères sont de longues chaînes de molécules reliées entre elles, appelées monomères. Les polymères sont principalement divisés en trois catégories : thermoplastiques, plastiques thermodurcissables et élastomères. Les principales propriétés de ces polymères ont été synthétisées dans Le tableau III.2. A température ambiante, les polymères thermodurcissables et les thermoplastiques ont un comportement vitreux. Sous l'effet de l'augmentation de température, ils deviennent caoutchouteux. La phase de transition entre ces deux états est caractérisée par la température de transition vitreuse, notée  $T_g$ , comme le montre la figure III.8. Cette température est de l'ordre de la température de polymérisation [112].

| Classes de polymère | Souplesse | Résistance | Résistance | Résistance aux |
|---------------------|-----------|------------|------------|----------------|
|---------------------|-----------|------------|------------|----------------|

|                   |            | Mécanique | Thermique | Agents chimiques |
|-------------------|------------|-----------|-----------|------------------|
| Thermodurcissable | Mauvaise   | Bonne     | Bonne     | Bonne            |
| Thermoplastiques  | Moyenne    | Médiocre  | Médiocre  | Bonne            |
| Elastomères       | Très bonne | Mauvaise  | Variable  | Médiocre         |

**Tableau III.2.** La tenue mécanique des polymères.[113]

La figure III.8 montre les différents états d'un polymère caractérisés par leur module de cisaillement en fonction de la température. Le polymère réticulé ne devient pas liquide et reste caoutchouteux jusqu'à ce qu'il se décompose (droite en pointillés) [112]. Le niveau du plateau caoutchouteux diminue à mesure que la nature amorphe du polymère augmente.



**Figure III.8.** Les différents états d'un polymère [112].

#### III.4.2. Adhésifs structuraux

Les adhésifs structuraux ont une résistance mécanique élevée, et certains spécialistes les définissent arbitrairement sous le seuil de 7 MPa [114] en cisaillement. Jusqu'à présent, le collage structural est toujours une méthode d'assemblage non détachable. Il doit donc assurer une durée de vie équivalente à celle de la structure où il est employé.

Dans des conditions de vieillissement "modérées", les performances de l'adhésif structural ne doivent pas changer de manière significative. Les adhésifs structuraux sont généralement formulés avec des résines thermodurcissables, qui nécessitent des réactions de réticulation en ajoutant des agents de durcissement et / ou un chauffage. Les résines utilisées dans les adhésifs structuraux sont généralement classées comme thermodurcissables ou hybrides modifiées. Certains élastomères thermodurcissables à haute résistance, tel que le polyuréthane, peuvent également être classés comme adhésifs structuraux.

### III.4.2.1. Adhésifs époxydes (Adhésifs structuraux)

Les adhésifs époxy ont été mis sur le marché en 1946 et sont utilisés dans de nombreux domaines, de la médecine (dentaires, prothèses orthopédiques) au génie civil et aux transports (industries aérospatiale et automobile [115-118]). Comme nous le savons tous, ils ont une variété d'utilisations car ils adhèrent bien à de nombreux substrats et peuvent être facilement modifiés pour fournir une large gamme de propriétés. Cette modification prend généralement l'une des formes suivantes :

- Addition simple de charges organiques ou inorganiques
- Mélange de résines de propriétés différentes
- Choix d'un agent de durcissement et/ou d'un mécanisme de réaction spécifique.

Parmi les ingrédients secondaires qui composent les adhésifs époxy, on utilise des diluants réactifs pour ajuster la viscosité des charges minérales qui peuvent ajuster la viscosité ou changer le coefficient de dilatation thermique et des charges fibreuses qui peuvent améliorer la cohésion. Les résines époxy sont souvent mélangées à d'autres résines pour améliorer certaines propriétés requises par l'application. Généralement, ces changements prennent la forme d'ajout d'élastomères pour augmenter la dureté ou la résistance au pelage.

La résine époxy réticulée a une structure moléculaire thermodurcissable. Ils ont une excellente résistance à la traction et au cisaillement, mais la résistance au pelage est faible lorsqu'ils restent inchangés. Ils offrent une excellente résistance aux agressions chimiques liées à la présence de solvants de différentes natures, d'huiles ou d'humidité. Ils présentent peu de retrait lors de la réticulation et offrent une bonne tenue mécanique au fluage. Enfin, les résines époxy sont peu volatiles pendant la réticulation. En effet, les adhésifs époxy mono composant ont une meilleure résistance mécanique et résistance à la fatigue. La résistance mécanique n'est généralement pas affectée par des températures inférieures à 80°C. Il existe cependant des colles époxydes permettant des températures en service de 150 °C. Les propriétés de ces adhésifs peuvent être modifiées en ajoutant d'autres résines ou caoutchoucs (nylon, polyamide, polysulfure, silicone, etc.).

Généralement, une température de polymérisation élevée entraîne une densité de réticulation élevée, ce qui augmente la résistance au cisaillement et augmente la température de transition vitreuse. En contrepartie, la ténacité et la résistance au pelage diminuent généralement [119].

Les adhésifs à base de résine époxy sont principalement vendus sous deux formes :

- Adhésif mono-composant (durcisseur et base sont dans le même composant). Ils commencent la polymérisation thermique à partir de 120 ° C.

- Adhésif à deux composants (agent de durcissement et substrat sont fournis séparément). Ils peuvent polymériser à basse température à 5 ° C.

Les propriétés mécaniques de ces colles sont résumées dans le tableau III.3.

La résistance au cisaillement de l'adhésif est un paramètre important pour le transfert de force dans le joint adhésif. Cependant, une distinction doit être faite entre la résistance de l'adhésif et la résistance du joint collé. En effet, au niveau de la zone de transition entre la colle et chacun des substrats se créent des interactions et des liaisons chimiques. Cette zone est appelée zone d'interphase, et sa composition est différente de celle de l'adhésif ou du substrat, et ajuste les performances du joint collé, en particulier sa résistance [120].

| Propriété                   | Min-Max                                     | Moyenne                                     | Echantillons |
|-----------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------|
| Module d'Young              | 1.00-6.55 GPa                               | 4.75 GPa                                    | 23           |
| Résistance au cisaillement  | 2.24-41.7 MPa                               | 16.7 MPa                                    | 121          |
| Résistance à la traction    | 13.8-69.6 MPa                               | 36.0 MPa                                    | 61           |
| Résistance à la compression | 16.0 -159 MPa                               | 79.3 MPa                                    | 38           |
| Résistance au pelage        | 0.175-12.3 kNm <sup>-1</sup>                | 4.11 kNm <sup>-1</sup>                      | 12           |
| Déformation à rupture       | 1.20-20%                                    | 3.93%                                       | 43           |
| Dilatation thermique        | 4.50 -150 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> | 4.50 -150 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> | 77           |

**Tableau III.3.** Propriétés mécaniques des colles époxydes [120].

La dernière colonne précise le nombre d'échantillons utilisés pour déterminer les valeurs minimales, maximales et moyennes.

### III.4.2.1.1. Comportement des colles époxydes

Des études ont montré que les propriétés des colles époxydes sont viscoélastiques. Cette performance viscoélastique dépend également de la température à laquelle la contrainte est appliquée. En effet, lorsque la température augmente, la rigidité de la colle diminue.

Ensuite, de nombreux modèles rhéologiques peuvent modéliser quantitativement le comportement viscoélastique linéaire observé. Ils sont obtenus en combinant les éléments ressort et amortisseur de différentes manières. La figure III.9 montre quelques modèles courants.

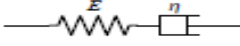
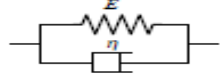
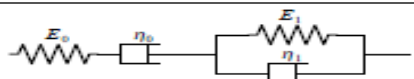
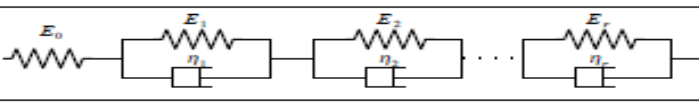
Par conséquent, une description quantitative des phénomènes viscoélastiques observés sur les matériaux polymères obéissant au principe de superposition de Boltzmann peut donc être obtenue en combinant judicieusement ces éléments, par exemple en considérant un nombre approprié de branche

en parallèle pour le modèle de Maxwell généralisé ou d'éléments en série pour le modèle de Kelvin généralisé.

Cependant, des études sur les performances des adhésifs époxy ont montré que la non-linéarité des paramètres rhéologiques est en fonction du niveau de charge appliquée, le principe de superposition de Boltzmann ne convient plus au-delà d'un certain niveau de chargement. Cet effet est particulièrement visible lorsque le matériau est soumis à une charge cyclique.

Une recherche bibliographique sur ce sujet montre qu'il manque en effet une méthode de calcul fiable bien reconnue et acceptée pour analyser les effets du temps, de la température, du niveau de charge, de l'humidité et du vieillissement sur la déformation de ces matériaux. Il existe de nombreux types de colles vendues sur le marché, et les conditions d'utilisation sont particulières, ce qui explique pourquoi cette méthode n'a pas été développée.

Des modèles partiels existent toutefois pour des conditions spécifiques d'utilisation et sous certaines hypothèses. Ils sont représentés sur la figure III.9.

| Dénomination       | Schématisation                                                                       |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Hooke              |   |
| Newton             |   |
| Maxwell            |  |
| Kelvin             |  |
| Zener              |  |
| Poynting-Thomson   |  |
| Burgers            |  |
| Kelvin généralisé  |  |
| Maxwell généralisé |  |

**Figure III.9.** Les modèles rhéologiques courants [122].



#### III.4.2.1.2. L'adhésif Redux 312

La Redux 312 est une colle therm durcissable (adhésif époxyde structurel) utilisée pour assembler des métaux et des matériaux composites. Elle présente de bonnes propriétés mécaniques jusqu'à 100 °C [121]. La procédure de mise en œuvre est montrée sur la figure III.10.

L'assemblage est chauffé à 120 °C pendant une heure sous une pression de 0.3 MPa. Les vitesses d'augmentation et de diminution de la température sont contrôlées et fixées entre 2°C/min et 4 °C/min. Le tableau III.4 présente les propriétés de la Redux 312, obtenues auprès du fournisseur Hexcel. Peu d'informations sont disponibles sur l'évolution de sa rigidité en fonction du temps ou de la température.

| Propriété                  | Température du test | Valeurs |
|----------------------------|---------------------|---------|
| Résistance au cisaillement | 22°C                | 42 MPa  |
|                            | 70°C                | 38 MPa  |
|                            | 80°C                | 35 MPa  |
|                            | 100°C               | 17 MPa  |
| Résistance à la traction   | 22°C                | 7.0 MPa |

Tableau III.4. Propriétés mécaniques de la Redux.[121].

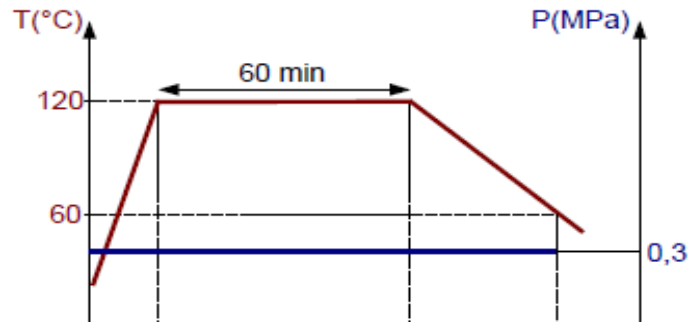


Figure III.10. Cycle de mise en œuvre de la Redux 312 [122]

#### III.4.3. Adhésifs Non-structuraux

Les adhésifs dits non structuraux sont généralement à base d'élastomères et / ou de thermoplastiques. Ces systèmes ont une faible résistance, mais offrent à leur tour une grande rapidité et facilité de mise en œuvre, ils apparaissent donc dans de nombreuses applications domestiques sous la forme d'adhésifs auto-adhésifs (autocollants), de produits d'étanchéité (mastic), de thermo-fusibles ou d'émulsions thermoplastiques.

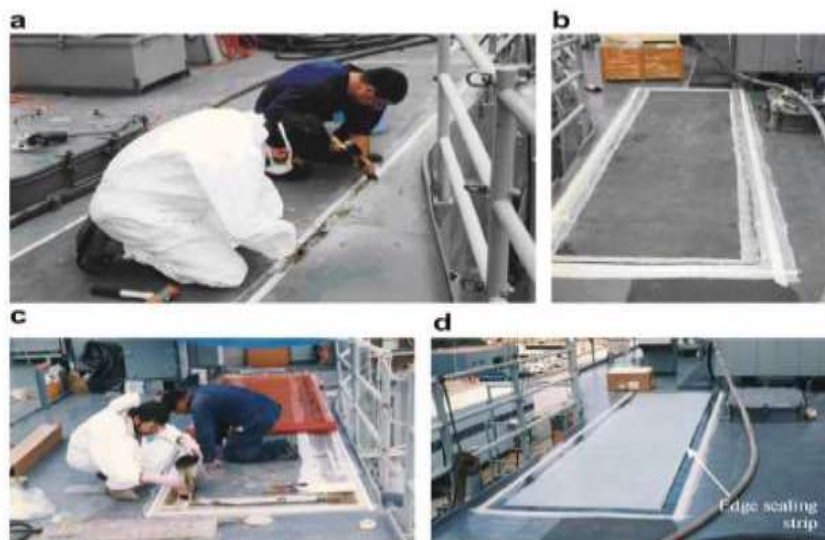
Ils représentent une part importante du marché des adhésifs en termes de quantité et de volume de vente. De même, dans le domaine de l'aviation qui nous concerne, les adhésifs non structuraux jouent

également un rôle important dans les applications de revêtement de cabine d'avion civil par exemple ou pour assurer la fonction non structurale de fixation ou d'étanchéité temporaire.

### III.5. Réparation par patch composites

Dans la plupart des études, l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement de croissance des fissures a été soigneusement étudiée en aéronautique. Par exemple, le type de patch, la taille du patch composite, le nombre de plis, l'asymétrie de la structure de réparation, la tension du composant avant le collage du patch composite, la plasticité, le collage imparfait du patch composite ou des contraintes résiduelles ont été examinées dans la littérature récente [48, 53] et [123-127]. L'objectif de ces travaux est plutôt de réduire la propagation de fissure existante. Donc, c'est ce que nous voudrions faire.

Les patchs composés sont largement utilisés, non seulement dans le domaine aéronautique mais aussi dans le domaine naval, véhicule de sport bicycle, ski, etc, pour réparer les structures endommagées par la fatigue. Ces patchs peuvent retarder la propagation des fissures, prolongeant ainsi la durée de vie de la structure ainsi réparée. I. Grabovac et D. Whittaker ont réalisé des applications de patchs composites pour la réparation des grands bateaux métalliques (Fig. III.11) [128]. Grâce à leurs travaux dans l'équipe Honda Racing F1, G. Savage et M. Oxley ont exprimé leurs moyens de réparations pour des structures composites : insertion, injection de résine, patchs composites (fig. III.12), etc. Ils ont donné pas mal de conseils sur la conception de réparation et les considérations pratiques [129].



**Figure III.11.** Réparation des bordages en aluminium par patchs composites [128]



**Figure III.12.** Réparation d'un châssis du véhicule F1 par patchs composites [128]

En outre, des patchs composites sont appliqués également dans l'ingénierie civile. Yao et al [168] ont procédé à une étude expérimentale pour vérifier la performance de collage entre patchs composites et bétons (simple recouvrement et double recouvrement) sous la traction.

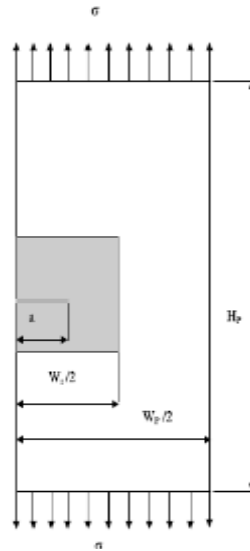
Dans notre étude, nous ne nous concentrons que sur le comportement de la réparation des structures aéronautique Al-2024-T3 par collage des patchs composites durs.

### **III.5.1. Types de patch utilisé dans la réparation des structures métalliques**

Selon l'état du matériau, les patchs de réparation en composite peuvent également être classés en deux types : patchs durs et patchs mous. Les patchs « dits » durs sont solidifiés avant leur mise en place. Les patchs « dits » mous sont appliqués à l'état non solidifiés. Leur solidification est réalisée après leur mise en place sur la structure. Dans notre étude, nous ne nous concentrons que, sur l'effet du premier type de patch (patchs durs).

### **III.5.2. Effet de la réparation par patch dur**

Certaines études numériques ont été menées pour analyser le comportement de la structure réparée par patch composé. Ces patchs sont appliqués sur la zone endommagée pour stabiliser les fissures existantes. Beaucoup de travaux ont été fait sur ce sujet [2, 24,130]. La figure III.13, montre une structure fissurée et réparée par un patch composite. Le but de cet exemple est d'étudier l'influence de la taille du patch composite sur la propagation de la fissure.

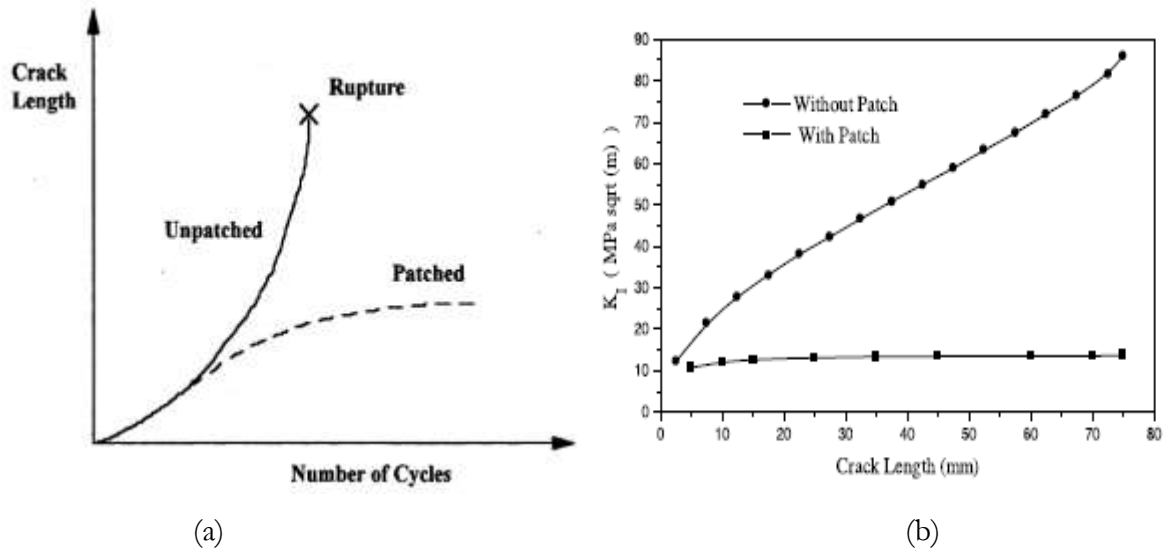


**Figure III.13.** Modèle d'une structure fissurée et réparée par patch.[24]

Le but du patch composé est d'améliorer la rigidité de la structure et de retarder la propagation des fissures autrement dit le patch composé a pour but d'absorber la contrainte fortement localisée en pointes de fissure. La figure III.14 (b) montre la relation entre le facteur d'intensité  $K_I$  et la longueur de fissure de l'échantillon sans patch puis avec patch et la figure III.14 (a) montre la comparaison en fatigue entre une structure fissurée et une structure fissurée et réparée.

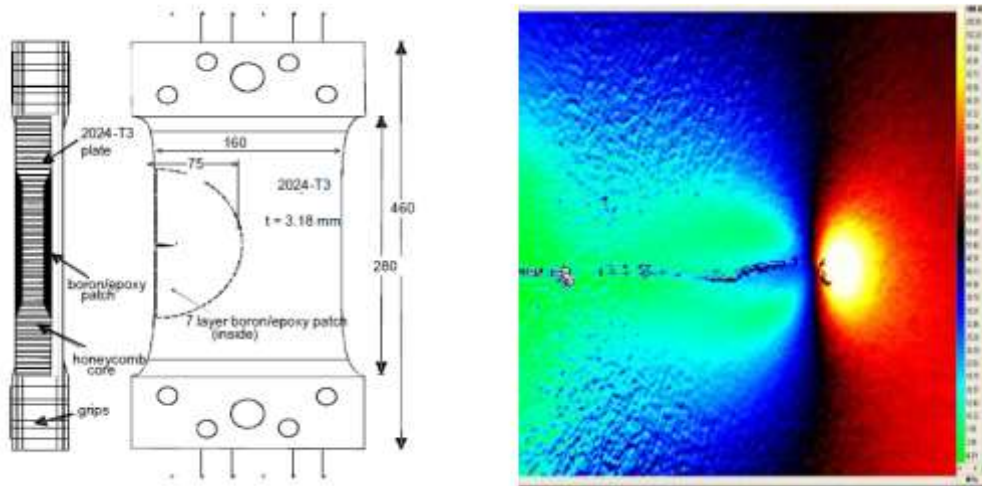
Ces résultats montrent, que comparativement à une structure non réparée, la présence de patch composite a conduit à une nette réduction du facteur d'intensité de contrainte  $K_I$ , ce qui entraîne une amélioration de la durée de vie de la structure endommagée.

Afin de valider ou non des modèles théoriques ou numériques, plusieurs études expérimentales sur la réparation par patches composites ont été menées. La figure III.15 représente par exemple un essai classique tiré de la littérature [131]. Cet essai consiste à analyser le comportement en fatigue d'une structure fissurée puis réparée par patch composite.



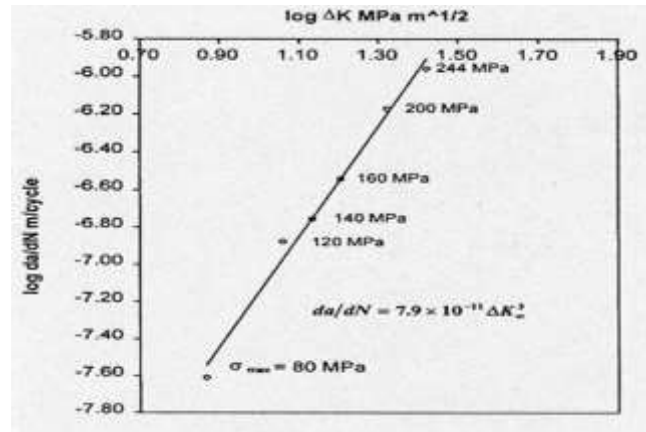
**Figure III.14.** Effet du patch :

- (a) Effet du patch sur la durée de vie d'une structure fissurée.[122]
- (b) Effet du patch sur l'évolution de facteur  $K_I$  on pointe de fissure.[24]



**Figure III.15.** Géométrie de l'éprouvette et champ de contrainte autour de la fissure.[137]

La figure III.16 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 cycle  $dN$  en fonction du logarithme de facteur d'intensité  $K$

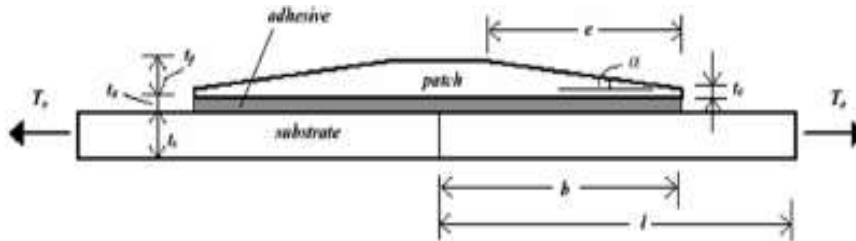


**Figure III.16.** Résultats d'un essai de fatigue sur un éprouvette fissurée et renforcée par un patch composite.[131]

Ces résultats montrent la linéarité du phénomène, et permet ainsi de calculer le coefficient de proportionnalité qui existe dans le cas d'une structure renforcée.

### III.5.3. Optimisation de la forme du Patch

Certaines recherches ont été menées sur la forme du bord libre du patch pour limiter la valeur maximale de la contrainte de cisaillement dans l'adhésif. Le but de ces recherches est d'évaluer l'effet de la forme du bord libre du patch composite sur la réduction de ces pics de cette contrainte. A titre d'exemple, Xiong et Raizenne [42] ont montré qu'un patch d'épaisseur réduite (épaisseur dégressive) peut réduire la contrainte dans la colle, car sa singularité géométrique n'est pas si évidente (moins marquée) (fig. III.17). 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 [53]. La figure III.18 présente ainsi plusieurs formes de patches étudiées. Ce travail a montré que la forme étoile conduit à une réparation plus efficace en termes de réduction du facteur d'intensité de contrainte.



**Figure III.17.** Patch composite avec une épaisseur dégressive.[42]

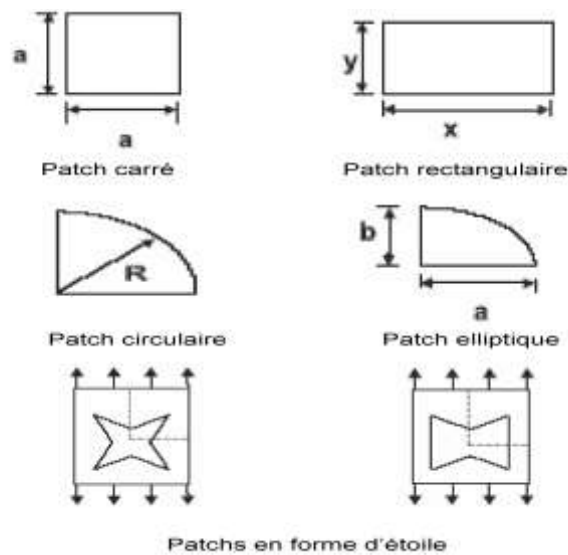


Figure III.18. Diverses formes de patches composites.[53]

#### III.5.4. Quelques exemples d'application de la réparation par patch

Dès les années 1970, la Royal Australien Air Force a commencé à utiliser des patches composites pour entretenir certains appareils vieillissants. Le laboratoire de recherche aéronautique et marine (AMRL) a utilisé avec succès des matériaux renforcés de fibres de bore pour faire face aux problèmes de corrosion et de fatigue. Le tableau III.5 résume les principaux travaux effectués.

| Avion    | Type de dommage | 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 10500 heures simulée depuis 1975 |
| F 111    | Corrosion       | En service depuis 1980                   |

Tableau III.5.Exemples de réparations effectuées par patches par la RAAF [122].

Ensuite, l'utilisation de patches composites est devenue une opération classique en Australie pour réparer les zones endommagées des structures des avions. Les figures (III.19-20 et 21) présentent quelques exemples de réparations effectuées sur ces structures. Sur la figure III.19, l'avion représenté est le F111. La particularité de la réparation est que les panneaux endommagés sont complètement remplacés par des pièces composites carbone / époxy.



Dans l'exemple de la figure III.20, des fissures dues à la fatigue de la structure sont apparues près d'un accès au réservoir. La zone endommagée est réparée par un patch en composite. Le dernier exemple, présenté sur la figure III.21, est un avion Hercules dont l'intérieur de l'aile présente une importante corrosion. La procédure classique de réparation dans ce cas consistait jusqu'alors à riveter des plaques d'aluminium sur la partie endommagée et nécessitait six jours de travail pour un ouvrier. L'utilisation de patches composites a réduit à une journée le temps de travail nécessaire pour la réparation [122]. Ce qui est un enjeu économique considérable.

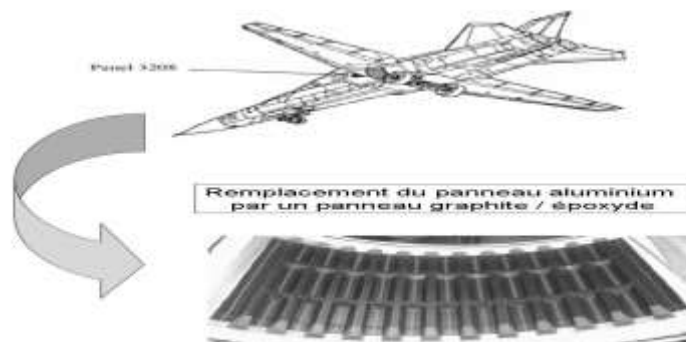


Figure III.19. Réparation exécutée sur un F 111.[132].

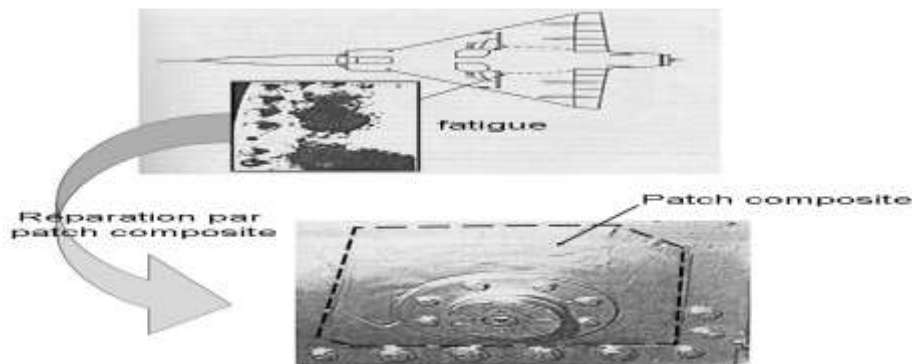


Figure III.20. Réparation exécutée sur un Mirage.[132]

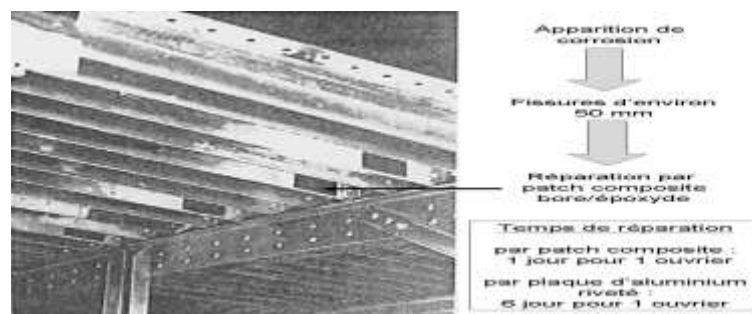


Figure III.21. Réparation exécutée sur un Hercules.[132]

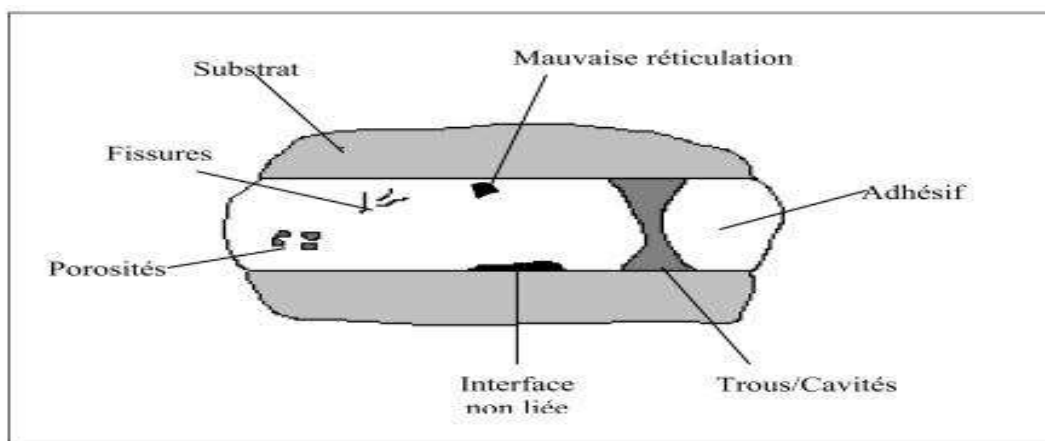


### III.6. Défauts des assemblages collés et les méthodes d'amélioration de cette technique

#### III.6.1. Défauts et modes de rupture d'un assemblage collé

Lors de la réalisation d'un assemblage collé, de nombreux types de défauts sont susceptibles de se produire (fig. III.22). Ces défauts sont clairement les sites prioritaires de l'amorçage et de la propagation des fissures qui engendrent la rupture finale de l'assemblage. Les défauts qu'on peut rencontrer dans les assemblages collés sont :

- La porosité due aux bulles d'air ou de gaz emprisonnées lors de la polymérisation et la mise en œuvre,
- Les cavités dues à des applications médiocres de l'adhésif ou aux dégagements gazeux durant la polymérisation,
- Le phénomène de fatigue,
- Le fluage et les contraintes résiduelles provoquant des microfissures,
- Les imperfections de mise en œuvre comme la mauvaise consistance ou préparation de l'adhésif ou un temps de polymérisation non contrôlé résultant des zones de faibles polymérisations
- Un mauvais traitement de surface du substrat ou la présence de contraintes lors du collage pouvant aussi créer des zones de décollement.

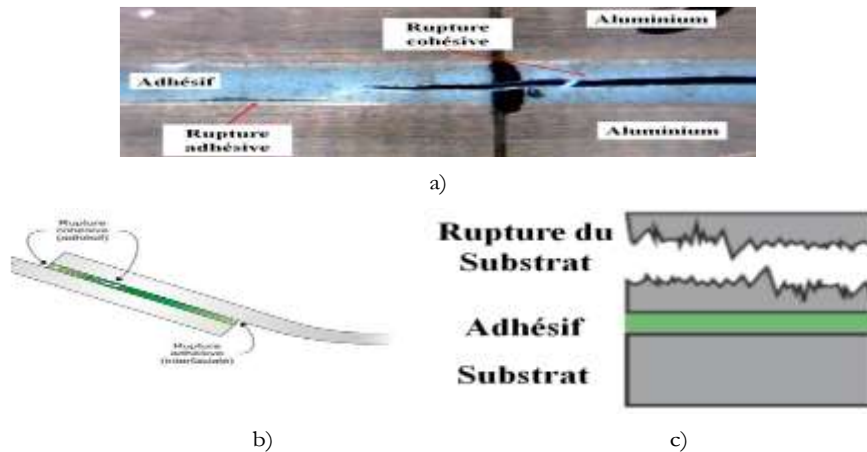


**Figure III.22.** Défauts typiques d'un assemblage collé [133]

Le type de surface de rupture du joint collé est un facteur important dans l'analyse car il peut nous indiquer la partie la plus faible de la structure et permettre au concepteur d'optimiser la conception. Nous considérons généralement les quatre principaux modes de rupture des joints collés (fig.III.23):

- La rupture cohésive, qui correspond à la rupture qui se produit dans la colle, est donc liée à ses caractéristiques.

- La rupture adhésive, qui correspond à la rupture qui se produit au niveau de l'interface colle/substrat.
- La rupture mixte qui combine les deux ruptures cohésive et adhésive.
- La rupture cohésive dans le substrat.



**Figure III.23.** Types de rupture pour un joint collé, b) rupture adhésive et cohésive, (c) rupture du substrat [98].

#### III.6.2. Techniques d'amélioration des assemblages collées

De nombreuses études ont montré que le traitement de surface présente des avantages dans la résistance mécanique des joints collés [134-135], le but des traitements est multiple, il s'agit de :

- Dégraisser la surface du substrat ;
- Eliminer les couches de contamination en surface qui sont faiblement adhérentes ;
- Modifier la composition chimique de la surface pour former une couche hautement réactive chimiquement ;
- Modifier la morphologie de la surface en augmentant la rugosité.

Ces études indiquent que le traitement de surface est essentiel pour obtenir une bonne résistance mécanique. Les principales catégories de traitements de surface les plus couramment utilisées sont :

- L'ablation mécanique telle que le sablage ;
- Les traitements chimiques et/ou électrochimiques ;
- Les dépôts plasma ;
- L'utilisation de primaires d'adhérence.

Enfin, il existe un procédé appelé « traitement énergétique » utilisé pour les matières plastiques. Par conséquent, la fluoration, le traitement au plasma froid, le traitement à la flamme et le traitement au

laser contribuent à augmenter l'énergie de surface du polymère (les énergies superficielles) et à améliorer sa capacité de liaison.

Un assemblage collé est non seulement caractérisé par des couches de matériau solide, mais comprend également l'interface entre ces couches, comme le montre la figure III.24.

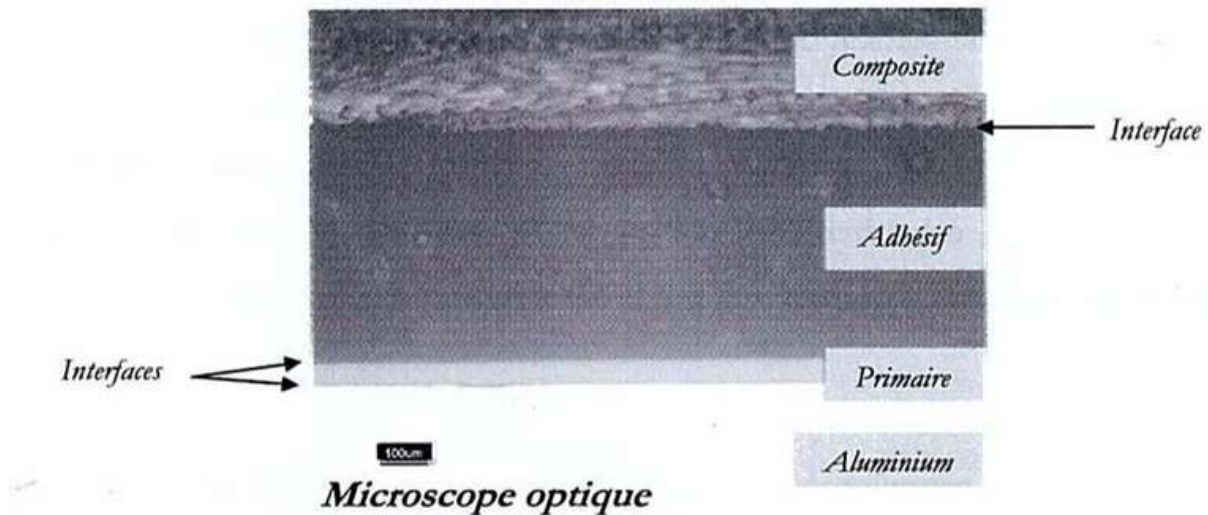


Figure III.24. Vue en coupe d'un assemblage structural. [107]

#### III.7. Avantages d'un patch en composite

Par rapport aux alliages métalliques, les avantages des matériaux composites pour la réparation comprennent [136] :

- Rigidité élevée permettant l'utilisation de patch de faible épaisseur (important pour des réparations externes) et permettant d'appliquer le renfort dans les directions désirées ;
- Déformation élevée à la rupture et durabilité sous des chargements cycliques permettant de réduire le risque de décollement du patch ;
- Faibles densités ;
- Excellente malléabilité (formabilité) permettant une fabrication moins coûteuse des patches de formes complexes ;
- Absence de traitement de surface pour les patches à base de matériaux composites.

Dans la plupart des réparations, l'utilisation de patch unidirectionnel est optimale puisque celui-ci fournit l'efficacité de renfort la plus élevée dans la direction de chargement, et minimise la rigidité inutile dans d'autres directions. Cependant, dans certains cas sous chargement bi-axial élevé et d'un changement de l'orientation probable de la fissure, il est indispensable de fournir le renfort transversal

et/ou de cisaillement. Ceci peut être réalisé en employant un stratifié avec un nombre approprié de plis de  $\pm 45^\circ$  et de  $90^\circ$ .

L'inconvénient principal d'employer des matériaux composites résulte de la différence des coefficients de dilatation thermique entre celle-ci et le métal. Les contraintes résiduelles sont de tensions dans le métal et de compressions dans le composite. Ces contraintes sont particulièrement nuisibles quand les températures de traitement des adhésifs sont élevées et les températures de fonctionnement sont très basses, en général de  $-10^\circ\text{C}$  à  $-50^\circ\text{C}$ . Par ailleurs, le chargement thermique cyclique de la région réparée engendre des contraintes provoquant la propagation de la fissure, indépendamment de la contrainte externe. Le renforcement et la réparation des structures métalliques par patch à base de composite peuvent être considérés comme une méthode rentable et souple. Les renforts ou les patches sont idéalement mis en application, évitant ainsi de recourir au démontage coûteux des structures d'avions [136].

## ***CHAPITRE IV***

# ***MODELISATION PAR LA MEF DES STRUCTURES DES AERONEFS ENDOMMAGEES PAR FISSURATION ET REPAREES PAR PATCH COMPOSITE***

## **Chapitre IV : Modélisation par la MEF des structures des avions endommagés par fissuration et réparés par patch composites**

### **IV.1. Présentation du logiciel de calcul utilisé**

Actuellement, les logiciels de calcul basés sur la méthode des éléments finis sont largement utilisés et les résultats numériques obtenus s'avèrent très satisfaisants si des modèles numériques sont correctement établis. A cet effet, les performances du logiciel Abaqus version 6.11 [138] sont utilisées dans ce travail pour analyser la réponse des plaques d'avions endommagés par fissuration et réparés par patch composites.

Toutes les applications destinées aux calculs par éléments finis nécessitent d'importantes connaissances dans le domaine des méthodes numériques, alors qu'Abaqus est conçu pour être utilisé partout sans qu'il y ait besoin de formation préalable sur les éléments finis. Grâce à son interface intuitive, il permet une prise en main très rapide du logiciel avec l'option d'automatisation de la reconnaissance des zones de contact et la génération du maillage.

Le programme Abaqus a de nombreuses capacités d'analyse par éléments finis, allant d'une simple étude statique linéaire à une autre étude statique complexe non linéaire. La documentation de ce code de calcul donne les procédures à suivre pour effectuer des analyses correctes des différents domaines de l'ingénierie. Le but ultime d'une analyse par éléments finis est de recréer mathématiquement le comportement d'un véritable système d'ingénierie. En d'autres termes, l'analyse doit être basée sur un modèle mathématique précis d'un prototype physique.

Le modèle numérique se compose des nœuds, des éléments, des propriétés des matériaux, de véritables constantes, des conditions aux limites, et d'autres caractéristiques utilisées pour représenter le système physique.

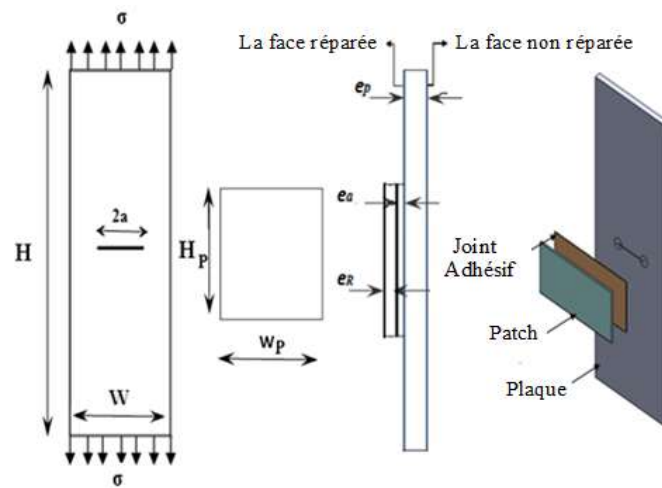
#### **IV.1.1. Modèle géométrique**

Comme mentionné précédemment, ce travail a pour objectif l'analyse du comportement mécanique en ruptures des structures des avions endommagés par fissuration et réparés par patch composites en vue d'améliorer leur durée de vie. Pour ce faire un patch composite est conjointement collé à l'aide d'un adhésif à la zone endommagée par fissuration d'une plaque en alliage d'aluminium 2024-T3.

La plaque, caractérisée par sa hauteur  $H = 250$  mm, sa largeur  $W = 125$  mm et son épaisseur, représente un élément d'une aile d'avion comportant une fissure rectiligne centrale de taille "2a" (fig.IV.1). Pour se mettre dans des conditions de fissuration, en mode d'ouverture (mode le plus dangereux), la plaque

est soumise à des efforts de tension uni-axiale perpendiculairement aux lèvres du défaut de fissuration (fig.IV.1). La partie endommagée par fissuration de la plaque a été réparée à l'aide d'un patch composite carbone/époxyde, défini par ses caractéristiques géométriques : hauteur  $H_p$ , sa largeur  $W_p$  et son épaisseur  $e_p$ . Il est supposé être parfaitement collé à la plaque par un adhésif de type FM-73, caractérisé par son épaisseur  $e_a$ . Pour la prise en considération des séquences d'empilements, les patches de réparation sont modélisés par des éléments composites et la couche adhésive avec la plaque est modélisée par un matériau isotrope homogène.

La modélisation globale est basée sur une approche élastique linéaire dont les constantes élastiques de la plaque, du patch et de l'adhésif sont illustrées dans le tableau IV.1.



**Figure IV.1 :** Modèle géométrique de la structure analysée.

**Tableau IV.1 :** Constantes élastiques de différents composants de la structure analysée.

|                | Plaque Al<br>(2024-T3) | Carbone / epoxy<br>Constants d'ingénieur | Adhésif de type<br>FM-73 |
|----------------|------------------------|------------------------------------------|--------------------------|
| $E_1$ (MPa)    | $72 \cdot 10^3$        | $153 \cdot 10^3$                         | $2.55 \cdot 10^3$        |
| $E_2$ (MPa)    | ----                   | $9,1 \cdot 10^3$                         | ----                     |
| $E_3$ (MPa)    | ----                   | $9,1 \cdot 10^3$                         | ----                     |
| $\nu_{12}$     | 0.33                   | 0.258                                    | 0.3                      |
| $\nu_{13}$     | ----                   | 0.258                                    | ----                     |
| $\nu_{23}$     | ----                   | 0.384                                    | ----                     |
| $G_{12}$ (MPa) | ----                   | $4,57 \cdot 10^3$                        | 420                      |
| $G_{13}$ (MPa) | ----                   | $4,57 \cdot 10^3$                        | ----                     |
| $G_{23}$ (MPa) | ----                   | $3,15 \cdot 10^3$                        | ----                     |

IV.1.2. Modèle numérique

Le modèle numérique tridimensionnel développé pour cette étude consiste en une plaque en aluminium Al 2024-T3 endommagée par fissuration et réparée par un patch composite de type carbone-époxyde. Un adhésif de type FM73 est interposé entre la zone fissurée et le patch.

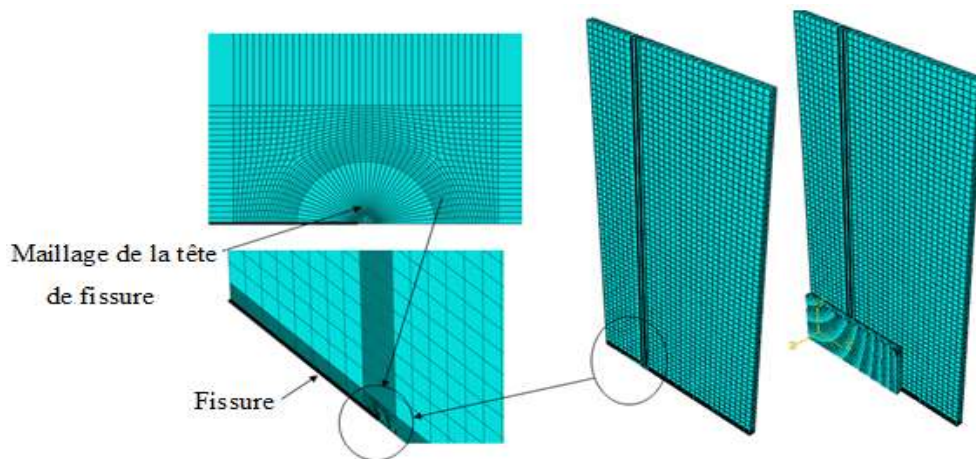
La modélisation par éléments finis nécessite le maillage des assemblages patch/adhésif/plaque fissurée à analyser. Le choix du type et de la taille d'éléments à utiliser, notamment en pointe de fissure, dépendent des paramètres fondamentaux pour bien maîtriser les forts gradients de contraintes et de déformations au voisinage des fronts de fissuration. La première étape consiste à choisir le type d'élément le plus adapté au problème donné. Pour notre modèle et conformément à la mécanique de la rupture, le milieu continu est discrétisé en un certain nombre d'éléments, la structure a été maillée globalement à l'aide des éléments du type C3D8, à savoir hexaédrique avec 8 nœuds. (An 8-node linear brick, fig. IV.2). Conformément à la suggestion Barsoum [79], Henshell et Shaw [80] et pour l'obtention d'une représentation correcte du champ de déplacements près des pointes de la fissure, des éléments dits singuliers ont été employés. La singularité de type  $1/\sqrt{r}$  pour les champs de contraintes a été obtenue en déplaçant tous les nœuds intermédiaires des éléments autour de la pointe de la fissure à un quart de distance de ceux appartenant au front de fissure considéré (voire chapitre II, fig.II.1). Le maillage du fond de fissure a été raffiné exclusivement à l'aide d'éléments spéciaux de type Barsoum (fig.IV.2). Le nombre total d'éléments de la structure réparée est étroitement lié à la forme géométrique du patch, pour une forme rectangulaire, le nombre total d'éléments est illustré dans le tableau IV.2. Ce dernier représente également la taille de côté d'un élément, loin et près de la fissure.

Afin d'éviter toute influence du maillage sur les résultats, la nature de ce maillage reste invariable tout le long de ce travail.

Tableau IV.2: Nombre et taille d'éléments dans le maillage

| Les différents composants de la structure analysée | Nombre d'éléments | Taille des éléments en mm |
|----------------------------------------------------|-------------------|---------------------------|
| Plaque aluminium 2024-T3                           | 11796             | 2                         |
| Front de fissure                                   | 2500              | 0.078                     |
| L'adhésif FM-73                                    | 3200              | 0.5                       |
| Patch composite                                    | 12800             | 0.5                       |





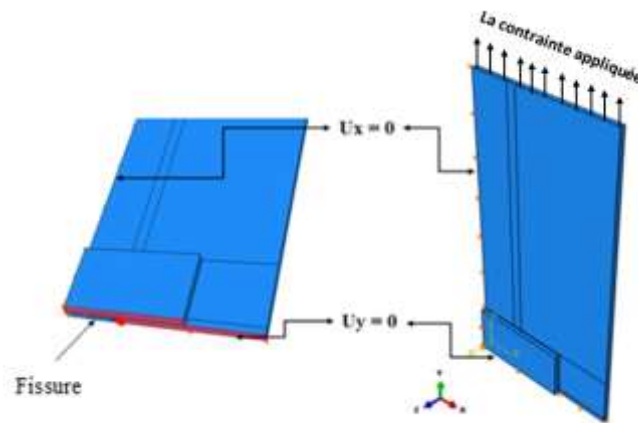
**Figure IV.2:** Maillage de la structure

Afin d'introduire les constantes élastiques de chaque composant de notre modèle, la couche adhésive, interposée entre le patch et la plaque, a été considérée comme étant un troisième matériau homogène à part entière. L'interaction entre la zone fissurée de la plaque et la colle d'une part, et entre la colle et le patch composite d'autre part, est de type (Tie). Les surfaces d'interaction sont considérées comme parfaitement collées (les deux protagonistes " patch-plaque" peuvent donc être considérés comme définitivement assemblés tout au long de la modélisation numérique).

La commande \* Stress intensity factor sur ABAQUS permet la détermination du facteur d'intensité de contrainte. Elle requiert en particulier la donnée des nœuds formant le front de la fissure et le nombre de contours sur lesquels l'évaluation du facteur d'intensité de contrainte  $K$  sera effectuée.

La haute symétrie de la structure analysée permet la modélisation du quart de la structure ce qui entraîne une diminution du temps de calcul, les conditions aux limites imposées au modèle numérique sont reproduites de la manière suivante (fig. IV.3) :

La section centrale est bloquée suivant la direction  $Y$ , une contrainte est imposée à l'extrémité de la plaque dans le sens de sa longueur (direction  $y$ ). Pour une meilleure simulation du fort gradient de contraintes, le maillage des zones locales, sources de concentration de contrainte, est particulièrement raffiné.



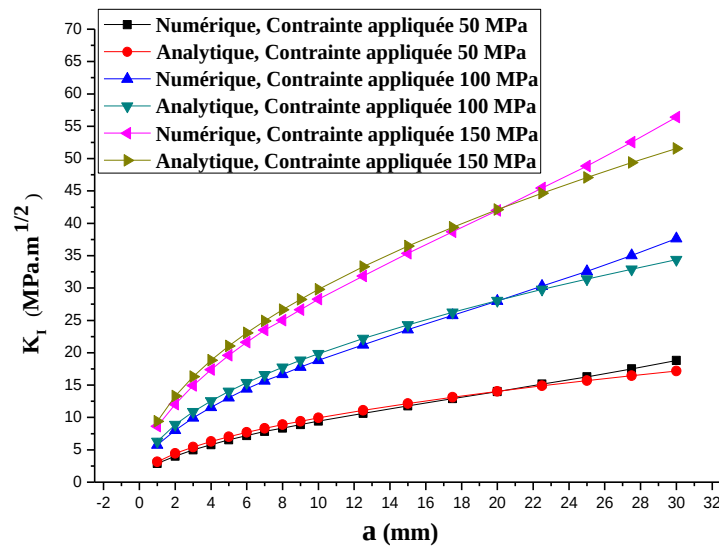
**Figure IV.3:** Conditions aux limites imposées à l'assemblage patch/adhésif/plaque

Pour valider la fiabilité des conditions aux limites, une étude préalable de convergence a été faite, cette étude a permis de déterminer un maillage adapté aux configurations fissurées et réparées par patch.

La figure IV.4, montre une analyse comparative de la variation du FIC obtenu à partir du modèle numérique développé dans cette étude, et de celui résultant d'un modèle analytique. Ce dernier est le seul paramètre significatif, qui permet de connaître l'état de contrainte et de déformation en toute pointe de fissure. Pour une fissure rectiligne centrale de taille "2a" initiée dans une plaque de dimensions finies et sollicitée en mode I, la relation entre la sollicitation lointaine normale à l'axe de fissure  $\sigma$  et le facteur d'intensité de contraintes  $K_I$  est donnée par la relation suivante :

$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \quad (IV.1)$$

L'analyse de cette figure montre que le modèle numérique et celui analytique conduisent pratiquement aux mêmes résultats et ce quelle que soit l'intensité des efforts de tension appliqués à la plaque. Ce comportement illustre clairement que le modèle développé dans cette étude et les conditions aux limites imposées à la structure fissurée sont fiables et permettent une meilleure analyse du comportement mécanique en rupture des structures endommagées par fissuration et réparées par patch composites.



**Figure IV.4 :** Variations du FIC en fonction de la taille de la fissure et de la contraintes appliquées

Toutes ces conditions de simulation seront maintenues tout au long de ce travail et permettront une modélisation fiable pour la prédiction de la performance de la réparation en termes de réduction du facteur d'intensité de contrainte, et des contraintes de cisaillements.

## IV.2. Résultats et discussion

Il est tout à fait clair que la fiabilité, la performance et la durabilité de la réparation des structures endommagées et réparées par patch composites dépendent non seulement des propriétés mécaniques et géométriques du patch, de la colle et de la structure réparée elle-même, mais également de la contrainte de cisaillement induite dans la couche adhésive lors de la mise en service.

Dans ce qui suit, nous analysons l'effet des paramètres mécaniques et géométriques de la réparation (plaque, patch et adhésif) sur l'efficacité de la réparation par patch composite en termes de réduction du facteur d'intensité de contraintes (FIC) en mode I et des contraintes de cisaillement dans la couche de l'adhésif.

Ce chapitre est structuré de la façon suivante :

- **Partie IV.2.1 :** Interaction patch-contraintes dans la plaque et dans la couche adhésive ;
- **Partie IV.2.2 :** Interaction adhésif-contraintes dans la plaque et dans la couche adhésive ;
- **Partie IV.2.3 :** Interaction plaque-contraintes dans la plaque et dans la couche adhésive.

### **IV.2.1 Interaction patch-contraintes dans la plaque et dans la couche adhésive**

La nucléation de fissures dans une structure métallique dans n'importe quel domaine, comme par exemple, les structures aéronautiques et maritimes, est une préoccupation majeure des opérateurs de maintenance pour l'amélioration de la durée de vie des structures des aéronefs. Becker [1] a mis au point une technique de réparation consistant à coller un patch composite à matrices polymères, généralement en époxy, sur la zone fissurée. Cette technique a démontré son efficacité à réduire la vitesse de propagation des fissures, à améliorer la tenue mécanique en traction et en fatigue des structures préalablement endommagées [2,3]. En plus de leur grande rigidité des patches et faible densité, ces matériaux offrent une bonne résistance à la corrosion.

La qualité de la réparation dépend de plusieurs paramètres géométriques et mécaniques du patch composite et de la couche adhésive. Ainsi, les formes des patches composites semblent constituer un élément déterminant de l'efficacité de la réparation. Ceci fut l'objectif de plusieurs projets de recherche. Bouchiba et al [55] ont développé une approche statique pour optimiser la forme du patch composite. Ils conclurent que la forme en papillon réduit l'énergie de rupture au front de la fissure et minimise les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive. M'hamdia et al [54], en procédant à la conception d'une nouvelle forme de patch, nommée patch double flèche, montrent que par rapport à la forme rectangulaire conventionnelle, cette forme donne lieu à une réparation plus performante et plus efficace en termes de réduction des contraintes de tension normales très concentrées en tête de fissure. Chung K.H et al [139- 140], Jeong Gi-Hyeon et al [141], en analysant l'efficacité de la géométrie des patches, d'un point de vue, mécanique de la rupture et de décollement du patch, ont poursuivi le développement d'une géométrie de patch composite conduisant à la réduction maximale du FIC. Ramji et Srilakshmi [142], en analysant la réparation par patch composite d'une structure sollicitée en mode mixte, ont montré que le FIC est insensible aux formes du patch. Dans une autre étude, Ramji et al [143], en étudiant l'effet des formes circulaire, carrée, rectangulaire, elliptique et octogonale du patch sur l'efficacité de la réparation de fissures en mode mixte, ont conclu que les formes rectangulaire et octogonale sont les plus performantes, en termes de réduction du FIC. Kashfuddoja et al [144] ont développé cette analyse en y ajoutant la forme ovale, ils ont étudié l'effet de ces formes sur la qualité de réparation en termes de réduction du facteur de concentration de contrainte "FCC" au voisinage d'une entaille circulaire localisée au centre d'une plaque réparée par un patch composite unidirectionnel et soumise à des efforts de tension. En comparant les valeurs de ces facteurs résultants de ces différentes formes, ces auteurs ont montré que le patch octogonal allongé perpendiculairement à la direction de traction, est la forme la plus efficace d'un point de vue réduction du FCC. Fekih et al [145],

en analysant l'effet des formes du patch sur la durabilité et la fiabilité, en matière de réduction de l'intégrale J, de la réparation, montrent que le patch en forme étoile est le plus fiable. Mahadesh Kumar et al [53] ont analysé les valeurs du facteur d'intensité de contrainte résultant de réparations utilisant quatre principales formes régulières de patches, carrée, rectangulaire, circulaire et elliptique. Ils montrent ainsi, d'un point de vue de réduction de ce paramètre de rupture (FIC), que la forme rectangulaire avec un allongement important dans la direction parallèle à la fissure est la plus efficace. En se basant sur ces constats, ces auteurs ont développé une forme nouvelle de patch nommée « skewed patch » ou en français « patch oblique ». Ils concluent que ce dernier conduit à un gain de masse de l'ordre de 28% pour pratiquement la même valeur du facteur d'intensité de contrainte ou bien il réduit cette valeur de 10% pour le même volume du patch. Mohamed Ibrahim et al [47] ont analysé l'effet de l'interaction entre deux fissures réparées par un patch rectangulaire. Cette analyse est effectuée en termes de réduction du facteur d'intensité de contrainte en mode I. Ils montrent que la réparation réduit fortement l'effet d'interaction, en termes de forte réduction du FIC, et empêche la coalescence de fissures extrêmement proche l'une de l'autre.

Cette partie de travail s'intègre dans ce contexte et vise à analyser l'effet des paramètres géométriques et mécaniques du patch composite sur l'efficacité et la performance de la réparation, en termes de réduction du facteur d'intensité de contrainte en têtes de fissures et de toutes les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive.

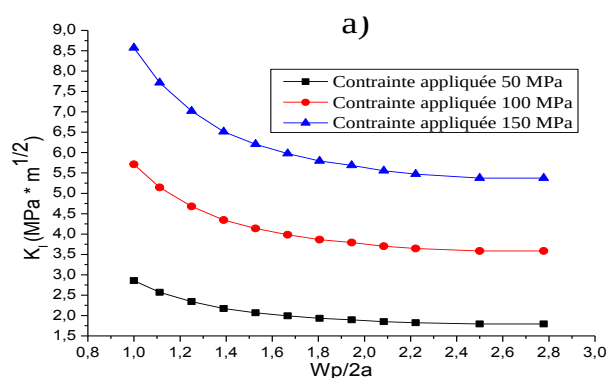
### IV.2.1.1. Interaction dimensions du patch-contraintes plaque et dans l'adhésif

La réparation de la zone fissurée est effectuée à l'aide d'un patch composite carbone-époxy, de forme rectangulaire caractérisé par sa hauteur  $H_p$ , sa largeur  $W_p$  et l'épaisseur  $E_p=2\text{mm}$  (fig. IV.1). La jonction entre ces deux matériaux Plaque-Patch est assurée à l'aide d'un adhésif de type FM73 d'épaisseur égale 0.2 mm. Ce dernier a été très souvent utilisé dans beaucoup de travaux dans le cas de la technique de réparation par patch composite.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'effet individuel et simultané de ces deux paramètres géométriques (hauteur  $H_p$  et largeur  $W_p$ ) sur la qualité de la réparation en termes de réduction du FIC en pointes de fissure et des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive. La figure IV.5 montre clairement que le FIC décroît quand la réparation est effectuée à l'aide du patch plus large, quelle que soit l'intensité des efforts de tension, la réparation devient de plus en plus efficace et performante. Ce comportement a été observé par Ouinas et al [146], Oudad et al [147], Mahadesh Kumar et al. [53], et confirmé par Ramji et al. [148] ainsi que par Kashfuddoja et al. [144] qui ont démontré l'efficacité de

concevoir un patch allongé dans la direction perpendiculaire au chargement. La réduction des contraintes locales normales en pointes de fissures n'est pas une condition suffisante pour analyser l'efficacité de la réparation, elle doit être complétée par la prise en charge des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive. L'effet de la largeur du patch sur le niveau des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive est illustré dans la figure IV.6. Cette dernière montre que les patches larges réduisent les contraintes tangentielles maximales dans l'adhésif, relativement aux trois plans de la structure XOY, XOZ et YOZ (fig.IV.6a, b, c) respectivement.

En termes de réduction simultanée des contraintes normales en pointes de fissures et des contraintes de cisaillement dans l'adhésif, la réparation, utilisant des patches rectangulaires allongés dans la direction perpendiculaire au chargement, est plus efficace et plus fiable. Cette efficacité est étroitement liée à l'optimisation de la hauteur de ce patch, notée  $H_p$  (fig. IV.7et IV.8). Il est clair dans ces résultats, que les patches composites plus hauts conduisent à une nette diminution du FIC en mode I (figure IV.7). Pour des hauteurs plus importantes, ce paramètre géométrique semble ne jouer aucun rôle important sur l'amélioration de la durée de vie de la réparation en termes de réduction du FIC (figure IV.7). En effet, il existe une valeur seuil au-delà de laquelle ce paramètre de rupture ne varie plus avec l'accroissement de la hauteur du patch, comme le montre la figure IV.7. Concernant les contraintes de cisaillement, une réparation à l'aide de patches hauts minimise les contraintes de cisaillement propres aux plans XOY et XOZ de la structure (figures IV.8a et IV.8b) et favorise ces mêmes contraintes dans le plan YOZ (figure IV.8c). Ces dernières sont essentiellement dues aux déplacements importants dans la direction des efforts de tension. Ces contraintes croissent en intensité puis se stabilisent à partir d'une certaine hauteur du patch. Les résultats obtenus sur les figures (IV.5 et IV.7) montrent plus clairement, la possibilité de déterminer une hauteur optimale d'un patch rectangulaire. Néanmoins, cette dernière est étroitement liée à sa largeur.



**Figure IV.5 :** Effet de la largeur du patch et de la contrainte appliquée sur le FIC en tête de fissure réparée,  $a=18\text{mm}$

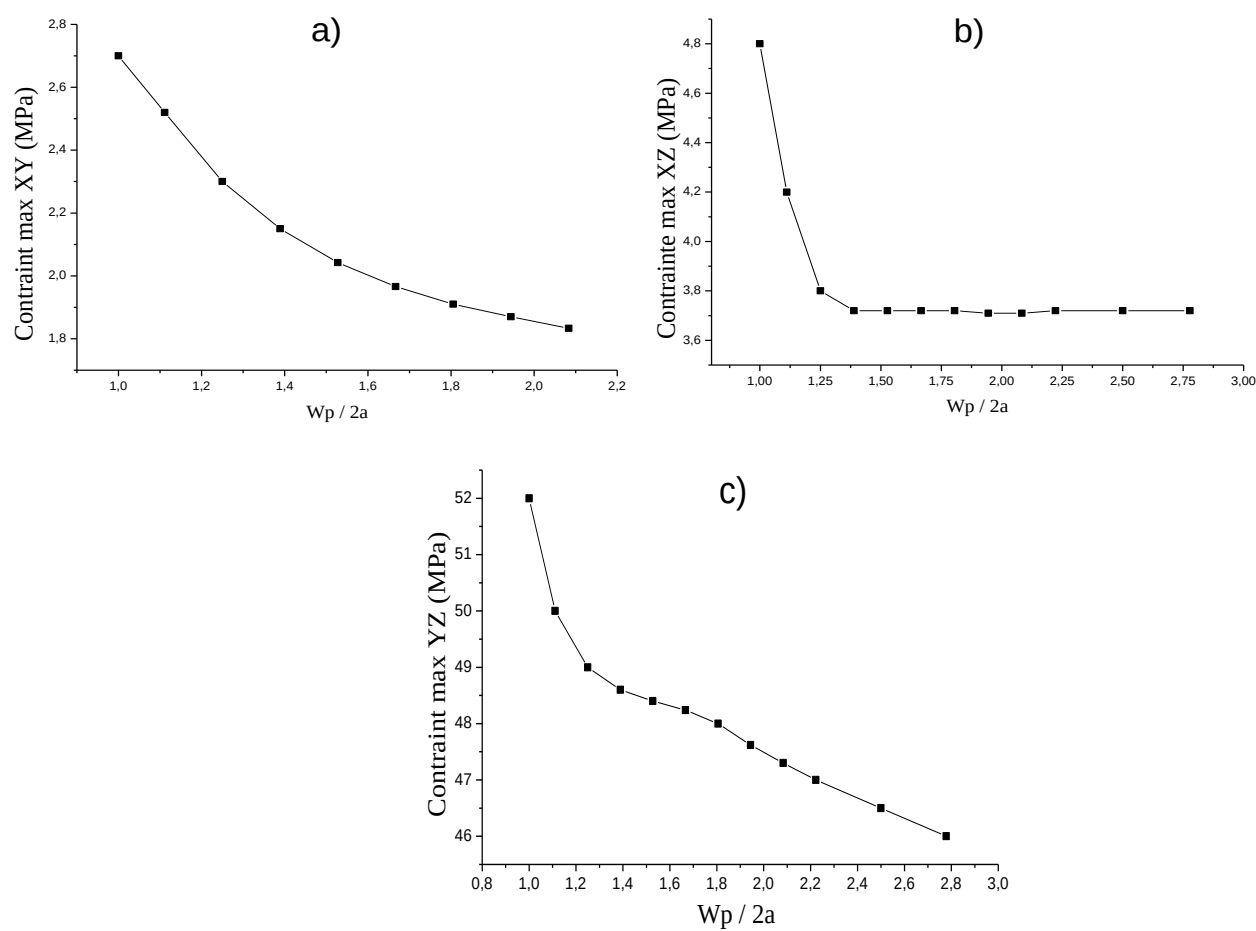


Figure IV.6 : Effet de la largeur du patch sur les contraintes de cisaillement maximales dans l'adhésif  
 Contrainte appliquée = 150 MPa, a =18mm.

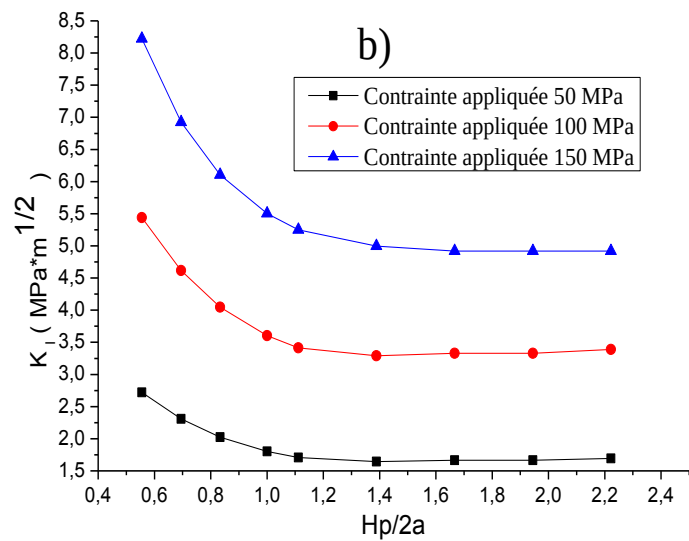
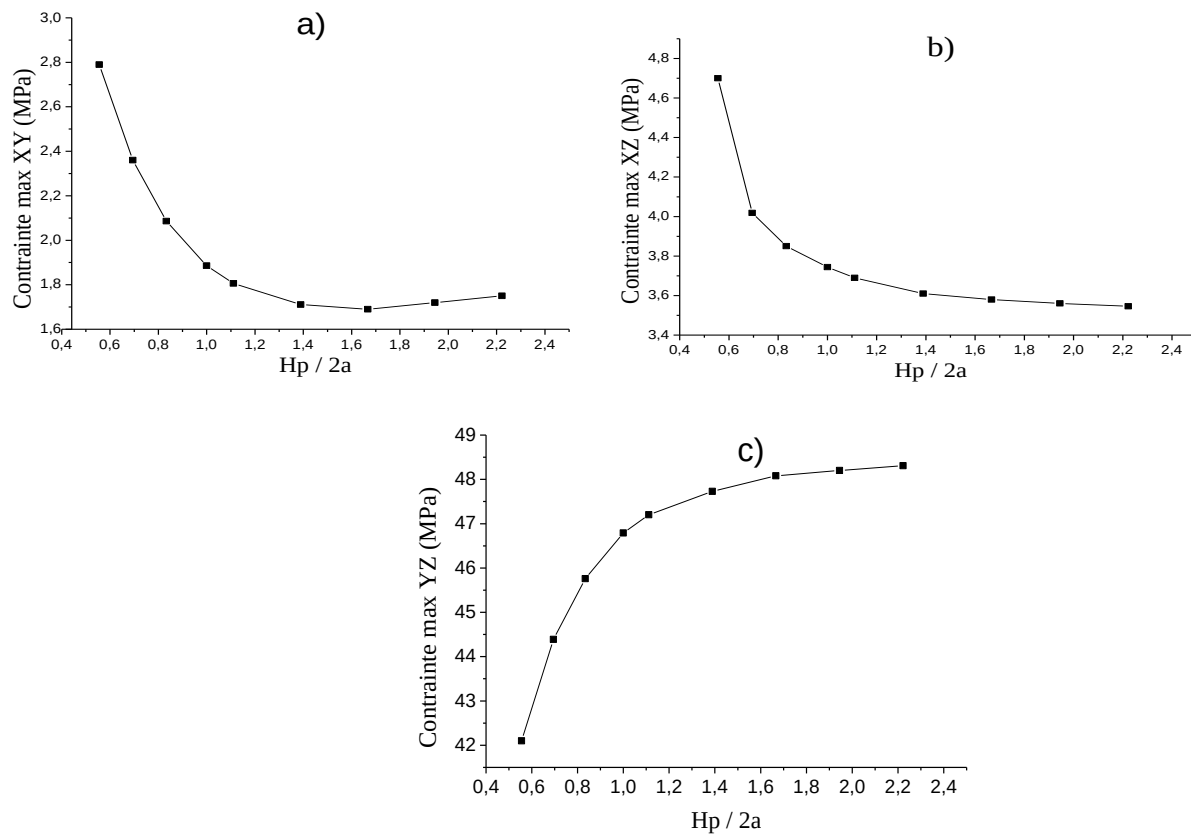


Figure IV.7 : Effet de la hauteur du patch et de la contrainte appliquée sur le FIC en tête de fissure réparée, a=18mm



**Figure IV.8.** Effet de la hauteur du patch sur les contraintes de cisaillement maximales dans l'adhésif  
Contrainte appliquée = 150 MPa,  $a = 18\text{mm}$ .

Nous concluons à la fin que, dans nos conditions de simulation, pour une fissure réparée de taille " $a = 18\text{mm}$ " et quelle que soit l'amplitude des contraintes de tension appliquées, pour des valeurs de largeurs supérieures ou égales à " $W_p > 72\text{mm}$ ", la hauteur optimale  $H_p$  est égale à 40mm. Dans ce cas, la réparation n'est efficace que si  $W_p > H_p$ , autrement dit, la réparation n'est performante que si le patch rectangulaire présente une hauteur (perpendiculaire à la fissure) inférieure à sa largeur (parallèle à la fissure). Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par Mahadesh Kumar et al. [53].

Ces résultats montrent aussi explicitement l'interaction entre la largeur  $W_p$  et la hauteur  $H_p$  d'un patch rectangulaire dans la détermination du facteur d'intensité de contraintes "FIC" et des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive, ce qui mène à penser que l'optimisation du patch devrait passer par d'autres formes pour lesquelles la hauteur varie en fonction de la largeur. L'interaction entre ces deux grandeurs géométriques (la hauteur et la largeur) du patch montre la nécessité d'effectuer une analyse d'optimisation pour la prédiction de la meilleure variation de ces dimensions (La forme)



permettant la réduction aussi bien des contraintes normales de tension " FIC" que des contraintes de cisaillement dans le joint d'adhésif.

### IV.2.1.2. Interaction forme du patch-contraintes normales de tension

La forme du patch composite présente un effet non négligeable sur la performance et la fiabilité de la réparation en termes de réduction des contraintes normales locales en pointes de fissures, définie par le facteur d'intensité de contrainte, et des contraintes de cisaillement dans le joint adhésif. La réduction de ces deux grandeurs physiques est une nécessité pour parler de la fiabilité et la durabilité des structures réparées.

Cette partie du travail rentre dans ce contexte et a pour but d'analyser l'effet de la forme du patch composite sur la qualité et l'efficacité de la réparation, pour ce faire, les mêmes conditions de simulation que celles utilisées précédemment ont été retenues. Le patch composite, en Carbone époxy unidirectionnel, est conjointement lié à la zone fissurée de la plaque à l'aide d'un adhésif type FM 73 d'épaisseur 0.2mm. Seule la géométrie du matériau de réparation dissocie les sept différents modèles analysés (elliptique, double flèches, forme H, rectangulaire, oblique, octogonal et papillon). Les tailles des formes ont été déduites à partir du patch initialement rectangulaire qui a été optimisé en fonction de la taille de fissure réparée selon les résultats indiqués sur les figures (IV.5 et IV.7).

L'effet de ces formes sur la performance de la réparation, est scindé en trois parties : avec conservation de la surface des patchs et de ses épaisseurs (Surface invariable), avec variation de la surface des patchs et conservation de ses épaisseurs (Surface variable) et en fin avec variation de la surface des patchs et de ses épaisseurs (volume invariable).

#### IV.2.1.2.1. Patchs avec conservation de la surface de recouvrement et ses épaisseurs (Surface invariable)

Dans un premier temps la réparation s'effectue à l'aide des patchs présentant une même surface et une même épaisseur (figure IV.9). Ces patchs ne se différencient que par leur forme géométrique.

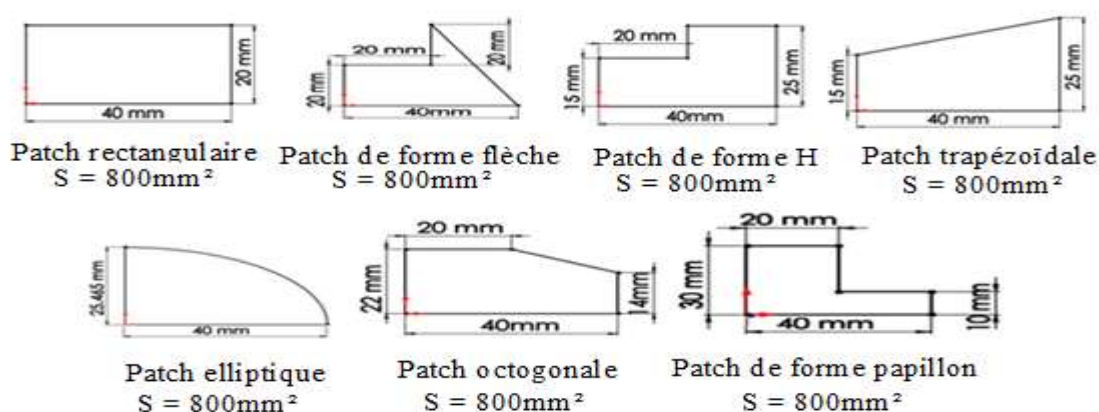
La largeur du patch  $W_p$  est maintenue constante, la compensation de la surface de recouvrement se fait en jouant sur sa hauteur  $H_p$ . Ces conditions permettent d'éliminer l'influence d'autres paramètres, et conduisent à une analyse plus réaliste de l'effet de la forme du patch sur le comportement mécanique en rupture de la plaque réparée.

Afin de réduire les fluctuations des résultats pouvant être dues à la nature des éléments de maillage, les mêmes éléments, les mêmes tailles, le même nombre (Tableau I.V2) et les mêmes conditions de simulation ont été retenues.

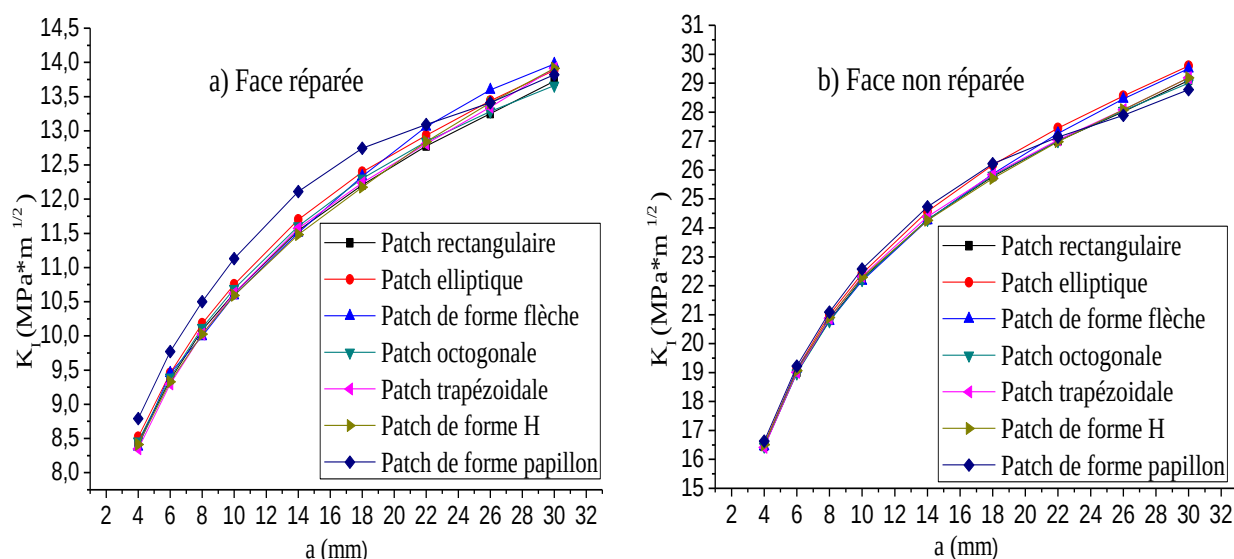
Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure IV.10 montrent que, le facteur d'intensité de contrainte "FIC" en pointes de fissures réparées semble pratiquement être peu sensible à la géométrie du patch. Cette insensibilité est nettement plus marquée pour les fissures de tailles courtes (inférieure à 18mm), ce comportement peut s'expliquer par le fait que la surface de recouvrement est identique pour toutes les formes de patches analysées. Cette surface est un paramètre géométrique déterminant de la performance de la réparation en termes de stabilité de la fissure. Les valeurs du critère de rupture (FIC) résultant de ces formes de patches convergent vers la même valeur.

Cependant, la réparation de fissures de tailles plus importantes montre une fluctuation négligeable du facteur d'intensité de contraintes. Ceci conduit à dire que, contrairement aux résultats obtenus par [149, 150, 55], lorsque la surface de recouvrement de la zone fissurée reste invariable, la forme de patch ne présente aucun effet sur l'efficacité de la réparation en termes de réduction de l'énergie de rupture en mode I. Ainsi, les arêtes vives (obliques, droites et aigues) de ces formes de patch sont positionnées trop loin des fronts de fissuration ce qui réduit considérablement leur effet de stocker indéfiniment les contraintes normales fortement localisées en têtes de fissure.

Ces résultats montrent explicitement que la surface de recouvrement de la partie endommagée contrôle le comportement mécanique de la réparation à l'aide des patches de formes différentes. Il sera judicieux d'analyser la réponse de ces structures réparées à l'aide de ces mêmes formes de patches présentant des surfaces de recouvrement variables.



**Figure IV.9:** Dimensions et formes de patches composites avec Conservation de la surface de recouvrement du patch et de son épaisseur.



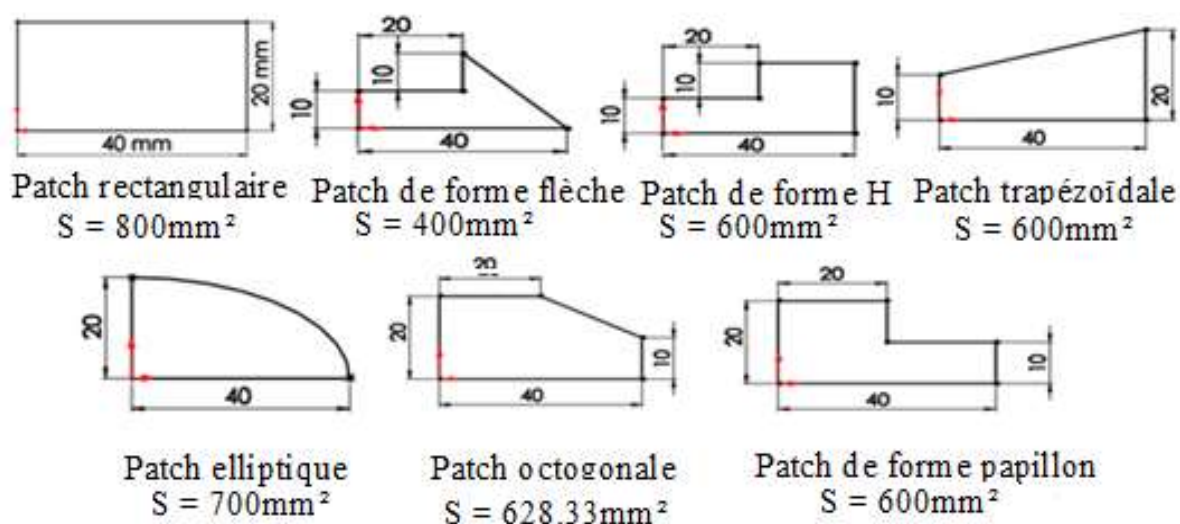
#### IV.2.1.2.2. Patches avec variation de la surface de recouvrement et conservation de l'épaisseur (surface variable).

Pour développer cette étude, toutes les formes de patches sont déduites d'un patch rectangulaire. Les sept patches obtenus présentent des surfaces de recouvrement variables (figure IV.11). La figure IV.12 illustre l'effet de la forme de tels patches sur la variation du facteur d'intensité de contrainte "FIC" en mode I. Ces résultats montrent nettement, que ce critère de rupture ne varie quasiment pas avec la variation de la forme du patch (fig. IV12a). Un même comportement est observé sur la face non réparée de la plaque (fig. IV12b). Pour la réparation des fissures de taille inférieure à 18mm, la géométrie du patch n'a pratiquement pas d'effet sur la qualité de la réparation en termes de réduction de ce paramètre de rupture (figure IV.12a). Au-delà de cette taille, une légère variation de ce facteur est observée. Il est à noter cependant que de telles fissures restent pratiquement théoriques et ce pour la prédiction de la performance de la réparation.

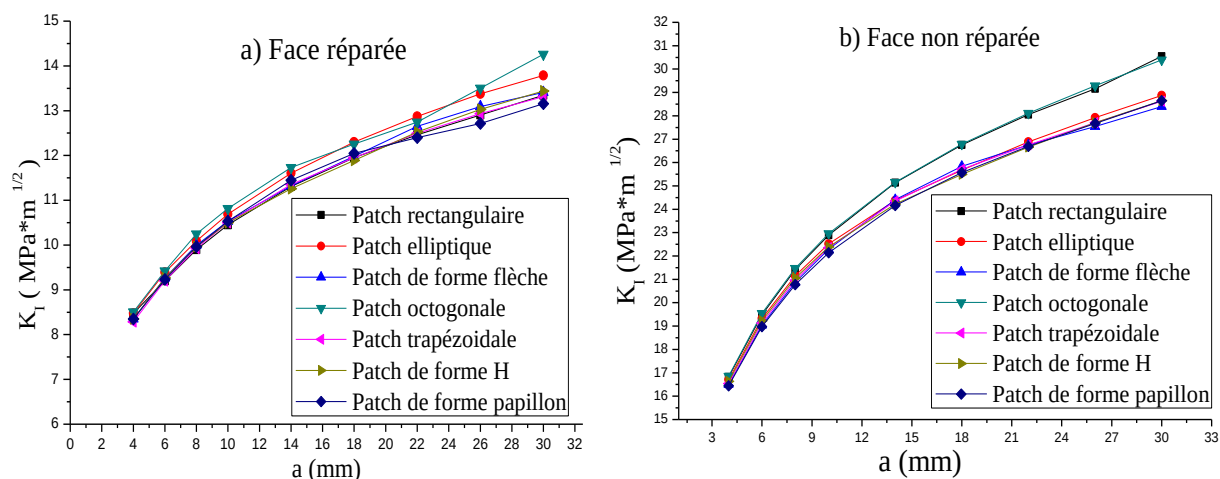
L'analyse globale de la structure fissurée montre que cette performance est quasiment insensible à la forme du patch. Rappelons que comparativement au patch rectangulaire, toutes les autres formes présentent une surface de recouvrement nettement plus petite. Il est pertinent de noter que le patch double flèches présente une surface de recouvrement doublement plus réduite que la forme rectangulaire. Ce qui est très intéressant d'un point de vue gain de masse correspondant à une valeur de 50%. Comparativement au patch rectangulaire, toutes les autres formes conduisent à un gain de

masse non négligeable et pratiquement à la même valeur du facteur d'intensité de contraintes. Ceci montre clairement que la géométrie du patch composite contrôle de façon significative, le comportement des fissures réparées. Une surface de recouvrement deux fois plus réduite conduit aux mêmes valeurs de l'énergie de rupture en têtes de fissures (figure IV.12a). Les valeurs des FIC enregistrées sur la face non réparée de la plaque sont plus élevées lorsque la réparation est effectuée à l'aide de patches à surface de recouvrement importante (figure IV.12b). Ceci montre que le risque de flexion de la plaque est moindre pour des réparations utilisant des patches à surface de recouvrement fortement réduite. Un tel comportement n'est possible que par une modification de la géométrie du patch, de cette modification résultent des arêtes vives (obtus, droites, aiguës) situées au voisinage proche des têtes de fissures favorisant ainsi un transfert important de charge vers le patch.

Pour mieux cerner cet effet, une analyse de cette modification avec conservation de son volume est nécessaire. Autrement dit, avec modification de la surface du patch et de son épaisseur.



**Figure IV.11 :** Dimensions et formes de patches ,(variation de la surface de recouvrement et conservation de l'épaisseur)



**Figure IV.12 :** Effet de la forme du patch sur le facteur d'intensité de contraintes en pointes de fissures réparées,  $\sigma = 150\text{MPa}$ , surface variable (variation de la surface de recouvrement et Conservation de l'épaisseur)

#### IV.2.1.2.3. Patches avec variation de la surface de recouvrement et de l'épaisseur (volume invariable)

Pour compléter cette étude, un même volume a été retenu pour toutes ces formes à surface de recouvrement variable. La variation de l'épaisseur du patch permet l'obtention un volume constant (figure IV.13). Les figures (IV.14a et IV.14b) représentent la variation du FIC des faces réparées et non réparées respectivement. L'analyse de ces résultats montrent clairement que la réparation, à l'aide de patches à surfaces de recouvrement plus réduites, conduit à une forte relaxation des contraintes normales de tension en pointes de fissure et donc aux plus faibles valeurs de ce paramètre de rupture. Autrement dit, la réparation est plus efficace lorsqu'elle est réalisée à l'aide de patches épais et moins étendu (faibles surfaces). Cette épaisseur est un paramètre fondamental où la rigidité du patch composite est plus forte.

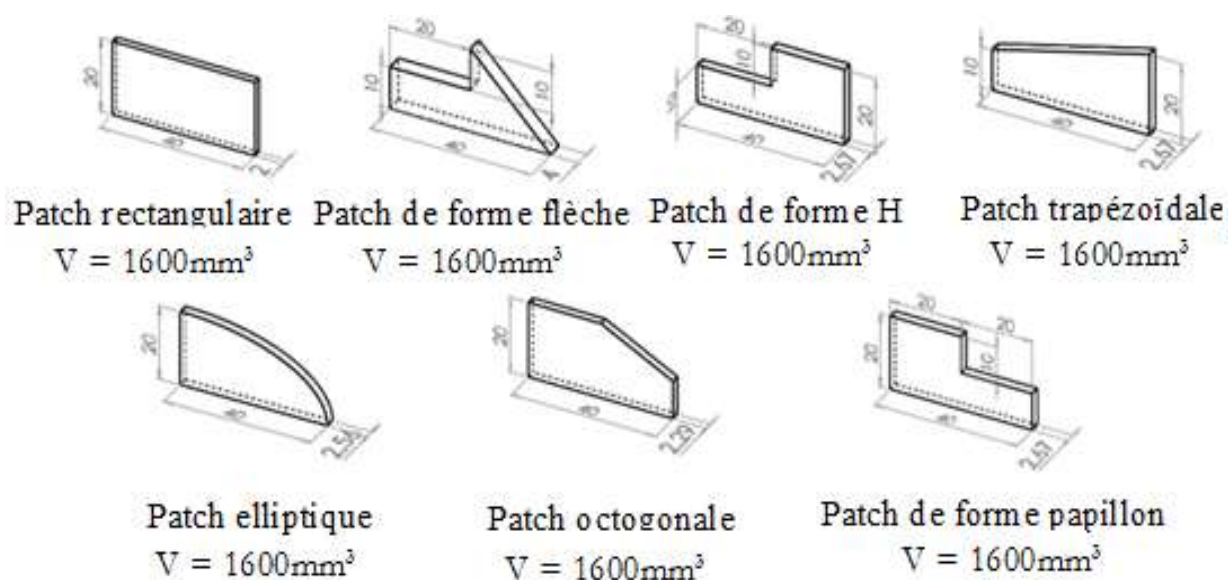
Ainsi, en termes de réduction d'énergie de rupture en têtes de fissures réparées, le patch en forme de flèche est plus performant. A volume égal et dans le cas de la réparation de fissures longues, il présente, par rapport au patch rectangulaire, un gain d'énergie de l'ordre de 45% sur la face non réparée et d'environ 25% sur la face réparée. Cette forme de patch réduit fortement l'instabilité de la fissure sur la face non réparée et minimise le risque de flexion de la plaque. La déformation élastique, due au flambement de la plaque, dû à la forte rigidité du patch, sont fortement minimisées lorsque la réparation est effectuée à l'aide d'un patch double flèches.

Nous concluons, d'un point de vue réduction de l'énergie de rupture en pointes de fissures des cotés réparés et non réparés et en termes de minimisation de la flexion due à la rigidité du matériau de

réparation et sa surface, le patch en forme de flèche est le plus efficace. Comparativement à toutes les autres formes géométriques du patch, cette forme conduit à un gain de masse important qui est un enjeu économique non négligeable de la réparation des structures des avions.

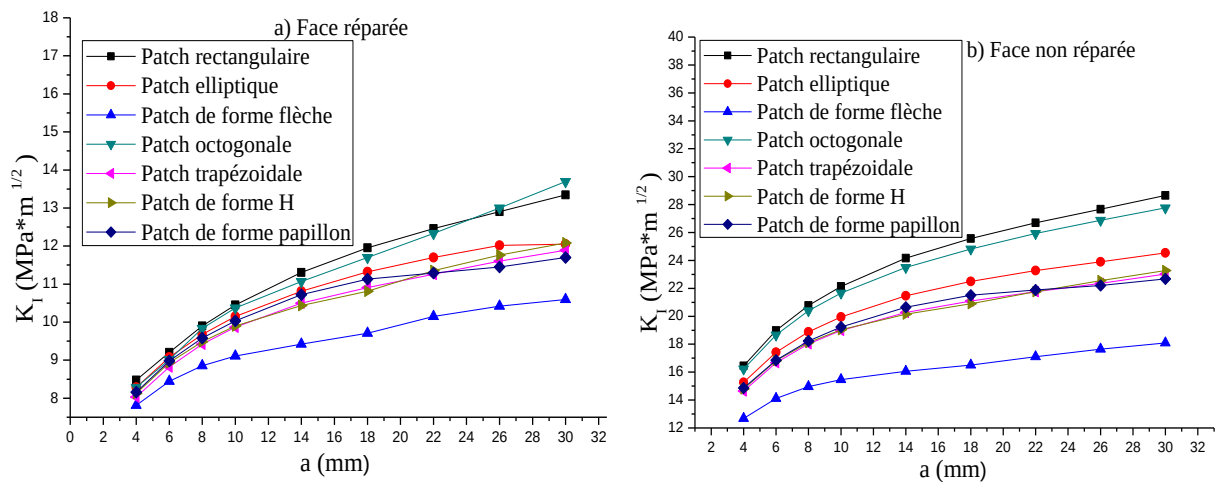
A volume constant du patch composite, en termes de relaxation de l'énergie de rupture des faces réparées et non réparées et de minimisation de l'effet de flexion de la plaque, la forme double flèches de patch reste la plus performante.

Donc, à la lumière de tout ceci, Il serait judicieux d'analyser l'effet de ces formes et particulièrement de cette forme (patch de forme flèche) sur le niveau et la distribution des contraintes de cisaillement dans le joint de la colle. Il est clair que la minimisation de ces contraintes joue un rôle déterminant sur la performance de la réparation en termes d'amélioration de la durée de vie des avions. Ces contraintes sont généralement responsables du décollement du patch de la plaque fissurée lié à la rupture des liaisons interfaciales. Il a été montré numériquement que le décollement est étroitement lié à l'endommagement du joint adhésif [151].



**Figure IV.13 :** Dimensions et formes de patches, volume constant (Variation de la surface de recouvrement et de l'épaisseur)





**Figure IV.14 :** Effet de la forme du patch sur le facteur d'intensité de contrainte en pointes de fissures, volume constant (variation de la surface de recouvrement et de l'épaisseur)

#### IV.2.1.3. Interaction forme du patch-contraintes de cisaillement dans l'adhésif

Pour minimiser les risques de dommage de la couche adhésive et augmenter la probabilité de survie de la réparation, il est important de maintenir les contraintes de cisaillement dans le joint de colle à un niveau le plus bas possible. Toute conception des formes du patch vise non seulement de relaxer au maximum l'énergie de rupture en pointes de fissures, mais également de réduire l'intensité de ces contraintes tangentielles afin de prévenir la rupture de l'adhérence.

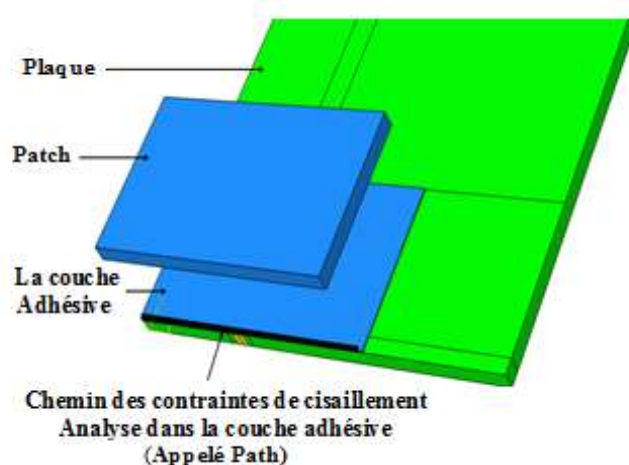
La performance de la réparation par patches composites dépend essentiellement du comportement mécanique de la couche adhésive. Celle-ci constitue le maillon le plus faible de la chaîne patch-adhésif-plaque et est pratiquement la cause essentielle de l'endommagement de la réparation par le processus d'amorçage et propagation du décollement. La compréhension des mécanismes de type de dégradation de la réparation n'est encore que très superficielle. Le décollement est un phénomène assez complexe dont les mécanismes physiques restent encore très mal connus, dépend pratiquement des paramètres mécaniques et géométriques du patch et de la colle, et surtout des contraintes de cisaillement induites dans la couche adhésive. Lors de la réparation, ces contraintes sont généralement responsables du dommage interfacial du joint adhésif et donc de l'endommagement de la réparation. Ainsi, plusieurs travaux ont été consacrés à un tel type de dégradation. Parmi eux on peut citer l'utilisation de la théorie de la zone endommagée pour expliquer les mécanismes du décollement dus à la ruine de l'adhésif. Cette théorie est basée d'abord sur la formation et le développement d'une zone endommagée, puis sur la propagation de fissures amorcées dans cette zone, ayant atteint une taille critique, sous des charges plus intenses. Crombe et al [44], Sheppard et al [45] ont développé un modèle permettant la prédiction de l'endommagement de la couche adhésive. Ils montrent que la dégradation de cette couche se produit une fois que la contrainte, induite dans l'adhésive, franchit une contrainte seuil. Ces auteurs concluent

que cette dégradation n'est pas le résultat de la propagation de la fissure réparée, mais plutôt de l'initiation et de la croissance de nouvelles fissures dans le joint adhésif. Ban et al [163] ont procédé à la correction en tenant compte du rapport de la zone endommagée, définie par le rapport entre la somme des surfaces estimées où la déformation à la rupture est atteinte et la surface du joint de colle. Ce modèle a été utilisé comme critère pour la prédiction de l'endommagement de l'adhésif. Ils concluent que le décollement d'un joint adhésif "type époxy FM 73", se produit lorsque ce rapport tend vers une valeur limite estimée 0,247. En se basant sur ce modèle, Ibrahim et al [47] ont analysé la dégradation de la couche adhésive utilisée pour la réparation par patch composite des structures d'avions fissurées.

En se basant sur le modèle de la zone d'endommagement de l'adhésif, Papanikos et al [48] ont observé que le bord supérieur du patch est une source d'amorçage du décollement. Ils concluent que ce décollement, responsable de la décohésion partielle des surfaces assemblées, conduit à une réduction considérable de l'aire effective de la jonction. Magalhaes et al [49], en analysant la nature de la dégradation d'un joint adhésif, ont montré que la ruine se manifeste à l'intérieur de la colle près de l'interface adhésif-adhérent, l'existence d'un film adhésif sur la surface collée illustre que le décollement est le résultat d'une rupture cohésive de l'adhésif. Xiong et Raizenne [42] ont montré que les patches avec une épaisseur décroissante diminuent la contrainte dans la couche adhésive car la singularité géométrique est alors moins marquée avec ce type de patches. Par exemple, ils ont procédé à l'optimisation de l'angle et à la diminution de la longueur de l'épaisseur du patch composite. Les contraintes de cisaillement induites dans la couche adhésive sont généralement responsables du décollement des structures réparées par patches composites. Pour compléter l'étude précédente, l'effet de la forme du patch sur le niveau et la distribution de ces contraintes est analysé. Il est important de maintenir ces contraintes à un niveau le plus bas possible.

Les contraintes de cisaillement ont été déterminées dans les plans XOY, XOZ et YOZ le long de la trajectoire de propagation de la fissure (figure IV.15) et dans toute la couche adhésive (contrainte max). Ceci constitue l'originalité de ce travail, pratiquement aucune étude n'a porté sur l'analyse de la performance de la réparation en termes de réduction de toutes les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive. La plupart des travaux numériques, analytiques et expérimentaux ont analysé l'efficacité de la réparation d'un point de vue réduction de l'énergie de rupture [14- 28].





**Figure IV.15.** Chemin d'évaluation des contraintes de cisaillement induites dans la couche adhésive

#### IV.2.1.3.1. Patch avec conservation de la surface de recouvrement et de son épaisseur (Surface invariable)

Dans cette analyse, la réparation a été effectuée à l'aide de différentes formes de patches présentant la même surface de recouvrement (fig. IV.9) et ne se différencient que par leur géométrie. Leur effet sur le niveau et la répartition des contraintes de cisaillement dans le joint adhésif sont représentés sur les figures (IV.16 et IV.17).

Le long de la trajectoire de propagation de la fissure (fig. IV.15), les contraintes tangentielles les plus fortes, dues à l'ouverture de la fissure, sont celles relatives au plan YOZ de l'assemblage patch/adhésif/plaque fissurée (fig. IV.16 c). Ces contraintes peuvent conduire à la dégradation de l'adhérence par un mécanisme de rupture des liaisons cohésives responsables du décollement du patch de la plaque ce qui est en bon accord avec les résultats obtenus par Magalhaes et al [49]. Ce risque est minimisé lorsque la réparation est effectuée à l'aide de patch de forme elliptique. Le niveau des deux autres contraintes propres aux plans XOZ et XOY (fig. IV.16a et IV.16b) est relativement faible et ne présente aucun risque d'endommagement de la réparation.

Cependant, les contraintes maximales de cisaillement dans la couche adhésive (fig. IV.17 a, b et c) relatives au bord et à l'ouverture de la fissure sont réduites à l'aide de patch de forme elliptique. Ceci illustre de façon explicite que l'effet, des arêtes vives ou obliques des autres patches situées suffisamment loin du défaut de fissuration, de stocker une forte proportion de l'énergie mécanique en tête de fissure est quasiment inexistant. Ces arrêtes sont des sources de concentration de contraintes de cisaillement,

localisées au bord libre de la colle. En conséquence, les contraintes de cisaillement dans une réparation utilisant de tels formes de patch sont élevées.

La figure IV.17c illustre les contraintes maximales de cisaillement les plus fortes, induites dans le joint adhésif localisées au bord du patch. Ces contraintes, dont le niveau croît avec la taille de la fissure réparée, peuvent conduire à l'amorçage et à la propagation de fissures à l'interface plaque-joint adhésif conduisant ainsi au décollement de la réparation. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par [31,42].

Ces résultats montrent que la forme elliptique minimise considérablement les contraintes de cisaillement dans l'adhésif et réduit, de façon comparable aux autres géométries, le facteur d'intensité de contraintes. Cette configuration, comparativement aux autres formes analysées, ne présente pas d'extrémités singulières, ou d'arêtes vives pouvant être un siège des concentrations des contraintes, à l'origine de l'augmentation des contraintes de cisaillement dans le film adhésif.

Il est donc intéressant d'analyser l'effet de la réduction de la surface de recouvrement de ces formes de patches avec maintien de la rigidité, autrement dit avec épaisseur constante, sur le comportement mécanique de la réparation.

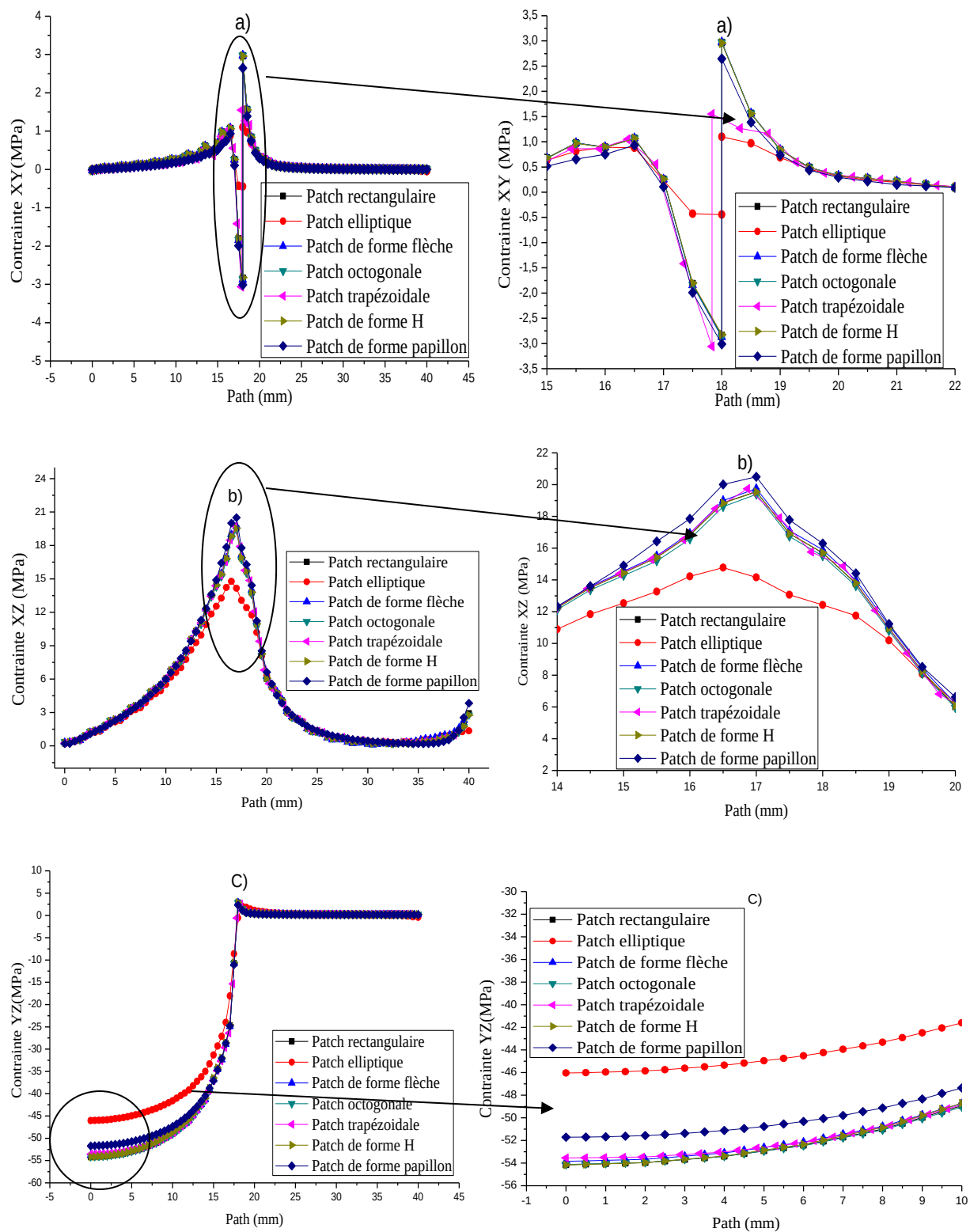
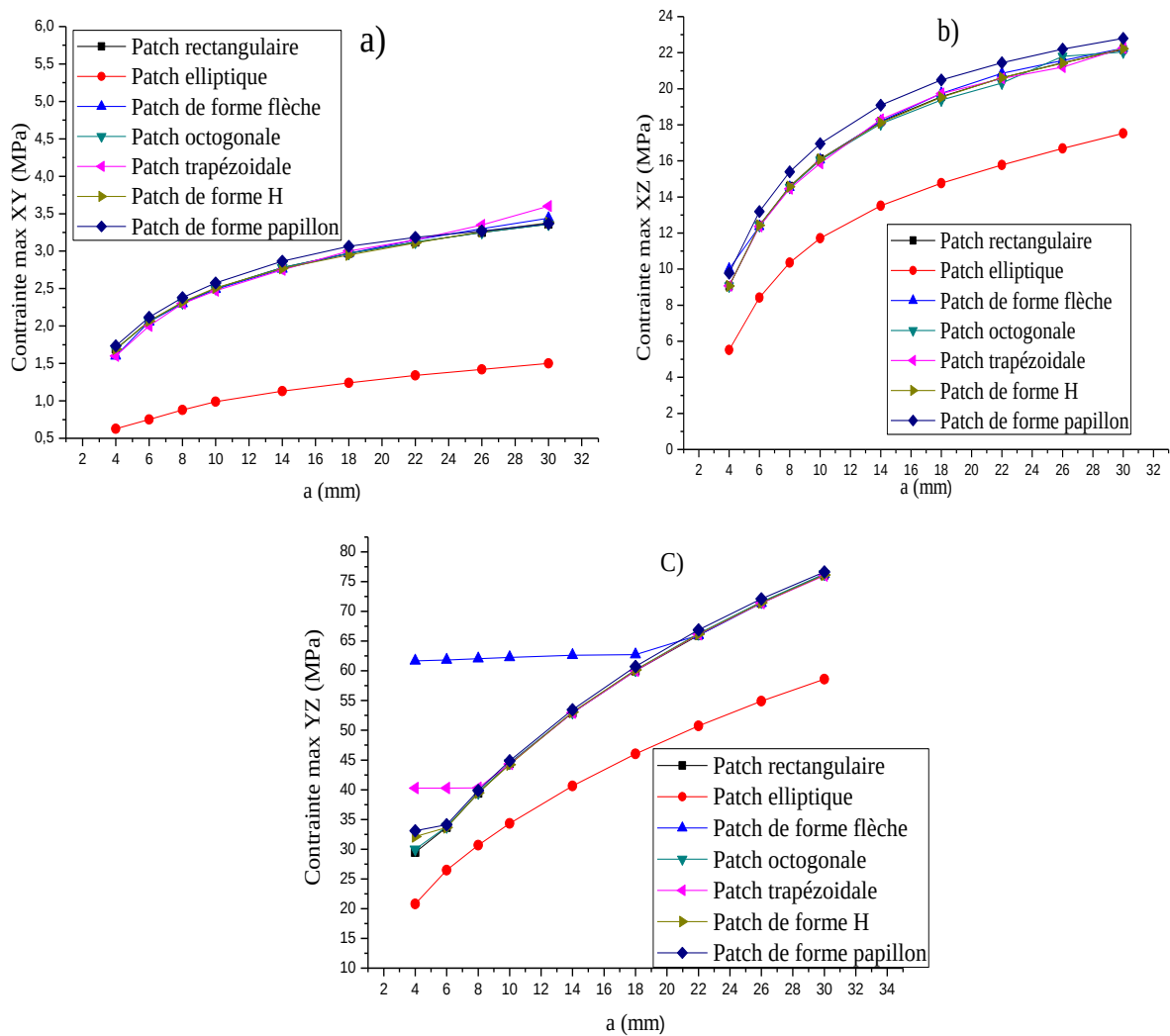


Figure IV.16 : Effet de la forme du patch sur le niveau des contraintes de cisaillement dans l'adhésif le long du chemin de propagation de la fissure,  $\sigma=150\text{MPa}$ ,  $a=18\text{mm}$



**Figure IV.17 :** Effet de la forme du patch sur le niveau des contraintes maximales de cisaillement dans l'adhésif,  $\sigma = 150 \text{ MPa}$

#### IV.2.1.3.2. Patch avec variation de la surface de recouvrement et conservation de son épaisseur (surface variable)

Dans cette partie, les formes de patches étudiées précédemment sont déduites à partir de la géométrie classique rectangulaire avec notamment une régression de la surface de recouvrement (figure IV.11). L'effet de ces formes sur le niveau et la répartition des contraintes de cisaillement est représenté sur les figures (IV.18 et IV.19). Ces dernières montrent, qu'en termes de réduction des contraintes de cisaillement relatives aux deux plans XOY, YOZ, le patch de formes orthogonale et elliptique sont plus efficaces (fig. IV.18a et IV.18b). En dehors de ces deux formes, l'effet de la forme du patch sur le niveau de ces deux contraintes n'apparaît pratiquement pas. Nos résultats montrent que, par rapport à toutes les formes de patches analysées, la forme elliptique et orthogonale minimise considérablement les contraintes de cisaillement dans l'adhésif (fig. IV.18a et IV.18b) et défavorisent le risque décollement.

Les contraintes tangentielles propres au plan YOZ, dues à l'ouverture de la fissure, sont relativement élevées et peuvent être responsables de la dégradation de la réparation (fig. IV.18c) par amorçage et propagation de fissures cohésive ou adhésive dans le joint de colle. Le niveau de ces contraintes est étroitement lié à la surface de recouvrement du patch, plus cette surface est importante plus ce niveau chute (figure IV.18c). Ainsi la réparation, à l'aide de patchs en forme rectangulaire induit de faibles contraintes de cisaillement.

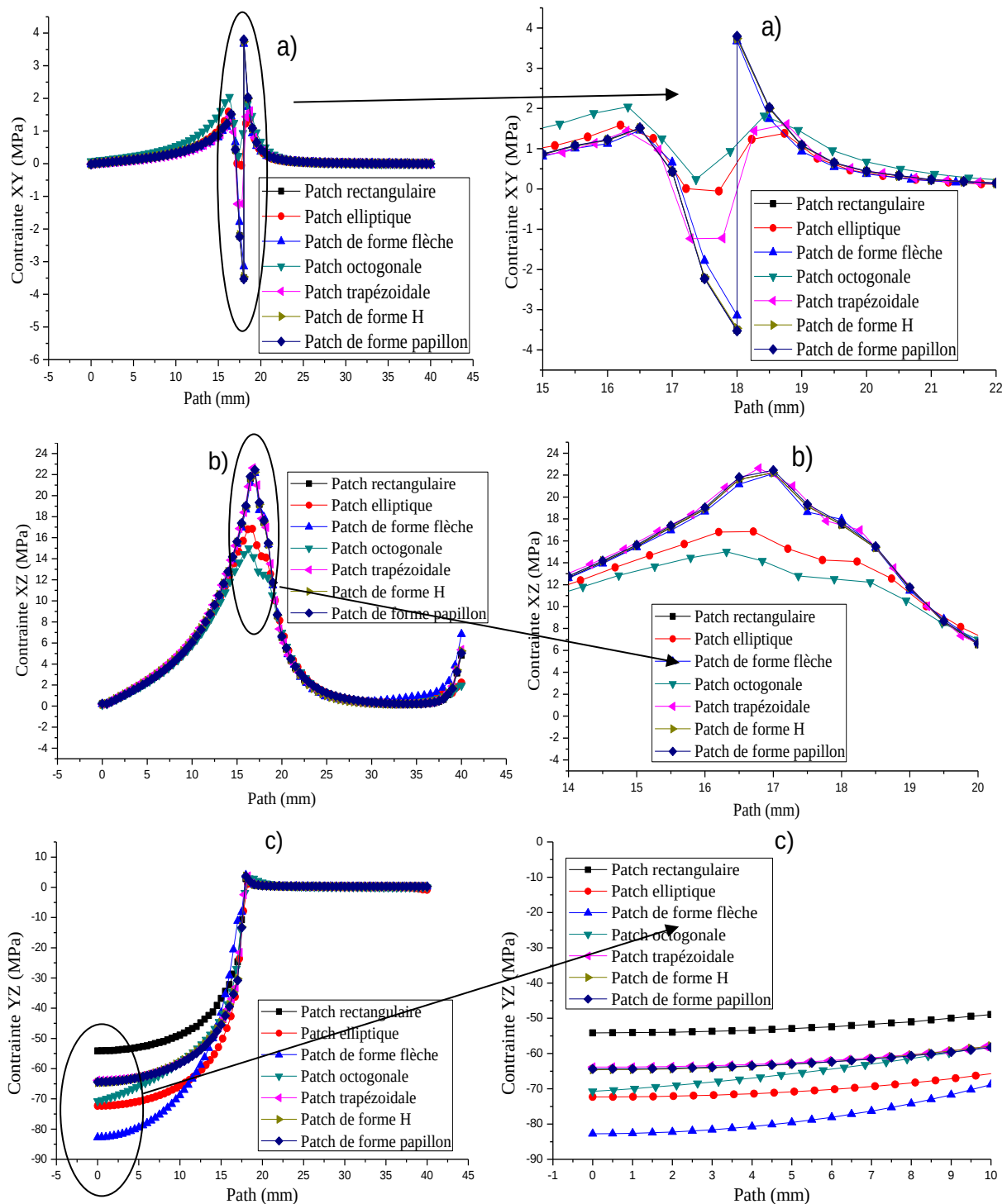
En prenant comme critère la réduction des contraintes maximales induites dans la couche adhésive lors du processus de mise en service, la réparation la plus fiable résulte d'un patch elliptique comme illustré sur les figures (IV.19a, b et c). Ces figures représentent la variation de ces contraintes générées respectivement dans les plans XOY, XOZ et YOZ du joint de colle. Indépendamment des tailles des fissures réparées, les contraintes tangentielles sur le bord libre du plan YOZ indiquent explicitement que ces dernières sont au niveau le plus bas lorsque la réparation est effectuée à l'aide d'un patch elliptique. Cette géométrie ne présente pas d'extrémité singulière, ou d'arêtes vives qui peuvent être le siège de concentration de contraintes, provoquant l'augmentation des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive. Néanmoins, dans nos conditions de simulation, ces arêtes relaxent considérablement les contraintes de tension normales fortement concentrées en têtes de fissures.

Concernant les contraintes tangentielles maximales dans la couche adhésive générées dans le plan XOY (fig. IV.19a), par rapport aux plans XOZ et YOZ (fig. IV.19b et IV.19c), ces contraintes sont d'un niveau beaucoup plus élevé, quelle que soient la taille de la fissure et la forme du patch.

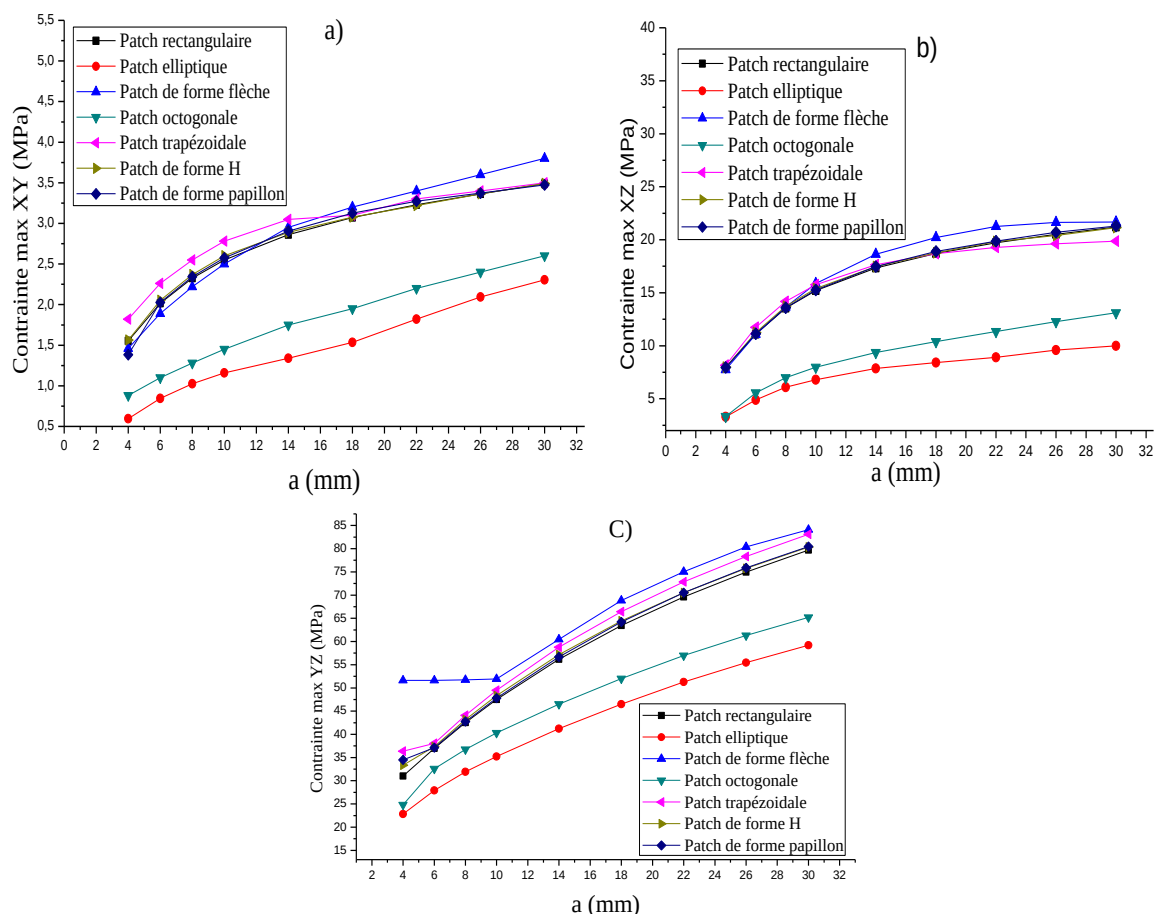
Les contraintes intensives induites dans le plan YOZ, localisées sur le bord libre de la colle, peuvent être des sources d'initiation et de propagation de nouvelles fissures dans l'adhésif, entraînant des dommages de la réparation par un mécanisme d'amorçage et propagation du décollement. En effet, les contraintes maximales, relevées dans cette zone de l'adhésif, dépassent le seuil de rupture en cisaillement. Ce risque est d'autant plus probable que la fissure est de taille longue et quel que soit la forme de patch avec laquelle elle est réparée (figure IV.19c).

Les tailles de fissures trop importantes demeurent théoriques pour mener à bien l'analyse de l'efficacité de la réparation en termes de réduction des contraintes normales de tension en pointes de fissures et des contraintes de cisaillement dans le joint adhésif. Ces tailles sont essentiellement responsables des valeurs trop importantes des contraintes de cisaillement relevées dans le plan de la plaque. Cette dernière montre que, quelle que soit la taille de fissure, la ruine de la colle est fort probable lorsque la réparation est effectuée à l'aide d'une forme de patch présentant des arêtes vives, d'angles aigus, droits ou obtus. Si de telles géométries présentent l'avantage de stocker des contraintes normales infiniment

intenses, elles favorisent l'intensification des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive provoquant ainsi un risque de séparation patch-plaque fissurée (décollement).



**Figure IV.18 :** Effet de la forme du patch sur le niveau des contraintes de cisaillement dans l'adhésif le long du chemin de propagation de la fissure :  $\sigma=150\text{MPa}$ ,  $a=18\text{mm}$



**Figure IV.19 :** Effet de la forme du patch sur le niveau des contraintes maximale de cisailment dans l'adhésif,  $\sigma=150\text{MPa}$

#### IV.2.1.3.3. Patch avec variation de la surface de recouvrement et de l'épaisseur (volume invariable)

Un même volume de patch initialement déduit de la forme rectangulaire a été retenu (fig. IV.13) pour compléter l'étude précédente. Les formes de patches ne se différencient que par leurs géométries et leurs surfaces de recouvrement. La conservation du volume du patch se fait en jouant sur son épaisseur. Rappelons que cette épaisseur est un paramètre déterminant pour la rigidité du matériau de réparation. La conservation de volume des patches à surfaces de recouvrement réduites exige des épaisseurs élevées de patches ce qui conduit à une forte rigidité de la réparation. A cet effet et comparativement au patch rectangulaire, un patch en forme de flèches à surface deux fois plus réduite et à rigidité deux fois plus importante conduit pratiquement aux plus faibles valeurs des contraintes de cisailment relatives au plan YOZ de la couche adhésive comme le montre la figure IV.20c. Ces contraintes sont dues à l'ouverture des lèvres de la fissure réparée dans la direction de traction. La taille théorique de fissures

réparées et l'amplitude du chargement appliqué trop élevées sont responsables de leur niveau trop important. Ces conditions de simulation extrêmes ont été volontairement utilisées pour l'estimation de l'efficacité de la réparation en termes de réduction de l'énergie de rupture en têtes de fissure et des contraintes tangentielles dans la colle. Il est à noter que le déplacement trop important des lèvres de la fissure peut conduire à l'amorçage du décollement par rupture des forces de liaisons interfaciales de l'adhésif. Cette zone de la plaque constitue un site privilégié d'amorçage et de propagation du décollement. On peut en conclure que ces contraintes sont en partie la cause.

Les contraintes de cisaillement engendrées dans le plan XOY restent peu intenses et ce quelle que soit la forme du patch (figure IV.20a). Ainsi, les contraintes localisées sur le plan XOZ de la structure (figure IV.20b) sont d'autant plus faibles que la réparation est effectuée à l'aide de patch à surface de recouvrement réduite, autrement dit à l'aide de patch plus épais et donc plus rigide, ces contraintes ne constituent aucun risque de dommage de la couche adhésive.

Les contraintes de cisaillement maximales, engendrées dans le plan de la réparation XOY et les plans XOZ et YOZ de la structure, sont représentées sur la figure IV.21. Ces résultats montrent que les contraintes les plus significatives sont localisées au bord libre (plan YOZ) de l'adhésif (figure IV.21c). Elles sont d'autant plus fortes que la réparation utilise des patchs présentant des arêtes à angle obtus, droit ou aigu. Ces dernières sont le siège de concentration des contraintes de cisaillement. A cet effet, la forme elliptique engendre les contraintes tangentielles les moins intenses. Ces contraintes sont en grande partie responsables de l'amorçage du décollement à partir des bords des patch comme le suggèrent les travaux présentés par [90-94].



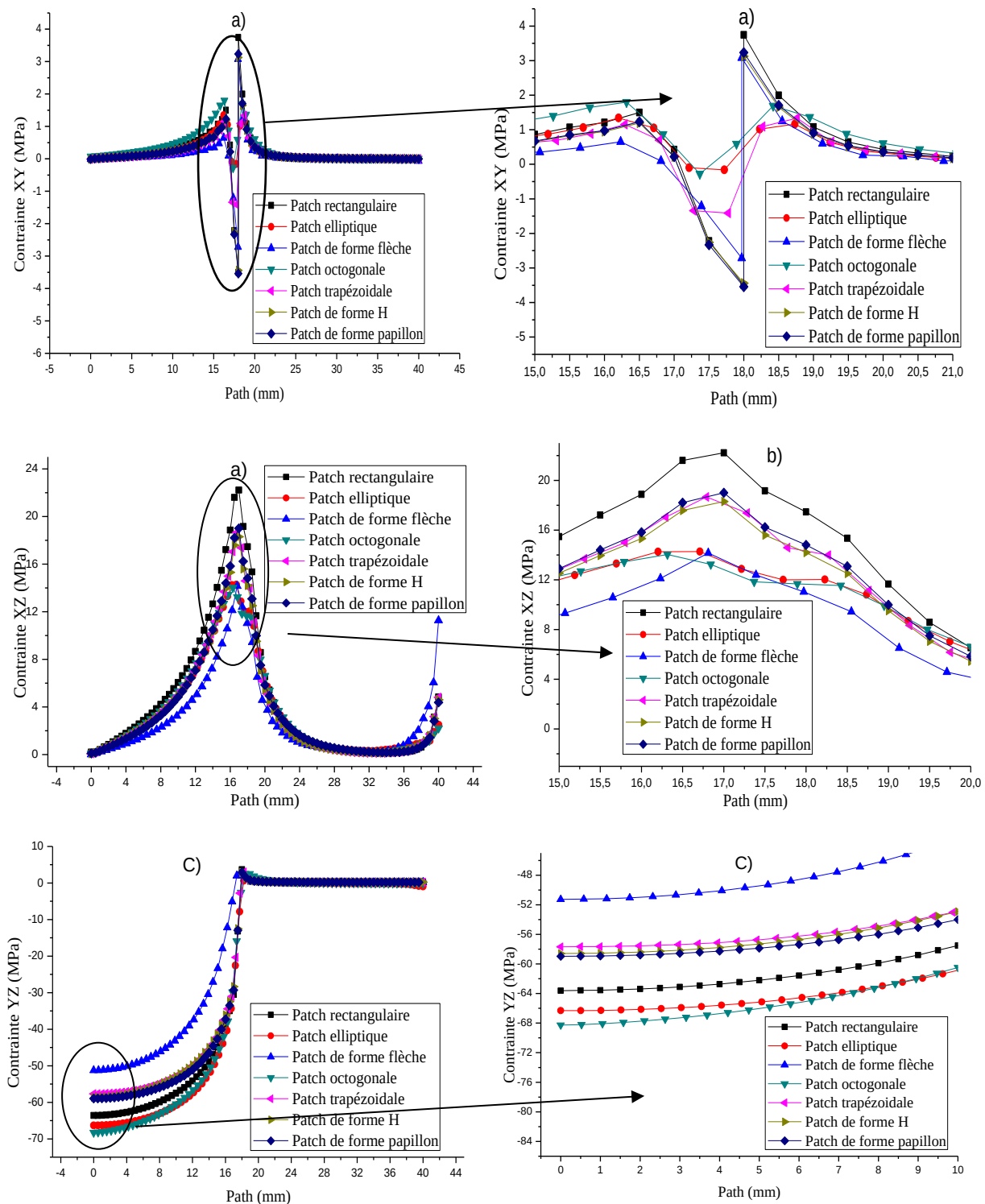
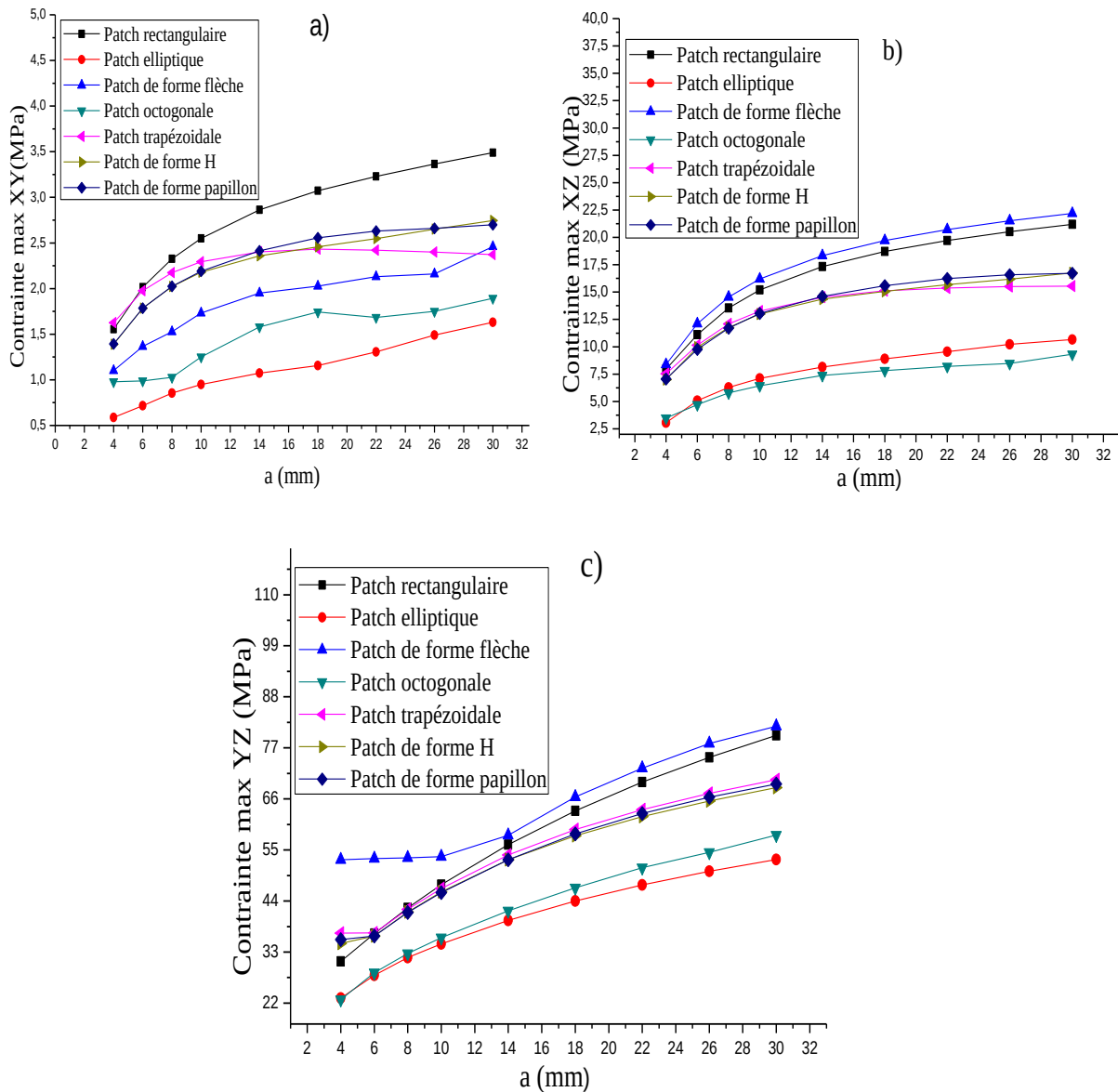


Figure IV.20 : Effet de la forme du patch sur le niveau des contraintes de cisaillement dans l'adhésif le long du chemin de propagation de la fissure,  $\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}$ ,  $a = 18 \text{ mm}$



**Figure IV.21 :** Effet de la forme du patch sur le niveau des contraintes maximale de cisaillement dans l'adhésif :  $\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}$ .

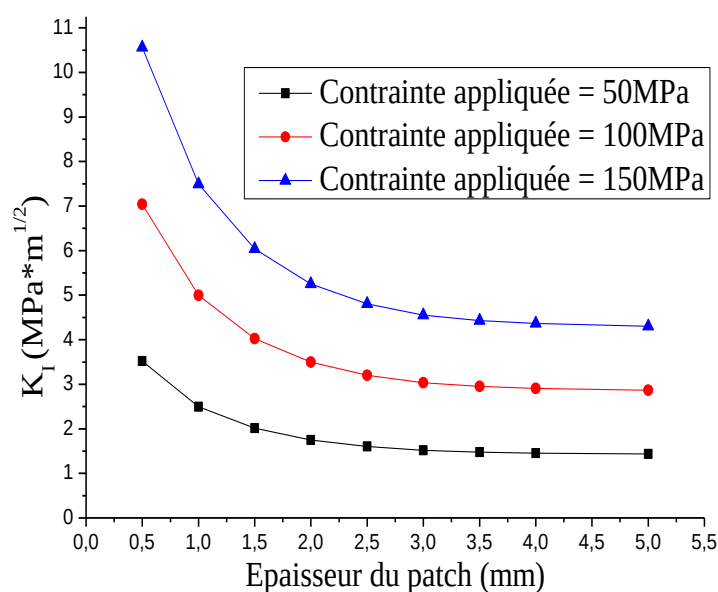
#### IV.2.1.4. Interaction épaisseur du patch-contraintes dans la plaque et dans l'adhésif

##### IV.2.1.4.1. Patch à épaisseur invariable

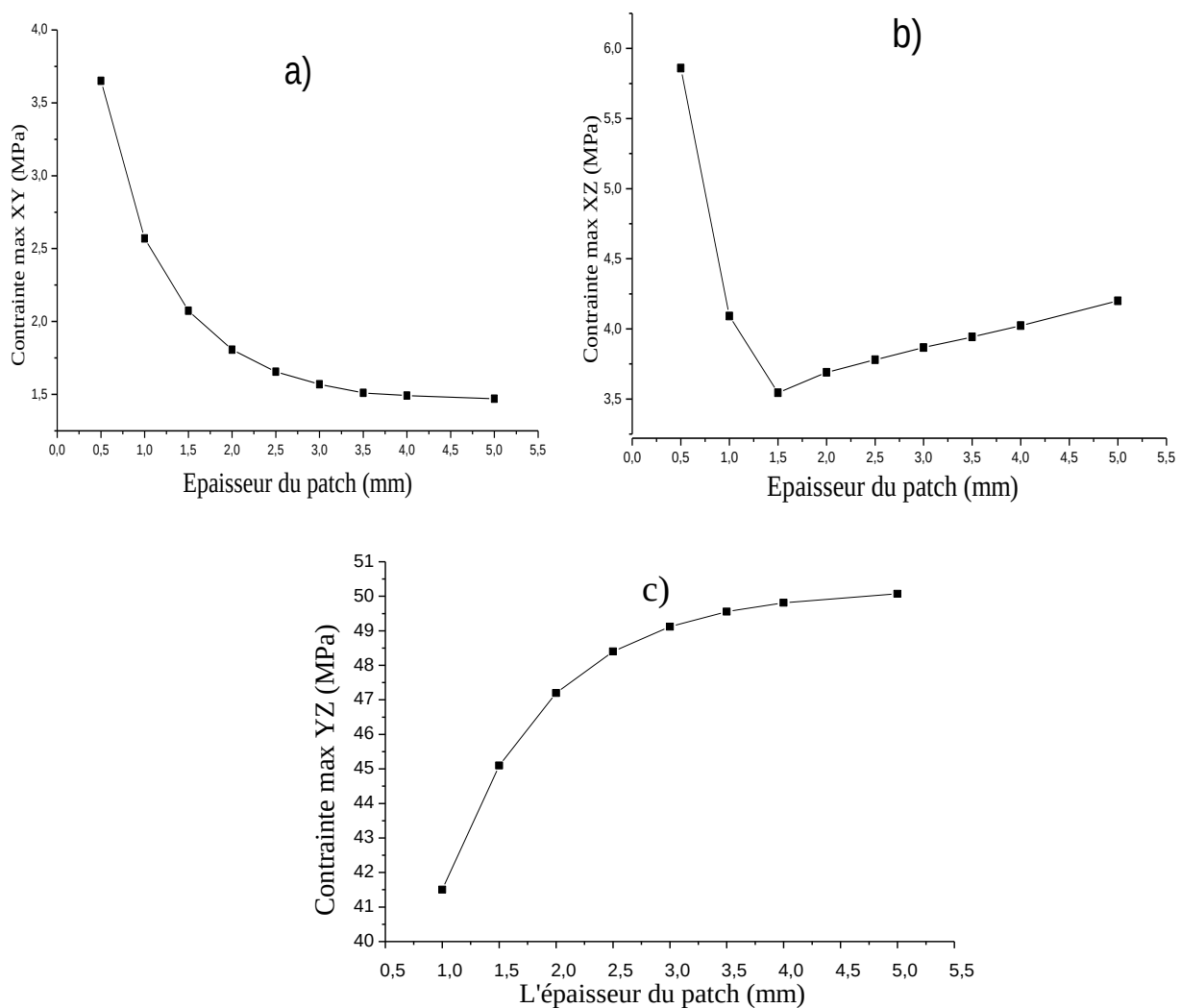
L'épaisseur du patch composite, caractéristique de la rigidité du matériau de réparation, est un paramètre déterminant de la fiabilité de la réparation. La performance de ce paramètre géométrique est alors analysée en termes de capacités de réductions des contraintes normales de tension locale en pointes de fissure "du FIC" et des contraintes de cisaillement dans le joint adhésif, comme le montrent respectivement les figures IV.22 et IV.23.

La performance du patch s'est nettement améliorée avec l'augmentation de son épaisseur mais jusqu'à une certaine limite seuil, dans notre cas égale à 3mm, au-delà de laquelle le facteur d'intensité de contraintes "FIC" ne varie pratiquement pas avec l'accroissement de cette taille (fig. IV.22). Ce comportement est observé quelle que soit l'intensité de la tension appliquée. Ceci illustre nettement que les réparations utilisant des patches composites épais sont plus efficaces en termes de réduction de ce critère de rupture "FIC" en pointes de fissures. De par leur volume important, ces patches sont susceptibles d'emmagasiner des contraintes normales de tension les plus intenses

D'autre part, les patches de fortes rigidités, patches épais, conduisent à une réduction des contraintes de cisaillement, propres aux plans XOY et XOZ (fig. IV.23a et IV.23b) de la couche adhésive respectivement et à l'intensification des contraintes de cisaillement dans le plan YOZ (fig. IV.23c). Cependant, pour des épaisseurs égales et supérieures à 3mm, ces contraintes sont peu sensibles à l'augmentation de ce paramètre géométrique. A cet effet, certains auteurs [87, 153] proposent l'optimisation de cette épaisseur.



**Figure IV.22 :** Effet de l'épaisseur du patch sur le facteur d'intensité de contraintes en mode I  
 $a = 18\text{mm}$ , Plaque fixée



**Figure IV.23 :** Effet de l'épaisseur du patch sur les contraintes de cisaillement maximale dans l'adhésif :  $\sigma_{app} = 150$  MPa,  $a = 18$  mm, Plaque fixée

Les résultats illustrés sur les figures IV.22 et IV.23, montrent que les patches composites épais absorbent une forte proportion de l'énergie mécanique en pointes de fissures ce qui conduit à une chute du FIC et par conséquent à une nette amélioration de l'efficacité et de la durabilité de la réparation. La rigidité du patch composite peut être plus performante, pour des épaisseurs données. La contrainte de cisaillement maximale la plus forte YOZ augmente avec l'accroissement de l'épaisseur du patch. Cette intensification augmente la probabilité de rupture de la couche adhésive et le risque de défaillance de la réparation. La survie à long terme des assemblages patch/adhésif/plaque fissurée passe par la maîtrise du niveau de ces contraintes.

Autrement dit, la performance de la réparation nécessite une réduction de ces contraintes, qui causent dans la plupart des cas la dégradation de la réparation. L'un des paramètres pouvant avoir un effet significatif sur le niveau et la répartition de ces contraintes est l'épaisseur non homogène (la forme de l'épaisseur) du patch composite, comme proposé par Xiong et Raizenne [42]. C'est l'objectif de ce qui suit.

### IV.2.1.4.2. Patch à épaisseur variable

Afin d'analyser l'effet du patch d'épaisseur variable (non homogène) sur les performances de la réparation, en termes de réduction des contraintes normales de tension en tête de fissure et de contraintes tangentielles dans la couche adhésive, et de minimiser les effets néfastes dus à l'épaisseur importante du patch composite, une épaisseur de forme aérodynamique a été développée dans le cadre de cette analyse. Ce paramètre géométrique a été considérablement réduit sur les deux bords couvrant les deux fronts de fissuration. Le but recherché est d'analyser l'effet de la variation oblique de l'épaisseur du patch sur le niveau de ces contraintes. En tenant compte de la forme proposée du patch par Xiong et Raizenne [42], contenant une épaisseur décroissante de la partie latérale du patch à ses bords (fig. IV.24), une nouvelle distribution d'épaisseur de patch, plus adaptée, a été développée dans ce travail (fig. IV.25). Cette forme, mise en évidence à partir d'un patch rectangulaire (fig. IV.25a), présente une rigidité constante (épaisseur du patch homogène) le long de la fissure et, au-delà de cette zone, une épaisseur réduite, comme illustré aux figures IV.25e et IV.25f.

Les formes présentées dans cette figure diffèrent de celles données par Xiong et Raizenne [42] (fig. IV.24) et résultent d'un patch initialement rectangulaire à rigidité invariable (épaisseur du patch invariable) (fig. IV.25a). Ce dernier a été modifié en :

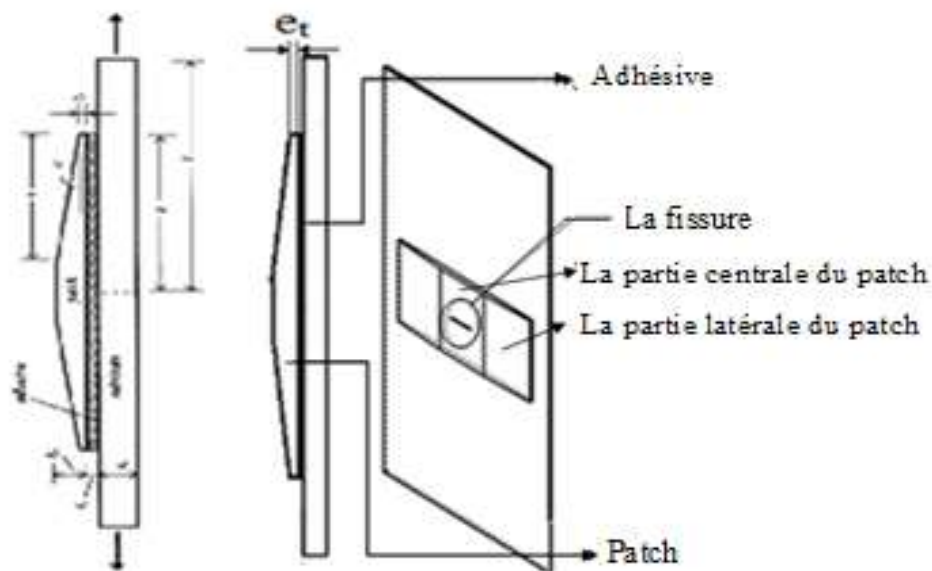
- Patch digressif (arêtes vives  $e_t = 0\text{mm}$ ) (fig. IV.25 e)
- Patch en escalier (fig. IV.25 f)
- Patch en escalier inversés (fig. IV.25 g)

Rappelons que le volume de ces patches est maintenu constant étant celui du patch rectangulaire (fig. IV.25). En d'autres termes, l'élément de volume enlevé des parties latérales du patch a été ajouté à sa partie centrale. La figure IV.26a montre clairement que pour tous les modèles du patch développés dans cette étude (patch digressif à arêtes vives à épaisseur  $e_t = 0\text{mm}$ ) et patch en escalier conduisent à une diminution des valeurs du facteur d'intensité de contrainte "FIC". Cette chute est beaucoup plus significative pour la réparation des fissures longues. Comparativement à toutes autres formes de patches, il est clairement établi dans cette figure que pour de tels défauts de fissuration, le FIC décroît avec

l'augmentation de la taille de la fissure réparée à l'aide d'un patch composite noté patch en escalier (fig. IV.26). Il est explicitement montré sur cette figure que l'efficacité et la performance de la réparation sont d'autant meilleures que les parties extérieures du patch composites, dans la direction de propagation de la fissure, sont les plus minces possibles.

Un comportement quasiment semblable à celui de la face de la plaque réparée est observé sur le côté non réparé (fig. IV.26b). Pour des fissures extrêmement longues, le patch dont l'épaisseur est non homogène semble mieux stabiliser la propagation de la fissure de la face non réparée.

Pour réparer les fissures courtes égales ou inférieures à 18 mm, le patch en escalier inversé (fig. IV.25g) est aussi efficace que le patch en escalier (fig. IV.25f). Cela montre clairement que ces défauts de fissuration ne sont pas très sensibles à la rigidité du patch. Pour les fissures de plus grandes tailles, leur comportement est diamétralement opposé (fig. IV.26a). En fait, le patch en escalier réduit le FIC, et le patch en escalier inverse intensifie ce paramètre. Les valeurs de ce critère de rupture sont à équidistance de celles du FIC résultant d'une réparation à l'aide d'un patch rectangulaire. Ce comportement montre explicitement que l'ouverture de la fissure (les lèvres de la fissure) doit être correctement recouverte. C'est dans cette zone de la fissure que le patch devrait être le plus rigide. Cet effet de rigidité du patch composite est bien confirmé sur la face non réparée de la plaque fissurée (fig. IV.26b), sur cette face, on observe un comportement presque contraire à celui de la face réparée (fig. IV.26a).



**Figure IV.24 :** Patch de Xiang et Raizenne [42]

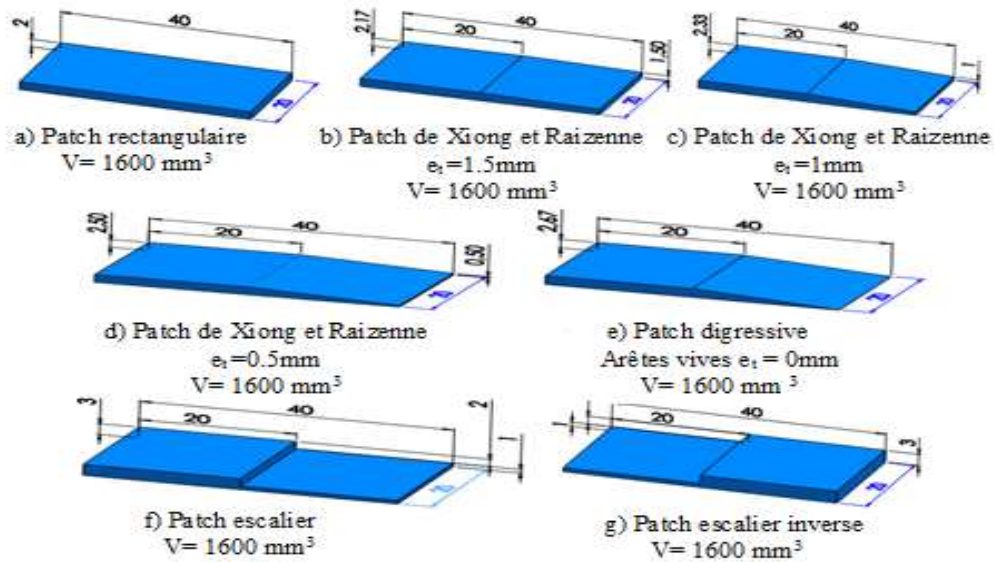


Figure IV.25: Patches développés à partir d'un patch rectangulaire et dimensions utilisées (volume constant)

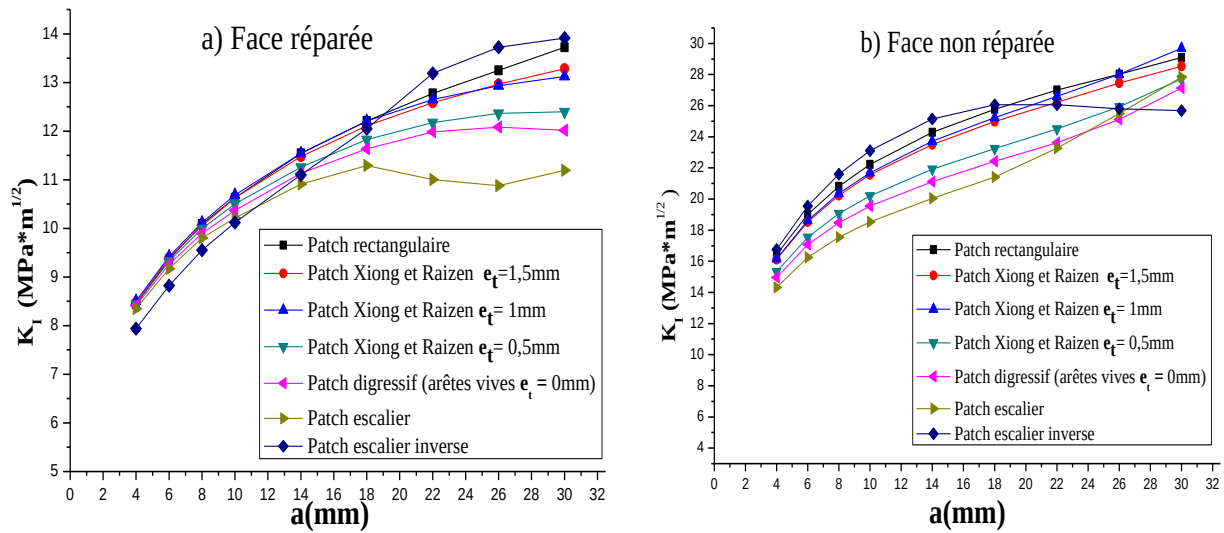
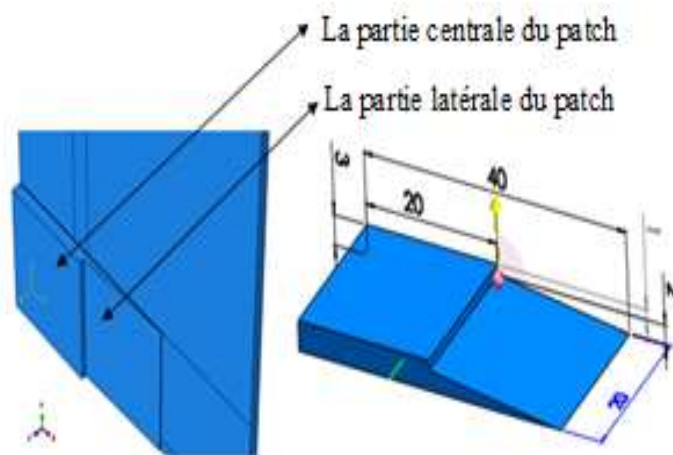


Figure IV.26 : Variation du facteur d'intensité de contrainte, en fonction de la taille de la fissure réparée par patches à épaisseurs variables et à volume constant :  $\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}$ .

Le modèle patch en escalier (fig. IV.25f) développé dans cette étude a été amélioré à son tour en tant que patch en escalier digressif (fig. IV.27). Cette modification a été apportée dans le but d'analyser son effet sur la qualité de la réparation en termes de réduction du FIC et les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures IV.28. Ils montrent que, par rapport au modèle de Xiong et Raizenne, la réparation à l'aide de patches à épaisseur en escalier digressif

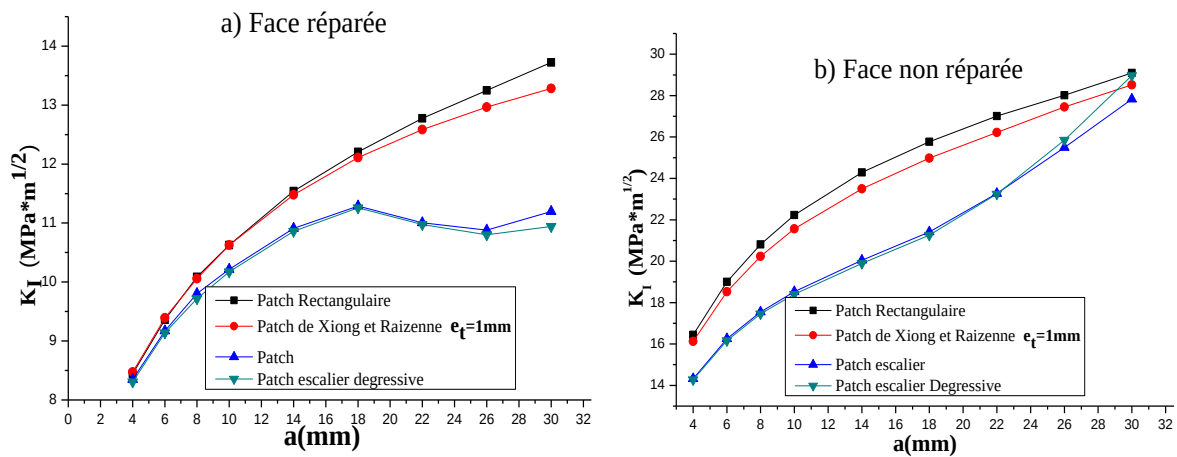
conduit à une relaxation importante des contraintes mécaniques localisées aux fronts de fissure et ce quelle que soit sa taille. Ce comportement est également observé sur le côté non réparé de la plaque.

Ceci illustre de façon claire, que les modèles mis au point dans cette étude présentent une configuration géométrique de l'épaisseur du patch composite permettant une meilleure aptitude de relaxation des contraintes de la zone endommagée par fissuration. L'utilisation de telles formes de patch en tant que matériau de réparation entraîne une diminution de l'énergie de rupture en pointes de fissures sur les deux faces réparée et non réparée (fig. IV.28a et IV.28b). Cette réduction est beaucoup plus marquée sur la face réparée (fig. IV.28a). Ce comportement montre explicitement l'interaction entre l'épaisseur non homogène d'un patch rectangulaire et l'énergie de rupture en pointe de fissure. Cette interaction est d'autant plus forte que la taille de la fissure est plus importante. En effet, il existe une taille de fissure "a", égale 18mm, au-delà de laquelle le facteur d'intensité de contraintes chute avec l'accroissement de cette taille. Ce qui conduit à dire que lorsque la partie centrale des fissures longues " $a > 18\text{mm}$ " (les lèvres de fissures) est parfaitement recouverte avec du patch épais, et que les têtes de fissures se localisent sur les zones du patch à épaisseur réduite, l'énergie de rupture est fortement relâchée. Un comportement contraire est observé sur la face non réparée de la plaque. L'énergie de rupture augmente fortement au-delà de cette taille (fig. IV.28b), mais reste inférieure à celle résultante du modèle de Xiong et Raizenne.



**Figure IV.27** : Modèle du patch développé (patch en escalier digressif)  $V_{\text{patch}} = 1600\text{mm}^3$





**Figure IV.28 :** Facteur d'intensité de contrainte en fonction de la taille de la fissure réparée par le modèle de Xiong et Raizenne et les modèles développés,  $\sigma_{app} = 150MPa$ ,  $V_{patch} = \text{constant}$ .

Contrairement aux patches de Xiong et de Raizenne, les patches développés dans ce travail ont une rigidité constante de la partie centrale recouvrant l'ouverture des lèvres de la fissure. Ce qui est nécessaire pour la stabilité des fissures longues. Ces patches sont simples à mettre en œuvre.

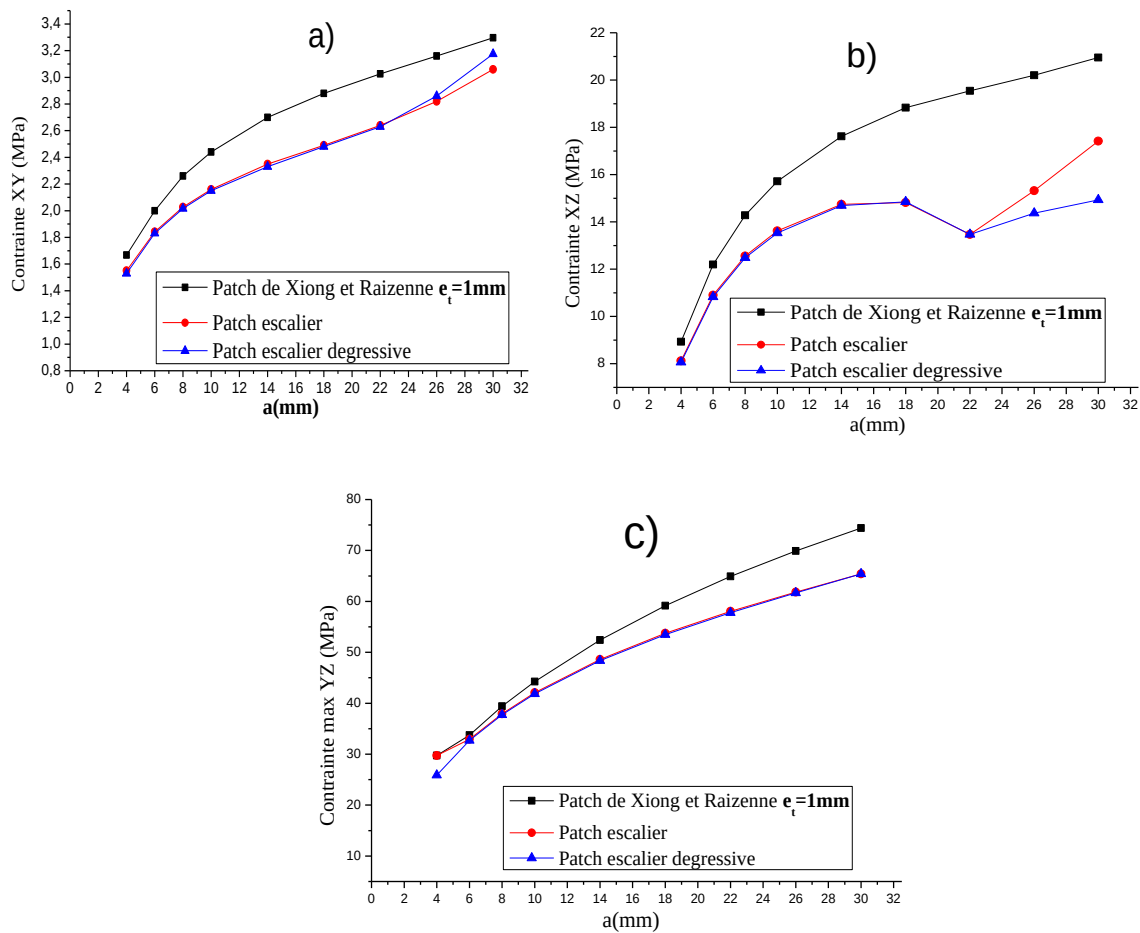
En revanche, ces patches minimisent les effets de flexion de la plaque, ce qui réduit le risque d'instabilité de la fissure sur la face non réparée. Comparés à ceux de Xiong et Raizenne, les résultats précédemment obtenus illustrent explicitement que les modèles de patches développés dans cette étude « patch en escalier » et « escalier digressif » fournissent des réparations plus efficaces d'un point de vue réduction des critères de rupture en mode I.

Il est important de maintenir les contraintes de cisaillement dans le joint adhésif à des seuils spécifiés. Toute conception de réparation est destinée à permettre des valeurs de contraintes de cisaillement (qui servent de moyen de transfert de contrainte) sans dépasser les seuils clairement définis pour la colle, afin de prévenir la rupture adhésive des assemblages patch/adhésif/plaque fissurée.

La question qui se pose est la suivante : qu'en est-il des contraintes de cisaillement pour les plans XOY, XOZ et YOZ de la couche adhésive, la réponse à cette question est illustrée à la figure IV.29.

Ces résultats illustrent les contraintes de cisaillement maximales. Dans ce cas, les patches développés dans cette étude induisent dans le joint adhésif, des valeurs généralement moins intenses que celles générées par le patch proposé par Xiong et Raizenne. Il est donc bénéfique de recouvrir la région de la fissure avec un patch en escalier ou un patch en escalier digressif, ce qui permet à la fois une réduction de l'énergie de rupture dans la fissure et une relaxation des contraintes de cisaillement maximales dans la couche adhésive.

Autrement dit, les patches développés dans ce travail semblent très efficaces pour réduire à la fois le facteur d'intensité de contrainte et maintenir les contraintes de cisaillement à des valeurs faibles.

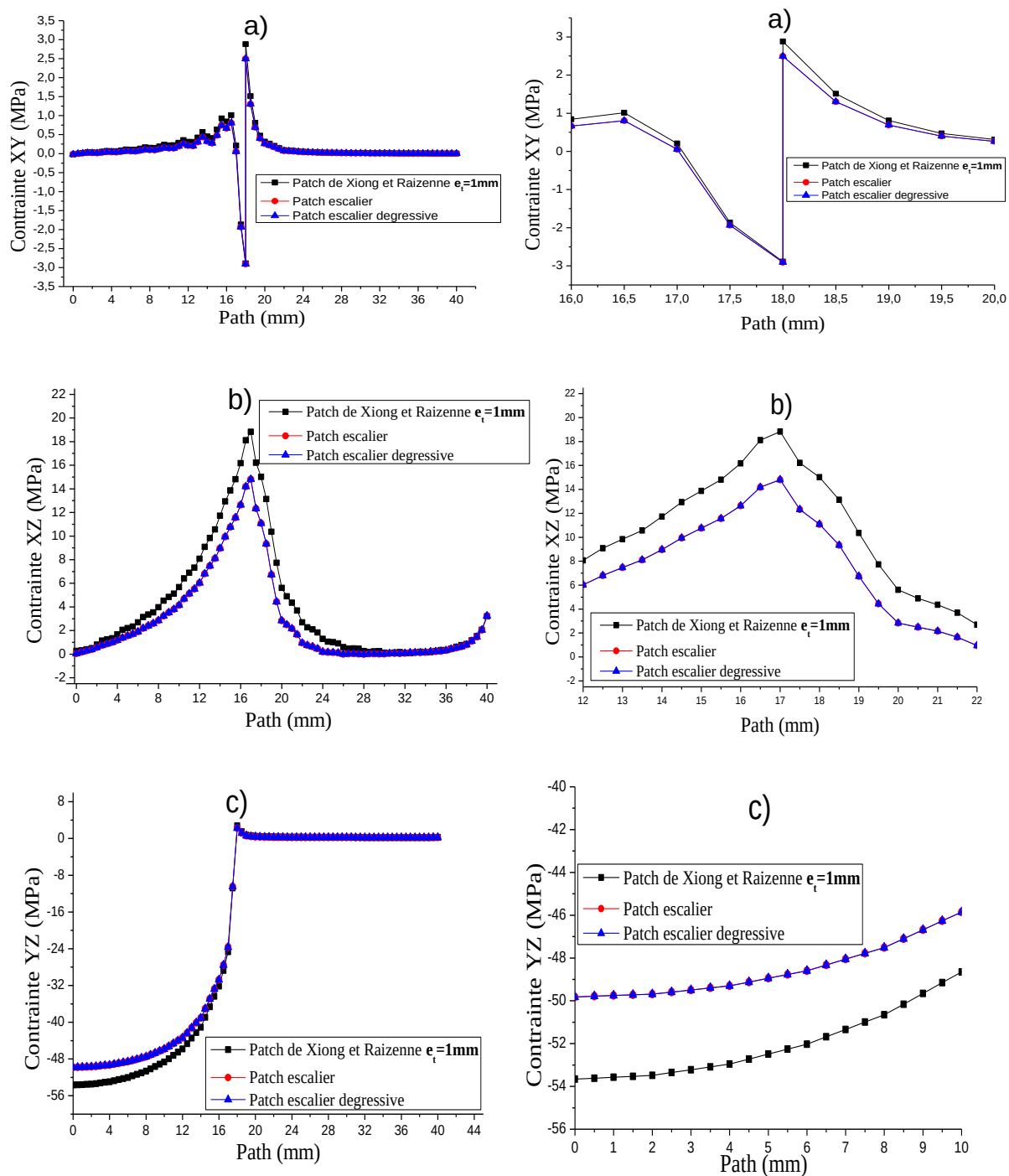


**Figure IV.29 :** Contraintes de cisaillement dans le joint adhésif obtenu par le modèle de Xiong et Raizenne et les modèles développés,  $\sigma_{app} = 150MPa$ ,  $V_{patch} = \text{constant}$

Une autre analyse, celle des contraintes de cisaillement induites dans l'adhésif le long du trajet de propagation de la fissure (fig. IV.15). La figure IV.30 indique la variation de ces contraintes respectivement dans les plans XOY, XOZ et YOZ, dans le cas d'une réparation utilisant le patch de Xiong et Raizenne, patch en escalier digressif et patch en escalier. Ces derniers restent généralement plus efficaces pour réduire les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive que le modèle de patch proposé par ces auteurs.

Les contraintes de cisaillement les plus importantes sont relatives au plan YOZ (fig. IV.30c) en raison de l'ouverture de la fissure provoquée par les déplacements les plus importants du cœur de la plaque (lèvres de fissure). Ces contraintes sont d'un niveau inférieur lorsque les réparations sont effectuées à l'aide de patches développés dans ce travail (patch en escalier digressif et patch en escalier). Dans cette zone de la plaque, la rigidité du matériau de réparation est nécessaire pour accroître la résistance mécanique aux les déplacements des lèvres de la fissure et retarder la propagation de la fissure.

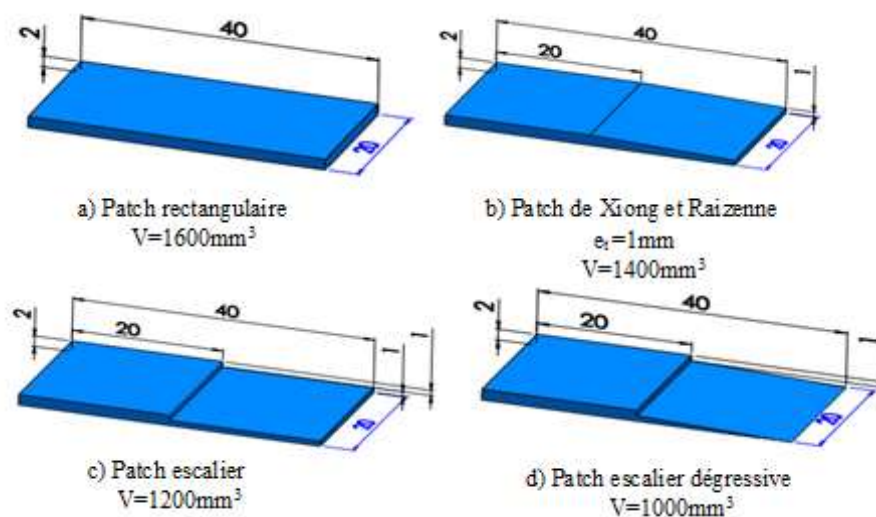
Finalement, les patches développés dans ce travail semblent très efficaces pour réduire à la fois le facteur d'intensité de contrainte et maintenir toutes les contraintes de cisaillement dans l'adhésif à des valeurs les plus faibles possibles.



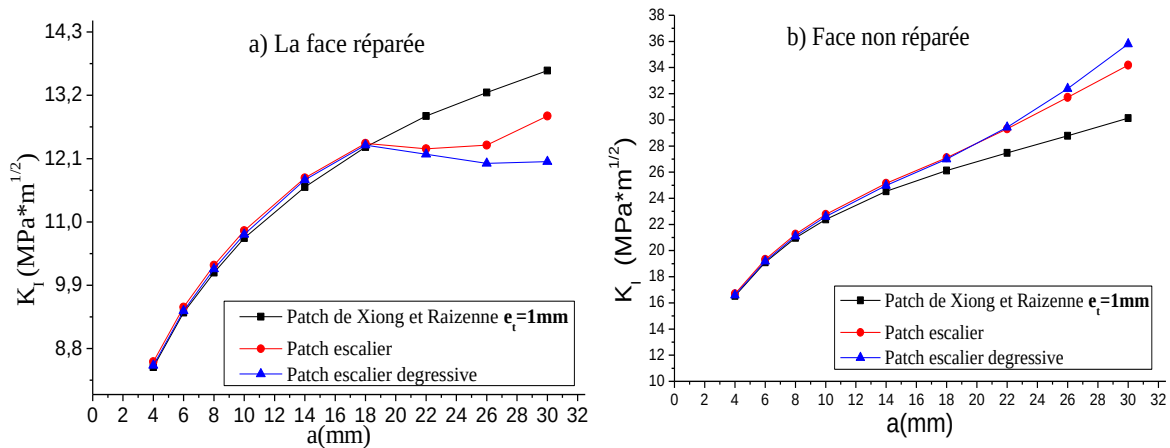
**Figure IV.30 :** Contraintes de cisaillement le long du chemin de propagation de la fissure, obtenues par les modèles de Xiong et Raizenne et les modèles développés,  $a=18\text{mm}$ ,  $\sigma_{app}=150\text{ MPa}$ ,  $V_{patch} = \text{constant}$

Rappelons que l'étude précédente avait été réalisée en utilisant des patches à volume constant (fig. IV.25). Il sera pertinent de procéder à l'étude de l'interaction entre la réduction des volumes de patch et les contraintes dans la plaque et dans la couche adhésive (fig. IV.31). Contrairement à la simulation précédente où les parties latérales, du patch initialement rectangulaire, étaient ajoutées à la partie centrale (volume constant), ici ces parties étaient tout simplement supprimées (volume réduit). Ceci a été effectué afin d'analyser l'effet du volume retiré sur l'efficacité de la réparation en termes de réduction du facteur d'intensité de contrainte en mode I (fig IV.32) et de relaxation des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive (fig IV.33).

L'analyse de la figure IV.32, confirme les résultats obtenus et illustrés sur les figure IV.26 et IV.28, montre qu'il existe une taille de fissure « a » égale à 18 mm (taille correspondante à la largeur de la partie centrale du patch) en dessous de laquelle, l'efficacité de la réparation, en termes de réduction de l'énergie de rupture ne dépendent pas de la géométrie de l'épaisseur du patch composite. En fait, le facteur d'intensité de contrainte résultant de la réparation des fissures avec le patch proposé par Xiong et Raizenne et celui réparé à l'aide des patches développés dans cette étude coïncide parfaitement (fig IV.32a), au-delà de cette taille de fissure, les patches mis en évidence dans cette partie du travail, patch en escalier ou patch en escalier digressif, sont plus efficaces que ceux proposés par Xiong et Raizenne et ce malgré leur faible volume. Un comportement opposé est observé sur la face non réparée de la plaque (fig IV.32b). Il est montré de façon explicite sur la figure IV.32, que la réduction trop importante du volume du patch composite (fig. IV.31) conduit à un écart du facteur d'intensité de contraintes de l'ordre de  $1\text{MPa}^{1/2}$ , ce qui quand même très intéressant d'un point de vue gain de masse et d'une forme aérodynamique.



**Figure IV.31:** Patches développés à partir d'un patch rectangulaire et dimensions utilisées (volume réduit).



**Figure IV.32 :** Facteur d'intensité de contrainte en têtes de fissure réparée par le modèle de Xiong et Raizenne et les modèles développés,  $\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}$ , (volume du patch réduit)

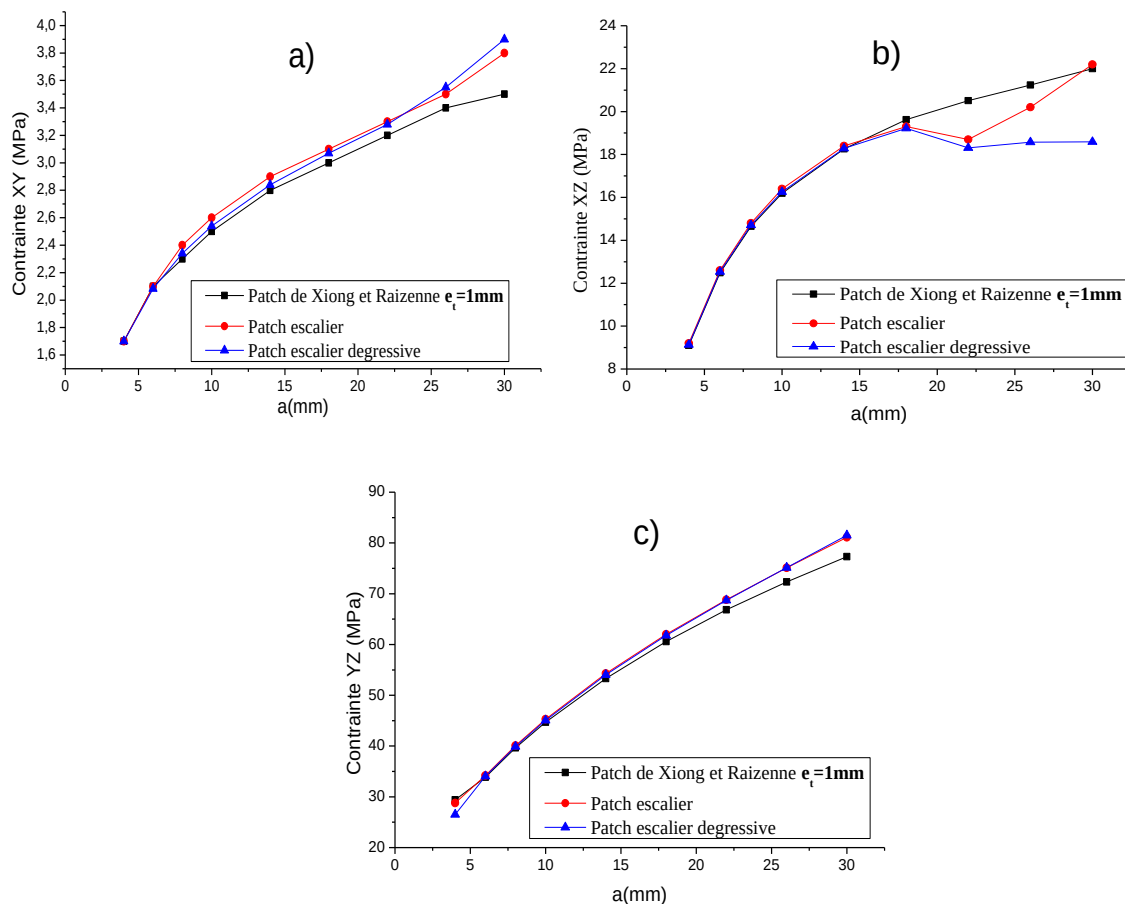
L'analyse comparative des deux patchs présentant un volume réduit, développés dans le cadre de ce travail, et de celui présenté par Xiong et Raizenne s'avère intéressante. Leurs performances sont alors comparées en termes de capacités de réductions des contraintes de cisaillement dans l'adhésif. Les contraintes de cisaillement maximales dans le joint adhésif induites respectivement dans les plans XOY, XOZ et YOZ (fig. IV.33) ont pratiquement le même comportement que les contraintes normales (FIC) (fig. IV.32). En fait, pour des fissures de moins de 18 mm, ces contraintes ne semblent pas dépendre de la forme de l'épaisseur du patch rectangulaire.

Pour des fissures trop importantes, la réparation à l'aide de patchs en escalier ou de patchs en escalier digressif, développée dans cette partie de travail, est plus efficace en termes de réduction maximale de la contrainte de cisaillement dans le plan XOZ (fig. IV.33b). Dans les deux autres plans, la réparation de Xiong et Raizenne génère une contrainte de cisaillement maximale légèrement inférieure (fig. IV.33 a et IV.33c).

L'analyse des figures IV.29 et IV.33 montrent que les contraintes de cisaillement maximales dans la couche adhésive sont d'un niveau légèrement bas lorsque la réparation est effectuée à l'aide de patch escalier digressif par rapport au patch escalier. Ce qui est pertinent en termes de forme aérodynamique et gain de masse. Ces deux critères sont déterminants dans le cas de la réparation externe des structures des avions.

Les résultats, illustrés au figure IV.32 et IV.33, confirment ceux obtenus précédemment et montrent clairement que la réparation de la partie centrale de la fissure (les lèvres de la fissure) par des patchs plus rigides est une condition nécessaire à la fois pour la réduction des contraintes normales en têtes

de fissure, et les contraintes de cisaillement maximales dans le joint adhésif. Le patch couvrant l'ouverture de la fissure doit être le plus rigide pour freiner à la long termes le mouvement des lèvres de fissure dans le sens de la traction. Ce comportement ralentit considérablement la progression de ce défaut de fissure dans le sens perpendiculaire à cette direction.

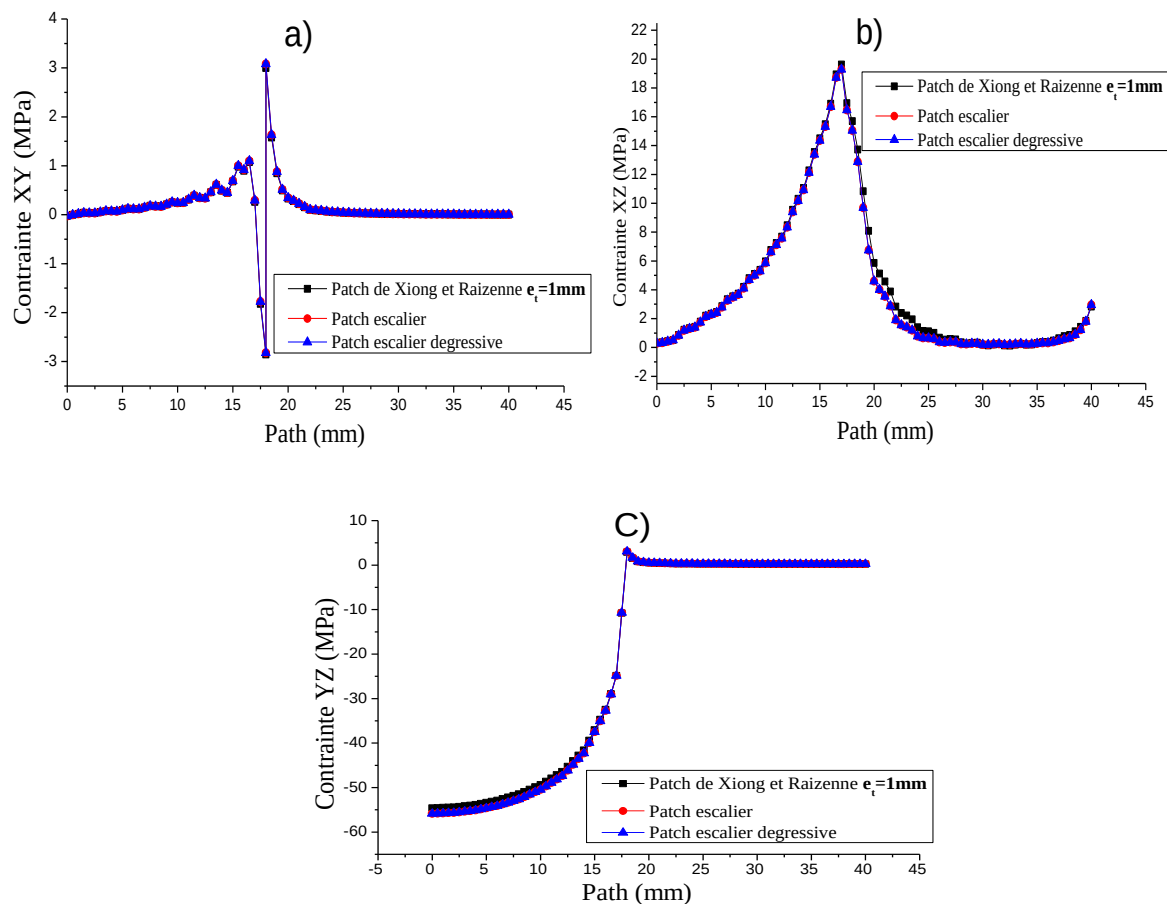


**Figure IV.33 :** Contraintes de cisaillement maximales obtenues par le modèle de Xiong et Raizenne et des modèles développés,  $\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}$ , (volume du patch réduit).

La performance de la réparation est comparée en termes de capacités de réduction des contraintes de cisaillement dans l'adhésif le long du trajet de propagation de la fissure (fig. IV.15). Les résultats, obtenus et illustré sur la figure IV.34, indiquent que ces contraintes sont très peu sensibles à la géométrie de l'épaisseur du patch composite. Cela montre explicitement que les patches conçus dans cette étude, de volume réduit, et ceux du modèle de patch Xiong et Raizenne, ont une efficacité comparable en termes de répartition des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive.

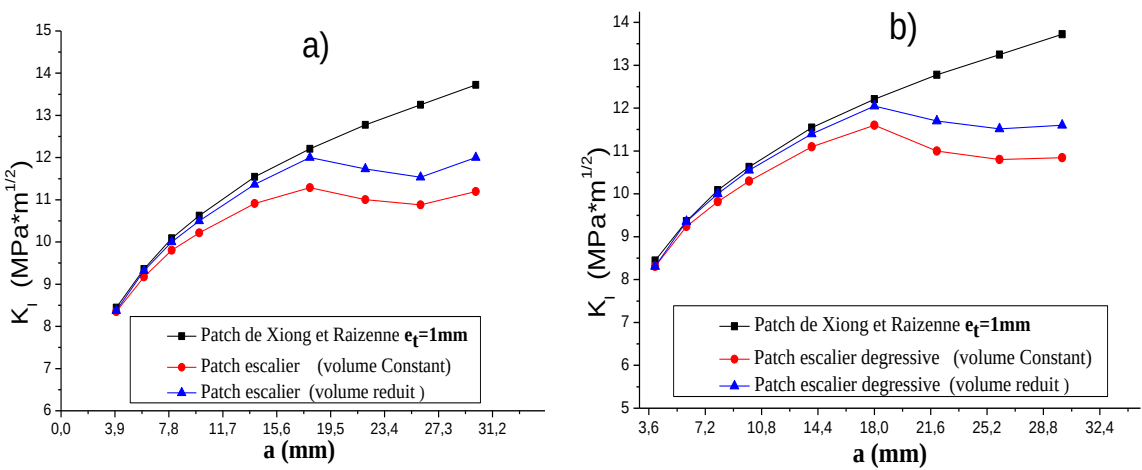
Les patches développés présentent l'avantage d'avoir un volume réduit (gain de masse) et surtout une épaisseur de géométrie aérodynamique, ce qui minimise le risque de décollement dû à des forces

excessives s'exerçant sur la zone réparée lors la mise en service des avions. Ces formes favorisent l'écoulement de l'air, et augmentent la probabilité de survie de la réparation, surtout, pour la réparation externe des structures d'avion.



**Figure IV.34 :** Contraintes de cisaillement le long du chemin de propagation de la fissure obtenue par le modèle de Xiong et Raizenne et des modèles développés,  $\sigma_{app}=150\text{ MPa}$ , (volume du patch réduit).

Enfin, dans le cadre de ce travail, il est intéressant de comparer et d'analyser les deux patches développés à volume réduit et à volume constant. L'analyse comparative montre qu'en termes de réduction du facteur d'intensité de contrainte en mode I de la face réparée, la réparation à l'aide des patches en escalier (volume constant) et des patches en escalier (volume réduit) présente des performances comparables (fig. IV.35a). Les valeurs de ce critère de rupture sont caractéristiques d'une telle illustration. Pour la réparation de fissures longues, la différence est égale ou inférieure à  $0,5\text{ MPa m}^{1/2}$ . On observe pratiquement le même comportement lors de la réparation, avec un patch en escalier digressif à volume constant et un patch en escalier digressif à volume réduit (fig. IV.35b).



**Figure IV.35:** Facteur d'intensité de contraintes en tête de fissure réparée par patches à volume constant et à volume réduit  
a) Patch en escalier b) Patch en escalier dégressif.

IV.2.1.5. Interaction nature du patch-contraintes dans la plaque et dans l'adhésif

L'un des paramètres physiques déterminant de la réparation est la rigidité du matériau de renfort, autrement dit son module d'élasticité. Sa performance en matière de réparation en termes de stabilité de la fissure par réduction du facteur d'intensité de contraintes constitue l'objectif de ce travail. Pour ce faire, la réparation a été effectuée en utilisant des patches de natures différentes, (tableau IV.3), collés à l'aide d'un adhésif de type FM73. Les modèles analysés ne se différencient que par la nature du patch composite de forme rectangulaire.

**Tableau IV.3 :** Modules d'élasticités des matériaux de réparation utilisés.

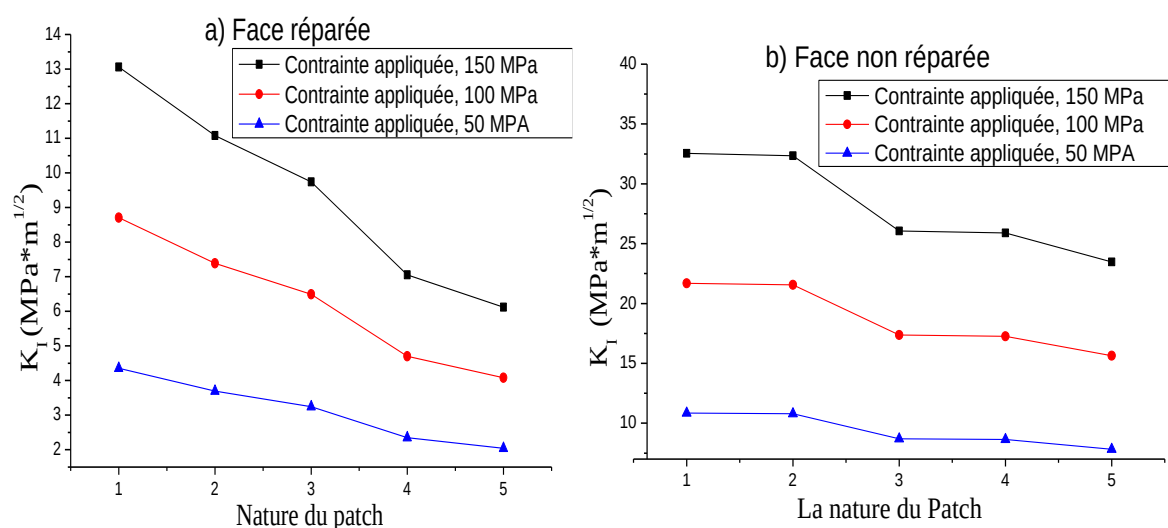
|                       | Matériau 1   | Matériau 2    | Matériau 3 | Matériau 4    | Matériau 5   |
|-----------------------|--------------|---------------|------------|---------------|--------------|
| Propriétés            | Verre/ Époxy | Aramide/Époxy | Al2024-T3  | Carbon/ Époxy | Boron/ Époxy |
| E <sub>1</sub> (MPa)  | 41500        | 69800         | 72000      | 153000        | 225000       |
| E <sub>2</sub> (MPa)  | 12400        | 5770          |            | 9100          | 11200        |
| E <sub>3</sub> (MPa)  | 12400        | 5770          |            | 9100          | 11120        |
| ν <sub>12</sub>       | 0.255        | 0.351         | 0.33       | 0.258         | 0.286        |
| ν <sub>13</sub>       | 0.255        | 0.351         | 0.33       | 0.258         | 0.286        |
| ν <sub>23</sub>       | 0.392        | 0.427         | 0.33       | 0.384         | 0.403        |
| G <sub>12</sub> (MPa) | 4650         | 2120          |            | 4570          | 4250         |
| G <sub>13</sub> (MPa) | 4650         | 2120          |            | 4570          | 4250         |
| G <sub>23</sub> (MPa) | 4450         | 1540          |            | 3150          | 4250         |

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures (IV.36 et IV.37). Il est à noter que les numéros 1 jusqu'à 5 indiqués sur l'axe X des figures IV.36, la disposition de la nature du patch telle qu'illustrée sur le Tableau IV.3. Il est clairement indiqué sur ces figures que l'efficacité et la performance de la

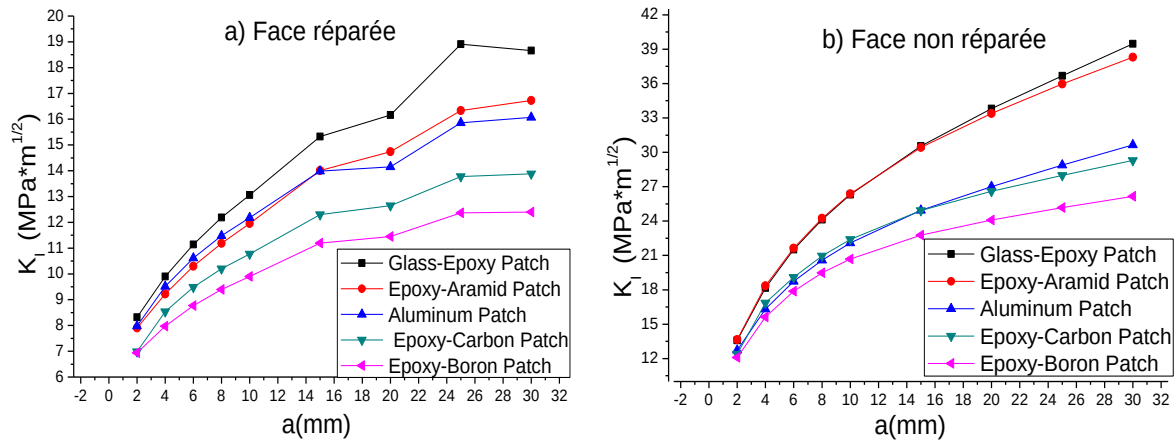


réparation est d'autant meilleures que le patch composite présente un module d'élasticité plus fort dans la direction de traction. Les plaques réparées à l'aide du patch de fortes résistances mécaniques, ici Boron/époxy, sont plus fiables et plus efficace en termes de réduction du facteur d'intensité de contrainte "FIC" de la face réparée et la face non réparée de la plaque (fig. IV.37). En effet, quelle que soit l'intensité de la contrainte appliquée, les patches plus résistants sont susceptibles d'absorber une grande quantité d'énergie mécanique fortement localisée aux fronts de fissuration ce qui conduit à une chute du facteur d'intensité de contraintes (fig. IV.36). Ce comportement est nettement plus marqué lorsque la réparation est effectuée à l'aide d'un patch plus rigide.

Les résultats obtenus montrent que la réparation devient de plus en plus efficace avec l'accroissement du module d'élasticité du patch composite. Ce comportement est très connu dans la littérature scientifique. Plusieurs chercheurs ont démontré l'efficacité de concevoir un patch plus rigide dans la direction du chargement appliqué. Ainsi, la fiabilité, la performance et la durabilité de la réparation sont, entre autres, étroitement liées à la rigidité du patch composite.



**Figure IV.36** : Effet de la nature du patch sur le du facteur d'intensité de contraintes :  $a=18\text{mm}$



**Figure IV.37** : Effet de la rigidité du patch sur le facteur d'intensité de contraintes d'une fissure réparée,  $\sigma_{app} = 150$  MPa,

Un fort module d'élasticité  $E_1$  permet l'utilisation du patch composite de faible épaisseur ce qui constitue un critère déterminant pour les réparations externes et minimise les effets néfastes dus à de fortes épaisseurs, telle que l'ouverture de la fissure du côté non réparé de la plaque. Un fort rapport épaisseur du patch et épaisseur de la plaque peut engendrer des contraintes additionnelles et conduire à l'instabilité en mode I du front de fissuration côté non réparé.

Ce phénomène est plus probable dans la réparation des structures d'avions. En effet, les épaisseurs élevées du patch composite présentent une grande résistance à l'écoulement de l'air. Les faibles épaisseurs du patch minimisent fortement le flambement élastique local de la plaque réparée et assurent une réparation plus efficace.

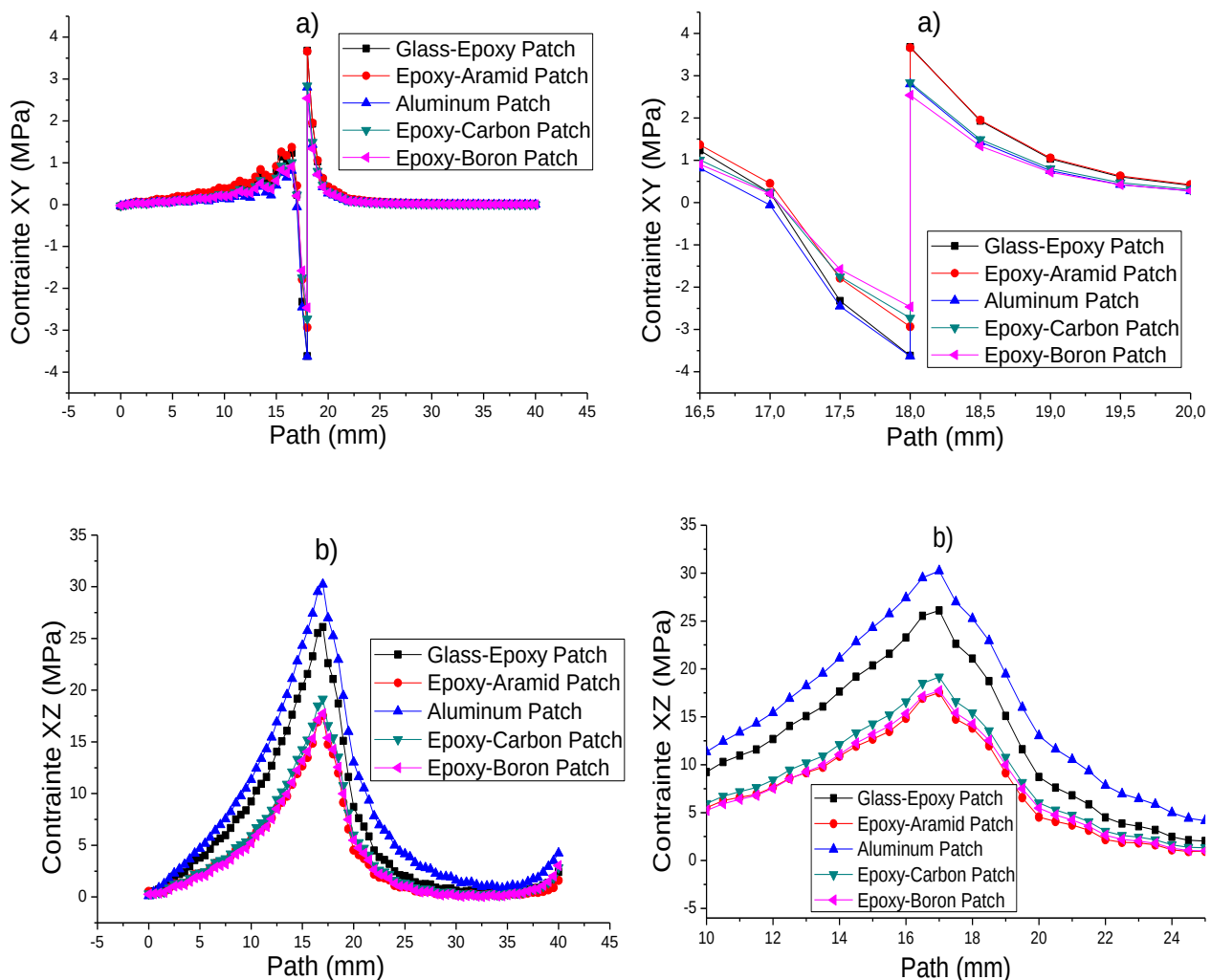
Les contraintes de cisaillement dans la couche adhésive ont été prélevées le long de la ligne, notée « Path » (fig. IV.15), autrement dit, le long de la trajectoire de la propagation de la fissure réparée. L'effet de la nature du patch composite (Module d'élasticité) sur le niveau et la répartition de ces contraintes est représenté sur la figure IV.38. L'analyse des résultats obtenus illustrent clairement que la réparation est d'autant plus efficace et plus performante, en termes de relaxation de ces contraintes que, si le patch composite présente un module d'élasticité élevé. En effet, les contraintes de cisaillement relatives respectivement aux plans XOY, XOZ et YOZ (fig. IV.38 a, b et c) dans la colle sont d'autant plus relaxées que la réparation est effectuée à l'aide du patchs composites de forte résistance mécanique.

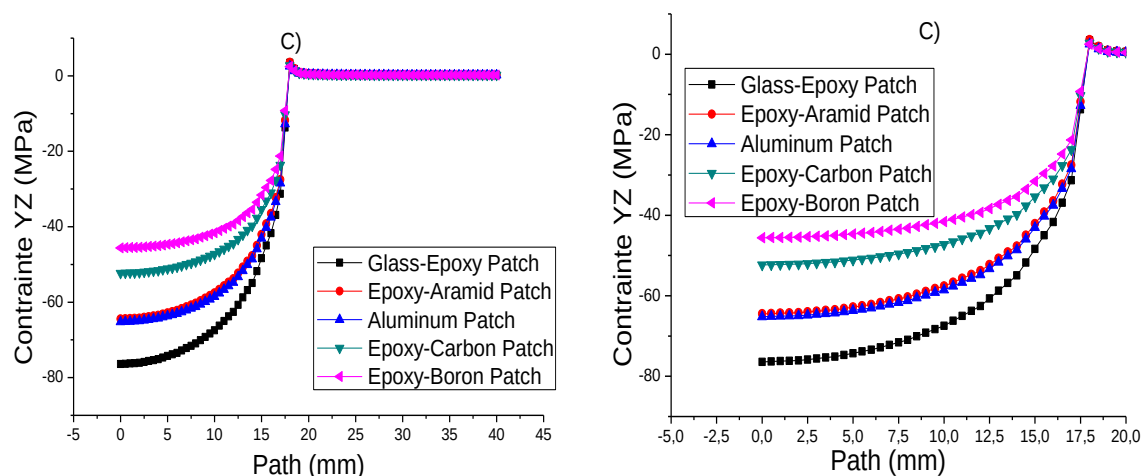
Comparativement aux contraintes propres aux plans XOY et XOZ (fig. IV.38a et IV.38b) de l'adhésif, celles engendrées dans le plan YOZ (fig. IV.38c) sont d'un niveau beaucoup plus important. C'est la partie centrale de la fissure qui est le siège des contraintes les plus fortes. Contrairement à un patch en verre-époxy, l'utilisation de patch en Boron-époxy permet une réduction, d'environ trois fois, des contraintes de cisaillement les plus importantes dans la couche adhésive.

## Chapitre IV : Modélisation par la MEF des structures des avions endommagées par fissuration et réparées par patch composite

En termes de réduction du facteur d'intensité de contraintes en pointes de fissure et des contraintes de cisaillement dans le joint adhésif, la réparation à l'aide d'un patch en Boron-époxy ou en Carbone-époxy est plus efficace et plus performante. Ce comportement donne la possibilité d'effectuer des réparations à l'aide de patch moins épais. La réduction de ce paramètre géométrique est une condition nécessaire à la réparation externe des structures d'avions. Elle minimise les forces de pression dans la direction de la vitesse relative du flux d'air dans le cas des structures aéronautiques. Le risque de décollement est plus probable quand la réparation est effectuée à l'aide des patches trop épais.

Il est noté qu'en France, il est actuellement interdit d'utiliser des fibres de bore qui est un matériau cancérigène. Le DGA (direction générale d'aéronautique) a pour le moment opté pour un renfort de type Carbone/époxyde dans ces études préliminaires.





**Figure IV.38 :** Effet de la nature du patch sur les contraintes de cisaillement dans l'adhésif prélevées le long du chemin de propagation de la fissure,  $\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}$ ,  $a = 18 \text{ mm}$

L'intensité et la répartition des contraintes maximales de cisaillement dans le joint adhésif, relative aux plans XOZ, XOY et YOZ, conjointement lié à un patch en carbone-époxy sont représentées sur les figures IV.39a, b et c respectivement. Les contraintes maximales propres aux plans XOZ et YOZ sont localisées sur les bords de cette colle. Celle dans le plan XOY est située au voisinage du front de fissure. Les contraintes induites dans les deux premiers plans sont d'une intensité extrêmement faible et ne constituent aucun risque de décollement du patch de la plaque fissurée (fig. IV.39a et IV.39b). Les contraintes de cisaillement induites dans le plan YOZ de la couche adhésive présentent des amplitudes élevées et peuvent conduire à l'endommagement de la jonction par rupture des liaisons interfaciale responsable de l'initiation et du développement du décollement. En effet, ces contraintes, engendrées par les déplacements trop importants de l'ouverture de la fissure dans la direction de traction uniaxiale peuvent être à l'origine du dommage du joint de colle interfaciale et donc à la ruine des assemblages patch/adhésif/plaque fissurée. Ce comportement est étroitement lié à la nature du matériau de réparation comme le montrent les figures (IV .40 a, b et c).

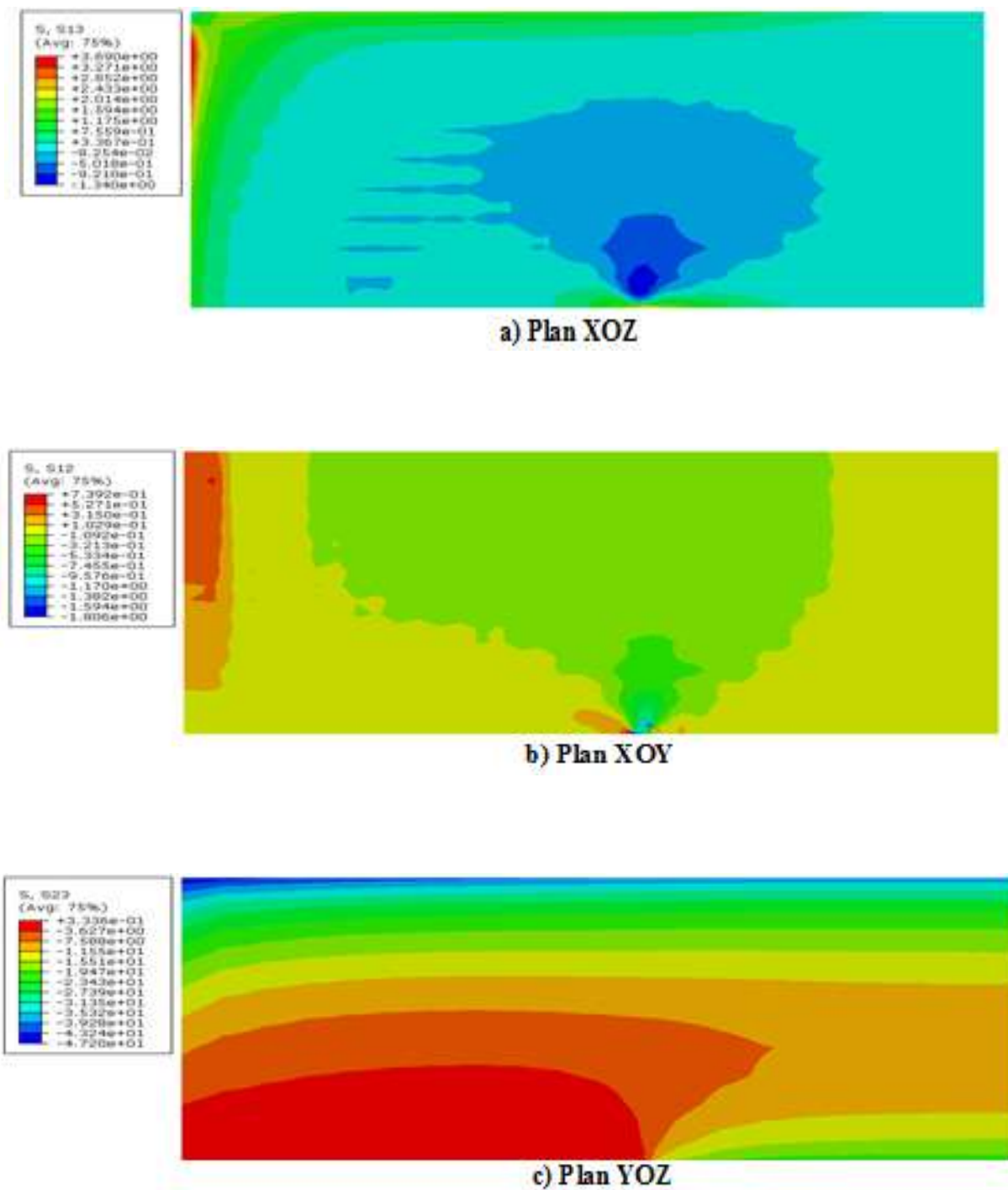
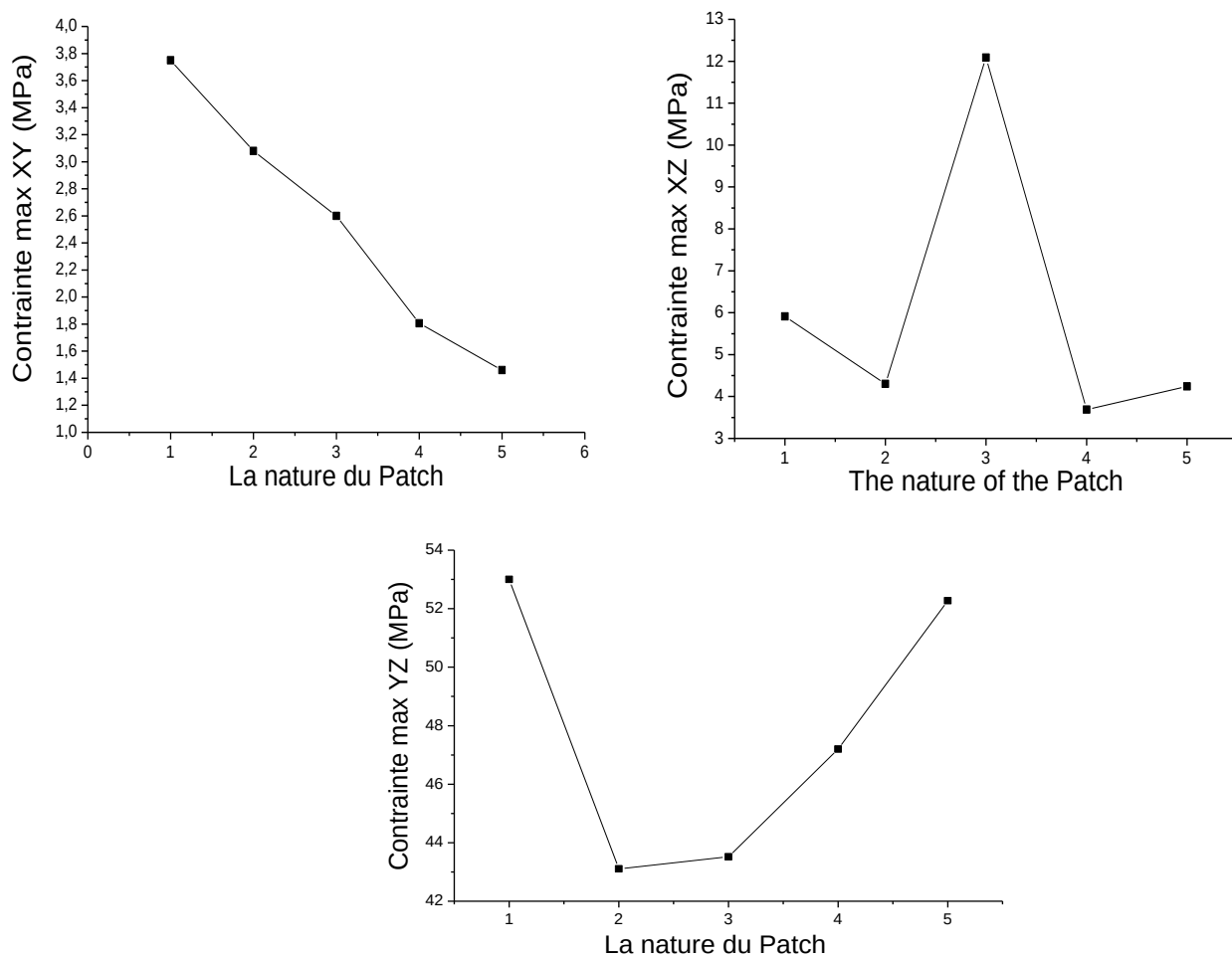


Figure IV.39. Niveau et distribution des contraintes dans la couche adhésive liant un patch Carbone-époxy à la plaque fissurée,  $\sigma_{app} = 150$  MPa,  $a = 18$  mm



**Figure IV.40 :** Effet du module d'élasticité du patch sur les contraintes maximales de cisaillement dans l'adhésif,  $\sigma_{app} = 150$  MPa,  $a = 18$  mm

#### IV.2.1.6. Interaction orientation des fibres du patch-contraintes dans la plaque et dans l'adhésif

Il est certain que la résistance mécanique des composites stratifiés est étroitement liée, non seulement à la nature de la fibre, à sa fraction volumique, mais également à l'orientation des plis. Dans ce cas, on distingue, deux modules de Young longitudinal et transversal " $E_L$  et  $E_T$ ", un module de cisaillement " $G_{LT}$ ", le coefficient de Poisson " $\nu_{LT}$ " (tableau IV.1) et l'épaisseur du pli en (mm) sont caractéristiques du stratifié (0,25 mm d'épaisseur pour chaque pli). Les composites stratifiés sont constitués d'une séquence d'empilement des plis imprégnés de matrice, chaque pli étant orienté par des fibres de constituant. Le patch composite retenu pour cette étude est le carbone-époxy dont les orientations des plis sont regroupées sur le tableau IV.4. Ce stratifié est utilisé comme patch composite dans le but d'analyser l'effet de cette orientation sur l'efficacité de la réparation en termes de réduction du facteur

d'intensité de contraintes en mode I. Les résultats ainsi obtenus sont illustrés sur la figure IV.41. L'analyse de cette figure indique que la performance de la réparation est d'autant plus affectée que l'orientation des plis est plus accentuée. Ceci montre que la réparation à l'aide du patch composite unidirectionnel est plus efficace et ce quels soient les efforts de tension appliqués à la plaque réparée.

Tableau IV.4 : Séquences d'empilements des plis du patch composite

| Strifié      | Orientation 1    | Orientation 2        | Orientation 3        | Orientation 4        | Orientation 5        | Orientation 6        |
|--------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Séquence     | [0] <sub>8</sub> | [0/15/               | [0/30/               | [0/45/               | [0/60/               | [0/75/               |
| D'empilement |                  | -15/90] <sub>s</sub> | -30/90] <sub>s</sub> | -45/90] <sub>s</sub> | -60/90] <sub>s</sub> | -75/90] <sub>s</sub> |

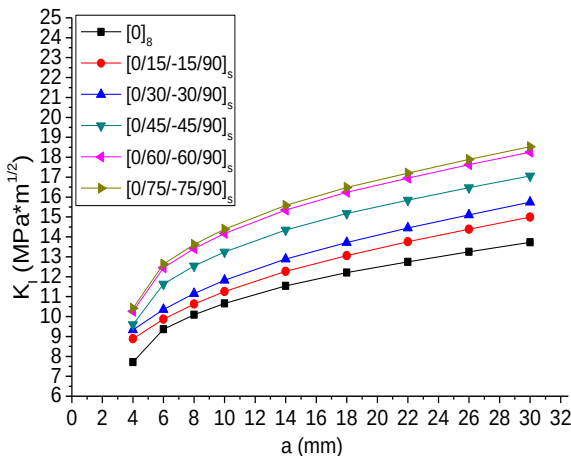
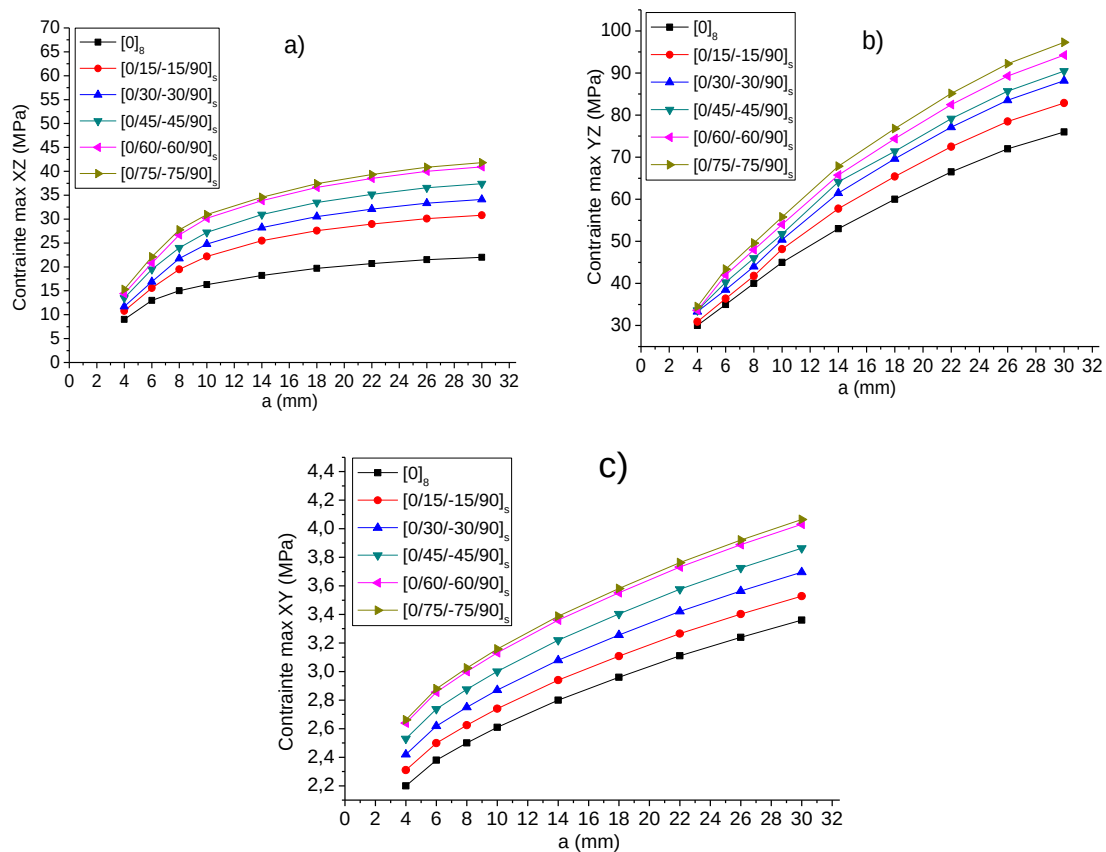


Figure IV.41 : Effet de l'orientation des plis du patch composite sur le facteur d'intensité de contraintes pour différentes fissures réparées :  $\sigma_{app} = 150\text{MPa}$

Les figures IV.41 et IV.42 montrent, quelle que soit la taille de la fissure réparée, l'utilisation de patch unidirectionnel comme matériau de réparation est beaucoup plus performante, en termes de réduction de l'énergie de rupture en pointes de fissures réparées et des contraintes maximales dans la couche adhésive, que les patches à empilements orientés. Ces deux paramètres physiques croissent avec l'accroissement des orientations des plis. Rappelons que la séquence d'empilement (0°), correspond à une orientation des fibres dans la direction de traction, (90°) à une orientation perpendiculaire à cette direction. Les résultats obtenus montrent que l'efficacité de la réparation est étroitement liée à la séquence d'empilement. La séquence (0°) conduit à une énergie de rupture la plus faible et à des contraintes maximales de cisaillement dans le joint adhésif les plus faibles. L'effet des différentes orientations des séquences d'empilement du matériau de réparation sur le niveau et la distribution des contraintes de cisaillement, analysées le long du chemin de propagation de la fissure (fig. IV.15), illustre

de façon nette que la réparation à l'aide du patch composite unidirectionnel est plus fiable, d'un point de vue réduction de ces contraintes tangentielles (fig. IV.43 a, b et c). Cette dernière représente la variation de l'intensité des contraintes  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{yz}$  et  $\sigma_{xy}$ , propres aux trois plans XOZ, YOZ, XOY de la colle respectivement, en fonction de la nature des séquences d'empilement.

Les résultats obtenus montrent que la performance, l'efficacité et la durabilité de la réparation, en termes de relaxation de l'énergie de rupture en pointes de fissures réparées et des contraintes de cisaillement dans le joint adhésif, dépendent de l'orientation des plis du patch composite. L'utilisation des patchs composites unidirectionnels comme matériaux de réparation est bénéfique en termes de réductions de ces deux paramètres physiques, caractéristiques de la fiabilité de la réparation. De tels composites offrent une excellente rigidité dans la direction des efforts de tension uniaxiale, sollicitant la fissure en mode I, et une faible rigidité dans les autres directions. Néanmoins, dans le cas d'un chargement complexe, de type par exemple biaxial, ou de fissures déviées, l'utilisation de patchs composites stratifiés à séquence d'empilement optimisés est souhaitée.



**Figure IV.42 :** Effet de l'orientation des plis du patch composite sur les contraintes de cisaillement maximales dans l'adhésif en fonction pour de différentes fissures réparées,

$$\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}$$



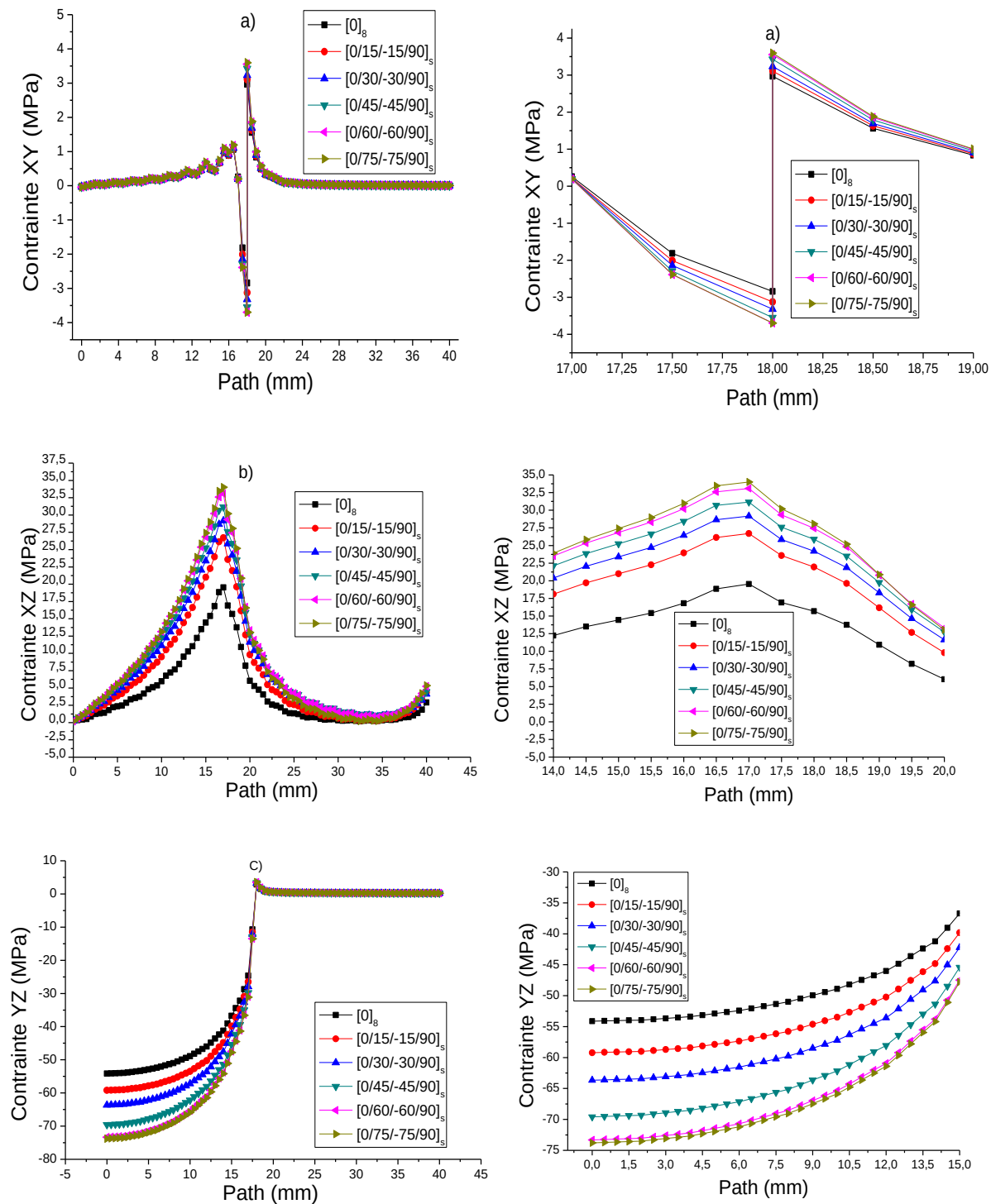


Figure IV.43 : Effet de l'orientation des plis du patch composite sur les contraintes de cisaillement dans l'adhésif relevées le long du chemin de propagation de la fissure,

$$\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}, a = 18 \text{ mm}$$

Il est clairement défini sur les figures IV.41, IV.42 et IV.43 que la performance de la réparation des fissures se propageant en mode d'ouverture (mode I) à l'aide d'un patch composites stratifiés à séquence d'empilement orientées, est médiocre. Les fortes contraintes normales de tension en pointes de fissure et les contraintes de cisaillement trop intenses dans la couche adhésive sont caractéristiques de cette inefficacité de la réparation. Les contraintes de cisaillement générées dans le plan YOZ de la colle dépassent largement le seuil de rupture en cisaillement. Ces contraintes conduisent inévitablement au dommage de l'adhésif par rupture des forces de cohésions interfaciales et par conséquent à la ruine des assemblages patch/adhésif/plaque fissurée. En effet, le transfert de charge, à travers la couche adhésive, de la plaque vers le patch est limité par la faible rigidité du matériau de réparation. Ces contraintes de tension et de cisaillement mécaniquement résiduelles non transférées vers le patch moins rigide sont responsables de l'endommagement de la réparation.

### IV.2.2 : Interaction adhésif-contraintes dans la plaque et dans la couche

La zone endommagée par fissuration de la plaque est conjointement liée au patch composite à l'aide d'un adhésif. Les adhésifs commerciaux sont le plus souvent des polymères phénoliques, acryliques, polyuréthannes, polyamides et époxydes. Le développement des adhésifs à hautes résistances mécaniques a facilité la généralisation de l'utilisation de la technique de réparation par patches composites en aéronautique, aérospatial, automobile, naval, hydrocarbure (pipelines), en génie civil (réparation d'ouvrage et la généralisation semble ouverte à d'autres applications industrielles). Généralement, la tenue mécanique interfaciale de la couche adhésive détermine la performance et l'efficacité de la réparation en termes de la durée de vie. La durabilité et la fiabilité des structures réparées par patches composites dépendent essentiellement du comportement mécanique de la couche adhésive. Celle-ci constitue le maillon le plus faible de la chaîne patch/adhésif/plaque fissurée et demeure pratiquement la cause essentielle de l'endommagement de la réparation par un mécanisme d'amorçage et croissance du décollement du patch. C'est pourquoi, la maîtrise du comportement mécanique de la couche adhésive, liant la plaque fissurée au patch composite, est d'une grande utilité pour la prédiction à long terme de l'endommagement de la réparation, proprement dite, lors de la mise en service de la plaque réparée.

L'adhésif est l'élément clé de la réparation, sa fonction est double : assurer un bon transfert d'énergie de la plaque fissurée vers le patch et une bonne adhérence mécanique entre le patch et la plaque. Ces deux fonctions fondamentales ne peuvent être remplies que si l'adhésif présente des propriétés mécaniques et géométriques bien définies.

#### **IV.2.2.1 Interaction nature de l'adhésif-contraintes dans la plaque et dans l'adhésif**

Les mêmes conditions de modélisation que les études précédentes ont été retenues pour cette étude. Les modèles analysés ne se différencient que par la nature et l'épaisseur du joint adhésif. Les adhésifs analysés sont regroupés sur le tableau IV.5.

Les résultats obtenus, en termes de relaxation de l'énergie de rupture et des contraintes maximales de cisaillement dans la colle, sont représentés sur les figures IV.44 et IV.45 respectivement. Ces deux figures illustrent clairement que le module de cisaillement est un paramètre déterminant de la performance de la réparation. En effet, il conditionne à la fois le niveau des contraintes en pointes de fissures et celui des contraintes de cisaillement dans le joint adhésif. La réparation à l'aide de colle de fort module de cisaillement conduit à une chute du facteur d'intensité de contraintes (fig. IV.44). Ce paramètre est d'autant plus faible que le patch composite est conjointement lié à la plaque fissurée à l'aide d'un adhésif plus rigide. Mais un tel adhésif conduit à une augmentation des contraintes de cisaillement comme le montrent les figures (IV.45 a, b et c). Ce comportement affecte considérablement le transfert des contraintes de la plaque vers le patch, l'accroissement des contraintes dans l'adhésif est caractéristique d'un tel comportement.

L'adhésif plus rigide, de résistance au cisaillement élevée, ralentit voire freine le transfert de charge en emmagasinant une forte proportion de l'énergie de rupture en têtes de fissures. Cette énergie stockée dans la colle sous forme de contraintes de cisaillement (fig. IV.45 a, b et c) peut être fatale à la réparation par rupture adhésive ou cohésive du joint et conduit au décollement du patch de la plaque par un mécanisme d'amorçage et de propagation et donc au dommage de la réparation.

Rappelons que ces contraintes illustrent les contraintes maximales de cisaillement, relatives aux plans XOY, XOZ et YOZ dans la colle localisée aux bords libres à l'interface plaque-adhésif. Ce risque est d'autant plus probable que les fissures de grandes tailles sont réparées à l'aide d'un adhésif de module de cisaillement élevé.

En raisonnant maintenant en contraintes de cisaillement induites, dans les plans XOY, XOZ et YOZ de la couche adhésive (figures IV.46 a, b et c), le long de la trajectoire de propagation de la fissure réparée (figure IV.15), les contraintes les plus fortes sont propres au plan YOZ. Cependant une réparation utilisant une colle ayant un module de cisaillement élevé est moins performante en termes de contraintes dans le joint adhésif. En effet, l'adhésif de hautes caractéristiques mécaniques (rigidité et résistance au cisaillement) minimise l'efficacité de la réparation par intensification des contraintes de cisaillement relatives au plan YOZ de la colle (figure IV.46a). Ces contraintes, fortement localisées aux

bords de l'adhésif, près de la zone centrale de la fissure, peuvent être source d'amorçage et de propagation du décollement du patch de la plaque fissurée. C'est dans cette partie que les déplacements à l'interface joint adhésif-plaque sont les plus considérables. Cette zone de fortes contraintes de cisaillement sont des sites privilégiés du dommage du joint adhésif par ruptures des forces de liaisons. Ces contraintes chutent progressivement d'intensité de cette zone vers le front de fissuration (fig. IV.46a), au voisinage de ces fronts, leur niveau est quasiment négligeable. L'intensité des deux autres contraintes propres aux plans XOZ et XOY est relativement faible et ne présente aucun risque d'endommagement de la réparation (fig. IV. 46b et IV.46c).

Les résultats obtenus montrent qu'un adhésif de module de cisaillement élevé conduit à une réduction du FIC et à un accroissement des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive. Autrement dit, il assure une bonne adhérence plaque fissurée-patch composite et un mauvais transfert de charges de la plaque vers le patch. La performance et la durabilité de la réparation nécessitent la réduction de ces deux paramètres physiques. Ainsi, le module de cisaillement du joint adhésif doit être optimisé afin d'avoir à la fois un bon transfert d'énergie mécanique et un bon accrochage mécanique caractérisé par une forte énergie d'adhésion.

**Tableau IV.5** Propriétés mécaniques des différents adhésifs

| <b>Adhésifs</b>       | <b>Module d'élasticité (GPa)</b> | <b>Module de cisaillement (GPa)</b> | <b>Coefficient de poisson</b> | <b>Résistance au cisaillement (GPa)</b> |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Redux K-6</b>      | 3.44                             | 1.27                                | 0.360                         | 0.056                                   |
| <b>AF-6</b>           | 0.125                            | 0.042                               | 0.494                         | 0.027                                   |
| <b>MN3C</b>           | 0.036                            | 0.010                               | 0.498                         | 0.017                                   |
| <b>Epon VIII</b>      | 3.502                            | 1.241                               | 0.412                         | 0.042                                   |
| <b>Méthlbond 4021</b> | 0.044                            | 0.015                               | 0.497                         | 0.031                                   |
| <b>FM-47</b>          | 2.240                            | 0.806                               | 0.385                         | 0.026                                   |
| <b>Epon 422 J</b>     | 2.723                            | 1.103                               | 0.294                         | 0.038                                   |
| <b>FM-1000</b>        | 1.240                            | 0.442                               | 0.408                         | 0.055                                   |

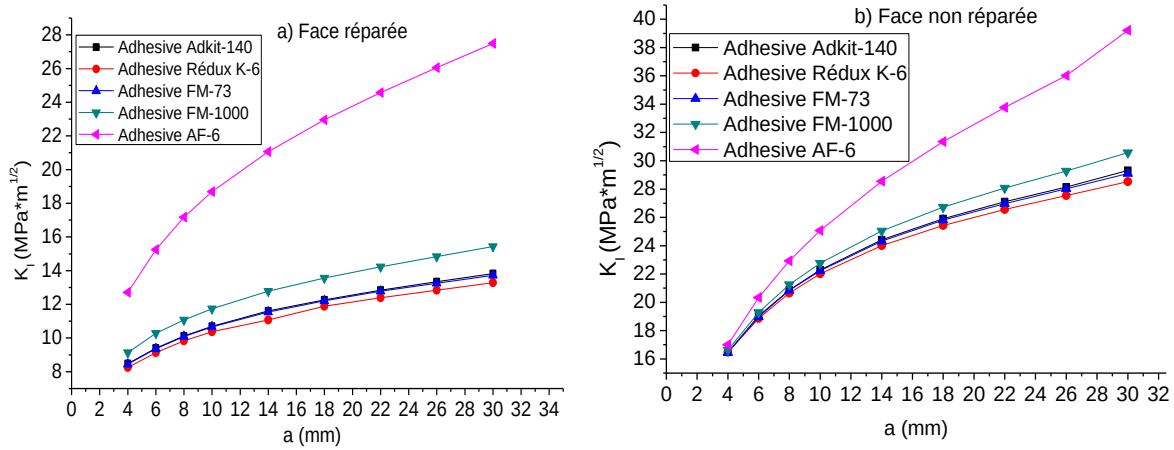


Figure IV.44: Effet de la nature du joint adhésif sur facteur d'intensité de contraintes en fonction de différentes tailles de fissures réparées :  $\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}$

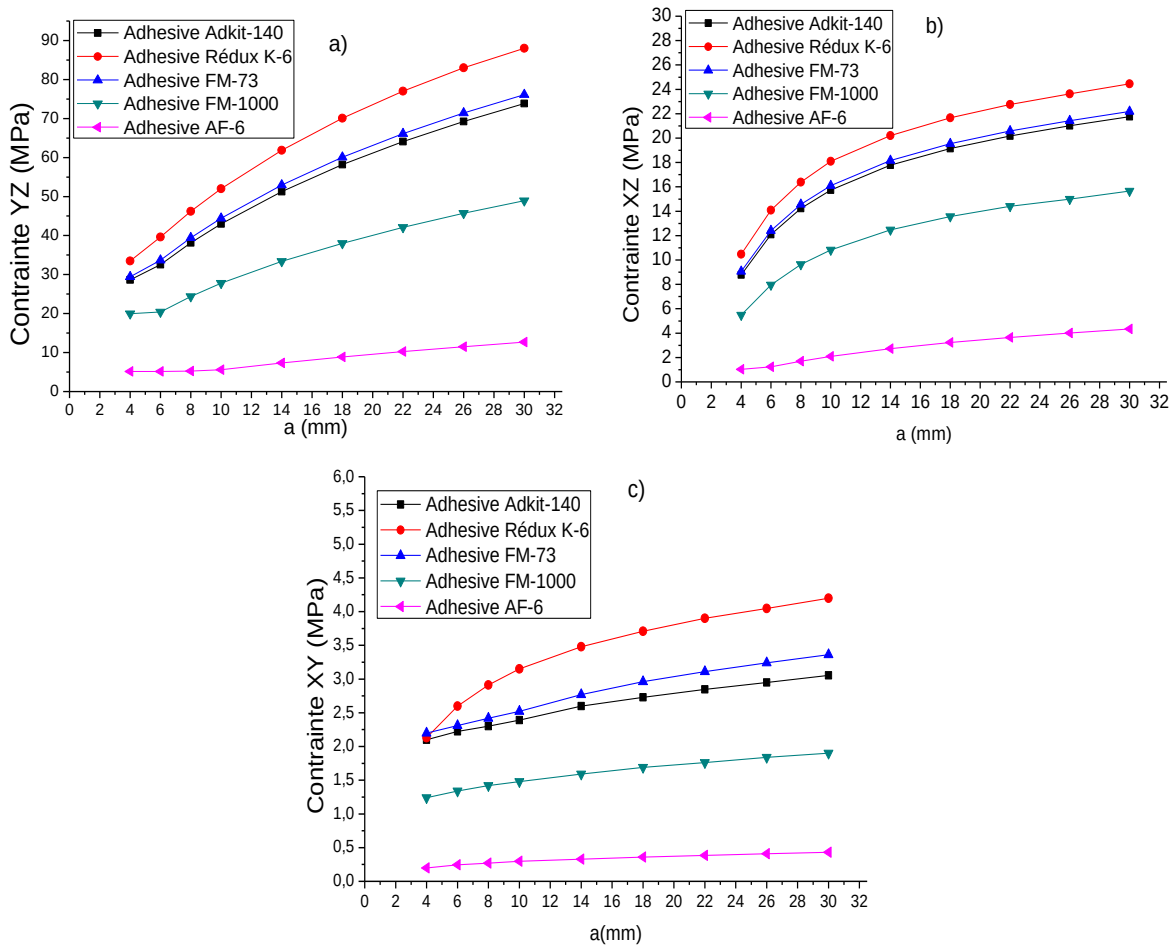


Figure IV.45 : Effet de la nature du joint adhésif sur les contraintes de cisaillement maximales dans l'adhésif en fonction de différentes tailles de fissures réparées :  $\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}$

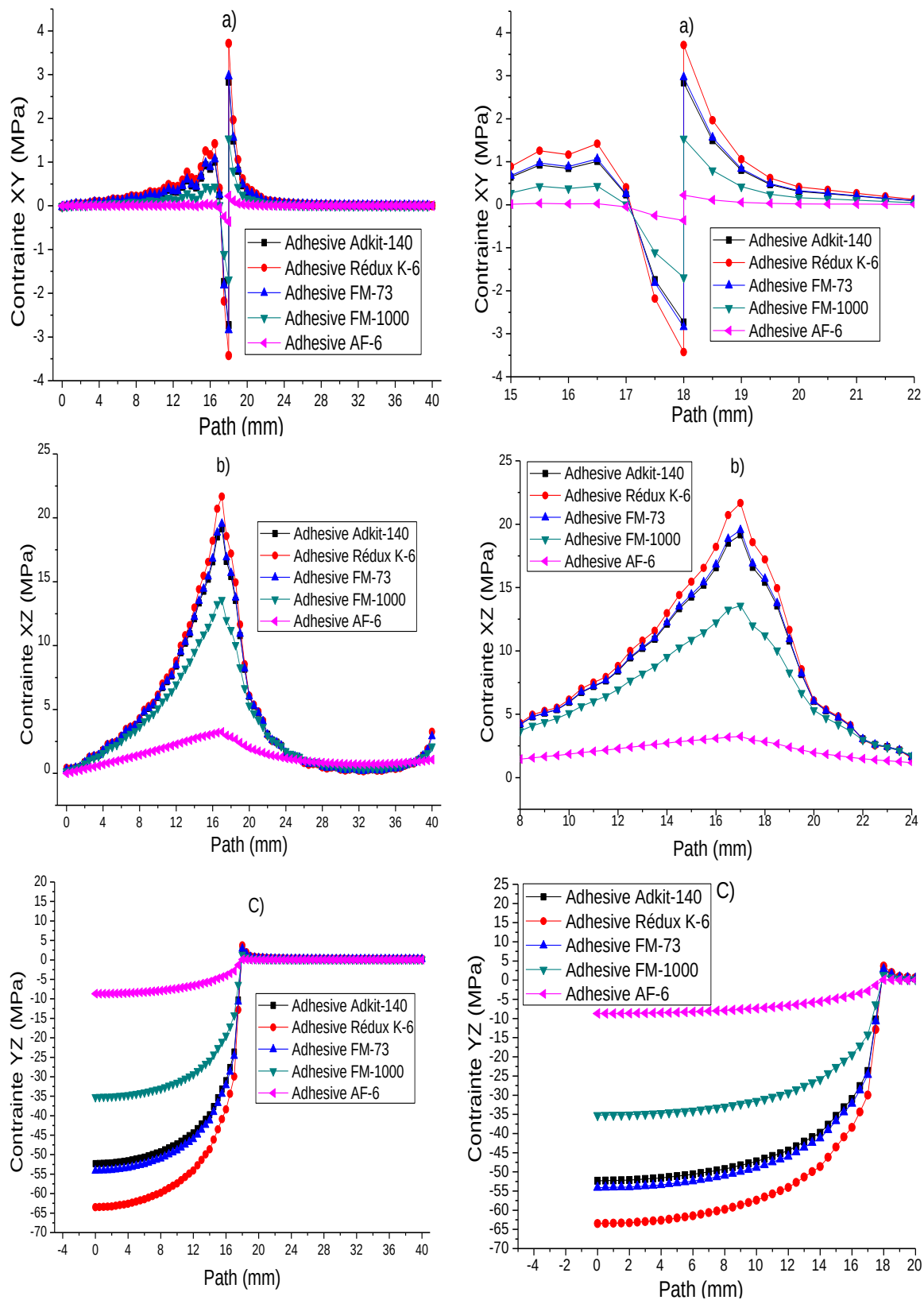


Figure IV.46 : Effet de la nature de l'adhésif sur les contraintes de cisaillement générées le long du chemin de propagation de la fissure  $\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}$ ,  $a = 18 \text{ mm}$ .

#### **IV.2.2.2 Interaction épaisseur de l'adhésif-contraintes dans la plaque et dans l'adhésif**

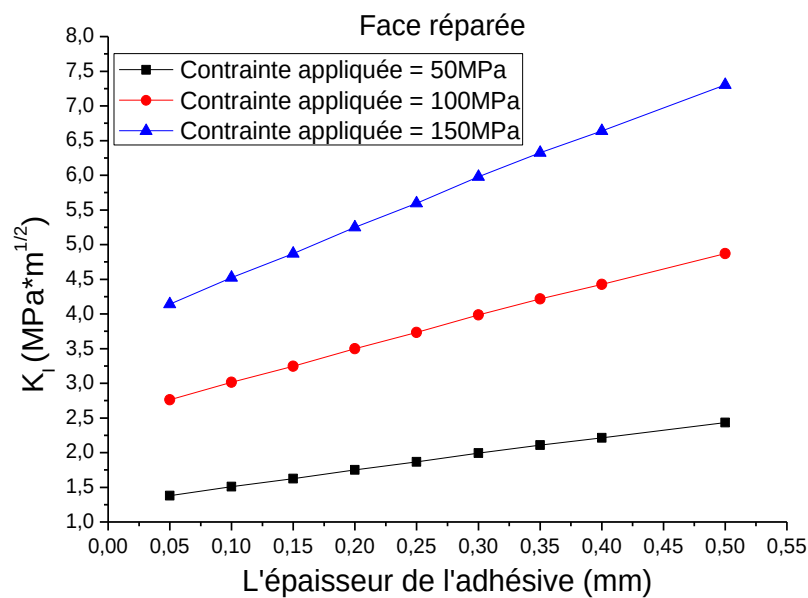
Les résultats obtenus précédemment montrent de façon explicite que la rigidité de la couche adhésive est un paramètre physique clé de la performance et la fiabilité de la réparation en termes de réduction des contraintes normales de tension en pointes de fissure et des contraintes de cisaillement dans le joint de la colle. L'épaisseur de l'adhésif est un paramètre géométrique caractéristique de la rigidité de ce matériau. A cet effet, il est nécessaire d'analyser le rôle de l'épaisseur de ce matériau sur la qualité de la réparation en termes de réduction de l'énergie de rupture en pointes de fissure et des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive. Pour ce faire, une plaque, de même taille que celle analysée précédemment, contenant une fissure  $a=18\text{mm}$ , est réparée à l'aide d'un patch en Carbone époxy, de taille  $H_p=40\text{mm}$ ,  $W_p=80\text{mm}$ , conjointement liée à l'aide d'un adhésif FM73. Les mêmes conditions de simulation que celles utilisées auparavant ont été retenues. Les modèles analysés ne se différencient que par l'épaisseur de la couche adhésive. Il en résulte le comportement illustré sur les figures (IV.47, IV.48 et IV.49).

La figure IV.47, illustrant la variation du facteur d'intensité en pointes de fissures réparées en fonction de l'épaisseur de l'adhésif, montre explicitement que cette épaisseur est un paramètre fondamental de l'efficacité de la réparation. L'énergie de rupture en pointes de fissures est d'autant plus élevée que le patch est conjointement lié à la plaque à l'aide d'un adhésif épais et ce quelle que soit l'intensité de chargement appliqué. Autrement dit, une augmentation de ce paramètre géométrique conduit à une intensification des contraintes normales de tension en pointes de fissure réparée. Ceci illustre bien que l'utilisation d'adhésif mince favorise la relaxation de l'énergie mécanique aux fronts de fissuration et défavorise celle des contraintes de cisaillement les plus importantes relatives aux plans XOZ, et YOZ, dans la colle (fig. IV.48b, c et fig. IV.49.b et c). Les contraintes tangentielles propres au plan XOY sont extrêmement faibles et ne constituent aucun risque de décollement (fig. IV.48a, et IV.49a).

Nos résultats sont conformes avec ceux obtenus par d'autres études [29,154] montrant que l'épaisseur de l'adhésif détermine l'efficacité de la réparation en termes de relaxation des contraintes normales en pointes de fissures. Les adhésifs épais freinent le transfert de charge de la plaque vers le patch et favorisent le risque de pelage et de sa rupture cohésive. Pour minimiser ces contraintes, la réparation doit être effectuée à l'aide d'un adhésif mince dont l'épaisseur varie entre 0,2mm et 0,4mm.

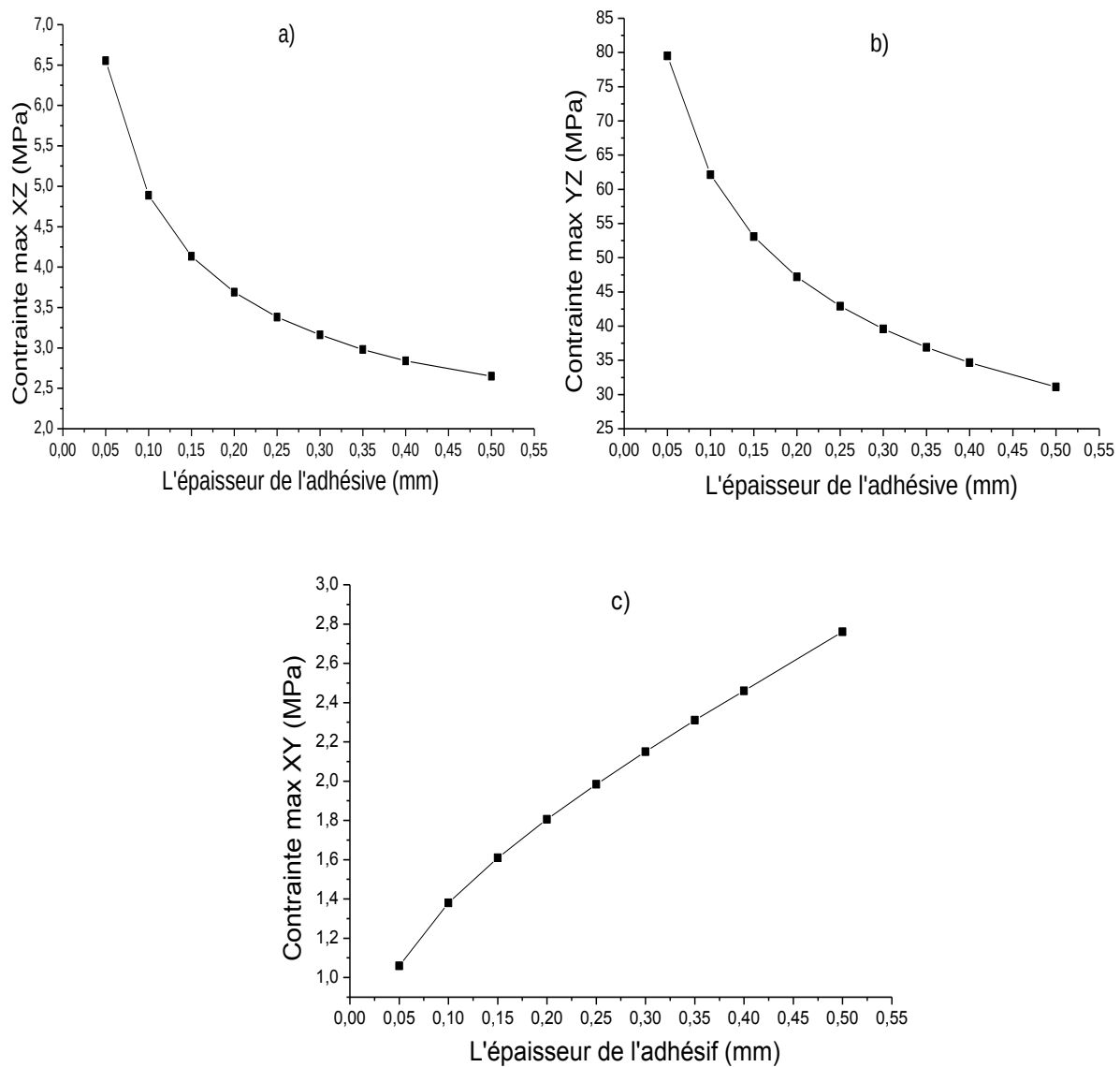
En termes d'efficacité de la réparation, l'épaisseur de la couche adhésive doit être à son tour optimisée pour l'obtention des paramètres mécaniques (énergie de rupture et contraintes de cisaillement) optimales permettant, à la fois, de minimiser les contraintes normales de tension en têtes de fissure réparée et les contraintes de cisaillement dans le joint adhésif et en même temps assurer un bon transfert de charge. Ceci ne peut se faire qu'en optimisant la rigidité de la colle.

Enfin, les résultats obtenus montrent, qu'il existe une interaction, caractéristique de la rigidité, entre le module de cisaillement de l'adhésif et de son épaisseur. Cette interaction correspondant au minimum d'énergie de rupture en pointes de fissure pour une épaisseur minimale et un module de cisaillement de l'adhésif maximal. Autrement dit, cette épaisseur optimisée et ce module optimisé conduisent à une rigidité de l'adhésif optimale. Un adhésif rigide conduit, d'une part, à une intensification des contraintes de cisaillement dans les plans XOZ, et YOZ de la colle, et d'autre part, à une réduction de transfert de charge vers le patch composite.



**Figure IV.47 :** Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur le facteur d'intensité de contrainte,  $a=18\text{mm}$





**Figure IV.48 :** Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur les contraintes maximales de cisaillement dans l'adhésif :  $\sigma_{app} = 150 \text{ MPa}$ ,  $a = 18 \text{ mm}$

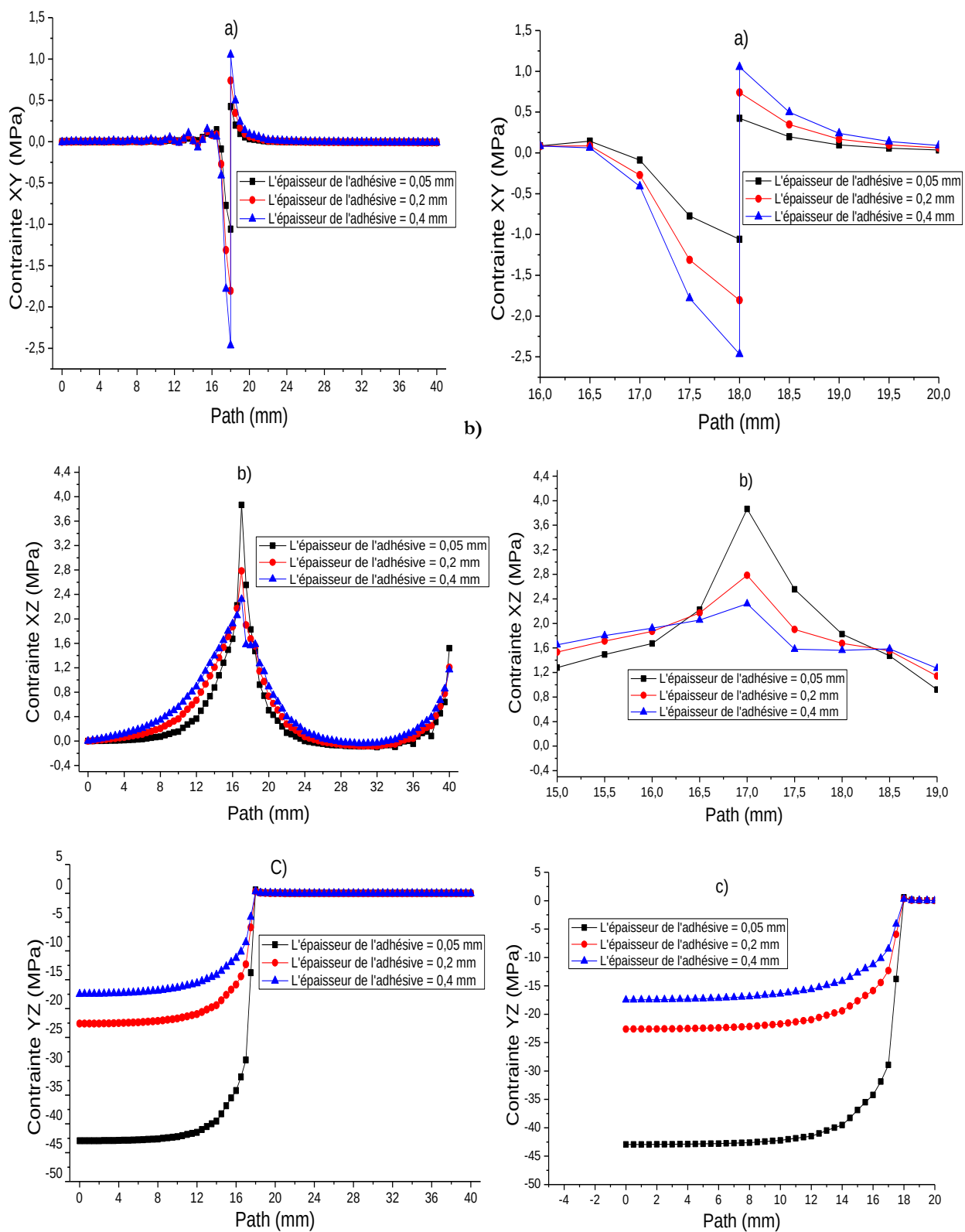


Figure IV.49 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur les contraintes de cisaillement dans l'adhésif générées le long du chemin de propagation de la fissure :  $\sigma_{app} = 150\text{MPa}$ ,  $a=18\text{mm}$

### **IV.2.3 : Interaction propriétés de la plaque-contraintes dans la plaque et dans l'adhésif**

Dans cette partie du travail, les mêmes conditions de simulation que celles utilisées précédemment ont été retenues pour analyser l'effet du module d'élasticité de la plaque fissurée et réparée et de son épaisseur sur la durabilité et la fiabilité de la réparation. Ces dernières sont étudiées en termes de relaxation de l'énergie de rupture en têtes de fissures réparées et des contraintes tangentielles dans la couche adhésive. Pour ce faire, Une structure contenant une fissure centrale de taille «  $a = 18\text{mm}$  » est conjointement collée à un patch, en carbone-époxy d'épaisseur 2mm, à l'aide d'un adhésif FM 73 d'épaisseur 0.2mm. Dans cette simulation, les modèles analysés ne se différencient que par la nature de la plaque (module d'élasticité) et de sa géométrie (épaisseur).

#### **IV.2.3.1. Interaction épaisseur de la plaque-contraintes**

L'effet de l'épaisseur de la plaque sur le facteur d'intensité de contrainte en pointes de fissures réparées est illustré sur la figure IV.50. Cependant ce critère de rupture est d'autant plus important que la structure réparée, avec la même nature du patch, est épaisse. Ce comportement est plus marqué lorsque la contrainte de tension uni-axiale est plus intense. Sur la face réparée la présence du patch composite réduit considérablement les contraintes normales de tension en pointes de fissure.

La réparation des plaques minces est beaucoup plus fiable en termes de réduction du critère de rupture en têtes de fissures réparées et ce quel que soit l'amplitude des contraintes appliquées. Ceci montre que l'épaisseur de la structure réparée est un paramètre clé de la performance de la réparation (figure IV.50). L'effet de l'épaisseur de la structure fissurée et réparée sur le niveau des contraintes de cisaillement, induites dans les plans XOY, XOZ et YOZ de l'adhésif est évalué le long du chemin de propagation de la fissure notée « Path » (fig. IV.15), et est illustré sur la figure IV.52. Il est clairement indiqué sur cette figure que la réparation des structures épaisses engendre des contraintes tangentielles les plus importantes. Les contraintes normales de tension fortement concentrées en pointes fissures réparées non transférées, à travers la couche adhésive, au patch composite en sont la cause essentielle. Les contraintes les plus intenses sont propres au plan YOZ (fig. IV.52c) et sont localisées au voisinage proche des lèvres de la fissure. Cette partie de la structure, correspondant à celle où les déplacements sont les plus importants (ouverture de la fissure), constituent une source d'amorçage et de propagation du décollement interfaciale entre le joint adhésif et la plaque. En effet, les contraintes de cisaillement locales, engendrées dans cette zone, dépassent largement le seuil de rupture en cisaillement de ce joint et conduisent au dommage de l'adhésif par une décohésion interfaciale liée à la rupture des forces de

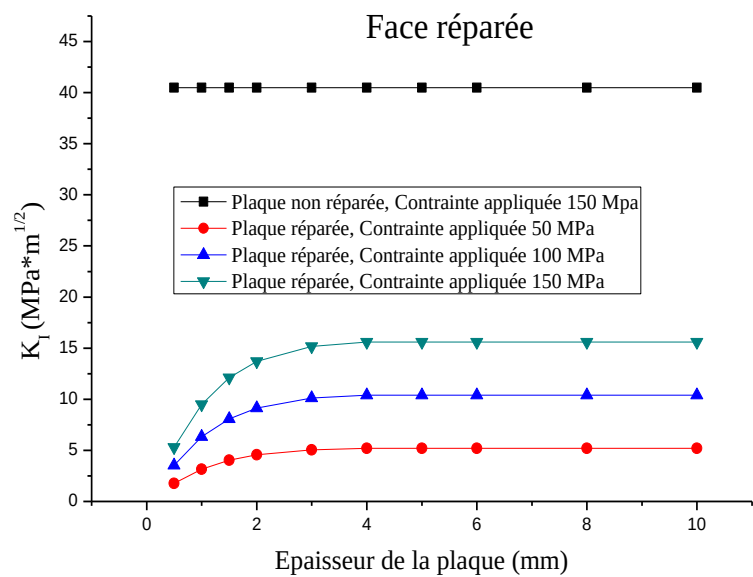
liaisons cohésives (décollement). Ce décollement s'accompagne de la propagation de la fissure réparée. Ce comportement est fort probable lorsque la structure réparée est épaisse.

Pour représenter de façon claire l'effet de l'épaisseur de la structure réparée, sur la figure IV.51 est indiquée la variation du facteur d'intensité de contrainte en pointe de fissure de la face non réparée en fonction de ce paramètre géométrique. L'analyse de cette figure montre, que comparativement à la structure non réparée, l'efficacité du patch composite est observée pour les plaques minces d'épaisseurs inférieures à 4,5mm. Autrement dit, le transfert des contraintes locales de tension en tête de fissure réparée de la plaque vers le patch composite, à travers la couche adhésive, s'effectue sur des distances bien inférieures à 4,5mm. A cette distance, l'énergie de rupture en pointe de la fissure de la plaque non réparée correspond à celle de la fissure de la face non réparée « opposée à la zone comportant un patch ». Pour une telle épaisseur, la présence du patch n'influe pratiquement pas sur le comportement de la fissure sur la face non réparée, et le front de fissure de cette face est d'autant plus instable que la plaque est épaisse. L'écart observé entre valeurs du facteur d'intensité de contrainte en tête de fissure de la face non réparée et celles résultantes de la structure non réparée, est essentiellement dû aux efforts du flambement de la plaque réparée causés par la forte rigidité du patch composite (fig. IV.51). Ce phénomène est en grande partie responsable de l'ouverture de la fissure sur la face non réparée de la plaque.

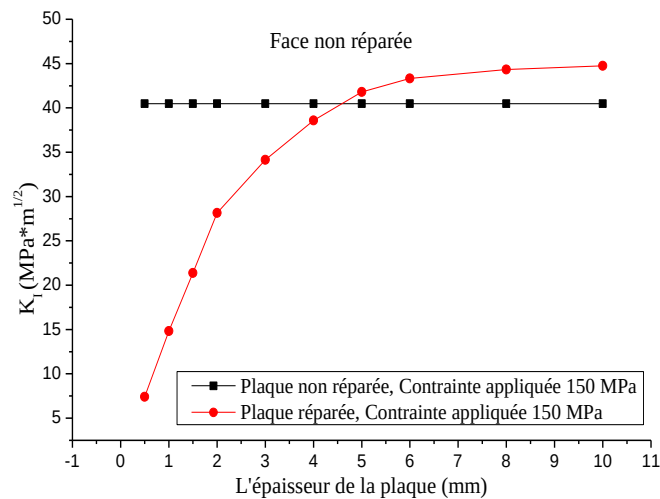
Les résultats illustrés sur les figures (IV.51 et IV.52), montrent que la réparation par simples patches composites des structures épaisses est fortement déconseillée parce qu'elle engendre un fort accroissement des contraintes de cisaillement dans le film adhésif et favorise la propagation de la fissure de la face non réparée opposée à celle contenant le patch composite (fig. IV.51).

Ce comportement semble s'expliquer par le fait que sous l'effet des contraintes appliquées le déplacement de la face non réparée est trop important par rapport à celle réparée par patch composite. Comparativement au côté réparé où la présence du patch composite freine, par sa haute rigidité, le développement de la fissure, cette même fissure sur la face non réparée étant plus libre (absence d'efficacité du patch) se propage sans résistance et, la présence de patch sur le côté réparé accélère cette croissance. Plus on s'éloigne de la zone de non transfert de contraintes de la fissure réparée vers le patch, plus la cinétique de propagation de la fissure de la face non réparée croît et peut conduire à la rupture brutale de la structure. Ceci montre clairement que la réparation par simple patch des fissures transversales amorcées dans des structures épaisses peut accélérer leur instabilité sur le côté non réparé. Les contraintes normales de tension, responsables de la propagation en mode I, non transférées au

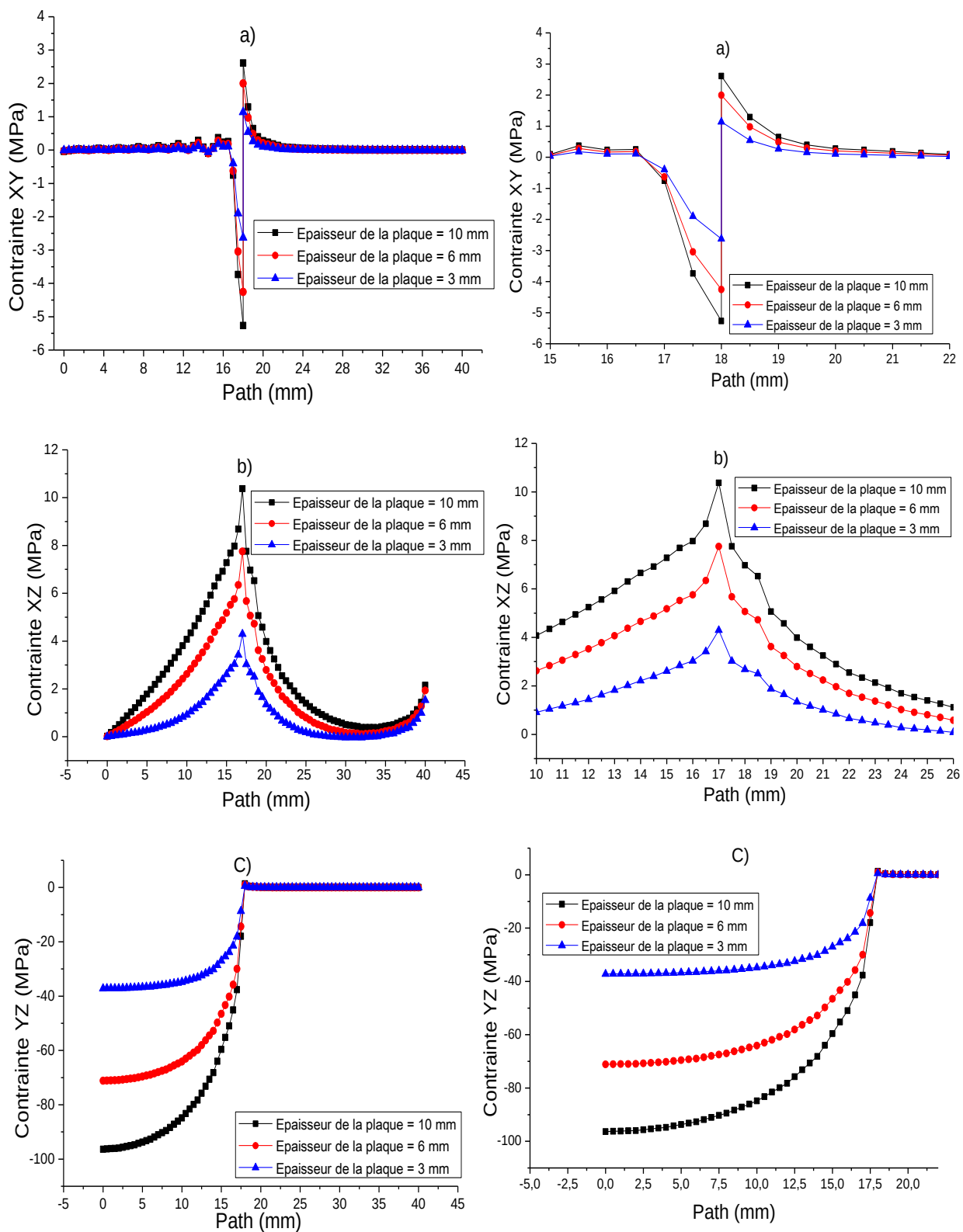
patch composite à travers le joint adhésif, sont à l'origine d'une telle croissance de la fissure. Ceci limite l'utilisation de la réparation par simple patch des structures épaisses.



**Figure IV.50 :** Effet de l'épaisseur de la plaque fissurée réparée par simple patch sur facteur d'intensité de contrainte de la face réparée pour de différents chargements,  $a=18\text{mm}$ ,  $e_{\text{patch}} = 2\text{ mm}$



**Figure IV.51 :** Effet de l'épaisseur de la plaque sur le facteur d'intensité de contraintes de la face non réparée pour de différents chargements intensité de contrainte :  $a=18\text{mm}$ ,  $e_{\text{patch}} = 2\text{mm}$



**Figure IV.52 :** Effet de l'épaisseur de la plaque réparée par simple patch sur les contraintes de cisaillement dans l'adhésif relevées le long du chemin de propagation de la fissure e patch =2mm,  $\sigma_{app} = 150\text{MPa}$ ,  $a=18\text{mm}$ .

Pour minimiser le risque de propagation de la fissure de la face non réparée et réduire les contraintes de cisaillement dans le joint adhésif, la double réparation par patch composite s'avère une solution fiable et adéquate comme le montrent les figures (IV.53 et IV.54). Les deux faces de la structure endommagées sont réparées à l'aide d'un double patch composite symétrique. Les résultats représentés sur ces figures confirment, d'une part, ceux obtenus par Beker et al [2,3] et Bachir Bouiadjra et al [28] et Rose [155]. En effet, le facteur d'intensité de contraintes, en pointe de fissure réparée par simple patch, varie de façon asymptotique avec l'accroissement de l'épaisseur de la plaque, et ceci montre l'effet bénéfique de la double réparation des structures et particulièrement des structures épaisses. Dans ce cas, le facteur d'intensité de contraintes, chute considérablement. Ce comportement illustre clairement que comparativement à la réparation externe, la double réparation est beaucoup plus performante, en termes de réduction de l'énergie de rupture en pointe de fissure réparée. Cette relaxation d'énergie, due au double transfert de contraintes de la zone endommagée vers les patches, est observée quelle que soit la taille de la fissure réparée. Ainsi, nos résultats confirment ceux résultant des travaux de Klug et al [156], Madani et al [157], Ouinas [23, 158]. Il est tout à fait clair que la réparation externe et interne permette d'éliminer les effets néfastes des contraintes de flexion de la structure (flambement externe) dues à la réparation par simple patch. Ces contraintes pouvant conduire, dans le cas d'une simple réparation, à l'instabilité, par augmentation de l'énergie de rupture en tête de fissure de la face non réparée, totalement relaxée par la réparation symétrique des zones internes et externes de la structure. La double réparation défavorise le flambement de la structure.

L'effet de la double réparation sur l'amélioration de la durée de vie des structures fissurées, en termes de relaxation des contraintes de cisaillement relatives aux plans XOY, XOZ et YOZ, engendrées dans la couche adhésive au voisinage très proche de la fissure réparée (fig. IV.15), est représenté sur la figure IV.55. Ces dernières montrent d'une façon explicite que la réparation par double patch (externe et interne) est beaucoup plus performante et plus efficace que la simple réparation (simple patch). En effet, ces contraintes tangentielles sont fortement relaxées dans le cas d'un dédoublement de la réparation.

Les résultats obtenus dans le cas d'une double réparation avec un volume de patch doublement plus important que la simple réparation (simple patch), montrent que la double réparation, par patch symétrique, améliore nettement, en termes de réduction de l'énergie de rupture en pointe de fissure réparée "FIC" et des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive, la durée de vie des structures fissurées. Ce comportement a été observé par Klug et al [156]. Le taux de réduction, atteignant les 50% pour la réparation des structures épaisses (épaisseur=10mm), est caractéristique de la stabilité des fissures transverses initiées dans des plaques d'épaisseurs importantes.

Quelle que soit l'épaisseur de la structure fissurée, le facteur d'intensité de contrainte en pointe fissure doublement réparée est très peu sensible à la variation d'épaisseur du patch (fig. IV.56). Une double réparation, avec conservation de volume de patch, est moins performante que la simple réparation, d'un point de vue relaxation des contraintes de cisaillement dans la colle, que celle utilisant des matériaux de réparation doublement plus épais, comme illustrée sur les figures (IV. 57a, b et c). Ces deux figures (IV.56 et IV.57) montrent nettement que l'effet de l'épaisseur du patch n'apparaît que dans le joint de colle. Les contraintes tangentielles propres aux plans XOY, XOZ et YOZ, induites dans le joint adhésif lors de la double réparation symétrique par patch composite deux fois moins épais que celui utilisé dans la simple réparation, sont légèrement différentes. Ceci montre clairement que la performance de la double réparation, en termes de réduction de l'énergie de rupture en tête de fissure et des contraintes de cisaillement dans la colle, utilisant un patch deux fois plus épais est comparable à celle résultant d'un patch deux fois plus mince comme l'illustrent les figures IV.57et IV.58b. En effet les valeurs du facteur d'intensité de contraintes en pointe de fissure réparée doublement à l'aide de patches d'épaisseurs deux fois plus grandes sont quasiment comparables à celles résultant d'une réparation externe et interne utilisant des patches d'épaisseur réduite de moitié.

Il est explicitement indiqué sur la figure IV.58b, que lors de la double réparation, le transfert des contraintes dues à la singularité de la fissure se fait à grandes distances des zones endommagées aux patches composites. Ce comportement est défini par la très faible variation du facteur d'intensité de contraintes le long de l'épaisseur de la plaque (fig. IV.58a).



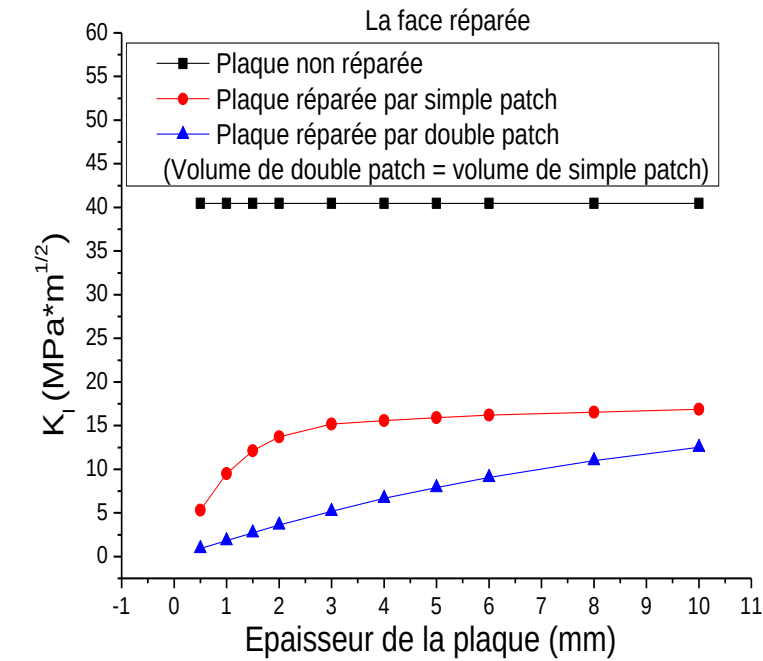


Figure IV.53 : Effet de la simple et double réparation sur le facteur d'intensité de contrainte de la face réparée :  $\sigma_{app}$ =150MPa, a=18mm

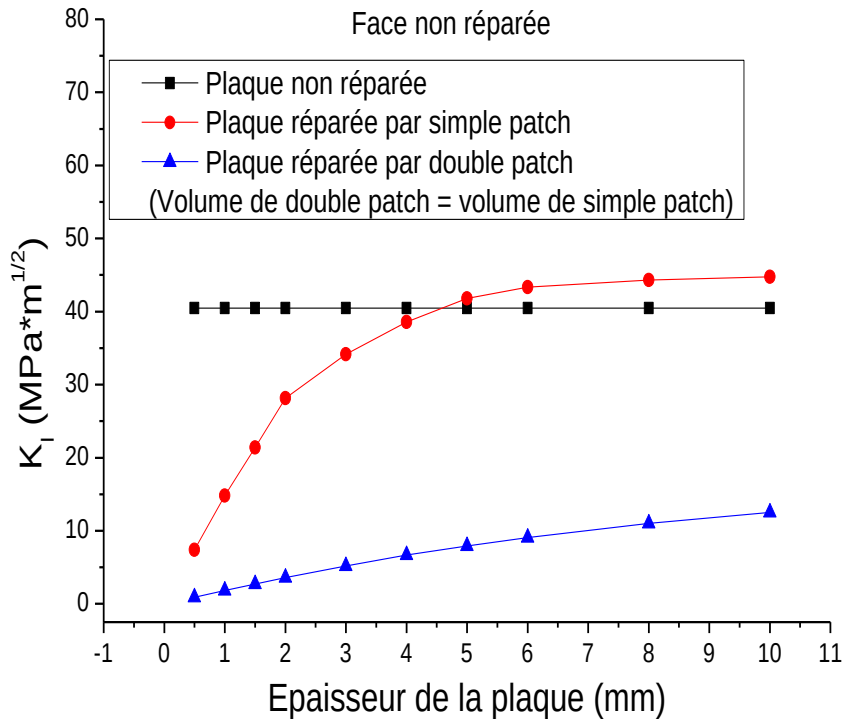
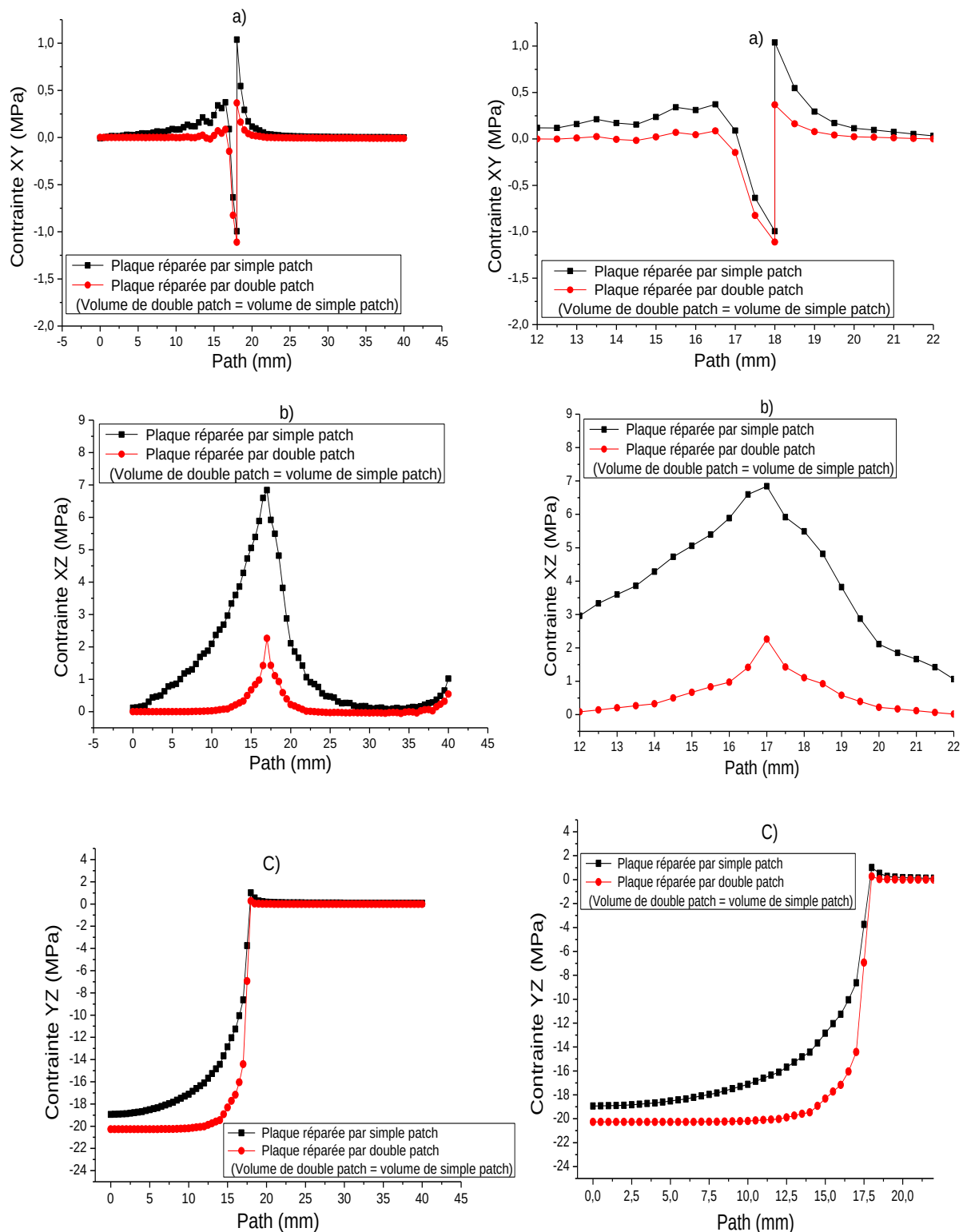
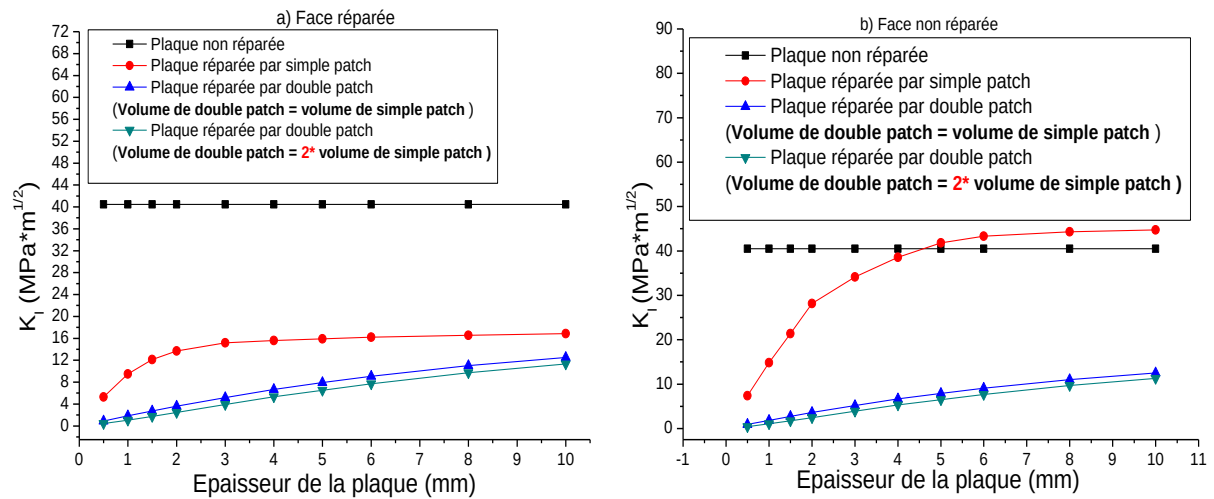


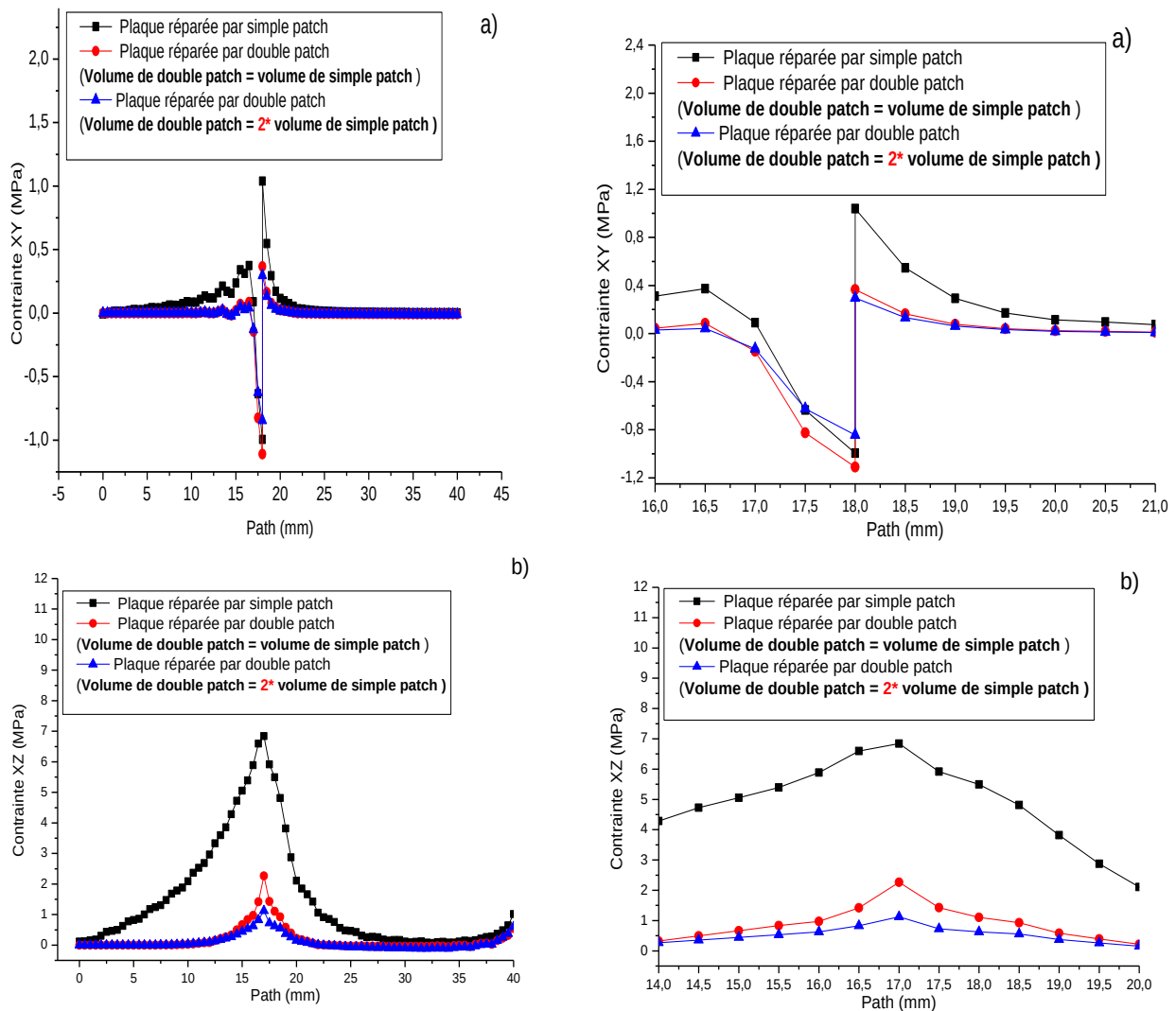
Figure IV.54 : Effet de la simple et double réparation sur le facteur d'intensité de contrainte de la face non réparée :  $\sigma_{app}$ =150MPa, a=18mm.

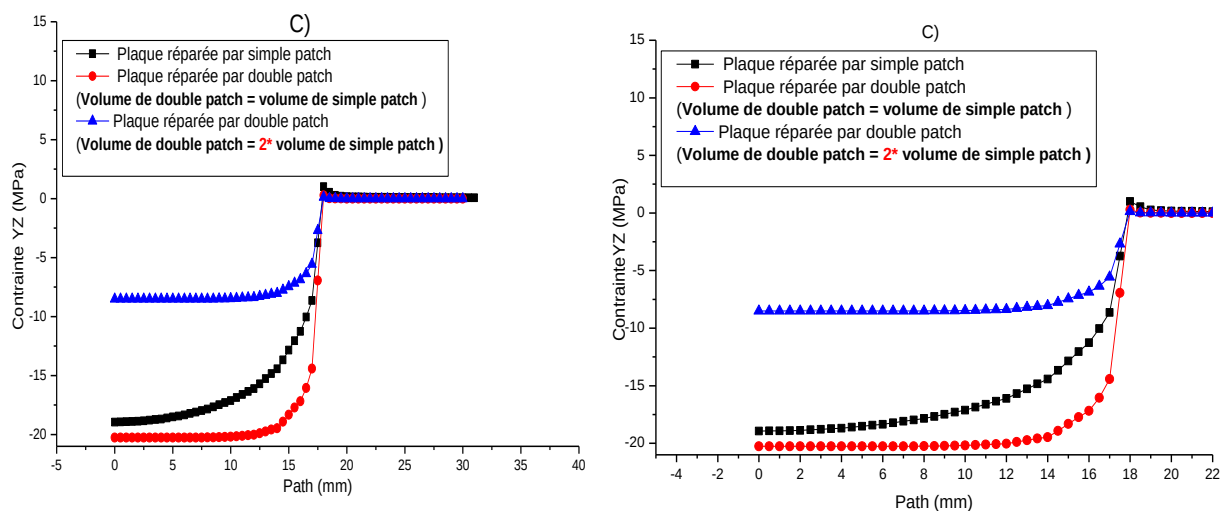


**Figure IV.55 :** Effet des simples et doubles réparations et de l'épaisseur de la plaque fissurée sur les contraintes de cisaillement dans l'adhésif relevées le long du chemin de propagation de la fissure :  $e_{\text{patch}} = 2\text{mm}$ ,  $\sigma_{\text{app}} = 150\text{MPa}$ ,  $a = 18\text{mm}$

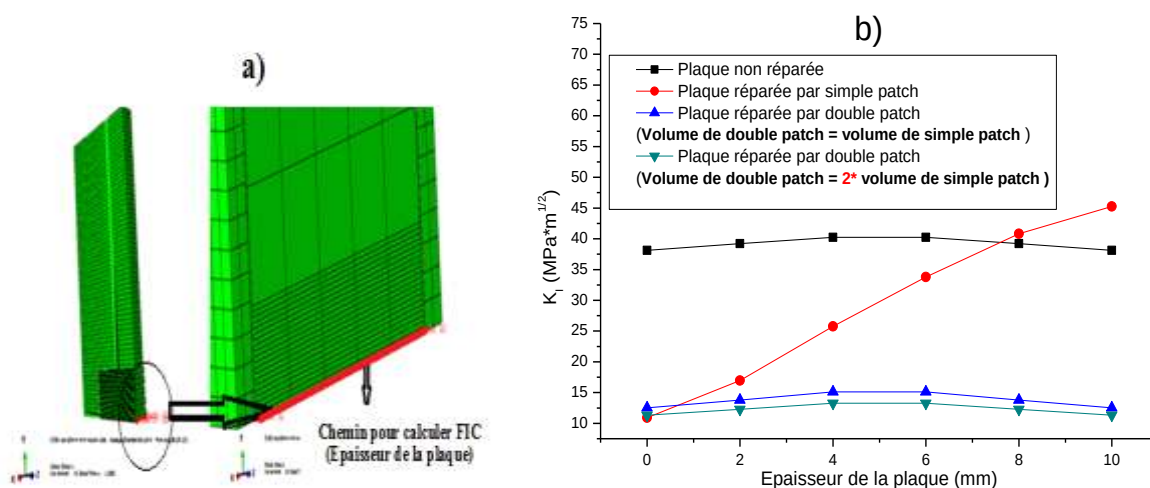


**Figure IV.56 :** Effet des simples et doubles réparations et de l'épaisseur de la plaque fissurée sur le facteur d'intensité de contraintes :  $e_{\text{patch}}=2\text{mm}$ ,  $\sigma_{\text{app}}=150\text{MPa}$ ,  $a=18\text{mm}$





**Figure IV.57 :** Effet des simples et doubles réparations sur les contraintes de cisaillement dans l'adhésif relevées le long du chemin de propagation de la fissure :  $e_{\text{patch}} = 2\text{mm}$ ,  $\sigma_{\text{app}} = 150\text{MPa}$ ,  $a = 18\text{mm}$



**Figure IV.58 :** Effet de la double réparation sur le facteur d'intensité de contrainte relevé le long de l'épaisseur de la structure fissurée :  $e_{\text{patch}} = 2\text{mm}$ ,  $\sigma_{\text{app}} = 150\text{MPa}$ ,  $a = 18\text{mm}$

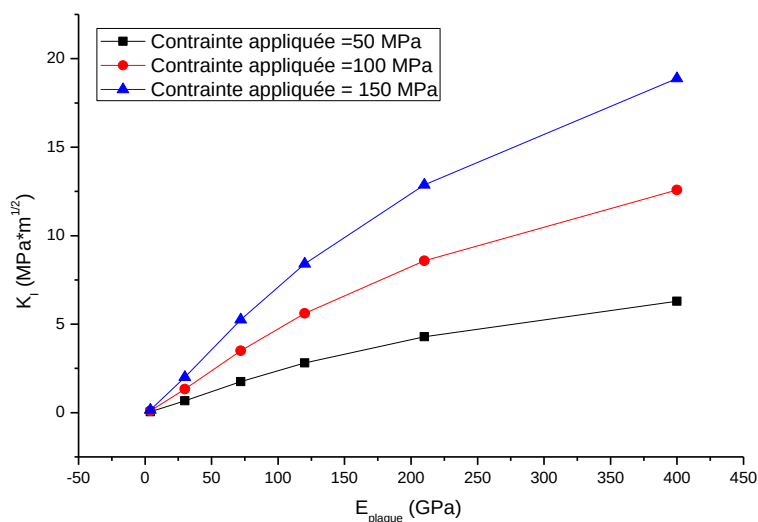
#### IV.2.3.2. Interaction module de Young la plaque-contraintes

Pour compléter l'étude précédente, sur la figure IV.59 est représenté l'effet du module d'élasticité de la plaque fissurée et réparée sur le niveau des contraintes normales locales de tension en pointes de fissure, caractéristique du "FIC". Cependant, le transfert de charge de cette plaque vers le matériau de réparation à travers la couche adhésive est d'autant plus faible que la structure fissurée est plus rigide. Dans ce cas, la rigidité élevée de la plaque supporte les contraintes fortement concentrées en pointe de fissure. Une forte proportion de cette énergie, emmagasinée dans la plaque, favorise l'avancée de la

fissure en conduisant à des valeurs plus importantes de l'énergie de rupture. Ce comportement est accentué par une intensification des contraintes de tension appliquées à la structure fissurée. A l'inverse, le transfert de charge est meilleur dans le cas de la réparation des plaques faiblement rigides.

Ce comportement est également observé dans le cas des contraintes de cisaillement, engendrées dans les plans XOY, XOZ et YOZ du film d'adhésif au voisinage de la fissure (fig. IV.60). En effet, une plaque de forte rigidité induit dans ce liant des contraintes de cisaillement élevées. Ceci est essentiellement dû au mauvais transfert de contraintes de la plaque fissurée vers le patch composite. Contrairement aux deux premiers plans XOY et XOZ (fig. IV.60a et IV.60b), les contraintes maximales tangentielles propres au troisième plan (YOZ) sont incomparablement plus importantes (fig. IV.60c). Ces efforts, localisés sur les lèvres de la fissure, de niveau comparable au seuil de rupture en cisaillement, peuvent conduire à la dégradation de la réparation par un dommage du joint adhésif lié à la ruine des forces de liaisons interfaciales. Pour minimiser ce risque, il est donc nécessaire de réparer de telles structures avec des patchs composites de très forte rigidité.

Les résultats obtenus montrent que la réparation des structures de haute rigidité par patch en Carbone-époxy présente un grand risque d'endommagement en termes d'accroissement d'énergie de rupture en pointe de fissure réparée et on observe une intensification des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive.



**Figure IV.59 :** Effet de la rigidité de la plaque fissurée sur le facteur d'intensité de contrainte en pointe de fissure de la face non réparée :  $e_{\text{patch}} = e_{\text{plaque}} = 2\text{mm}$ ,  $\sigma_{\text{app}} = 150\text{MPa}$ ,  $a = 18\text{mm}$

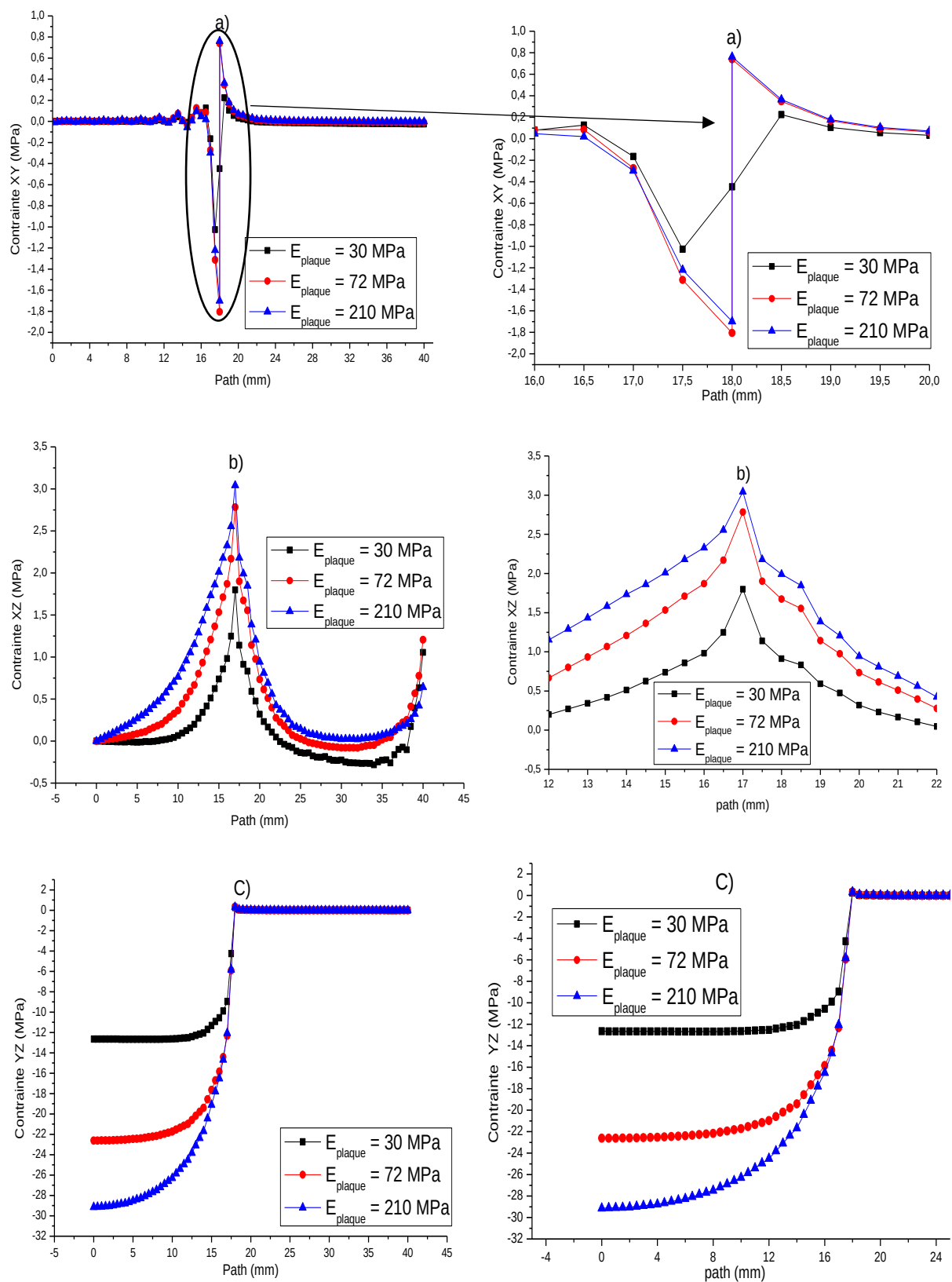


Figure IV.60 : Effet de la rigidité de la plaque fissurée sur les contraintes de cisaillement dans la colle près de la fissure réparée,  $e_{\text{patch}} = e_{\text{plaque}} = 2\text{mm}$ ,  $\sigma_{\text{app}} = 150\text{MPa}$ ,  $a = 18\text{mm}$

## ***CONCLUSION GENERALE***

### Synthèse de l'ensemble des résultats

Les résultats obtenus dans ce travail montrent que les paramètres géométriques et mécaniques de la réparation déterminent sa durabilité et sa performance en retardant voire en freinant la propagation de la fissure (arrêt de la fissure) et de réduire les contraintes de cisaillement dans le joint adhésif. Les propriétés géométriques et mécaniques, analysées, sont respectivement les paramètres du patch définis par sa taille, sa forme, son épaisseur, son module d'élasticité, et par l'orientation des fibres, les paramètres de l'adhésif définis par son module de cisaillement et son épaisseur et les caractéristiques de la plaque définies par son module de Young et son épaisseur. L'ensemble des études réalisées permet de dégager les conclusions suivantes :

Les paramètres géométriques et mécaniques du patch composite déterminent la durabilité et la performance de la réparation. Ils permettent la stabilisation des défauts de fissuration par une forte réduction de l'énergie de rupture en têtes de fissure réparée et une minimisation du risque du dommage de la couche adhésive, par une réduction des contraintes de cisaillement dans le joint adhésif, responsables de l'amorçage et de la propagation du décollement du patch de la plaque.

- En fonction de la taille de la fissure réparée, Il existe une interaction, dans le cas d'un patch rectangulaire, entre sa hauteur et sa largeur, définissant la surface de recouvrement de la zone fissurée, permettant la minimisation du facteur d'intensité de contraintes. Ces résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par d'autres travaux parmi lesquels ceux de Bachir Bouiadja et al [28] et Mahadesh Kumar et al. [53], Poole et al [14], Zhu et Lam[159], Chung et al [160], Ouinas et al [25]. Il existe donc une taille du patch rectangulaire pour laquelle le retardement et l'arrêt de la croissance de la fissure réparée n'est plus possible et au-delà de laquelle les contraintes de cisaillements maximales dans la couche adhésive s'intensifient. A cet effet, ces deux paramètres ont été, en fonction de la taille de fissuration, optimisés.
- La performance de la réparation, en termes de réduction du facteur d'intensité de contraintes, est quasiment indépendante de la forme de patch composite présentant la même surface de recouvrement. Beaucoup travaux [25, 53,54, 55,150,161,162,163] se sont intéressés à l'effet de la forme de patch sur le niveau de l'énergie de rupture en pointe de fissure. L'effet de ces formes sur l'intensité des contraintes de cisaillement, fait défaut dans ces travaux. L'étude proposée ici prend en considération l'effet de la géométrie du patch sur la réduction de ces deux grandeurs simultanément (énergie de rupture, (FIC) et toutes contraintes de cisaillement dans l'adhésif). Ceci constitue l'originalité de ce travail. Contrairement à tous les travaux menés jusqu'à l'heure actuelle, ce travail a permis la mise en évidence d'un site de l'adhésif, localisé au voisinage très



proche des lèvres de la fissure, où le risque de décollement est le plus privilégié. Ce risque est d'autant plus probable que la surface de recouvrement des lèvres de la fissure est faible d'un patch moins rigide.

- Pour une même rigidité et une même surface de recouvrement, la forme elliptique est la géométrie de patch permettant la minimisation de ces grandeurs. Dans ce cas, les arêtes vives (des angles obtus, droit, aigu) des patches situés loin de la fissure, ne présentent aucun effet sur les contraintes de tension localisées aux fronts de fissuration. Ces arêtes sont responsables de l'accroissement des contraintes de cisaillement dans la couche adhésive et sont des sites privilégiés d'amorçage et de propagation du décollement du patch de la plaque.
- L'obtention de différentes formes de patches à partir de la géométrie classique rectangulaire, n'est possible qu'avec une réduction de la surface de recouvrement. Les sept formes de patches analysées (elliptique, double flèches, forme H, rectangulaire, oblique, octogonale et papillon) conduisent pratiquement aux mêmes valeurs du FIC. Ce comportement est dû à la modification de la morphologie du patch et non à la diminution de la surface de recouvrement. Comparativement à une réparation à l'aide d'un patch rectangulaire, celle utilisant un patch en forme double flèches, à surface de recouvrement réduite de moitié, conduit au même niveau de cette énergie de rupture. Ceci correspond à un gain de masse trop important. Néanmoins, de cette forme de patch résultent les contraintes de cisaillement les plus importantes dans le joint adhésif. Cette forme présente des zones à risque d'initiation et de croissance de décollement dû au faible recouvrement des lèvres de la fissure réparée. Si les arêtes aiguës de cette géométrie ont l'avantage d'emmagasiner des énergies mécaniques (contraintes normales de tension) indéfiniment fortes, elles présentent l'inconvénient d'être des sièges d'intensification des contraintes de cisaillement dans l'adhésif. Le risque de décollement est fort probable lorsque la réparation utilise cette forme de patch. L'application d'une colle plus rigide sur le bord libre semble réduire les contraintes maximales de cisaillement localisées sur cette partie de l'adhésif, comme le suggèrent le travail présenté par Kaye et al [41], ainsi que Underhill et al [164] proposent l'optimisation de la forme du bourrelé et de colle autour du bord libre de la jonction.
- L'épaisseur du patch, présentant une interaction avec la largeur et la hauteur caractérisant le volume du recouvrement de la zone endommagée, est un élément géométrique clé de la réparation. Son accroissement, entraînant une forte rigidité du patch, facilite le transfert des contraintes fortement localisées aux fronts de fissures et réduit l'énergie mécanique de rupture. Néanmoins ça engendre des contraintes additionnelles de flexion pouvant influencer la cinétique de propagation de la fissure sur la face non réparée. Sa réduction affecte le transport de charge

de la zone fissurée en termes d'intensification du facteur d'intensité de contraintes et des contraintes tangentielles dans le joint adhésif. Dans ce cas, le volume du patch est insuffisant pour emmagasiner une forte proportion de l'énergie mécanique fortement localisée en têtes de fissures réparées. Pour minimiser les effets du patch épais et du patch mince, l'épaisseur du matériau de réparation a été optimisée à la valeur de 3mm. Ce comportement est conforme avec ceux résultants des travaux d'Achour et al [165], Ouinas [25] et Bachir Bouiadjra [26,27]. La réparation à l'aide des patches épais peut conduire à la dégradation de la réparation par rupture de la couche adhésive. C'est le transfert d'énergie mécanique de la plaque fissurée vers le patch à travers le joint adhésif qui est responsable de ces contraintes de fortes intensités localisées près du bord libre de la jonction. Ce comportement a été observé par Lucas et al [166] et M.Y. Tsai [167].

Pour minimiser les contraintes de cisaillement dans l'adhésif et améliorer la résistance de la colle et du patch composite à des efforts de fatigue Xiong et Raizenne [42] proposent une épaisseur dégressive du patch composite.

- Cette étude a conduit au développement deux formes nouvelles de patch permettant le recouvrement des têtes de fissures par des épaisseurs en forme d'escalier et en forme dégressive pointue et des lèvres de la fissure par une épaisseur plus importante. Cette forme, résultant d'un patch initialement rectangulaire à épaisseur constante, permet à la fois une relaxation des contraintes normales de tension en pointes de fissures et de contraintes de cisaillement dans la couche adhésive. Ces formes de patch peuvent être utilisées pour la réparation ou le renforcement externe des structures d'aéronefs qui sont minces et soumises à des efforts complexes qui peuvent conduire à la ruine de la réparation. Ces formes favorisent l'écoulement de l'air, minimise le phénomène du décollement et améliore la durée de vie de la réparation. Dans le cas de ces structures le risque du décollement, par rupture de l'adhésif, est d'autant plus probable que le matériau de réparation est épais. Ce risque est exclu dans le cas d'une réparation utilisant des patches dégressifs à faibles épaisseurs, développés dans cette étude.

Le module d'élasticité suivant la direction de chargement du patch composite unidirectionnel est un paramètre physique déterminant de la qualité de la réparation.

- La réparation utilisant des patches plus rigides est plus performante et plus durable en termes de relaxation de l'énergie élastique de rupture en pointes de fissures réparées et des contraintes de cisaillement dans le joint adhésif. Contrairement aux patches ductiles présentant un faible module d'élasticité, ceux de forte rigidité présentent une forte capacité d'emmagasiner des contraintes

initialement intensivement concentrées en pointes de fissures sous forme de déformations élastiques. Autrement dit, le transfert de ces contraintes de la zone endommagée vers le patch, à travers le joint de colle, est d'autant meilleur que le matériau de réparation présente une raideur élevée. Néanmoins, les résultats obtenus illustrent explicitement, qu'une forte rigidité du patch composite, dans le cas de la réparation des structures minces (épaisseur  $< 4\text{mm}$ ) ou ductile (faible module de Young), engendre des contraintes additionnelles de flexion conduisant au flambement de la structure. Les contraintes, dues à ce flambement, peuvent conduire à l'instabilité de la fissure sur la face non réparée. Pour minimiser l'effet de ce flambement, nous proposons donc, dans une telle situation, en fonction de la nature et de l'épaisseur de la structure, une optimisation du module d'élasticité du patch composite.

La performance de la réparation par patches composites stratifiés dépend non seulement de la rigidité mais également de l'orientation des plis adjacents et de la séquence d'empilement.

- Par rapport à toutes autres orientations, celle de  $(0^\circ)$  est la plus efficace, en termes de réduction de l'énergie de rupture en pointes de fissures réparées et des contraintes de cisaillement dans le film adhésif. Cette disposition des plis de  $(0^\circ)$  orientée dans la direction de traction uni-axiale offre au matériau de réparation sa plus forte raideur. Cette dernière chute d'intensité au fur et à mesure que l'orientation des plis s'éloigne du pli  $(0^\circ)$ . De tels patches, présentant une faible aptitude d'emmagasiner une intense énergie mécanique, c'est la cause de l'accroissement du facteur d'intensité de contraintes aux fronts de fissures et des contraintes tangentielles dans la colle. Néanmoins, dans le cas de la réparation des structures fissurées soumises à des efforts bi-axiaux ou d'une déviation de la fissure amorcée, les composites stratifiés, comme matériaux de réparation, constituent une solution de choix.

Cas des paramètres mécaniques et géométriques de l'adhésif :

- Il existe une interaction entre le module de cisaillement de l'adhésif et de son épaisseur, éléments déterminant de la rigidité de l'adhésif, cette interaction correspondant au minimum d'énergie de rupture en pointe de fissure pour une épaisseur minimale et un module de cisaillement de l'adhésif maximal. Autrement dit, cette épaisseur optimisée et ce module optimisé ont conduit à une rigidité optimale de l'adhésif.

Outre ; les structures d'aéronefs, la réparation par patch composite peut être utilisée pour l'amélioration de la durée de vie des structures employées dans les hydrocarbures, en génie

maritime, en génie civil etc. Ces structures sont définies par leurs modules d'élasticité et leurs épaisseurs.

- Cette étude a mis en évidence que ces deux caractéristiques déterminent la qualité et la performance de la réparation. Ainsi, dans nos conditions de simulation, la réparation externe n'est efficace que pour les fissures transverses initiées dans les structures pratiquement minces, d'épaisseur de moins de 4,5mm. Le front de fissuration de la face non réparée devient de plus en plus instable avec l'accroissement de l'épaisseur de la plaque. L'intensification de l'énergie de rupture en tête de fissure de la face non réparée est caractéristique de ce comportement. Au-delà de cette taille, la double réparation s'avère être d'une grande utilité pour la stabilisation d'une telle fissure. Il en résulte un facteur d'intensité de contraintes fortement réduit comparé à celui obtenu à partir d'une simple réparation. Dans le cas d'accessibilité à la face interne, la double réparation est plus efficace, plus performante et plus durable en termes de réduction de l'énergie de rupture en pointes de fissures réparées et des contraintes de cisaillement dans le joint adhésif. En termes de réduction de l'énergie de rupture en têtes de fissures, ce comportement est conforme avec ceux obtenus par d'autres études. D'un point de vue relaxation des contraintes de cisaillement maximales dans le joint adhésif, les résultats obtenus dans cette étude constituent une nouveauté indiscutable.
- Nos résultats montrent que la performance de la double réparation utilisant un patch deux fois plus épais, en termes de réduction de l'énergie de rupture en pointes de fissures réparées et des contraintes tangentielles dans la colle, est comparable à celle résultante d'un patch deux fois plus mince. En effet, une double réparation à l'aide d'un patch doublement plus mince conduit pratiquement à des valeurs comparables du facteur d'intensité de contraintes en têtes de fissures réparées que celles résultantes de la même réparation utilisant un patch deux fois plus épais. Cette dernière engendre des efforts de cisaillement légèrement plus élevés.

## ***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

## Références Bibliographiques

- [1] Baker A, LRF Rose and R. Jones. Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Structure, Volume 1. Elsevier, 2002, p. 10-14
- [2] Baker A. Repair of cracked of defective metallic aircraft components with advanced fiber composites-an overview of Australian work, Composite Structures 2(1984),153-181.
- [3] Baker A. Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure, Composite Structures 47(1991), 431-443.
- [4] Baker AA, Chester RJ. Recent advances in bonded composite repair technology for metallic aircraft components. In: Chandra T, Dhingra AK, editors. Proceedings of the international conference on advanced composite materials, 1993, p. 45-49.
- [5] Baker A, Stuart Dutton, Donald Kelly. Composite materials for aircraft structures. AIAA, Second edition 2004, p.290-292.
- [6] Molent L, Callinan RJ, Joes R. designe of an all boron/epoxy double reinforcement for F111 wing pivot: structural aspect. Composite Structure, Vol 11, 1989, Pages 57-83.
- [7] Mathias J : Etude du comportement mécanique des patches composites utilisés pour le renforcement des structures métalliques aéronautiques. Thèse de Doctorat de l'Université de Blaise Pascal, September 2005;
- [8] Wang, A. N, Rider, M. Heller, and R.KAYE. Theoretical and experimental research into optimal edge taper of bonded repair patches subject to fatigue loadings. International Journal of adhesion an adhesive, Vol 25:410-426, 2006
- [9] Ramesh Chandra, Murthy MVV, Ramamurthy TS, Rao AK. Analytical estimation of stress intensity factors in patched cracked plates. Engng Fract Mech 1985, Vol 21, Pages 479-494
- [10] Satya N Atluri, Sam G Sampath, Pin Tong. Structural integrity of aging airplanes. Springer-Verlag, Edition 1991, p.200-2002
- [11] LRF. ROSE. An application of the inclusion analogy for bonded reinforcements. International Journal of Solids and Structures, 17(8):827-838, 1981.
- [12] Duong, C N, Wang J, and Yu, J. An approximate algorithmic solution for the elastic fields in bonded patched sheets. International Journal of Solids and Structures, International Journal of Solids and Structures, 2001;38:4685-4699
- [13] Hart Smith L J. A demonstration of the versatility of Rose's Closed-form analyses for bonded crack patching. Boeing paper MDC 00K0104, presented to 46th International SAMPE symposium and exhibition, Long Beach, 6-10 May 2001; in proceeding, 2002: a materials and processes odyssey, pp 1118-1134.
- [14] Poole P.: Graphite-epoxy patching efficiency studies, advances in the bonded composite repair of metallic aircraft structure. In Alan Baker, Francis Rose, Rhys Jones, Vol. 1 st Ed. 2002; p. 415-441;
- [15] Alderliesten RC. Damage tolerance of bonded aircraft structures.Int J Fatigue 2009;31:1024-30.
- [16] Qing XP, Beard SJ, Kumar A, Hannum R. A real-time active smart patch system for monitoring the integrity of bonded repair on an aircraft structure. Smart Mater Struct 2006; 5:66-73.
- [17] Aminallah L, Achour T, Bachir Bouiadjra B, Serier B, Amrouche A, Feaugas X. Analysis of the distribution of thermal residual stresses in bonded composite repair of metallic aircraft structures. Comput Mater Sci 2009; 46:1023-7.

- [18] M'hamdia R, Bachir Bouiadjra B, Serier B, Ouddad W, Feaugas X, Touzain S. Stress intensity factor for repaired crack with bonded composite patch under thermo-mechanical loading. *J Reinf Plast Compos* 2011; 30:416-24.
- [19] Gkikas G, Sioulas D, Lekatou A, Barkoula NM, Paipetis AS. Enhanced bonded aircraft repair using nano-modified adhesive. *Mater Des* 2012 ; 41 :394-402.
- [20] Ouinas D. Etude du comportement en rupture des structures en biomatériaux-Applications aux collages, thèse de Doctorat de l'université de Sidi Bel Abbès, Mai 2005.
- [21] Ouinas D., Bachir Bouiadjra B., Himouri S., Benderdouche N.: Progressive edge cracked aluminum plate repaired with adhesively bonded composite patch under full width disband. *Composites Part B Engineering*, 2012, 43, 805-811
- [22] Ouinas D., Bachir Bouiadjra B., Achour T., Benderdouche N. Influence of disbond on notch crack behavior in single bonded lap joints. *Mater.Des.* 2010; 31:4356-62.
- [23] Ouinas D, Bachir Bouiadjra B, Serier B, the effects of disbonds on the stress intensity factor of aluminum panels repaired using composite materials. *Compos Struct* 2007; 78:278-84.
- [24] Ouinas D, Bachir Bouiadjra B, Achour T, Benderdouche N. Influence of disbonds on notch crack behavior in single bonded lap joints. *Mater Des* 2010; 31:4356-62.
- [25] Ouinas, A. Hebbar, B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, B. Serier: Numerical analysis of the stress intensity factors for repaired cracks from a notch with bonded composite semicircular patch. *Composites Part B Engineering*, 2009, 40, 804-810;
- [26] Bachir Bouiadjra B, Ouinas D, Serier B, Benderdouche N. Disbond effects effects on bonded boron/epoxy composite repair to aluminum plates. *Compt Mater Sci* 2008; 42:220-7;
- [27] Bachir Bouiadjra B, Ouddad W, Albedah A, Benyahia F, Belhouari M. Effects of the adhesive disbond on the performances of bonded composite repairs in aircraft structures. *Mater Des* 2012; 37:89-95; 151.
- [28] Bachir Bouiadjra B, Belhouari M, Serier B. Computation of the stress intensity for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode. *Composite structures* 56(2002), 401-406;
- [29] Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, B. Serier. Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode. *Composite Structures*, Volume 56, Issue 4, June 2002, Pages 401-406;
- [30] Benyahia F, Albedah A, Bachir Bouiadjra B. Analysis of the adhesive damage for different patch shapes in bonded composite repair of aircraft structures. *Mater Des* 2014; 54:18-2;
- [31] Fekirini, B. Bachir Bouiadjra , M. Belhouari, B. Boutabout, B. Serier, Numerical analysis of the performances of bonded composite repair with two adhesive bands in aircraft structures, *Composite structures*, 2008, 82:84-89;
- [32] Lena MR, Kling JC, Sun CT: Composite patches as reinforcements and crack arrestors in aircraft structures. *J. Aircraft* 1998, 35 (2), 318-323 ;
- [33] Mathias J : Etude du comportement mécanique des patchs composites utilisés pour le renforcement des structures métalliques aéronautiques. Thèse de Doctorat de l'université de Blaise pascal, septembre 2005 ;
- [34] Belhouari M, Bachir Bouiadjra B, Megueni A, Kaddouri K. Comparison of double and single bonded repairs to symmetric composite structures: a numerical analysis. *Compos. Struct* 2004;65:47-53



- [35] Linxia Gu, Ananth Ram Mahanth Kasavajhala, Shijia Zhao. Finite element analysis of cracks in aging aircraft structures with bonded composite-patch repairs. *Composites Part B* 2011 ;42 : 505–510
- [36] Mhamdia R : analyse du comportement mécanique des structures endommagées et réparées par patch, Thèse de doctorat de l' Université Djillali liabes de Sidi Belabbes 2013;
- [37] Albedah A, BachirBouiadjra B, Ouddad W, Es-Saheb M, Benyahia F. Elastic plastic analysis of bonded composite repair in cracked aircraft structures. *J reinf Plast Compos* 2011; 30:66-72.
- [38] Lucas F.M da Silva and R.D. Adams. Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion & adhesives*. 27:227-235-2007
- [39] WK. Chiu and R. Jones. Unified institutive for thermoset adhesive, FM-73. *International Journal of adhesion and adhesives*, 27(2):97-114, 1983.
- [40] XX. Yu, AD. Crombe, and G. Richardson. Materiel modelling for rate dependent adhesives. *International Journal of adhesion and adhesives*, 21:179-2010,2001
- [41] R.H. Kaye end M. Heller. Through-thickness shape optimization of bonded repairs and lap-joints *International Journal of Adhesion and adhesives*, vol 22: 7-21,2002.
- [42] Xiong, Y., and Raizenne, D. Stress and failure analysis of bonded composite-to-metal joints.Tech.rep. Institute for aerospace research. Canada
- [43] Wang, A. N, Rider, M. Heller, and R. KAYE. Theoretical and experimental research into optimal edge taper of bonded repair patches subject to fatigue loadings. *International Journal of adhesion an adhesive*, Vol 25:410-426, 2006
- [44] Crombe A, Richardson G. A unified approach for predicting the strength of cracked and non-cracked adhesive joints. *Int J Adhes* 1995; 49:211-44.
- [45] Sheppard A, Kelly D, Tong L. A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints. *Int J Adhes* 1998;18,385-400.
- [46] Chang-Su Ban, Young-Hwan Lee, Jin-Ho Choi, Jin-HweKweon. Strength prediction of adhesive joints using the modified damage zone theory. *Compos struct* 2008; 86:96-100.
- [47] Ibrahim Nour Chafak, Bouanani Morad Fari, Bouiadjra Bel Abbes Bachir, and Serier Boualem: Analysis of the adhesive damage between composite and metallic adherents: Application to the repair of aircraft structures: *Advances in Materials Research*, Vol. 5 No. 1, pages 11-20, 2016;
- [48] Papanikos, P.,Tserpes, K.I. , Pantelakis, Sp. Initiation and progression of composite patch debonding in adhesively repaired cracked metallic sheets. *Compos.Struct.*, 2007;81, 303-311.
- [49] Magalhaes AG, De Moura MFSF, Gonçalves JPM. Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials. *Int J Adhes* 2005; 25:313-9;
- [50] Rezgani L, Bachir Bouiadjra B, Belhouari M, Madani K, Serier B, Feaugas X. Effect of composite hygrothermal aging on the SIF variation in bonded composite repair of aircraft structures. 2010; 29(16):3631-3636
- [51] Aminallah L, Rezgani L, Bachir Bouiadjra B, Madani K, ,Albedah A, Benyahia F. Effects of the composite and adhesive aging on the plasticity in bonded composite repair. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2011;30(15):1245-1250 ·
- [52] Apalak Kemal M, Apalak Gul Z, Gunes R. Thermal and gemetrically nonlinear stress analyses of an adhesively bonded composite, tee joints with double support. *J Thermoplast Compos Mater*. 2004; 17:10.3-36.
- [53] Kumar Mahadesh A, S.A. Hakeem. Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet.*Compos.Struct* 2000; 49:285-292



- [54] M'hamdia R, B. Serier, B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari. Numerical analysis of the patch shape effect on the performances of bonded composite repair in aircraft structures. *Composites: Part B* 43 (2012) 391-397
- [55] Bouchiba et col. New optimization method of patch shape to improve the effectiveness of cracked plates repair. *Structural Engineering and Mechanics*. Vol 58, Nv.2 (2016). 301-326
- [56] CHENG.P Etude et optimisation de la réparation des composites stratifiés par collage des patches externes. Thèse de Doctorat de l'université d Bourgogne. 2010.
- [57] HAUTIER.M. Analyse des réparations des matériaux composites : mise en œuvre d'un procédé par infiltrations et étude du comportement mécanique. Thèse de Doctorat de l'université Toulouse
- [58] X.Liu, G. Wang. Progressive failure analysis of bonded composite repairs. *Composite structures*, 81 (2007) 331-340.
- [59] C.F. Shih, H.G. de Lorenzi et W.R. Andrews, 'Studies on crack initiation and stable Crack rowth', *Elastic-Plastic Fracture*, ASTM STP 668, American Society for Testing and Materials, Piladelphia, 1979, pp. 65-120.
- [60] M.F. Kanninen, E.F. Rybicki, R.B. Stonesier, D. Broek, A.r. Rosenfield, C.W. Marscall Et G.T. Hahn, 'Elastic-Plastic Fracture Mechanics for Two-Dimensinal Stable Crack Growth and Instability Problems', *Elastic-Plastic Fracture*, ASTM STP 668, American Society for Testing And Materials, Piladelphia, 1979, pp. 121-150.
- [61] J.E. Rice.A path independent integral and the approximate analysis of strain Concentrations by notches and cracks, *Journal of Applied Mechanics*, vol. 35, 1968, pp. 379-386.
- [62] J.A. Beley et J.D. Landes, The J integral as a fracture criterion, ASTM STP 514,American Society for Testing And Materials, Piladelphia, 1972, pp. 1-20.
- [63] J.Benard, A. Michel, J.Philibert, and J.Talbot.Métallurgie générale. Masson, 1984.2édition.
- [64] Bekkar Baghdad, Etat de l'art sur le comportement en fissuration par fatigue des alliages d'aluminium a durcissement structural. Université Aboubekr Tlemcen, (Algérie), 2014
- [65] G.R. Irwin, Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate', *Journal of Applied Mechanics*, vol. 24, 1957, pp. 361-364.
- [66] A.A. Griffith, The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. A221, 1920, pp. 163-198.
- [67] A.A. Wells. Unstable crack propagation in métaIs: cleavage and fast fracture, cranfield crack propagation symposium, vol.1, pp.210-230, 1961.
- [68] Westergaad H.M. (1939). Bearing pressures and cracks, *Trans.ASME, Journal. Appl. Mech*,
- [69] Zaghlole. 2004.Concepts Fondamentaux De La Mécanique de La Rupture, Université de Metz.
- [70] G.R Irwin Fracture, In: Flugge S, editor, *Handbuch der Physik*, vol. 6, Berlin: Springer, p 1, 1958.
- [71] C.F. Shih. Relationship between the J integral and the crack opening displacement for stationary and extending cracks. *Journal of the Mechanics and physics of solids*, vol. 29, pp, 305-326,1981.
- [72] J.N. Robinson et A.S. Tetelman. Measurement of KIC on small specimens using critical crack tip opening displacement fracture toughness and slow stable cracking, ASTMSTP 595, pp, 139-158, 1974.
- [73] J.C. Lautridou et A.Pineau. Crack initiation and stable crack growth resistance in A508 steels in relation to inclusion distribution, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 15, 2, pp. 55-71, 1981.
- [74] D. Brock. Correlation between stretched zone size and fracture toughness. *Engineering Fracture Mechanics*, vol 6, pp. 173-181, 1974.
- [75] G.R.Irwin. Fraturingod'f metals ASM, Cleveland, Chio, p.147, 1949.

- [76] D.S.Dugdale. Yielding of steel sheets containing slits, J.of the mechanics and physics of solids 1960.
- [77] ISA-BTP. Ecole d'ingénieurs. Introduction a la méthode des éléments finis, pdf. <http://clb.perso.univ-pau.fr/rdm/isa5/coursef.pdf>. 2017. France
- [78] E. Byskov. The calculation of stress intensity factors using the finite element method with cracked elements. International Journal of Fracture Mechanics, Vol 6: pp 159–167, 1 970.
- [79] RS. Barsoum. On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 10, 25-37, 1976.
- [80] R. Henshell, K. Shaw. Crack tip finite elements are unnecessary. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 9, 495-507, 1975.
- [81] S.Benzley. Representation of singularities with isoparametric finite elements. International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 8: pp. 537-545, 1974.
- [82] Blackburn, W.S., Calculation of stress intensity factors for straight cracks in grooved and ungrooved shafts, Eng. Fracture Mechanics, Vol. 8 731-736 (1976).
- [83] M.stern .E.Becker. A conforming crack tip element with quadratic variation in the sinugular fields. Int. J. Numer. Meth. Eng. 12, 279-288, 1978.
- [84] Saverio fiordalisi. Modélisation tridimensionnelle de la fermeture induite par plasticité lors de la propagation d'une fissure de fatigue dans l'acier 304l. thèse de doctorat. L'école nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique.2014
- [85] Stéphane marie, approche énergétique de la déchirure ductile. Commissariat à l ' énergie atomique (Direction des réacteurs nucléaires). 1999. France
- [86] Samuel GENIAUT. Calcul des facteurs d'intensité des contraintes par extrapolation du champ de déplacements. Code\_Aster. Code\_Aster. Page : 1/8 available at : [https://www.code-aster.org/V2/doc/v11/fr/man\\_r/r7/r7.02.08.pdf](https://www.code-aster.org/V2/doc/v11/fr/man_r/r7/r7.02.08.pdf)
- [87] S-C. Her, D-L. Shie. The failure analysis of bolted repair on composite laminate. International Journal of Solids and Structures 35 (1998) 1679-1693
- [88] O. Roques. Dossier sur le Collage Structural. RENAULT F1 Team.
- [89] AFNOR Adhésifs-termes et définitions. Rapport technique NF EN 923, Janvier 2006
- [90] sylvain Popineau. Durabilité en milieu humide d'assemblages structuraux colle type aluminium/composite. Thèse de doctorat. L'école des Mines de paris 2005
- [91] R.J Hussey, J. Wilson structural adhesives Directory and Databook. Chapman and hall, 1996
- [92] A.Higgins. Adhesive bonding of aircraft Structures. International Journal of adhesion& Adhesive, 20:367-376, 2000
- [93] Maxwell Davis, David Bond Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. International Journal of adhesion & adhesive, 19:91-105, 1999.
- [94] P.C Pandey, S. Narasimhen Three-dimensional nonlinear analysis of adhesively bonded lap joints considering visco-plasticity in adhesives. Computer and structures, 79:769-783, 2001.
- [95] I.Grabovac, R.A Bartholomeusz , A.A. Baker Composite reinforcement of a ship superstructure-project overview. Composites, 24:501-509, 1992
- [96] R.F Mander Use of resins ind road an bridge construction and repair. International Journal of adhesion & adhesives, 3:27-39, February 1981
- [97] Adheria, la base de données des adhésifs, [http :// www.carma-adheria.net/](http://www.carma-adheria.net/).
- [98] Bellali Mohammed Amine, Méthodes de simulation des matériaux composites, application aux structures endommagées et réparées. Mémoire de master. Udl. Sba. 2017

- [99] Marie-Anne Bruneaux. Durabilité des assemblages collés : Modélisation mécanique et physico-chimique. Thèse de doctorat, L'Ecole Nationale des ponts et chaussées, 2004
- [100] H. Monternot, D. Bénazet, H. Ancenay. Guide du collage. CETIM, 1978
- [101] F. Elbing, N. Anegreh, L. Dorn, E. Uhlmann Dry ice blasting as pretreatment of aluminum surfaces to improve the adhesive strength of aluminum bonding joint. *International Journal of adhesion & adhesive*, 23:63-79,2003
- [102] J.D Bardiset, K.T. Kedward. Surface Preparation effects on mode I testing of adhesively bonded composite joints. *Journal of composites technology & research*, 24:30-37,2002
- [103] L.J Hart-smith. A peel-type durability test coupon to assess interfaces in bonded, co-bonded composite joint, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1+:181-191,1999
- [104] K.L. Mittzl, pizzia : Adhesion promotion Techniques :Technical Applications. Mareel Dekker, 1999.
- [105] Silva- 6 M. E. R. Shanahan, *GFP* 7, 247 (1987).
- [106] Silva-Popinou (pdf) 10 W. D. Bascom and R. L. Patrick, *Adhesive Age*, 25-32 (1974).
- [107] Silva-Popinou (pdf) sylvain popineau. Durabilité en milieu humide d'assemblages structuraux colles type aluminium/composite. Thèse de doctorat. L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. 2005. France
- [108] Mario. O. (2007), “ Étude du vieillissement des assemblages structuraux acier/aluminium : Influence de l'environnement sur le dimensionnement. Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de paris
- [109] J.P. Jeandrou et, J. Lemaire 40% d'économie sur vos assemblages : le collage le permet aujourd'hui ! In les lundis de la mécanique, Clement-Ferrand, Novembre 2006
- [110] AA. Baker. Repair of cracked or defective metallic aircraft components with advanced \_bre composites - an overview of Australian work. *Composite Structures*, 2:153{181, 1984.
- [111] B.R. Burchardt, P.W. Merz (2006) Elastic Bonding and Sealing in Industry. *Handbook of Adhesives and Sealants Volume 2*, chapter 6, p. 356-375.
- [112] J. Cognard. Science et technologie du collage. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000.
- [113] H. Monternot, D. B\_enazet, and H. Ancenay. Guide du collage. CETIM, 1978.
- [114] Bretton C, Villoutreix G. Familles d'adhésifs et caractérisation d'un collage Structurale. *Les Techniques de l'Ingénieur*, AM3560-2008
- [115] Ruschau JJ, Coate JE. The effectiveness of an adhesively bonded composite patch as applied to a transport aircraft lower wing skin. *International Society for the Advancement of Material and Process Engineering*, (1994), p. 532–543.
- [116] Guyt C. Delamination effects in fuselage crack patching. *International Society for the Advancement of Material and Process Engineering*, (1996), p. 903–914.
- [117] Satoh T, Miyazaki Y, Suzukawa Y, Nakazato K. On the development of structural adhesive technology for the automotive body in Japan. *The Japan Society of Automotive Engineers*, (1996), p. 165–178.
- [118] Schroeder KJ. Structural adhesives for aluminium vehicles. *Society of Automotive engineers*, (1996), p. 195–202.
- [119] Naoufel BEN SALEM. Fiabilité des assemblages structuraux collés pour applications spatiales. Thèse de doctorat. L'université bordeaux I, Ecole doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur. 2012. France

- [120] P. Coudor. Analyse \_ du mécanisme d'interaction dans les structures souples assemblées par collage. PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont II, 2009.
- [121] Hexcel Composites. Redux 312 - modi\_edepoxy \_lm adhesive – product data, Mars 2007. Publication RTA027b.
- [122] Antoine Deheeger. Etude des effets thermiques dans des joints collés. Application à des structures renforcées par patchs composites. These de doctorat. Université Blaise Pascal - Clermont II. France
- [123] A. C. Okafor, N. Singh, U.E. Enemuoh, S.V. Rao. Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminium aircraft panels. *Composite Structures* 71 (2005) 258-270
- [124] B.B. Bouiadjra, H. Fekirini, B. Serier, M. Benguediab. Numerical analysis of the beneficial effect of the double symmetric patch repair compared to single one in aircraft structures. *Computational Materials Science* 38 (2007) 824-829
- [125] T. Achour, B. Bachir Bouiadjra, B. Serier. Numerical analysis of the performances of bonded composite patch for reducing stress concentration and repairing cracks at notch. *Computational Materials Science*, 28 (2003) 41-48
- [126] B. Bachir Bouiadjra, H. Fekirini, B. Serier, M. Benguediab. Numerical analysis of the beneficial effect of the double symmetric patch repair compared to single one in aircraft structures. *Computational Materials Science*, 38 (2007) 824-829
- [127] S. Naboulsi, S. Mall. Modelling of cracked metallic structure with bonded composite patch using the three layer technique. *Composite Structures* 35 (1996) 295-308
- [128] Pengcheng CHENG, Etude et optimisation de la réparation des composites Stratifiés par collage des patchs externes, université de bourgogne, thèse de doctorat (2010)
- [129] G. Savage, M. Oxley. Repair of composite structures on Formula 1 race cars. *Engineering Failure Analysis*
- [130] Baker A., Aktepe B. Sensor techniques to validate the stress intensity in cracked metallic panels repaired with bonded composite patches, Tech. rep Defense Science And technology Organization, Australia
- [131] Baker A., Jones R. Bonded repair of aircraft structures. Martinus Nijh Publishers, 1988
- [132] AA. Baker and R. Jones. Bonded repairs of aircraft structures. Martinus Nijho\_ Publishers, 1988.
- [133] P. Fraisse, “Caractérisation mécanique et ultrasonore de structures collées : cas des assemblages verre - époxy”, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris VI, 1991.
- [134] A. J. Kinloch, “Adhesion and adhesives”, Ed. Chapman and Hall, London, 1987.
- [135] R. D. Adams, W. C. Wake, “Structural adhesive joints in engineering”, Elsevier Appl. Sci. Publishers, London, 1984.
- [136] Grabovac, I., R. A. Bartholomeusz, and A. A. Baker. "Composite Reinforcement of a Ship Surper structure-Project Overview". *Composites*, 24: 501-509, (Number 6, 1993).
- [137] R. Jones, D. Peng, K. Cairns, and S. Pitt. Composite Repairs To Cracked Metallic Components- Experiment and Theory. 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007. Brisbane, Australia Brisbane, Australia
- [138] Simulia, Dassault Systems. Abaqus software, <http://www.3ds.com>. Version 6.11, (2011).
- [139] Chung, K.H. and Yang, W.H. (2003). A study of the fatigue crack growth behavior of thick aluminum panels repaired with composite patch. *Composite Structures*.60. pp. 1-7. DOI: 10.1016/S0263-8223(02)00095-8.

- [140] Chung, K.H., Yang, W.H. and Cho, M.R. (2000). Fracture mechanics Analysis of cracked Plate Repaired by Composite Patch. *Key Engineering Material*, 43-8, pp. 183-187. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.183-187.43.
- [141] Jeong, G.H.Y., Won-Ho, Jo. and Myeong, Rae. (2000). Fracture Mechanics Analysis of Cracked Plate Repaired by Patch (I). *Transaction of the Korean Society of Material Engineers* 24 (8), pp. 2000-2006. DOI: 10.22634/KSME-A.2000.24.8.2000.
- [142] Ramji, M. and Srilakshmi, R. (2012). Design of composite patch reinforcement applied to mixed mode cracked panel using FEA. *J ReinfPlast Comp* 39(9), pp. 585-95. DOI: 10.1177/0731684412440601.
- [143] Ramji, M., Srilakshmi, R. and Bhanu Prakash, M. (2013). Towards optimization of patch shape on the performance of bonded composite repair using FEM, *Compos. B. Eng*, 45, pp. 710–20. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.07.049.
- [144] Kashfuddoja, M. and Ramji, M. (2014). Design of optimum patch shape and size for bonded repair on damaged Carbon fibre reinforced polymer panels. *Materials and Design*, 54, pp. 174–183. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.08.043.
- [145] Fekih, S.M., Albedah, A. F., Benyahia Belhouari, M., Bachir Bouiadjra, B. and Miloudi, A. (2012). Optimization of the sizes of bonded composite repair in aircraft structures. *Matériaux & Design*, 41, pp. 171-176. DOI: 10.1016/j.mat des.2012.04.025.
- [146] Oudad Wahid, Analyse par la méthode des éléments finis tridimensionnel de l'étendue de la zone plastique en tête de fissure réparée par patch en composite, Thèse de Doctorat, Université de SBA-UDI, 2010.
- [147] Ouinas D, Bachir Bouiadjra B, Achour T, Benderdouche N. The effect of disbands on the stress Intensity Factor of aluminum panels repaired using composite materials. *Compos Struct* 2007; 78:278-84.
- [148] Ramji M, R Srilakshmi, M Bhanu Prakash. Towards optimization of patch shape on the performance of bonded composite repair using FEM. *Composites Part B* 2013;45: 710–720.
- [149] R.F Mander Use of resins ind road an bridge construction and repair. *International Journal of adhesion & adhesives*, 3:27-39, February 1981
- [150] Kaddouri K, D Ouinas, B Bachir Bouiadjra. FE analysis of the behaviour of octagonal bonded composite repair in aircraft structures. *Computational Materials Science* 2008;43: 1109–1111
- [151] Mohammed Amine Bellali et al. using czm and xfem to predict the damage of aluminum notched plates reinforced with a composite patch. *J. of Mechanics of Materials and Structures*, 2020; 15(2):185-201, DOI: 10.2140/jomms.2020.15.185
- [152] Ban Chang-Su, Lee Young-Hwan, Choi Jin-Ho, KweonJin-Hwe. (2008), “Strength prediction of adhesive joints using the modified damage zone theory. *Compos Struct*; 86:96–100.
- [153] Hossein Housseini-toudeshky, Ghaffari Mir Ali, Mohammed Bijan. Finite element fatigue propagation of induced cracks by stiffeners in repaired panels with composite patches. *Compos Struct* 2012,94:1771-80
- [154] B.Bachir Bouiadjra, H. Fekirini, M. Belhouari, B. Boutabout, B. Serier. Fracture energy for repaired cracks with bonded composite patch having two adhesive bands in aircraft structures *Computational Materiel Science*, Volume 40, Issue 1, July 2007,pp 20-26
- [155] Rose LRF. Dsign analysis and validation for a bonded composite repair to primary aircraft structure. In: proceeding of International Conference on Fracture. ICF-9.1997? pages 129-141



- [156] Kaulg J C, Maley S, Sun C.T, Characterization of fatigue behavior of bonded composite repairs, Journal of aircraft 1999, 36:1016-22.
- [157] K.Masani, S.Touzain , X.Faugas, M.Benguediab, M.Ratwani. Numerical analysis for the determination of the stress intensity factor and crack opening displacements in plates repaired with single and double composites patches. Computation Materials Scienc, Volum 42, Issue 3, May 2008, Pages 385-393.
- [158] D.Ouinas, B. Serier, B.B. Bouiadjra. The stress of the disbands on the pure mode II. Stress intensity factor of aluminum plate reinforced using composite materials. Computational materials Science, Volume 39, Issue 4, June 2007, Pages 728-787.
- [159] Fikih Zhu C. Lam YC. Analysis of one-sided repair to a cracked thick plate. In Proceedings of International on Fracture 1997;1CF-9 : 595-602
- [160] OUDED. K.H. Chung and W.H. Yang .A study of the fatigue crack growth behavior of thick aluminum panels repaired with a composite patch. Composite Structures 60:1-7,2003.
- [161] Brighenti, R. (2005). Optimum patch repair shapes for cracked members, Int. J.Mech Mater. 1(4), pp. 365-381. DOI: 10.1007/s10999-005-0525-8.
- [162] Ouinas, D., Zenasni, R. and Sahnoun, M. (2011). Effet de la forme géométrique du patch sur la réduction du FIC en mode I. Journées d'Etudes Nationales de Mécanique, Ouargla, Algérie., 07-08 Mars.
- [163] Bachir Bouiadjra, B. Fari Bouanani, M. Albedah, A. Benyahia, F. and Es-Saheb, M. (2011). Comparison between rectangular and trapezoidal bonded composite repairs in aircraft structures: A numerical analysis. Materials and Design. 32, pp. 3161–3166. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.02.053.
- [164]. P.R. Underhill and D.L. Du Quesnay. The dependence of the fatigue life of adhesive joints on surface preparation International Journal of adhesion and adhesives, vol 26:62-66,2006
- [165] T.Achour, B.Bachir Bouiadjra, B.Serier. Numerical analysis of the performances of the bonded composite patch for reducing stress concentration and repairing cracks at notch. Computational Materiel Science, Volume 28, Issue 1,July 2003, Pages 41-48 ;
- [166] Lucas F.M da Silva and R.D Adams. Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composite. International Journal of adhesion & adhesives, 27: 227-235,2007
- [167] MY.Tsai and J.Morton. The effect of spew let on adhesive stress distribution in laminated composite single-lap joints. Composite Structures, 32:123-131, 1995.
- [168] J. Yao, J.G. Teng, J.F. Chen. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints. Composites: Part B 36 (2005) 99-113