THESE DE DOCTORAT

Présentée à

UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

POUR OBTENIR

LE DIPLOME DE DOCTORAT 3éme Cycle EN GÉNIE MÉCANIQUE

Option : Fabrication Mécanique et Productique

Par

BOUALAMALLAH DJAMAL

Intitulée :

Effet de l'environnement sur le comportement des assemblages hybrides (Collage/Boulonnage)

Directeur de thèse : **Mr. GHAZI Abdelkader**
Co-directeur de thèse : **Pr. MILOUDI Abdelkader**

Soutenu le : 01 / 06 / 2023

Devant le jury composé de :

M^r^. BOULENOUAR Abdelkader	Pr.	U. Sidi Bel Abbes	Président
M^r^. ZENGAH Sahnoun	MCA	U. Mascara	Examinateur
M^r^. DJEBBAR Noureddine	MCA	U. Ain Temouchent	Examinateur
M^r^. MEDJDOUB Sidi Mohamed	MCA	U. Sidi Bel Abbes	Examinateur

Laboratoire de Matériaux et Systèmes Réactifs LMSR, Département Génie Mécanique,
UDL/ Sidi Bel Abbes, Faculté de Technologie,
BP 89, Cité Larbi Ben Mhidi, Sidi Bel Abbès 22000, Algérie
ANNÉE UNIVERSITAIRE 2022-2023

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier **les membres du jury** qui sont Mr. BOULENOUAR Abdelkader professeur à l'université de sidi bel abbes .Mr .ZENGAH Sahnoun maitre de conférences à l'université de mascara .Mr .DJEBBAR Noureddine maitre de conférences à l'université d'Ain Temouchent .Mr. MEDJDOUB Sidi Mohamed maitre de conférences à l'université de sidi bel abbes. qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail, et d'accepter la lecture de cette recherche.

Ainsi j'exprime profondément mes remerciements à **M. Ghazi Abdelkader** maitre de conférences à l'université de mascara pour avoir dirigé mes recherches. Sa disponibilité à tout instant, ses critiques constructives et sa rigueur scientifique sont autant d'atouts qui me permis à mener ce travail.

J'adresse également mes plus vifs remerciements à **M.Miloudi Abdelkader** professeur à l'université de sidi bel abbes qui a suivi de prés l'avancement de ce travail, sa disponibilité, ses critiques constructives et sa rigueur scientifique, sa motivation et sa présence dans les moments difficiles.

J'adresse ma reconnaissance **au comité scientifique** au niveau de l'université de sidi bel abbes qui m'a enseigné au cours de la période de première année 3eme cycle.et ensuite je tiens également à remercier infiniment l'université de mascara d'avoir nous permettre de faire des essais mécaniques et puis j'adresse un grand merci notamment au département de génie mécanique et le département de génie civile à l'université de mascara d'avoir nous rendre services au cours de ce travail de recherche .ensuite je remercie lycée Mohamed belkbir de Ain skhouna .Saida . En fin je tiens à associer ce travail **ma famille,** notamment **mes parents père et mère**, qui m'ont soutenu et encouragé durant toute mon activité de recherche.

Merci aux lecteurs de cette thèse

Résumé

Actuellement la plupart des assemblages mécaniques constitués de boulons ou de d'un joint collé. La combinaison de ces deux techniques d'assemblage vise à minimiser les aspects négatifs de chacune des deux techniques et de tirer avantage d'une possible complémentarité. La présente étude s'intéresse à la combinaison du collage et du boulonnage, le comportement d'un assemblage boulonné, collé et hybride constitué de tôles minces d'épaisseur e=2 mm, en acier galvanisé a été étudié. Cette étude a été axée principalement sur l'influence du couple de serrage des boulons, la température et le milieu humide. Une étude complémentaire visant à développer des modèles numériques par éléments finis en 3Da été réalisée afin d'accéder aux comportements mécaniques des assemblages collés, boulonnés et hybrides. Le but étant ainsi d'obtenir les cartographies les plus fiables possibles des champs des contraintes afin d'identifier leur influence sur les sites d'amorçage de fissure, et aussi pour prévoir exactement le point d'initiation de fissure. La validité de ces modèles est discutée à partir des résultats expérimentaux obtenus sur des assemblages collés, boulonnés et hybrides. L'utilisation du collage comme technique complémentaire à la technique de boulonnage a permis de montrer son effet positif sur la distribution des champs de contraintes.

Mots clés :Assemblage, colle, boulon, hybride, Abaqus, éléments finis.

Abstract

At the present time, most mechanical joints consist of bolts or a bonded joint. The combination of these two joining techniques aims to reduce the negative aspects of each of the two techniques and to take advantage of possible complementarity. The present study focuses on the combination of bonding and bolting, and investigates the behavior of a bolted, bonded and hybrid assembly of thin galvanized steel sheets e=2 mm thick. The main focus was on the influence of bolt torque, temperature and humidity. A complementary study aimed at developing 3D finite element numerical models was carried out to gain access to the mechanical behaviors of bonded, bolted and hybrid assemblies. The aim was to obtain the most reliable mapping possible of stress fields in order to identify their influence on crack initiation sites, and also to accurately predict the crack initiation point. The validity of these models is discussed on the basis of experimental results obtained on bonded, bolted and hybrid assemblies. The use of bonding as a complementary technique to bolting has demonstrated its positive effect on stress field distribution.

Keywords : Assembly, Adhesive, bolt, hybrid, Abaqus, finite element.

ملخص

تتكوّن معظم التجميعات الميكانيكيّة حاليا على براغي تجميع أو شريط لاصق. يهدف الجمع بين الطريقتين معا إلى التّقليل من السّلبيّات لكلا الطّريقتين ، والاستفادة قدر الإمكان من إيجابياتهما مجتمعة، تهدف هاته الدراسة إلى الجمع بين التجميع بالبراغي والشريط اللاصق في آن واحد، تمّ من خلالها دراسة السّلوك الميكانيكي للتجميع بالبراغي، والتّجميع بالشريط اللاّصق، والتجميع الهجين بواسطة قطع من الفولاذ المجلفن بسمك 2 مم . تتمركز هذه الدّراسة أساسا على تأثير عزم مزدوجة الشدّ للبرغي ، درجة الحرارة، والرطوبة . بالإضافة إلى جزء مكمّل للدراسة يهتمّ بتطوير أنموذج رقميّ ثلاثي الأبعاد وفق طريقة العناصر المنتهية من أجل التعرّف رقميا على السلوك الميكانيكي للتجميعات الثلاثة المدروسة بهدف الحصول على الخرائط الأكثر مصداقية لطريقة انتشار الإجهادات لتحديد الأماكن التي يتمّ فيها بدء تشكل الكسور، وكذلك من أجل التنبّؤ بدقّة بنقطة بدء الكسر. تمّت مناقشة هاته النّماذج الرّقمية من خلال النتائج التي حصلنا عليها بالتجارب على الأنواع الثلاثة للتّجميعات (بالبرغي- باللاصق – الهجين) . إن إدماج اللاّصق مع البراغي في التجميع الهجين له أثر إيجابي في توزيع الإجهادات .

الكلمات المفتاحيّة : تجميع ، اللاصق ، عنصر التجميع " البرغي "، هجين،أبكوس ، العناصر المنتهية .

Liste des matières

I.1.Introduction générale……..…….. **1**

Chapitre I

Etat de l'art

I.1. Introduction …… **6**

I.2.Assemblages boulonnés ……..…… **7**

I.2.1. Définition des joints boulonnés……... **7**

I.2.2.Configuration…… **7**

I.2.3.Avantages et inconvénient…… **9**

I.2.4.Transfert de charge dans les joints boulonnés…….. **10**

I.2.5. Caractéristiques d'un joint boulonné……... **10**

I.2.6.Résistance d'un boulon……. **11**

I.2.6.1. Résistance statique d'un boulon…… **11**

I.2.6.2. Résistance dynamique d'un boulon……... **12**

I.2.7.Analyse expérimentale…….. **12**

I.2.8.Analyse analytique…… **13**

I.2.9. Contraintes et modes de rupture……. **16**

I.2.9.1. Forces et contraintes en jeu……... **16**

I.2.10. Modes de rupture……... **17**

I.3.Assemblages collés…… **18**

I.3.1. Définition de la technique du collage……... **18**

I.3.2. Théorie de l'adhésion……... **20**

I.3.2.1.Adhésion …… **20**

I.3.2.2.Adhérence…… **20**

I.3.2.3 Théorie de l'ancrage mécanique…… **21**

I.3.2.4. Théorie électrique……. **21**

I.3.2.5. Théorie de la diffusion…….. **21**

I.3.2.6. Théorie thermodynamique……. **22**

I.3.2.7. Théorie chimique……... **22**

I.3.3. Traitements de surface…… **23**

I.3.4. Concentrations de contraintes et modes de rupture……. **24**

I.3.5. Défauts dans les assemblages collés…….. **26**

I.4.Assemblages hybrides. (HBC ou HBB)……. **27**

I.4.1 .Définition……. **27**

I.4.2. Avantages et inconvénients……. **28**

I.5. Analyse numérique pour les assemblages Boulonnés, collé, et hybrides……... **28**

I.5.1. Boulonnage…….. **28**

I.5.2.Collage…….. **29**

I.5.2.1. Analyse de Goland et Reissner……. **29**

I.5.2.2. Analyse de Hart-Smith…….. **32**

I.5.3.Hybride……... **33**

Chapitre II

Etude expérimentale

II.1. Introduction……... **44**

II.2.Procédure expérimentale…… **45**

II.2.1. Assemblage boulonné……. **45**

II.2.1.1. Caractéristiques des matériaux……..... **45**

II.2.1.2.Eprouvettes et machines…… **46**

II.2.1.4.Conditions d'essais et configurations étudiées……..... **49**

II.2.1.5. Influence du couple de serrage……..... **51**

II.2.1.6. Mode de rupture dans l'assemblage……..... **54**

II.2.2. Assemblages collés……. **58**

II.2.2.1.Essais de caractérisation de l'adhésif……. **58**

II.2.3. Assemblages hybrides…… **63**

II.2.3.1. Effet du couple de serrage sur la tenue mécanique de l'assemblage hybride…… **67**

II.2.3.2.Effet de l'environnement sur la tenue mécanique d'un assemblage hybride……..... **70**

II.2.3.3.Influence de la température sur le comportement mécanique de la colle AB… **71**

II.2.3.4.Influence de la température sur le comportement mécanique de l'assemblage hybride…….. **73**

Chapitre III

Etude numérique

III.1. Introduction…….. **79**

III.2. Modélisation de l'assemblage collé……. **80**

III.2.1. Description du modèle et propriétés mécaniques……..... **80**

III.2.2. Gestion de contacte……... **83**

III.2.3. Maillage et Conditions aux limites ……... **83**

III.2.4. Résultats…… **85**

III.3. Modélisation de l'assemblage Boulonné…….. **88**

III.3.1. Description du modèle et propriétés mécaniques…….. **88**

III.3.2.Matériaux utilisées……. **89**

III.3.3.Maillage et conditions aux limites…….. **89**

III.3.5. Résultats…….. **92**

III.3.5. 1.Comparaison entre deux configurations…….. **92**

III.4. Modélisation d'un assemblage hybride……. **97**

III.4.1. Description du modèle et propriétés mécaniques……... **97**

III.4.2.Résultat……..... **99**

III.4 2.1.Effet de la température sur les assemblages hybrides……... **104**

Conclusion générale…… **110**

Liste des tableaux

Chapitre II
Etude expérimentale

Tableau II.1 : Composition chimique de l'acier……... 45

Tableau II.2 : Propriétés mécaniques de l'acier galvanisé …….. 45

Tableau II. 3 : Propriétés mécaniques des colles…… 61

Tableau II.4 : Module de Young et contrainte maximale en fonction de la température……. 72

Tableau II.5 : Comparaison de l'éprouvettes hybride matière du poids avant et après l'étuvage…… 73

Chapitre III
Etude numérique

Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques de l'acier galvanisé ……. 81

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques…… 89

Figures

Chapitre I
Etat de l'art

Figure I.1: Échantillon à recouvrement simple boulonné…… 8

Figure I. 2 : Configuration de joints boulonnés : (a) Simple recouvrement - (b) Double recouvrement……... 8

Figure I. 3: Notations utilisées……. 11

Figure I. 4 : Équivalence du problème d'après…… 13

Figure I. 5 : Déformation d'un joint boulonné à simple recouvrement soumis à une force de traction : mise en évidence de la flexion secondaire……. 16

Figure I. 6 : Illustration des modes de défaillance d'un joint boulonné : (a) en tension - (b) en cisaillement - (c) par clivage - (d) par matage d'après…… 18

Figure II.7: Représentation schématique de différentes géométries d'assemblage…. 20

Figure I. 8 : Tendance de l'échantillon pendant la traction…….. 24

Figure I. 9 : Contraintes dans le recouvrement d'un joint collé…….. 25

Figure I. 10 : Points de concentrations de contraintes avec débordement de colle…. 25

Figure I. 11 : Modes de rupture acceptable d'un joint collé……. 26

Figure. I.12 : Défauts typique dans un assemblage collé…….. 27

Figure I. 13: Configurations de joints hybrides (Simple recouvrement)……. 28

Figure I. 14: Conditions aux limites idéales et indications de maillage d'après……. 29

Figure I. 15: Géométrie et notation du joint collé en simple recouvrement…… 30

Figure I. 16: Matériau dont le comportement est élastique parfaitement plastique…. 32

Figure .I.17: modèle hybride par element fini de paroissien…….. 33

Figure I.18: Répartition des contraintes de cisaillement dans un joint hybride (collé +riveté)…….. 35

Chapitre II
Etude expérimentale

Figure II.1 : Courbe Contrainte allongement…… 45

Figure II.2:Découpage et perçage des tôles par laser…….. 46

Figure II.3: Plaques usinées pour les assemblages……... 46

Figure II.4: Usure du boulon en acier ordinaire……... 47

Figure II.5: Type du boulon utilisé pour notre cas de figure…….. **47**

Figure II.6 : Clé dynamométrique ECO BUDGET…… **48**

Figure II.7: Éprouvette d'un assemblage boulonné (une seule fixation)……. **48**

Figure II.8: Assemblages boulonnés préparés……..… **49**

Figure II.:9 Procédure de serrage……. **49**

Figure II.10: Machine de traction INSTRON…….. **50**

Figure II.11: Assemblage à recouvrement simple sollicité en traction-cisaillement. **50**

Figure II.12: Effet de la force de serrage..... **51**

Figure II.13 : Variation de la charge maximale en fonction du couple de serrage…... **52**

Figure II.14 : Rupture du filetage……. **53**

Figure II.15:L'aire de la courbe de traction en fonction du moment…… **53**

Figure II.16 : Variation de l'énergie d'adsorption en fonction du couple de serrage.. **54**

Figure II.17 : Mode de rupture mixte traction-cisaillement (norme usuelle)……... **55**

Figure II.18 : Mode de rupture d'un assemblage à norme NASM …… **56**

Figure II.19:Mode de rupture pour les couples :$C = 19Nm$ et $C = 39Nm$…… **56**

Figure II.20: Mode de rupture pour les couples$C = 33Nm$ et $C = 36Nm$……. **57**

Figure II.21:Mode de rupture pour les couples$C = 25Nm$ et $C = 30Nm$…….. **57**

Figure II.22 : Types de colles utilisées …… **58**

Figure II.23: Eprouvettes fabriquées dans un moule (a : Colle noire, b : Colle AB) **59**

Figure .II.24: Dimension des éprouvettes selon la norme WP 300…….. **59**

Figure II.25: Essai de traction de la colle noire…… **60**

Figure II.26:Essai de traction (Colle AB)……. **60**

Figure II.27 : Mode de rupture de la colle noire…….. **61**

Figure II.28: Courbes typiques de l'essai de traction pour la Colle AB et la colle noire…….. **61**

Figure II.29 : Courbes typique traction de l'assemblage collé pour la Colle AB et la colle noire……... **62**

Figure II.30 : Assemblages collés avant traction……. **63**

Figure II.31 : Assemblages collés après traction (faciès de rupture)…….. **63**

FigureII.32:Evolution de la charge en fonction de déplacement pour joint hybride avec (colle noir et colle AB)……. **64**

Figure II.33: Trois types d'assemblage ; Hybride, Boulonnage et Collage…….. **64**

Figure II.34:Evolution de la charge en fonction de déplacement des trois configurations…… **65**

FigureII.35: Comparaison des charges maximales de rupture et des déplacements dans les différentes configurations **66**

Figure II.36 : Variation de l'énergie d'adsorption en fonction du couple de serrage **67**

Figure II.37: Effet du couple de serrage sur la tenue mécanique de l'assemblage hybride…….. **68**

Figure II.38 : Evolution de la charge maximale en fonction du couple de serrage. **69**

Figure II.39 : Evolution de la charge maximale en fonction du couple de serrage. **70**

Figure II.40: Etuve de séchage……. **71**

Figure II.41: Effet de la température sur le comportement de la colle AB…… **71**

Figure II.42 :Evolution du module de Young en fonction de la température……... **72**

Figure II.43: Effet de l'environment sur la tenue mécanique des assemblages hybrides (Température + humidité)…….. **75**

Figure II. 44 : Evolution de propriétés mécaniques du joint en fonction de la température…… **75**

Chapitre III
Etude numérique

Figure III.1 : Géométrie du joint collé à simple recouvrement……. **80**

Figure III.2: Courbe typique contrainte - Allongement de l'acier galvanisé…… **81**

Figure III. 3: Contrainte -déplacement de la colle AB……..... **81**

Figure III.4 Contrainte-déplacement de la colle noire…….. **82**

Figure III.5: Modèle géométrique du joint collé …….. **82**

Figure III.6: Règles de pénétration des nœuds esclaves/maîtres…….. **83**

Figure III.7: Maillage de l'assemblage collé…… **84**

Figure III.8 :Maillage au niveau de la colle…….. **84**

FigureIII.9: Conditions aux limites dans le joint de colle…… **84**

Figure III.10 : Etude de la convergence de la colle préférée AB …… **85**

Figure III. 11 : Plans des profils des contraintes de Von Mises dans la colle…….. **85**

Figure III.12 : Niveaux de contrainte de Von Mises dans l'assemblage collé…….. **86**

Figure III.13: Distribution des contraintes de pelage dans la couche adhésive… **86**

Figure III.14: Distribution des contraintes de cisaillement dans la noire et AB …..… **87**

Figure III.15 : Dimensions de l'assemblage boulonné…….. **88**

Figure III. 16:Assemblage des pièces……... **89**

Figure III.17 :Maillage de l'assemblage boulonné..... **90**

Figure III.18 : Conditions aux limites de l'assemblage..... **90**

Figure III.19 : Représentation schématique de la partition de boulons …… **91**

Figure III.20 : Représentation schématique des surfaces maîtres et esclaves..... **92**

Figure III. 21 : Variation des contraintes de Von Mises avec et sans serrage..... **93**

Figure III. 22 : Variation des contraintes de Von Mises avec et sans serrage..... **93**

Figure III. 23 :Contraintes développées dans la région du boulon après application d'une force de serrage..... **94**

FigureIII. 24 :Contour des contraintes de Von mises dans les boulons en fonction du couple de serrage..... **95**

FigureIII.25 : Variation de la contrainte maximale de Van Mises en fonction du couple de serrage..... **96**

Figure III.26 : Distribution des contraintes normales suivant l'axe z dans la plaque inférieure et supérieure..... **96**

Figure III.27 : Profil de déformé du trou (étude numérique) et rupture de la plaque (résultat expérimentale)..... **97**

Figure III.28 : Partitions dans différents sections..... **98**

Figure III. 29 : Maillage du joint collé et boulonné..... **99**

Figure III.30: Contraintes développées dans la région du boulon dans un assemblage boulonné et hybride ($C = 0.492Nm$)…… **100**

Figure III.31: Contraintes développées dans la région du boulon dans un assemblage boulonné et hybride ($C = 0.738Nm$)…… **100**

Figure III.32: Contraintes développées dans la région du boulon dans un assemblage boulonné et hybride ($C = 0.984\ Nm$). **100**

Figure III.33: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et **101**

supérieure d'un assemblage hybride ($C = 0.492Nm$)……

Figure III.34: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage boulonné($C = 0.492Nm$) …… **101**

Figure III.35: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage hybride ($C = 0.738Nm$)…… **102**

Figure III.36: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage boulonné ($C = 0.738Nm$)……..... **102**

Figure III.37: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage hybride($C = 0.984\ Nm$)…… **102**

Figure III.38: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage boulonné ($C = 0.984Nm$)…… **103**

Figure III. 39 **:** Plans des profils des contraintes de Von Mises dans la colle de l'assemblage hybride ($C = 0.492Nm$)…… **104**

Figure III. 40 : Plans des profils des contraintes de Von Mises dans la colle de l'assemblage hybride ($C = 0.738\ Nm$)…… **104**

Figure III. 41 : Plans des profils des contraintes de Von Mises dans la colle de l'assemblage hybride ($C = 0.948\ Nm$)…… **104**

Figure III. 42 : Modélisation d'un assemblage hybride sous une température 26 . **105**

Figure III.43: L'assemblage hybride _la colle AB. (à 26°C)……... **106**

Figure III.44: L'assemblage hybride _la colle AB. (à 40°C)…… **106**

Figure III.45: L'assemblage hybride _la colle AB. (à 60°C)……... **107**

Nomenclature

Notations générales

C = raideur (N.mm-1) de la fixation (1D)

Ci = raideur (N.mm-1) de la fixation *i* (1D)

Cu = raideur (N.mm-1) de cisaillement de la fixation (2D)

Cw = raideur (N.mm-1) de traction de la fixation (2D)

*C*θ = raideur (N.mm.rad-1) de flexion de la fixation (2D)

Ec = module d'Young (MPa) de l'adhésif

Ef = module d'Young (MPa) de la fixation

Ej = module d'Young (MPa) du substrat *j*

G = module de Coulomb (MPa) de l'adhésif

Ij = moment quadratique (mm4) autour de *z* du substrat *j*

L = longueur (mm) du recouvrement

Mj = moment (N.mm) de flexion dans le substrat *j*

Nj = effort (N) normal dans le substrat *j*

Ni= effort (N) normal dans le substrat *j* et la travée *i*

Sj = section (mm2) du substrat *j*

Smax = contrainte (MPa) maximale de pelage dans l'adhésif

Si,j,k,l = moment (N.mm) de flexion nodal au noeud *i*, *j*, *k* ou *l*

T = contrainte (MPa) de cisaillement dans l'adhésif

Ti = contrainte (MPa) de cisaillement dans l'adhésif et la travée *i*

Tmax = contrainte (MPa) maximale de cisaillement dans l'adhésif

Tmoy = contrainte (MPa) moyenne de cisaillement dans l'adhésif

Vj = effort (N) tranchant dans le substrat *j*

b = profondeur (mm) de la jonction ou pas transversal

ci = constante d'intégration (mm)

d = distance (mm) au bord

dj = abscisse (mm) de la fixation *j*

e = épaisseur (mm) de la couche adhésive

Introduction générale

Introduction générale

Parmi les systèmes métalliques actuellement développés, on peut citer : deux types des assemblages mécaniques, assemblage démontable, une liaison qui est conçue de manière à être démontée sans détérioration importante des pièces qui peuvent être généralement réutilisées pour recréer un assemblage (clou, rivetage, boulonnage, agrafe, goupille, clavette). Et assemblage permanent (non démontable), pour supprimer cette liaison, il est nécessaire de déformer ou de détruire au moins une des pièces assemblées (soudage, collage, clinchage). Pour faire le choix entre ces deux types il y a plusieurs critères, critères structurels par exemple : résistance, comportement…, critères de fabrication par exemple : faisabilité, maîtrise des tolérances…, critères propre au montage sur site par exemple : faisabilité, possibilités de réglages… et critères économiques **[1]**.

Les assemblages boulonnés sont largement utilisés dans les structures métalliques en raison de la simplicité de leur réalisation, ainsi que de la facilité de leur mise en œuvre. Néanmoins, la présence du trou d'alésage constitue le point faible de ce type des structures du fait de la concentration des contraintes qui est souvent la cause principale de la naissance des fissures. En plus, ce mode d'assemblage implique un transfert de charge entre deux milieux continus de manière discrète (au niveau des fixations) et par conséquent génère de fortes concentrations de contraintes en bord de trou, néfaste pour la tenue en fatigue**[2]**.

Les assemblages collés permettent un transfert mieux réparti sur la longueur de recouvrement, mais présentent une accommodation plastique, incompatible avec la tenue en fatigue (statique dans la durée). En plus, les endroits les plus sollicités sont aux extrémités de l'adhésif présentant plus de risques d'amorçage de fissures et par conséquent son renforcement est plus recommandé **[3]**.

L'idée de l'utilisation d'un assemblage hybride boulonné collé est de réduire le transfert aux fixations, de manière à déplacer le site critique en zone non trouée tout en garantissant la tenue aux charges extrêmes. Dans cette étude, nous nous intéressons à l'étude d'un assemblage hybride qui associe deux techniques d'assemblages boulonnés et collés. La combinaison de ces deux techniques d'assemblage vise à minimiser les aspects négatifs de chacune des deux techniques.

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse porte sur l'étude du comportement d'un assemblage boulonné, collé et hybride constitué de tôles minces d'épaisseur e=2 mm, en acier galvanisé.

L'influence du couple de serrage lié au procédé de réalisation de l'assemblage boulonné et hybride sur leurs comportements global sera analysée. Seul l'assemblage à simple recouvrement est étudié dans le cadre de ce travail. Cette étude est menée à la fois selon une approche expérimentale en analysant la chronologie et les mécanismes d'endommagement des assemblages d'une part, et une simulation numérique par éléments finis, d'autre part.

Globalement, le présent rapport de la thèse est organisé en trois chapitres principaux :

Dans le premier chapitre, nous donnons une généralité sur les assemblages boulonnées, collés et leurs comportements mécaniques globaux. On s'attachera à comprendre leurs avantages, inconvenants, la rupture et l'endommagement, puis nous aborderons les problématiques scientifiques majeures soulevées au cours des travaux en les replaçant dans leur contexte.

Le deuxième chapitre présente les procédures et les résultats expérimentaux. Les détails sur le matériau des plaques (acier galvanisé) et son comportement mécanique sont donnés à partir des essais de traction monotone sur des éprouvettes du type haltère. Les essais mécaniques en traction-cisaillement sont réalisés sur des assemblages collés afin de choisir le type de la colle adéquate, d'autres essais sont réalisés sur des assemblages boulonnés et hybride afin de vérifier l'influence du : couple de serrage des boulons, la température et le milieu humide. Le couplage entre ces deux techniques d'assemblages (boulonné et collé) permet d'identifier les différentes phases décrivant le comportement global d'endommagement d'une part, et de détecter les zones critiques. Et enfin d'étudier le choix des différents facteurs qui peuvent influer sur le processus du couplage.

Le troisième chapitre sera basé sur une simulation numérique contiennent toutes les propriétés des matériaux utilisés et conditions de chargement, les couples de serrage et les coefficients de frottement entre les éléments de contact. Afin de prédire le comportement des assemblages, et pour déterminer les champs des contraintes pour identifier leur influence sur les sites d'amorçage de fissure, et aussi pour prévoir

exactement le point d'initiation de fissure. À la fin de ce manuscrit seront présentées les conclusions et les perspectives générales.

Référence bibliographiques

[1] **Thong DANG-HOANG**, Rupture et endommagement d'un assemblage boulonné :approche expérimentale et simulation numérique, thèse de doctorat, 19, 25.

[2] **Kelly, G.** (2006),Quasi-static strength and fatigue life of hybrid composite single-lap joints. Composite Structures. 72(1). 100-115.

[3] **Paroissien. E.** (2006). Contribution aux assemblages hybrides (boulonnes/colles)-Application aux jonctions aéronautiques. 20-30.

Chapitre I

Etat de l'art

CHAPITRE I

Etat de l'art

Ce chapitre littéraire a pour objectif de parcourir en revue les notions de base concernant les assemblages boulonnés, collés et hybrides afin de voir ce qui s'est passé auparavant et pour comprendre le phénomène dés le début et cela sera un facteur de bien faire l'expérimentation et la modélisation numérique notamment les assemblages hybrides notre cas d'étude, sachant que ce type est très difficile à modélisé numériquement autrement dit via le code de calcul par EF Abaqus , et encore difficile même expérimentalement en raison de manque de moyen d'expérimentation, qui ne sont pas à la hauteur de cet objectif de recherche , et puis ce passage nous permet de faire comprendre les considérations demandées lors des essais au cours de cette période de recherche, et de même nous faire la simulation selon les normes reconnues dans ce domaine hyper important, que soit du côté de la conception ou bien de la fabrication .

I.1.Introduction

Les assemblages collés sont largement utilisés dans plusieurs domaines de l'ingénierie, tels que l'automobile, l'aérospatiale et les structures spatiales, en tant que méthode simple pour rassembler des composants, tout en garantissant les exigences de conception de la structure. Les joints collés offrent de nombreux avantages, en particulier l'assemblage de différents matériaux ou matériaux composites. L'assemblage entre les matériaux est continu, ce qui permet de répartir uniformément les efforts et d'éviter les concentrations de contraintes. Cependant, un inconvénient majeur de cette technique d'assemblage est une résistance à la Chaleur limitée, une sensibilité à l'humidité et au vieillissement. La résistance de l'assemblage est directement liée au comportement de l'adhésif puisqu'il présente de faibles propriétés par rapport à celles des substrats. L'analyse du comportement adhésif était la principale préoccupation des chercheurs. Dès le premier travail de Volkersen[**1**], d'autres modèles ont été développés sur un joint à recouvrement simple ou double. La méthode des éléments finis a été largement utilisée pour prédire le comportement des joints collés. Son plus grand avantage est qu'il est très facile de modifier les conditions aux limites et les géométries, d'introduire des non-linéarités de comportement, d'analyser des structures faites de matériaux différents et donc de réaliser des études paramétriques complexes avec une modélisation tridimensionnelle[**2**].

Les joints boulonnés sont aussi souvent utilisés dans l'aérospatiale, les structures ferroviaires et l'automobile. Les fixations mécaniques telles que les boulons étaient couramment utilisées dans l'industrie aérospatiale depuis plusieurs décennies. Cette technique fournit un ensemble de bonne conductivité électrique et la facilité de démontage des composants. Le problème majeur qui se pose dans un joint boulonné est la forte concentration des contraintes autour des trous de fixation qui augmente le risque de défaillance de la structure, notamment la localisation de ces fissures n'est possible que lorsque leur taille dépasse la tête du boulon. Cette technique d'assemblage permet de joindre des métaux de natures identiques ou différentes (aluminium, acier) et même des composites, avec des boulons en alliage d'aluminium, acier etc... Plusieurs études ont été réalisées pour étudier le comportement des structures rivetées par des approches analytiques et expérimentales, ou des simulations numériques. Cependant, la dernière recherche vise à combiner les deux types d'assemblages pour améliorer les performances individuelles de chaque type de joint. Les applications modernes des joints hybrides (collés + boulonnés), sont d'un grand intérêt technologique. Cette technique est d'une grande importance en ingénierie comme l'aéronautique. Un certain nombre d'études expérimentales ont montré que ces assemblages peuvent potentiellement atteindre une résistance statique élevée par rapport au joint collé ou riveté séparément. Comparée à une structure boulonnée, elle réduit le nombre de boulons et améliore l'esthétique et la résistance de la structure.

I.2.Assemblages boulonnés

I.2.1. Définition des joints boulonnés.

L'assemblage mécanique de deux panneaux est réalisé par l'intermédiaire d'un rivet ou d'un boulon. L'utilisation de boulons apporte des avantages supplémentaires au simple rivet puisque, par exemple, une précontrainte peut être installée sur le boulon afin de produire une force de frottement capable de reprendre les efforts extérieurs. Elle visera également à réduire l'impact des concentrations de contraintes engendrées par la présence du trou[**2**].La Figure I.1 illustre un exemple d'un assemblage boulonné, à simple recouvrement.

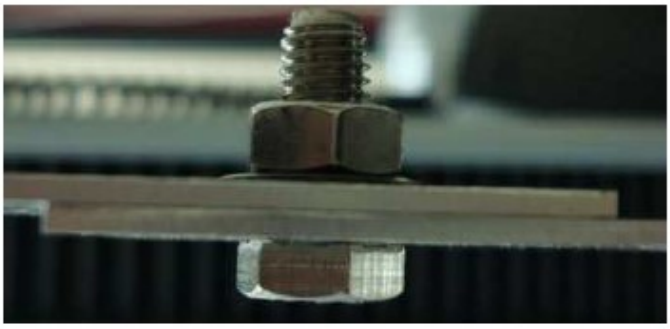


Figure I.1:Échantillon à recouvrement simple boulonné.

Les assemblages par fixation sont souvent utilisés dans des structures aéronautiques, automobiles, ferroviaires, et aussi dans plusieurs composants mécanique (grues, ponts, …ect). Les structures boulonnées présentent l'avantage de leurs facilitées de mise en œuvre. Ce type d'assemblage concerne à la fois les tôles métalliques (aluminium, acier, …) et en composite avec des corps du boulon en tenue mécanique à la fois en statique, et en dynamique et en fatigue.

Plusieurs travaux dans la littérature sont basés sur l'étude de la caractérisation mécanique des assemblages boulonnés. Ces études ont porté sur plusieurs volets, nous citons, à titre exemple:

- **La flexibilité de la fixation.**
- **Le transfert de charge.**
- **Les concentrations de contraintes.**
- **Les différentes modes de rupture..ect.**

I.2.2.Configuration

Le boulonnage n'offre que deux configurations d'assemblage : les joints à simple recouvrement et les joints à double recouvrement (respectivement (a) et (b) sur la Figure I.2.

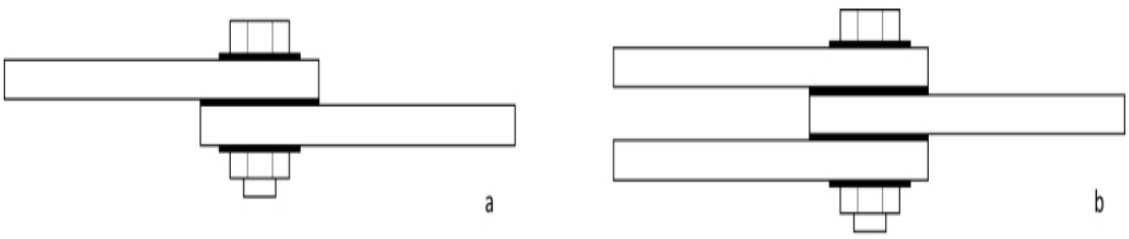


Figure I. 2 : Configuration de joints boulonnés : (a) Simple recouvrement - (b) Double recouvrement[**2**].

Les joints à simple recouvrement sont utilisés souvent pour l'assemblage de deux panneaux :

- Joints à simple recouvrement : ils permettent de ne pas trop alourdir la structure[3].
- Joints à double recouvrement : ils sont généralement utilisés pour les réparations ou l'assemblage de deux plaques bout à bout. Ils sont moins communs dans le domaine de l'aéronautique mais apportent des avantages comme le fait de limiter la flexion secondaire, phénomène parasite qui engendre le pelage.

Généralement, en aéronautique, les joints présentent plusieurs rangées de boulons. Cependant, les études sont plus couramment menées sur des configurations à un, deux voire trois boulons en colonne, alignés dans la direction de chargement. En effet, même si des configurations à plusieurs colonnes sont envisagées, leur étude est toujours ramenée à une configuration en colonne[4 , 5, 6].

I.2.3.Avantages et inconvénient

Les joints boulonnés peuvent être démontés en cas de contrôle ou de nécessité de réparation. En faisant varier l'épaisseur des substrats, ils peuvent reprendre des charges d'intensité différentes : une charge élevée pourra être transmise en utilisant des substrats épais [6]. En dépit du perçage qui est une étape délicate, en particulier pour les matériaux composites, les joints boulonnés sont simples à mettre en œuvre. Ils ne nécessitent pas de préparation de surface qui peut s'avérer long et difficile.

Cependant, en plus d'apporter du poids à l'assemblage, l'ajout de boulons introduit les concentrations des contraintes par la création du trou. Les concentrations de contraintes à ce niveau sont souvent critiques pour la résistance du joint puisque les fissures sont généralement initiées autour du trou[7]**.** Si des matériaux composites sont utilisés pour les substrats, le perçage peut engendrer un délaminage du matériau. Le foret peut dé laminer les premiers plis ainsi que les derniers plis. Lorsque l'outil de perçage entre dans le matériau, le mouvement de rotation entraine les premiers plis en les tirants. Cela introduit une force de pelage qui sépare ces plis du reste du matériau[8].Lorsque le foret sort du matériau composite, il est susceptible de pousser les derniers plis. Il est possible d'éviter ces problèmes en diminuant l'effort de pénétration qui peut être atteint en adaptant la vitesse de rotation ou d'avance du foret: une diminution de la vitesse d'avance pourra limiter la délamination à l'entrée. La délamination à la sortie peut facilement être éliminée en soutenant la partie arrière du composite. La dégradation de

la matrice engendrée par la chaleur dégagée lors du perçage peut être limitée par une vitesse d'avancement réduite. Malgré tout, il est possible qu'un délaminage interne du matériau apparaisse à cause du passage du foret[**9**]. Par ailleurs, un trou apporte une discontinuité dans les fibres des composites : la résistance du matériau est affectée. Finalement, lorsque un matériau composite est utilisé, il est essentiel de choisir avec précaution le matériau du boulon afin d'éviter la corrosion galvanique. Elle se produit lorsqu'un matériau composite contenant des fibres de carbone se trouve en contact avec une fixation en aluminium, par exemple, et que de l'eau s'infiltre dans la fixation[**10**, **11**]. Les matériaux se dégradent, la structure s'affaiblie.

I.2.4. Transfert de charge dans les joints boulonnés

Le transfert de charge pour les joints boulonnés se fait à deux niveaux :

- À l'échelle macroscopique par les forces de tension et de cisaillement dans la fixation, d'une part, et par le contact entre les plaques, d'autre part,
- À l'échelle microscopique par les frottements entre les plaques ou entre les extrémités du boulon et les plaques[**12**, **13**].

I.2.5. Caractéristiques d'un joint boulonné

Plusieurs paramètres rentrent en jeu pour caractériser un joint boulonné. La Figure I.3 indique toutes les notations utilisées. Ainsi, les paramètres liés au substrat sont l'épaisseur « t », la largeur « w », la longueur « L », la distance du milieu du trou à la fin de la zone de recouvrement « e » et le diamètre du trou « D ». En ce qui concerne le boulon, le diamètre « d » sera utilisé. Cependant, dans la suite du projet, afin de représenter les tests expérimentaux effectués, il n'y aura pas de jeu entre le trou et le fût du boulon, seule la nomenclature « D » sera conservée et pourra représenter, indépendamment, le diamètre du trou ou le diamètre du boulon. Comme nous n'étudions que des boulons utilisés conjointement avec des rondelles, seul le diamètre extérieur des rondelles « d_r » est considéré[**14**].

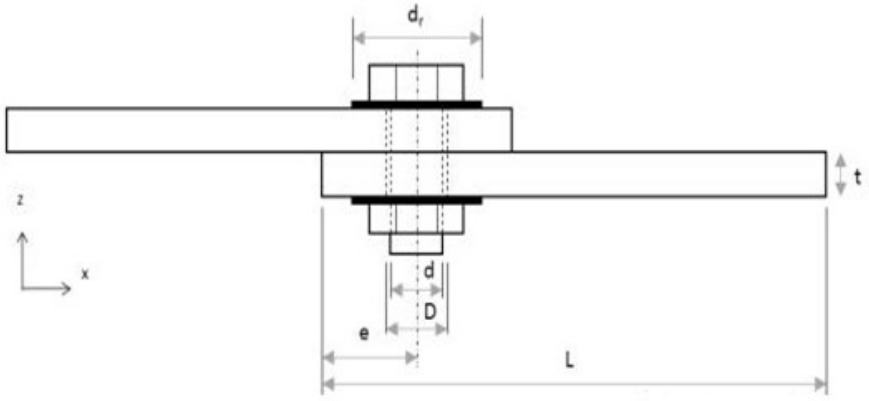


Figure I. 3: Notations utilisées[**15**].

I.2.6.Résistance d'un boulon.

I.2.6.1. Résistance statique d'un boulon.

Les normes NFE 20-898-1 et NFE 20898-2 définissent clairement les spécifications d'essais statiques sur la liaison **[16].**

a) La vis :

La résistance statique nominale d'une vis va être essentiellement fonction de la classe de qualité de l'élément fileté. Le symbole de la classe de qualité se compose de deux chiffres :

- Le premier représente le 1/100ème de la valeur nominale de la résistance à la traction exprimée en N/mm^2 (MPa).
- Le second représente dix fois le rapport entre la valeur nominale de la limite inférieure d'écoulement Rel ou de la limite conventionnelle d'élasticité $Rp_{0.2}$ en N/mm^2 et la valeur nominale de la résistance à la traction. Par exemple, pour une vis de classe 10.9 on obtient :

$$R_{mmin} \approx 100 * 10 = 1000 \text{ MPa} \qquad \textbf{(I.1)}$$

$$R_{emin} \approx \frac{9*R_{mmin}}{10} = 900 \text{ MPa} \qquad \textbf{(I.2)}$$

b) L'écrou :

L'écrou est lui aussi soumis aux mêmes types d'essais (statiques). Il sera de la même façon affecté d'une classe de qualité. Dans ce cas, la classe de qualité est symbolisée par

une valeur qui représente sensiblement le 1/100ème de la contrainte minimale exprimée en MPa sur la vis lors de l'essai de traction sur écrou, exemple : écrou de classe 8 :
L'écrou doit pouvoir résister à une force correspondant à une contrainte de 800 MPa dans la section résistante de la vis, sans qu'il y ait une déformation permanente de l'écrou. L'écrou doit alors pouvoir être enlevé à la main. Dans le cas contraire, la norme NFE 20-898-2 autorise l'utilisation d'une clé pour une manœuvre d'un demi-tour de la clé au maximum. L'écrou doit être ensuite retiré à la main.

De façon pratique, et à classe de qualité égale, l'écrou sera toujours bien plus résistant que la vis **[17].** C'est donc la vis qui va, dans tous les cas, déterminer la résistance statique du boulon. Le CETIM (centre d'étude et de services technologiques de l'industrie des matériaux de construction) a réalisé de nombreux essais statiques, notamment une intéressante étude comparative sur la boulonnerie en aciers spéciaux pour traitements thermiques, et en aciers au Bore **[18-20].** Ces essais montrent que la tenue statique (et dynamique) des boulons en aciers au bore est toujours supérieure à celle obtenue avec les aciers spéciaux pour traitements thermiques.

I.2.6.2. Résistance dynamique d'un boulon

Il convient de remarquer que 80 %de cas de rupture en fatigueconcerne les assemblages vissés **[21].** La première difficulté est de déterminer les sollicitations auxquelles est soumise la liaison ; cette analyse est généralement complexe et nécessite souvent l'utilisation d'outils puissants comme les éléments finis.

La deuxième difficulté est l'extrême complexité de la transmission des efforts entre l'écrou et la vis, qui dépend de la forme des filets, mais aussi des jeux et des rigidités relatives des pièces. De nombreux travaux ont essayé de modéliser le phénomène **[22,23]**, permettant une bonne compréhension de celui-ci, mais restant inexploitables pour le calcul. Dans ce sens, TANAKA et HONGO **[24]** ont réalisés une étude numérique sue l'assemblage vissé, de trois corps élastiques (vis, écrou, pièce serrée), en se basant sur la méthode des éléments finis.

I.2.7.Analyse expérimentale

Des boulons instrumentés sont couramment utilisés pour mesurer le transfert de charge mais aussi la précontrainte appliquée. Le mode opératoire est le même quelle que soit la

mesure étudiée. Il faut tout d'abord installer des jauges sur le boulon. Ensuite, l'étalonnage est une étape importante : plusieurs valeurs connues sont appliquées et les informations données par les jauges sont enregistrées. Une base de données ou une droite de corrélation est ainsi créée. Elle est utilisée lorsque les données des tests sont acquises. Il est alors possible de connaître en temps réel la précontrainte appliquée au boulon[**25**] , ou le transfert de charge du boulon[**26، 27**].

Toutefois, ces systèmes expérimentaux demandent du temps (fabrication minutieuse, étalonnage) et du matériel spécial et peuvent s'avérer très coûteux. Par ailleurs, tous les boulons ne peuvent pas être équipés de jauges. Par exemple, MCCARTHY[**29**]utilise un boulon de diamètre 6 mm, ce qui est généralement le cas dans la littérature.

I.2.8.Analyse analytique.

Les modèles analytiques développés dans la littérature visent généralement à déterminer le taux de transfert de charge pour chacun des boulons de l'assemblage. Ils permettent également de faire une évaluation rapide du joint, sans avoir besoin de la mise en œuvre d'un modèle complexe par éléments finis et d'un opérateur qualifié. Dans ce paragraphe, un seul modèle analytique est développé : il est repris dans la suite de ce mémoire. Il a l'avantage d'être à la fois relativement simple et suffisamment précis.

Le modèle présenté dans cette partie est celui de GUILLOT[**21**]**.** Pour établir son modèle analytique, l'auteur ne considère qu'une seule colonne de fixation. Chacune des parties de l'assemblage, qui sont les portions de substrats entre les fixations et les fixations elles-mêmes, sont associées à des ressorts. Figure I. 4 dont il détermine la souplesse (notée C sur la Figure I.4). Chaque fixation établit un lien entre les deux substrats A et B, tandis que chaque portion de substrat joint deux fixations adjacentes.

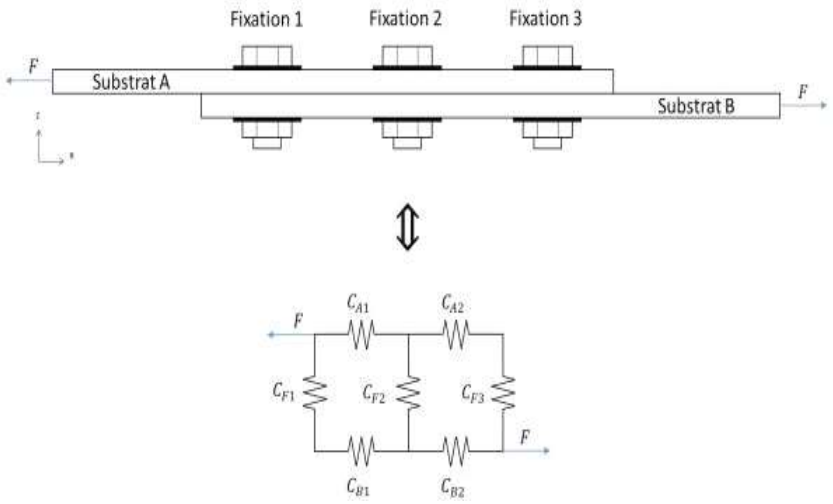


Figure I. 4: Équivalence du problème[**30**].

D'autres hypothèses sont émises dans un but de simplification :

- le domaine plastique n'est pas pris en compte,
- toutes les déformations doivent rester élastiques,
- la charge appliquée est statique et transversale à l'axe des boulons,
- aucune précontrainte n'est appliquée,
- les frottements sont négligés,
- la flexion secondaire n'est pas prise en compte,
- il n'y a pas de jeu entre le trou et le boulon.

Afin de calculer la souplesse des fixations et du substrat, plusieurs méthodes sont applicables, en se basant sur des résultats expérimentaux ou uniquement des considérations d'ordre géométrique et matériel. C'est cette dernière option qui est exposée ici. En effet, HTH.H[**31**]proposent une formule empirique pour calculer le paramètre de fixation C_F :

$$C_F = \left(\frac{t_A + t_B}{2d}\right)^a \frac{b}{n}\left(\frac{1}{t_A E_A} + \frac{1}{n t_B E_B} + \frac{1}{2 t_A E_F} + \frac{1}{2n t_B E_F}\right) \textbf{(I. 3)}$$

où E_A et E_B sont les modules d'Young des matériaux des substrats A et B, t_A et t_B les épaisseurs des substrats, d le diamètre de la fixation, n qui vaut 1 si le joint est à simple recouvrement, 2 pour un joint à double recouvrement, a et b valent respectivement 2/3 et 3 si le joint est boulonné et respectivement 2/5 et 2,2 dans un cas de joint riveté pour des substrats en métal, respectivement 2/3 et 4,2 s'ils sont en carbone/époxy assemblés par des boulons.

Certains paramètres ne sont pas pris en compte ici, puisqu'ils ont été négligés par les hypothèses, mais peuvent néanmoins influencer la flexibilité des fixations comme la précontrainte, le jeu trou-boulon ainsi que les têtes des fixations. Tous ces paramètres diminuent la souplesse de la fixation[**32**]**.**

La souplesse des pièces, C, est celle de la portion de substrat entre deux trous sans les prendre en compte. On a ainsi :

$$C = \frac{l}{wtE} \textbf{(I. 4)}$$

Avec :E le module d'Young du substrat considéré, ℓ la distance entre deux trous consécutifs, w la largeur du substrat, et t son épaisseur.

Pour trouver le transfert de charge dans chaque boulon, HUTH**[32]**développe son calcul, en écrivant la compatibilité des déplacements associée à l'équilibre des nœuds, pour chaque sous-système, et en ajoutant la condition que la somme des forces transférées par chaque fixation doit être égale à la force appliquée. Il est également possible de développer cette équation par analogie électrique comme le suggère PAROISSIEN[**5**], d'après ROSS[**33**], en utilisant les deux lois de Kirchoff dans les différentes mailles du circuit électrique équivalent.

Le problème à résoudre se résume donc sous la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} C_{F1}+C_{A1}+C_{B1} & -C_{F2} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ C_{A2}+C_{B2} & C_{F2}+C_{A2}+C_{B2} & -C_{F3} & \cdots & 0 & 0 \\ C_{A3}+C_{B3} & C_{A3}+C_{B3} & C_{F3}+C_{A3}+C_{B3} & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_{A(n-1)}+C_{B(n-1)} & C_{A(n-1)}+C_{B(n-1)} & C_{A(n-1)}+C_{B(n-1)} & \cdots & C_{F(n-1)}+C_{A(n-1)}+C_{B(n-1)} & -C_{Fn} \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \cdots \\ \tau_{n-1} \\ \tau_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{A1} \\ C_{A2} \\ C_{A3} \\ \cdots \\ C_{A(n-1)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \textbf{(I.5)}$$

Où$\left(\tau_{\mathrm{i}} = \frac{FT}{F}\right)$est le taux de transfert de charge de la fixation i et ; C_{Ai} , C_{Bi} , C_{Fi} sont respectivement les souplesses des différentes parties i du substrat A, du substrat B et de la fixation i.

Seuls les cas à deux et trois boulons nous intéressent par la suite. Ainsi, en résolvant le système matriciel pour deux et trois boulons, on obtient respectivement :

- **pour deux boulons**

$\tau_1 = \frac{C_{A1}+C_{F2}}{C_{A1}+C_{B1}+C_{F1}+C_{F2}}$ et $\tau_2 = \frac{C_{B1}+C_{F1}}{C_{A1}+C_{B1}+C_{F1}+C_{F2}}$ dans le cas général $(\mathbf{I.6})$

$\tau_1 = \tau_2 = 0.5$ dans le cas de transfert idéal, c'est-à-dire, lorsque les substrats sont identiques (même épaisseur et même matériau) ainsi que les fixations.

- **pour trois boulons**

$$\boldsymbol{\tau_1 = \tau_3 = \frac{\frac{C_F}{C}+1}{\frac{3C_F}{C}+2}} \quad \boldsymbol{et\ \tau_1 = \tau_2 = \frac{\frac{C_F}{C}}{3\frac{C_F}{C}+2}} \text{ dans la cas idéal} (\mathbf{I.7})$$

Il est ainsi possible de voir que les lignes extrêmes d'un joint à plusieurs boulons sont plus chargées que les boulons du milieu.

Ce modèle analytique, réducteur dû à ses nombreuses hypothèses simplificatrices (absence de frottements, pas de précontrainte appliquée, flexion secondaire négligée), n'est pas suffisant pour mener des calculs de conception, mais il permet une approche globale du fonctionnement d'un joint boulonné.

ALKATAN[**34**] a amené une étude afin de déterminer les paramètres influents lorsque sont ajoutés frottements et précontrainte : ces facteurs sont nombreux et ont diverses influences. Ainsi, la précontrainte tend à diminuer la souplesse, la rigidité apparente devient élevée ; le même comportement est observé avec les frottements ou la largeur de l'échantillon. Lorsque l'épaisseur diminue, la souplesse augmente. Enfin, le module d'Young n'a pas d'influence sur la flexibilité mais sur la répartition des contraintes. Toutes ces observations n'ont pas permis aux auteurs de déterminer un modèle analytique simple pour améliorer le modèle de GUILLOT**[21]**.Cependant, les souplesses apparentes des différentes parties du joint (substrats et boulons) peuvent être retrouvées par analyse numérique dynamique ou par résultats expérimentaux. Par la suite, MCCARTHY et GRAY**[35]** ont développé des modèles analytiques, en considérant les frottements et la précontrainte. ILIESCU **[36]** a présenté également son modèle analytique, avec la prise en compte du jeu trou-boulon. Toutefois, comme le modèle de **HUTH**[**31**] a l'avantage d'être à la fois relativement simple et suffisamment précis.

I.2.9.Contraintes et modes de rupture

I.2.9.1. Forces et contraintes en jeu

L'assemblage est globalement en tension puisqu'une charge axiale est appliquée sur le joint. Cependant, un phénomène parasite apparaît : la flexion secondaire. En effet, comme la transmission de charge ne se fait pas sur le même plan, les fibres externes des deux substrats vont avoir tendance à s'aligner lors de l'application de la charge, comme la Figure I.5[**37**].

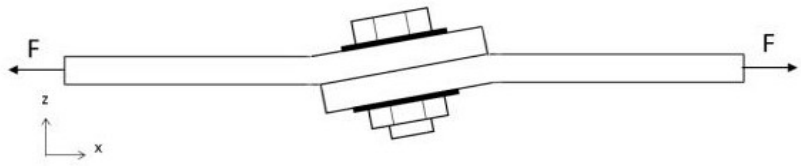


Figure I. 5: Déformation d'un joint boulonné à simple recouvrement soumis à une force de traction : mise en évidence de la flexion secondaire[**37**]. .

Comme les plaques sont en flexion à cause de la flexion secondaire, elles sont en tension d'un côté et en compression de l'autre, dans la zone de recouvrement[38]. Toutefois, les propriétés en compression de nos matériaux ne seront pas prises en compte, la compression des substrats reste faible, ce facteur a peu d'influence sur le résultat. Enfin, le boulon subit des efforts de cisaillement par l'intermédiaire du déplacement des deux substrats. Dû à la flexion secondaire, il bascule avec l'application du chargement.

I.2.10. Modes de rupture

Lorsque les substrats sont en métal, une déformation plastique apparaît autour du trou ce qui permet une redistribution des contraintes. Si ceux-ci sont en composite, la déformation ne sera qu'élastique jusqu'à rupture, la résistance est donc diminuée[38].

Plusieurs paramètres influencent la résistance comme la séquence d'empilement du matériau composite, l'épaisseur des substrats, le jeu entre le trou et le fût du boulon[18, 39] L'espacement entre les boulons pour un assemblage avec plusieurs lignes ou colonnes de fixations peut également modifier le mode de rupture de l'assemblage. En effet, dans ces configurations, la charge est transférée par le boulon (matage) mais aussi par contournement. La répartition de ces deux forces influence la charge à laquelle il y a défaillance de l'assemblage[37].

La concentration de contrainte introduite par le trou est généralement le point critique de l'assemblage [5, 40] .Lorsque la rupture s'amorce au bord du trou, là où la concentration de contrainte est maximale, puis se propage perpendiculairement à la direction du chargement appliqué, la rupture est dite en tension (Figure I.6a). La rupture en cisaillement ou par clivage (Figure I.6b et c, respectivement) est provoquée par le matage (Figure I.6d)[41], la rupture peut également avoir lieu, si la tête de la fixation passe à travers un des substrats.

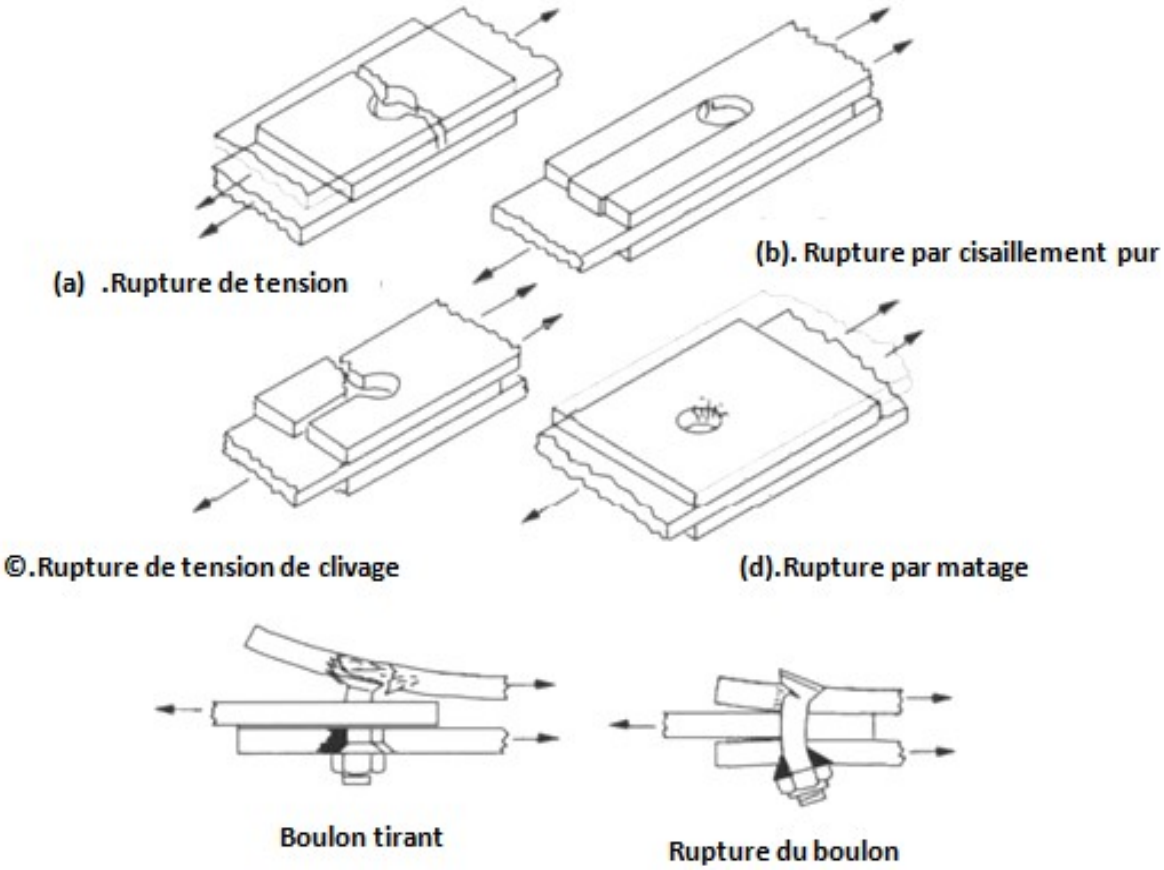


Figure I. 6: Illustration des modes de défaillance d'un joint boulonné :
(a) en tension, (b) en cisaillement, (c) par clivage, (d) par matage, d'après Campbell[**41**].

Les défaillances en clivage, tension ou cisaillement sont des défaillances liées à une structure faible. C'est pourquoi une défaillance en matage sera privilégiée en conception: elle est plus sécuritaire pour le design et est liée à une structure forte. En effet, une défaillance en matage arrive progressivement tandis que les autres défaillances surviennent de manière brutale[**41**]. Ainsi, McCarthy et al. [**28**]Ont choisis les dimensions de son joint boulonné (avecw/d = 6, e/d = 3 et d/t = 1.6) pour favoriser une rupture par matage.

I.3.Assemblages collés.

I.3.1. Définition de la technique du collage.

Le collage est une technique d'assemblage moderne et assez complexe à mettre en œuvre. Il est nécessaire d'avoir de bonnes connaissances dans la théorie de la colle,

pour pouvoir appliquer cette méthode dans des conditions satisfaisantes. Le collage ne doit pas être un palliatif ou une roue de secours. Il faut penser au collage dès la conception du produit. Les conditions de réussite sont d'autant plus grandes que l'on maîtrise la théorie des adhésifs et que l'on a de bonnes notions des colles disponibles sur le marché. Le collage est une technique qui est très couramment utilisée. Ainsi, de nombreux objets peuvent être collés : dans une automobile par exemple, on colle le pare-brise, et sur sa face interne la vignette l'opercule d'un yaourt adhère également au pot grâce à de la colle. Selon l'utilisation que l'on fait des objets, les colles sont plus ou moins résistantes (l'opercule du yaourt doit se décoller rapidement et facilement, à la différence du pare-brise sur une voiture) **[28]**.

Le collage est un procédé qui permet de maintenir solidement et durablement deux matériaux semblables au moyen d'une colle. Le terme de colle reste encore souvent employé pour désigner des formulations à base de produits naturels (végétaux, animaux), alors que le terme d'adhésif est plus réservé à des formulations faisant appel à des résines de synthèse ou élastomère. Cette distinction tend à disparaitre pour employer le mot adhésif comme terme générique **[42].**La géométrie des collages dépend, bien entendu, du cas de figure et du contexte général, mais dans de nombreux exemples, le collage se fait en recouvrement. L'efficacité d'un collage dépend fortement de la géométrie d'assemblage. Chaque application nécessite une conception adaptée au mode de sollicitation. Généralement les adhésifs sont efficaces lorsqu'ils travaillent en cisaillement. Les efforts de traction ou de pelage sont moins bien supportés. Un autre paramètre important est la surface de recouvrement, ainsi pour un collage en bout, présentant une surface restreinte, le joint a une résistance insuffisante pour la transmission des sollicitations. La résistance est très faible par rapport à celle des pièces assemblées **[42].** Le joint à simple recouvrement permet une répartition des charges convenable, mais la distribution des contraintes n'est pas homogène, ce qui a pour effet d'engendrer un moment de flexion. Pour pallier à ce problème, il est possible de modifier les géométries; ainsi, optimiser la répartition des contraintes, comme pour le cas du joint à simple recouvrement biseauté qui réduit les contraintes aux extrémités (figure I.7). Autre exemple, plus résistant, est le joint bord-à-bord à double recouvrement symétrique qui permet une très bonne transmission des sollicitations, sans déformation sous les contraintes les plus élevées. Il existe de nombreuses configurations adaptées à chaque condition d'effort **[48].**

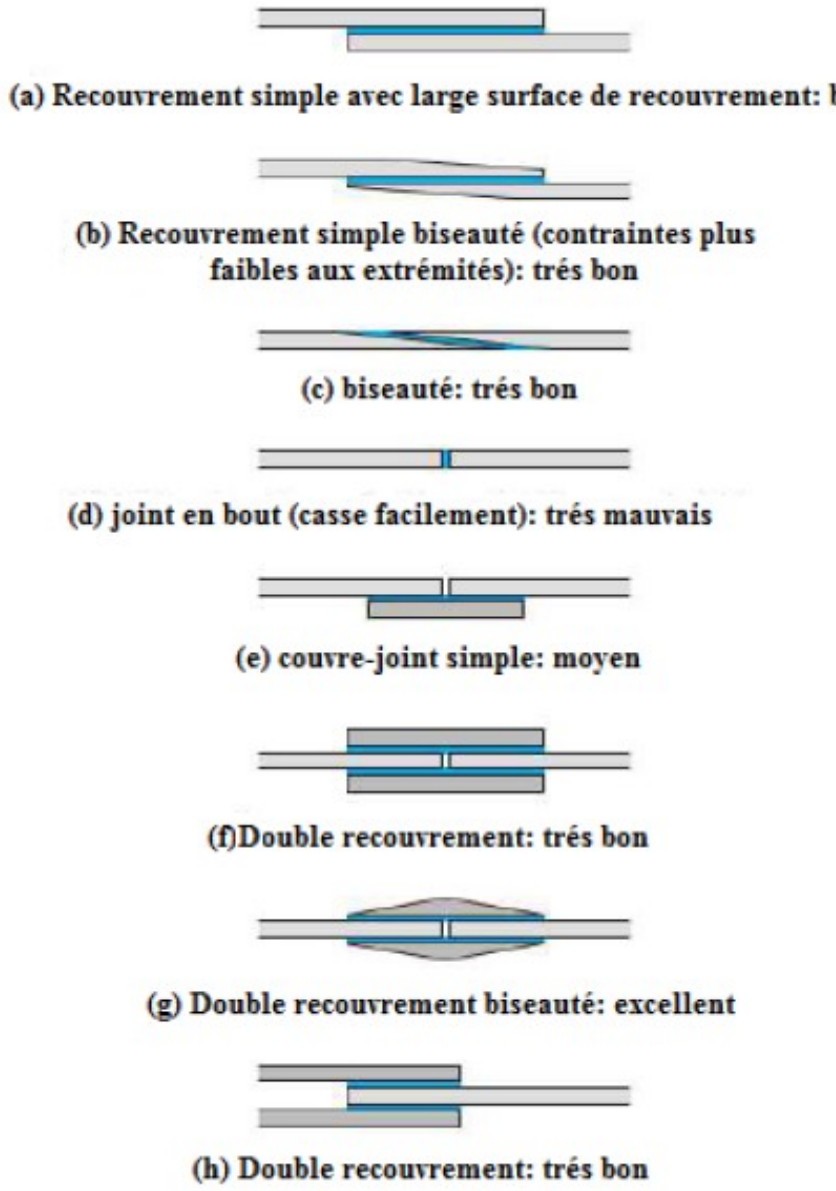


Figure I.7: Représentation schématique de différentes géométries d'assemblage **[43]**

I.3.2. Théorie de l'adhésion

I.3.2.1.Adhésion

L'adhérence est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques qui se produit lorsque l'on met en contact intime deux matériaux. Les différentes théories de l'adhésion prévoient l'établissement de liaisons ou d'interactions spécifiques **[44].**

I.3.2.2.Adhérence

L'adhérence est la force ou énergie nécessaire pour séparer deux matériaux réunis par une surface commune **[44].**Adhésion est un terme utilisé dans de multiples domaines, chaque domaine possédant sa propre théorie. Il existe donc plusieurs modèles

complémentaires (et parfois contradictoires). Nous allons donc étudier les différents modèles dans le cas d'un substrat recouvert d'un revêtement quelconque.

I.3.2.3Théorie de l'ancrage mécanique

La théorie de l'ancrage mécanique, initiée par Mac BAIN **[45]** dès 1926, est la plus ancienne des théories de l'adhésion. Ce modèle considère que l'origine de l'adhésion provient d'un ancrage physique du polymère dans les aspérités présentes à la surface du substrat. Il en résulte un accrochage mécanique entre les deux surfaces. Ce mécanisme n'est donc applicable que lorsqu'il existe un contact intime entre les deux matériaux, et que le revêtement mouille bien la surface du substrat, afin de pouvoir pénétrer les anfractuosités de sa surface. Par exemple le traitement *sulfochromique* possède la particularité de former une couche d'oxyde poreuse : ceci décuple l'aire de contact entre le revêtement s'il est initialement liquide et le substrat métallique, favorisant ainsi l'ancrage mécanique. Cette explication est réaliste, comme l'a montré par ARROWSMITH [**46**] , en déposant un polymère époxyde sur une surface de cuivre plus ou moins rugueuse. Mais l'adhésion sur des surfaces parfaitement lisses suppose d'autres théories **[51]**.

I.3.2.4. Théorie électrique

La théorie électrique a été développée par DERYAGIN et COLL **[47].** À la surface de couches d'oxydes à caractère ionique, les hétérogénéités chimiques et les défauts de surface aboutissent à la formation de charges électrostatiques. Le système polymère/substrat métallique est alors assimilé à un condensateur plan, dont les armatures seraient les deux couches électriques formées au contact des deux surfaces. Il convient cependant de remarquer que ces interactions électrostatiques ne peuvent jouer qu'un rôle mineur dans les forces globales d'adhésion, même si les travaux de BOIZIAU et LECAYON **[48]** ont décrit de manière suffisamment précise le processus de formation de l'interface polymère/métal, pour proposer une modélisation qualitative des mécanismes réactionnels, dans le cas notamment du polyacrylonytrile sur le nickel. Par contre, dans de nombreux cas où l'adhésion est très forte, l'électrisation des surfaces n'a pas pu être mise en évidence de prime abord **[49].**

I.3.2.5.Théorie de la diffusion .

La théorie de la diffusion a été proposée par VOYUSKII **[50]**. Elle s'applique aux matériaux polymères compatibles (c'est-à-dire lorsqu'au moins un monomère est soluble dans l'autre monomère), en particulier à l'auto adhésion, lors du contact de deux

matériaux de même nature, comme le caoutchouc. Dans cette théorie, l'adhésion résulte de l'inter-diffusion des molécules ou des chaînes d'un des prépolymères dans l'autre. L'interface entre les deux matériaux disparaît au profit d'une interphase, dont les propriétés physico-chimiques varient continûment, depuis les propriétés du premier matériau jusqu'à celles du second. Cette adhésion est contrôlée par les phénomènes de diffusion, c'est pourquoi elle implique la compatibilité des matériaux.

I.3.2.6.Théorie thermodynamique

Cette théorie, aussi appelée théorie du mouillage, a été initiée par SHARPE et SCHONHORN **[51]**. Selon cette théorie, l'adhésion est attribuée aux forces intermoléculaires (liaisons de type Van der Waals,) existant à l'interface. Ces liaisons intermoléculaires sont faibles et non dirigées. Elles ont un champ d'action de l'ordre des distances intermoléculaires. De ce fait, pour qu'elles s'établissent, il est nécessaire de créer un bon contact entre les deux surfaces, c'est-à-dire que le polymère doit parfaitement mouiller le substrat. L'apparition de cette théorie a entraîné de nombreuses modifications dans le milieu des adhésifs, car elle a mis en évidence l'importance de la structure et de la composition physico-chimique des surfaces des matériaux mis en contact. Parmi ces modifications, nous pouvons noter l'apparition des traitements de surface, des primaires d'adhésion et la modification chimique des adhésifs qui ont pour but d'augmenter le nombre de sites actifs par rapport au substrat .

I.3.2.7.Théorie chimique

La théorie chimique a été proposée par BUCHAN et RAE**[52].** Ce processus a plus particulièrement été mis en évidence dans le cas de l'adhésion du caoutchouc sur le laiton. En effet, il a été montré que le caoutchouc se lie au cuivre par l'intermédiaire de l'agent de vulcanisation (le soufre) en formant un pont sulfure. L'adhésion est basée ici sur la formation de liaisons chimiques iono-covalentes. Ces liaisons sont parmi les plus fortes (jusqu'à 1000kJ.mol^{-1}) : elles assurent aux assemblages collés une résistance à la rupture importante et une meilleure durabilité, contrairement aux liaisons type Van der Waals. La distance d'interaction entre atomes (0.15 nm à 0.24 nm) impose ainsi un contact intime entre les deux matériaux et donc, là encore, un bon mouillage. De nombreuses études **[53, 54, 55]** montrent que l'adhésion entre deux matériaux, est largement favorisée par l'absence d'impuretés à la surface des substrats, pouvant bloquer l'action des espèces susceptibles d'établir des liaisons fortes. Par conséquent, il est intéressant de promouvoir, à la surface du substrat, la présence d'espèces réactives

vis-à-vis d'un revêtement polymère tout en empêchant la présence des espèces "indésirables". Ceci est couramment réalisé à l'aide de traitements thermiques, physiques, ou chimiques appropriés à la nature du subjectile. Cependant, bien que de nombreuses améliorations soient observées sur le fer, l'aluminium, le titane ou le cuivre, les mécanismes responsables de l'adhésion ne sont pas toujours clairement élucidés. La théorie de la liaison chimique est malgré tout considérée comme une justification majeure de l'adhésion, surtout dans le cas des systèmes polymère/métal ou oxyde métallique **[56].**

I.3.3. Traitements de surface

Le choix de l'adhésif est une composante importante dans la tenue d'un assemblage collé et dépend fortement de la nature du substrat ainsi que du type de contraintes que subit la structure. Dans de nombreux cas, un traitement de surface est nécessaire afin de préparer le substrat à l'assemblage, il permet de nettoyer la surface, augmenter l'énergie libre de surface et/ou d'augmenter l'ancrage mécanique. Cela dépend de la théorie de l'adhésion qui est estimée importante. La composition chimique de la surface est également un élément qui permet d'augmenter l'adhésion de la colle au substrat en favorisant la création de liaisons chimiques. La préparation des surfaces peut être faite principalement de trois manières : soit en appliquant un traitement mécanique, soit avec un traitement chimique, soit encore par traitement physique (plasma, corona). Les traitements mécaniques permettent de supprimer les couches de pollutions diverses et d'augmenter la rugosité de la surface, diverses méthodes sont couramment appliquées : ponçage, sablage, grenaillage. Il est souvent nécessaire d'éliminer les résidus de ces traitements.

Les traitements chimiques sont les traitements les plus utilisés en préparation de surface pour le collage. L'un des plus simples à mettre en œuvre est le dégraissage. Il consiste à une élimination des matières et des poussières présentes à la surface de la pièce à coller grâce à un solvant. Le décapage, quant à lui, permet d'éliminer les matières polluantes présentes à la surface du matériau qui peuvent être liées de manière plus intime à la surface, les plus communs pour les métaux étant les oxydes. Les produits les plus utilisés pour le décapage chimique sont les acides et les bases. Enfin des traitements dits de « conversions », consistant en la création d'une nouvelle couche sur le substrat peuvent être utilisés pour préparer les surfaces avant collage. Les traitements les plus connus pour les métaux sont : la phosphatation, l'oxydation anodique, la chromisation,

etc. L'utilisation de primaires d'adhésion est également répandue afin d'augmenter l'adhésion des adhésifs pour l'assemblage des pièces de structure. Il est aussi nécessaire de maîtriser la géométrie du joint de colle afin d'éviter les zones de concentration de contraintes [56] . La durabilité d'un assemblage collé est également fortement dépendante des conditions de mise en œuvre lors de l'assemblage[57] , mais aussi de celles de son environnement[58, 59]. La surface, quant à elle, fait intervenir diverses théories de l'adhésion avec les différents traitements de surface.

I.3.4. Concentrations de contraintes et modes de rupture

Lorsque la contrainte en cisaillement augmente dans l'adhésif, une contrainte de pelage se développe à l'extrémité perpendiculairement au plan des adhérents, en raison d'un faible moment de flexion induit par la superposition des adhérents **[60]**, (Figure I.8). Cette contrainte diminue tant que la longueur de recouvrement et l'épaisseur de l'adhésif sont faibles, lorsque le module de l'adhésif augmente et l'adhérent est épais et rigide [**60,62**]. Les concentrations de contraintes se trouvent dans le joint de colle à environ 1 mm de l'extrémité du recouvrement **[62]**, comme le montre la Figure I.9. Cela est dû au changement brusque de géométrie et à la contrainte de pelage qui s'ajoute aux contraintes de cisaillement. S'il y a un débordement de la colle à l'extrémité de l'adhérent, des points de concentration de contraintes supplémentaires s'ajoutent, comme le montre la Figure I.10 [**60,62].**

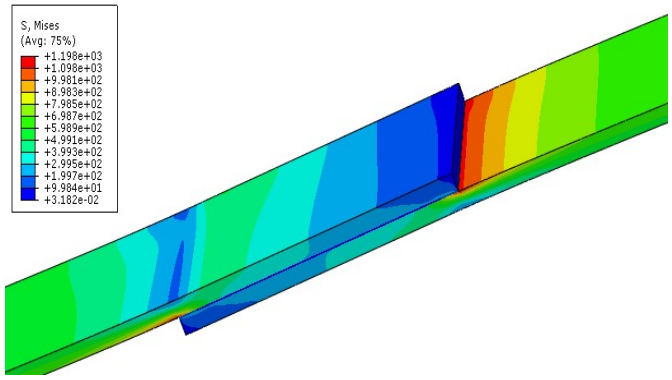


Figure I.8: Tendance de l'échantillon pendant la traction.

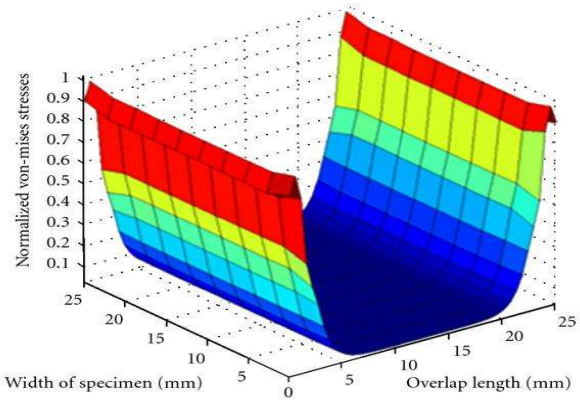


Figure I. 9: Contraintes dans le recouvrement d'un joint collé[**63**].

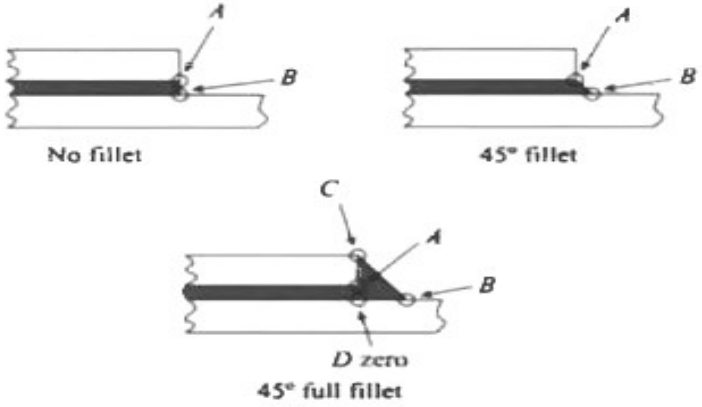


Figure I. 10: Points de concentrations de contraintes avec débordement de colle[**64**].

Ou est la figure

Lorsqu'on place un échantillon collé à recouvrement simple sous tension, sept modes de rupture sont observés, dont trois sont acceptables et quatre sont inacceptables, tel que montré à la Figure I.11 Il est acceptable d'obtenir une rupture cohésive de la colle, un délaminage d'un pli en surface ou une rupture complète des adhérents. Il est inacceptable d'obtenir le décollement de l'adhésif de l'adhérent, une rupture par pelage, un cisaillement excessif de l'adhésif ou un amincissement de la section droite de l'adhérent. Le mode de rupture recherché est la cohésion de la colle[**65**]. Les autres modes de rupture entraînent une rupture catastrophique ou une diminution significative de la résistance du joint. Pour obtenir le mode de rupture désiré, il faut accorder beaucoup d'attention au traitement des surfaces et à l'application de la colle.

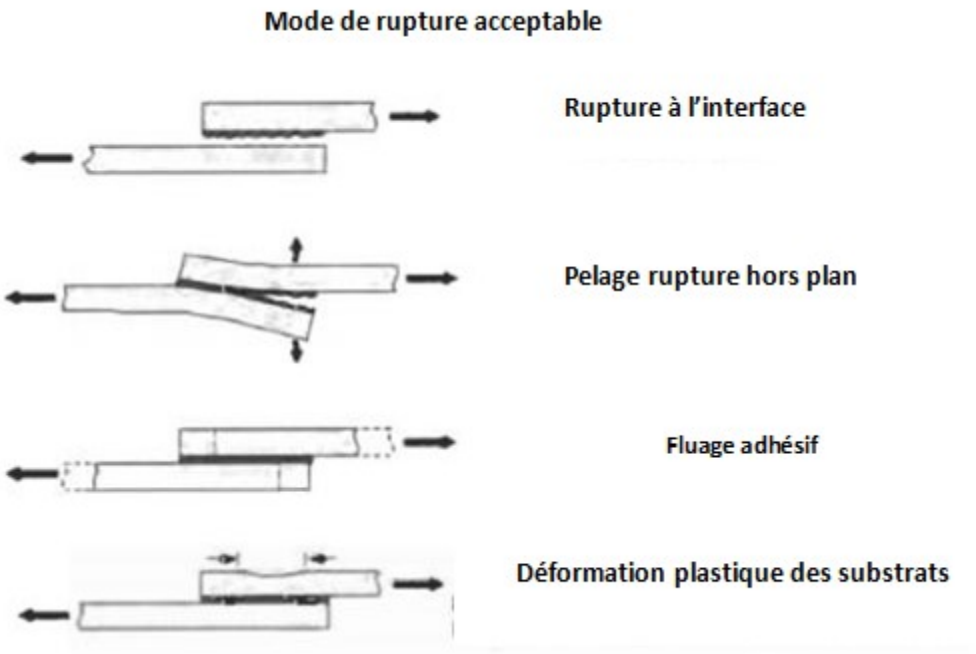


Figure I. 11: Modes de rupture acceptable d'un joint collé[**65**].

I.3.5. Défauts dans les assemblages collés

L'adhérence des assemblages collés est généralement mesurée à l'aide d'essais mécaniques de séparation de l'assemblage mais peut aussi être évaluée soit par des procédés de contrôle destructifs et non destructifs de l'assemblage qui permettent d'identifier des défauts dans le joint de colle tels que de la porosité, un déficit de polymérisation, de la micro fissuration ou des décollements ponctuels. Les essais mis en œuvre permettent une étude de la répartition de légat de contrainte en fonction des données géométriques de l'assemblage et de la loi de comportement de l'adhésif. La nature des défauts que l'on peut rencontrer dans un assemblage collé varie selon le phénomène à l'origine de ce défaut. On peut ainsi trouver :

- ✓ Une porosité due à des gaz de polymérisation ou de l'air emprisonné pendant la Fabrication de l' assemblage.
- ✓ Des micros fissures dues à un fluage de l'adhésif, des contraintes résiduelles ou à des Phénomènes de fatigue.
- ✓ Des zones de faible polymérisation causées par : un mauvais mélange de l'adhésif, un mauvais dosage des composants ou un temps de polymérisation insuffisant.
- ✓ Des cavités dues à une mauvaise application de l'adhésif ou à des dégagements gazeux durant la polymérisation.

- ✓ Des zones de décollements pouvant être conséquentes et provenant généralement d'une déficience de la préparation de surface du substrat, de phénomènes de condensation à l'interface, ou à la présence de contaminants lors du collage, comme le montre la Figure I.12.

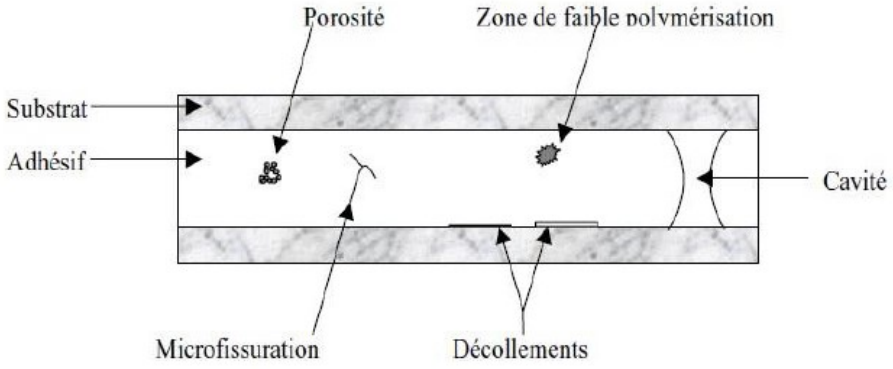


Figure. I.12: Défauts typique dans un assemblage collé.

I.4.Assemblages hybrides (HBC ou HBB).

I.4.1.Définition

Les joints hybrides, alliant collage et boulonnage, on colle les deux adhérents ensemble, puis un trou est percé au centre du recouvrement et on y insère un boulon ou un rivet. Les deux principaux cas étudiés sont les joints composite-aluminium et composite-composite[**41**], ces joints sont proposés afin de bénéficier des avantages des deux techniques tout en minimisant leurs inconvénients. Il ne s'agit pas d'une simple superposition des deux techniques : les deux assemblages doivent travailler en synergie. La colle permet d'améliorer les propriétés mécaniques ainsi le nombre de boulons pourra être diminué. L'optimisation de l'assemblage peut permettre une meilleure répartition du transfert de charge et ainsi une résistance accrue[**66**]. Depuis 2005, des auteurs tentent de montrer l'avantage des joints hybrides par rapport aux deux types précédents. Par ailleurs, certains auteurs développent des modèles par éléments finis plus fiables pour prédire la résistance de l'assemblage. Pour optimiser ce type de joint, HoangNgoc et Paroissien **[67]** choisissent d'étudier l'effet de la flexibilité de la colle sur le transfert de charge dans la colle et dans les boulons (Figure I.13).

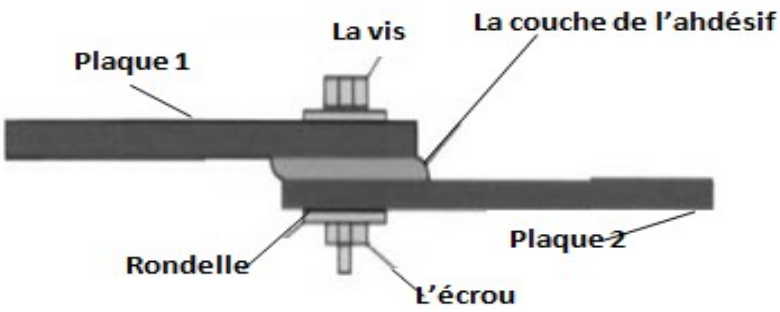


Figure I. 13: Configurations de joints hybrides (Simple recouvrement)[**67**]

I.4.2. Avantages et inconvénients

Le boulon présent dans le joint hybride fait en sorte d'éviter la séparation des deux substrats ainsi que de limiter la propagation des dommages de l'adhésif lorsqu'il arrive à défaillance. Pour **Hart-Smith [68] ,** les adhésifs utilisés lors de l'hybridisation sont très rigides ; cette technique n'apporte donc pas d'amélioration notable. En revanche, tous les autres auteurs s'accordent à dire que l'ajout d'adhésif permet d'avoir un joint plus résistant qu'un simple joint boulonné **[68]**.

I.5. Analyse numérique pour les assemblages Boulonnés, collé, et hybrides.

I.5.1. Boulonnage.

Une analyse numérique permet des gains de temps et des économies sur le coût des matériaux par rapport aux études expérimentales. En effet, l'installation d'un boulon permettant de mesurer le transfert de charge est complexe et nécessite de nombreux tests comme nous l'avons vu précédemment.

Un paramètre important en éléments finis est le temps de calcul. Suivant la modélisation, les conditions aux limites et le maillage, les résultats obtenus seront différents. McCarthy et all **[18]** ont mené une analyse approfondie de la modélisation numérique, d'un essai de traction sur un joint à un boulon.

Lors d'un essai, les extrémités de l'assemblage sont bloquées entre les mors de la machine de traction. Si ces extrémités ne sont pas modélisées, la raideur du joint est augmentée. En effet, lors des tests en laboratoire, seules les faces supérieures et

inférieures sont bloquées, le matériau du reste de cette partie se déforme sous l'action de la traction. Si elle n'est pas modélisée, elle est considérée comme infiniment rigide[**23**].Souvent les auteurs ne modélisent que la moitié du joint et appliquent des conditions de symétrie : deux fois moins d'éléments et de nœuds sont à prendre en compte lors de la résolution qui est alors plus rapide[**18**] .

Un maillage adapté permet d'obtenir des résultats avec précision tout en n'augmentant pas considérablement le temps de calcul. Les différentes parties des substrats ne doivent pas être maillés avec la même précision : les zones où une option de contact y est définie doivent être plus fines que le reste du substrat. Ainsi, les efforts de maillage seront portés principalement sur la zone de recouvrement. En effet, c'est l'endroit où se situe le trou mais également où les plaques sont en contact. Par ailleurs, le trou est une singularité puisqu'il engendre une concentration de contrainte. Il est également soumis à la non-linéarité qu'est le contact entre les plaques et le fût du boulon. Ainsi, un maillage fin, raffiné de manière radiale autour du trou, permet d'avoir des résultats précis et cohérents. Ainsi les conditions aux limites présentées à la Figure I.14 permettent de modéliser avec le plus de précision possible les tests de traction effectués expérimentalement et seront reprises par la suite[**23**].

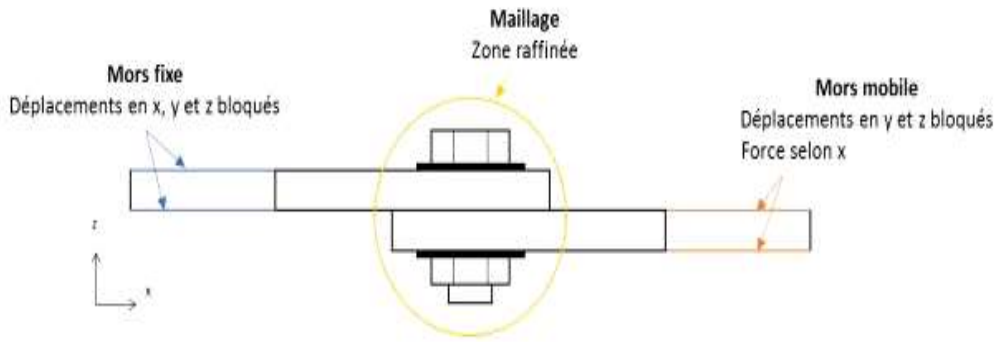


Figure I. 14: Conditions aux limites idéales et indications de maillage, d'après **STEWART [23] .**

I.5.2.Collage

I.5.2.1. Analyse de Goland et Reissner

Goland et Reissner **[69]** tiennent compte du moment de flexion dans leur analyse, et raisonnent alors dans le cadre des plaques en flexion cylindrique. Ils supposent l'adhésif et les substrats parfaitement élastiques. Ils supposent la profondeur grande devant les

épaisseurs des substrats, de sorte qu'ils considèrent un problème de déformations planes. Ils supposent de plus que la contrainte normale dans la direction x (Figure I.15) dans la colle est négligeable et que τ dans la colle ne varie pas dans l'épaisseur. Ils procèdent en deux étapes ; ils déterminent premièrement la répartition du chargement sur la section rectangulaire du joint puis dans un second temps ils déterminent les contraintes dans la colle. Pour cela, ils considèrent les substrats et l'adhésif comme un seul bloc. Ils obtiennent des solutions pour deux cas particuliers (cas limite) :

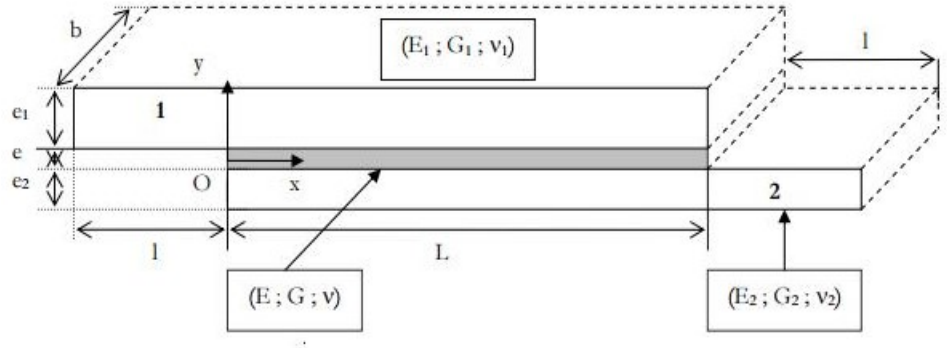


Figure I. 15: Géométrie et notation du joint collé en simple recouvrement**[5].**

La couche de colle est fine et de rigidité similaire aux substrats (soit la relation:$\frac{e}{E} \ll \frac{e1}{E1}$).

La couche de colle est fine et ses déformations ne sont pas négligeables (soit la relation$\frac{e}{E} \gg \frac{e1}{E1}$);c'est ce cas qui s'applique aux assemblages métal/colle/métal.

Ils définissent un facteur de moment fléchissant k_{GR} et un facteur de force k' qui relient respectivement le moment de flexion M0 et l'effort tranchant V0 en finde recouvrement, à la charge de traction appliquée à l'assemblage, équilibré ici, afin de tenir compte de la flexibilité des substrats et de l'adhésif.

$$M_0 = 0.5K_{GR}\, e_1 F. \quad (\mathbf{I.8})$$

$$V_0 = K_{GR}\, F\sqrt{3(1-\nu_1^2)\frac{F}{E1e1b}} = 2k'\frac{e_1}{L}\, F. \quad (\mathbf{I.9})$$

Où :

$$k'^{-1}_{GR} = 1 + 2\sqrt{2}\tanh\left(1.5\sqrt{(1-\nu_1^2)}\frac{L}{2e_1}\sqrt{\frac{F}{E1be_1}}\right). \quad (\mathbf{I.10})$$

$$k' = 0.5\frac{L}{e1}\sqrt{\frac{3(1-\nu_1^2)}{E1e1b}}. \quad (\mathbf{I.11})$$

Ils obtiennent ainsi dans le second cas limite :

$$\tau_{(x)=}\frac{-1}{4bl}\left[(1+3k)\frac{\beta L}{2e1}\frac{\cosh\left(\frac{\beta x}{e1}\right)}{\sinh\left(0.5\frac{\beta L}{e1}\right)}+3(1-k_{GR})\right]F(\mathbf{I.13})$$

Où :

$$\beta^2 = 8\frac{G}{E1}\frac{e_1}{e}. \quad (\mathbf{I.12})$$

et :

$$\sigma_{yy}(x) = \frac{e1}{4L^2b\Delta}\left[\left(0.5R_2\,\lambda^2k_{GR}\right)+\lambda k'\cosh\lambda\cos\lambda)\cosh\left(\frac{\lambda 2x}{L}\right)\cos\left(\frac{\lambda 2x}{L}\right)+\right.$$
$$\left.(0.5R_1\lambda^2k_{GR}+\lambda k'\sinh(\lambda)\sin(\lambda))\sinh\left(\frac{\lambda 2x}{L}\right)\sin\left(\frac{\lambda 2x}{L}\right)\right]F.(\mathbf{I.13})$$

Où:

$$\lambda = \gamma\frac{L}{2e_1}. \qquad (\mathbf{I.14})$$

$$\gamma^4 = 6\frac{E}{E_1}\frac{e_1}{e}. \ (\mathbf{I.15})$$

$$R_1 = \cosh\lambda\sin\lambda+\sinh\lambda\cos\lambda. \quad (\mathbf{I.16})$$

$$R_2 = \sinh\lambda\cos\lambda-\cosh\lambda\sin\lambda. \qquad (\mathbf{I.17})$$

$$\Delta = 0.5(\sinh(2\lambda)+\sin(2\lambda)). \qquad (\mathbf{I.18})$$

Les contraintes maximales se situent aux extrémités du joint et ont pour valeur :

$$\tau_{max=}\left(\frac{1+3k_{GR}}{4}\eta_V L\coth(\eta L)+\frac{3(1-k)}{4}\right)\tau_{moy}. \quad (\mathbf{I.19})$$

et:

$$\sigma_{yy(max)} = \frac{e_1}{bL^2\Delta}(0.5\,\lambda^2k_{GR}(\sinh(2\lambda)-\sin(2\lambda))-\lambda k'(\cosh(2\lambda)+\cos(2\lambda). \ (\mathbf{I.20})$$

Dans le cas de substrats indéformables (k_{GR}=1), la contrainte de cisaillement maximale est deux fois plus importante que la valeur prévue par Volkersen; d'où l'importance de tenir compte de la rotation du joint.

I.5.2.2. Analyse de Hart-Smith

En 1973, Hart-Smith **[10]** reprend les travaux précédents sur les joints collés et développe les joints à recouvrement simple collés[**12**]. En 1974, le même auteur reprend ses travaux pour les appliquer aux adhérents en composite[**11**].

Hart-Smith a fourni un travail considérable sur les jonctions collées à simple recouvrement, à double recouvrement, en escalier et biseautées. Ses solutions analytiques incorporent les effets thermiques et les effets de déséquilibre de rigidité. Il se place dans le cadre des plaques en flexion cylindrique. De plus, Hart-Smith s'intéresse au comportement non linéaire de l'adhésif : il a développé une approche élastique-plastique parfait, schématise par la Figure I.16.

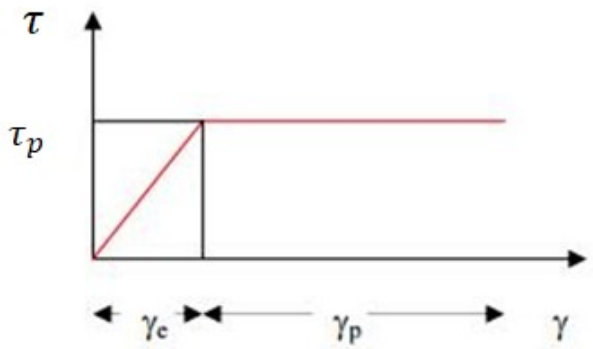


Figure I. 16: Matériau dont le comportement est élastique parfaitement plastique[**75**].

Dès la fin des années 90, ce sont les modèles par éléments finis qui prennent la place dans les travaux. En 1999, Li [**61**] développe un modèle éléments finis permettant de prédire la distribution des contraintes dans un joint à recouvrement simple. En2001, Dean [**70**] développe le modèle éléments finis pour l'appliquer à une géométrie collée (pièce quelconque). Plus récemment, plusieurs auteurs ont tenté d'améliorer les modèles numériques par éléments finis, pour le but de s'approcher aux résultats expérimentaux. Pour se faire, les auteurs passent d'un modèle 2-D à un modèle 3-D avec des éléments qui simulent la non-linéarité des matériaux, tel que montré parAsgari et Stoumbos **[64,**

65]. Langella [63] a présenté également une autre approche par des éléments finis, en se basant sur le comportement non-linéaire de la colle et des adhérents.

I.5.3. Hybride

Dans ces travaux de thèse, Paroissien **[5]** a analysé le comportement des assemblages hybrides pour des applications aux jonctions aéronautiques. Cette étude s'intéresse à la combinaison du collage et du boulonnage. Les jonctions longitudinales de fuselage d'avions civils, montées en simple cisaillement, constituent un cas d'application des travaux. Des études paramétriques sont présentées pour obtenir, d'une part, la répartition des transferts de charge dans les substrats et les fixations, et d'autre part, la répartition des contraintes adhésives, en fonction des paramètres géométriques et mécaniques de l'assemblage. Un modèle EF-3D a été développé afin d'accéder aux comportements mécaniques locaux et la détermination des raideurs des fixations. Paroissien [4] a montré que la mesure expérimentale du taux de transfert aux fixations, sous faibles charges, à l'aide de boulons instrumentés valide et calibre les approches analytiques et numériques. La Figure I.17 illustre un exemple du maillage en simple cisaillement à deux fixations et en double cisaillement.

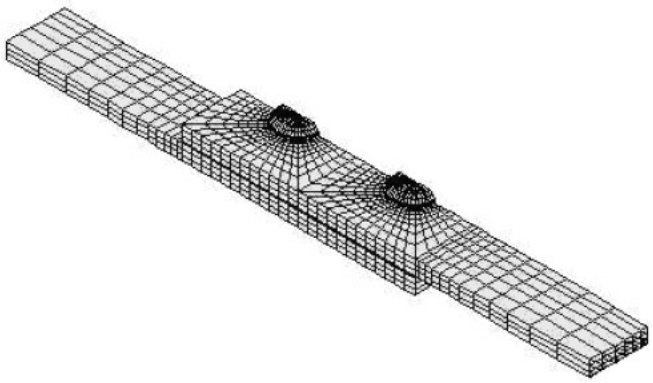


Figure I.17:Modèle hybride par éléments finis, utilisé par Paroissien[**5**]

En 2019, Ezzine **[71]** a présenté une étude numérique sur l'endommagement et rupture des assemblages hybrides de type adhésif-rivets. Dans son travail, le modèle de zone cohésive (CZM) a été adopté pour modéliser la propagation des fissures dans les joints collés, en utilisant la loi de traction-séparation bilinéaire, intégrée dans le code de calcul ABAQUS. La zone cohésive est représentée par une rangée d'éléments cohésifs où la progression de la fissure aura lieu. Les paramètres de la loi de cohésion d'une surface adhésif/substrat ont été déterminés par des tests de rupture, réalisés sur des tests sur des

éprouvettes DCB et ENF. Un critère d'amorçage de dommage et un critère de défaillance de mode mixte sont utilisés, respectivement, pour initier et effectuer des fissures aux interfaces.

Deux types de modèles numériques de joint à recouvrement simple ont été testés. Dans le premier modèle (CZMi), la zone cohésive est représentée par une rangée d'éléments cohésifs placés le long d'une seule interface (adhésif-substrat) et la seconde interface du modèle étant laissée intacte. Dans le second modèle (CZMii), les éléments cohésifs sont placés le long des deux interfaces entre l'adhésif et le substrat.

Dans ce cas, la zone cohésive comprend deux rangées d'éléments cohésifs, des essais de cisaillement expérimentaux ont été effectués sur des joints à recouvrement unique collés avec de l'adhésif Adekit A140 pour déterminer la courbe force-déplacement. Le modèle numérique, utilisant une seule rangée d'éléments cohésifs, a une courbe force-déplacement décalée vers l'arrière de la courbe force déplacement expérimental. Il montre une plus grande rigidité initiale et moins de résistance à la propagation des fissures dans les joints. La courbe force-déplacement du modèle numérique utilisant deux rangées d'éléments cohésifs coïncide avec la courbe force-déplacement expérimentale. La courbe force-déplacement numérique présente une bonne rigidité initiale et une bonne résistance à la propagation des fissures dans les joints. Ces derniers résultats numériques (deux rangées d'éléments cohésifs) sont en bon accord avec les résultats expérimentaux et permettent de valider le modèle numérique appliqué aux essais de cisaillement des joints collés.

Ezzine **[71]** a combiné les méthodes CZM et XFEM pour modéliser des assemblages hybrides. Les résultats numériques obtenus ont montré une bonne cohérence avec les résultats expérimentaux et permettent de garantir la validité du modèle numérique appliqué. Il a conclu que l'utilisation d'un assemblage hybride montre une résistance mécanique élevée par rapport à d'autres méthodes d'assemblage conventionnelle. L'utilisation de l'assemblage hybride améliore la résistance mécanique et augmente la durée de vie par rapport à un joint à recouvrement collé et un joint riveté. La Figure I.18 illustre un exemple de la répartition des contraintes de cisaillement dans un joint hybride.

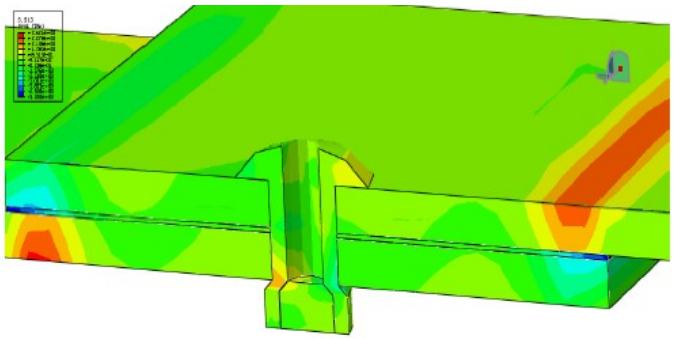


Figure I.18: Répartition des contraintes de cisaillement dans un joint hybride, de type adhésif-rivets **[71]** .

Référence bibliographiques

[1] **Volkersen, O.** (1938). Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. Luftfahrtforschung, 1938. 15(1/2): p. 41-47.

[2] **Marion . L.** Analyse de transfer de charge de joints boulonnés à simple recouvrement, université de Montréal, pp.3 ,19.

[3] **OUELLET, M.** (2013). Conception axiomatique des joints hybrides à recouvrement simple en matériaux composites. (École Polytechnique de Montréal).

[4] Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.06.

[5] **Eric P. (2013).** Contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés) - application aux jonctions aéronautiques, p.A12, A13.

[6] **Giraud J.M. (1980).** Quelle épaisseur de colle choisir pour un assemblage collé ?, Matériaux et Techniques.

[7] **Volkersen, O. (1938).** Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. Luftfahrtforschung, 1938. 15(1/2): p. 41-47

[8] **Goland, M. and E. Reissner, (1944).** The stresses in cemented joints. Journal of applied mechanics, 11(1): p. AI7-A27.

[9] **Adams RD, Peppiatt NA**. (1973). Effect of Poisson's ratio strains in adherends on stresses of an idealized lap joint. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, pp134-139.

[10] **Hart-Smith, L.J. (1973).** Adhesive-bonded single-lap joints. Langley Research Center Hampton, V A, pp. 431-448 .

[11] **Hart-Smith, L.** (1974). Analysis and design of advanced composite bonded joints: National Aeronautics and Space Administration.

[12] **Hart-Smith L.J** . (2013). Adhesive-Bonded Double-Lap Joints, NASA, TR CR-112235. pp. 205-2010 .

[13] **Crocombe, A.** and D. Bigwood.(1993). Development of a full elasto-plastic adhesive joint design analysis. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 27(4): pp. 211-218 .

[14] **Oplinger, D.** (1994). Effects of adherend defiections in single lap joints. International Journal of Solids and Structures, 31(18): p. 2565-2587.

[15] **Marion .L.**(2015). Analyse de transfer de charge de joints boulonnés à simple recouvrement, université de Montréal, pp.3 ,19.

[16] **Raphael C.** (1995). Variable-adhesive bonded joints. Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium, pp.99-108.

[17] **Tserpes, K., P. Papanikos, and T. Kerrnanidis** .(2001). A three-dimensional progressive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 24(10).663-675.

[18] **McCarthy, C. and M. McCarthy.** (2005). Three-dimensional finite element analysis of single-boit, single-lap composite bolted joints: Part Il- effects of bolt-hole clearance. Composite structures, 71(2).159-175.

[19] **McCarthy, c., M. McCarthy, and V. Lawlor. (**2005). Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt- hole clearances. Composites Part B: Engineering, 36(4). 290-305.

[20] **OUELLET, M,** (2013). Conception axiomatique des joints hybrides à recouvrement simple en matériaux composites.

[21] **GUILLOT, J.**(2010). Calcul des assemblages vissés - Assemblage de pièces planes de faible épaisseur. Partie 1. Techniques de l'ingénieur.

[22] **MCCARTHY, C. T., & GRAY, P. J.** (2010). An analytical model for the prediction of load distribution in highly torqued multi-bolt composite joints. *Composite Structures,* 2011. 93(2), 287-298.

[23] **STEWART, M.** (1997). An experimental investigation of composite bonded and/or bolted repairs using single lap joint designs.

[24] **Michihiko. T, Hongo .K ,** (1981) . Stress Analysis Connections by Finite Element Method, journal series b-fluids and thermal engennering .p 5

[25] **ASTROM, B. T.** (1997). Manufacturing of polymer composites.

[26] **THOPPUL, S. D., FINEGAN, J., & GIBSON, R. F.** (2009). Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – A review.Composites Science and Technology, 69(3-4), 301-329.

[27] **GANJI, N.** (2007). Parametric study of load transfer in two-bolted single lap hybrid (bonded/bolted) shear joints. (Wichita State University).

[28] **McCarthy, C. and M. McCarthy.** (2005). Three-dimensional finite element analysis of single-boit, single-lap composite bolted joints: Part Il- effects of bolt-hole clearance. *Composite structures*, 71(2): p. 159-175.

[29] **Ireman, T.** (1998). Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints. *Composite structures*, 43(3), 195-216.

[30] **MCCARTHY, C. T., & GRAY, P. J.** (2011). An analytical model for the prediction of load distribution in highly torqued multi-bolt composite joints. *Composite Structures,* 93(2), 287-298.

[31] **HUT.H.** (1986) . Influence of the fastener flexibility on the prediction of load transfer

and fatigue life for multiple row joints , *fatigue in mechanical fastened composite and metallic joints ,* ASTM STP 927 ? 221-250 .

[32] **Halil .Ö.** Introductory Chapter: Structural Adhesive Bonded, Mechanical Engineering Department, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey, *Applied Adhesive Bonding in Science* ,3-4.

[33] **ROSS, R. D.** (1947). An electrical computer for the solution of shear-lag and bolted joint problems. NACA, 1947.

[34] **ALKATAN, F., ANDRIAMAMPIANINA, J., STÉPHAN, P., GUILLOT, J.** (2013).Flexibility of hybrid load transfer assemblies: Influence of tightening pre-stress. *Aerospace Science and Technology*, 25(1), 84-92.

[35] **MCCARTHY, C. T., & GRAY, P. J.** (2011). An analytical model for the prediction of load distribution in highly torqued multi-bolt composite joints. Composite Structures, 93(2), 287-298.

[36] **ILIESCU, D.(**2008). Approches expérimentale et numérique de l'usinage a sec des composites carbone/époxy.

[37] **OUELLET, M.** (2013). Conception axiomatique des joints hybrides à recouvrement simple en matériaux composites.

[38] **Marion. L** .Analyse de transfer de charge de joints boulonnés à simple recouvrement, université de Montréal .3 -19.

[39] **ASTROM, B. T** .(1997). Manufacturing of polymer composites: CRC Press.

[40] **ROSALES-IRIARTE, F., FELLOWS, N., & DURODOLA, J**, (2012). Failure prediction in carbon composites subjected to bearing versus bypass loading. *Journal of Composite Materials,* 46(15), ,859-1878.

[41] **Campbell, F.C**.(2010). Structural composite materials. ASM international.

[42] **McBain JW, Hopkins DG.** (1925). On Adhesives and Adhesive Action. J. Phys. Chem.; Vol. 29(2) : 188−204.

[43] **A. Haidara.** (2013). 12eme journées d'étude sur l'adhésion.

[44] **Cognard P.** (2013). Collage des matériaux : Caractéristiques, mise en œuvre des colles. Tech. De l' ingénieur, Vol. BM 7 617: 1−20.

[45] **McBain JW**.(1925) **.** Hopkins DG. On Adhesives and Adhesive Action. J. Phys. Chem.; Vol. 29 (2) : 188–204 .

[46] **D. J. ARROWSMITH**, Transactions of the Institution of Metal Finishing, 1970, 48 (88) .

[47] **B. V. DERYAGIN and Y. P. TOPROV**.(1983). Role of the molecular and electrostatic forces in the adhesion of polymers, *in Physico-chemical aspects of polymer surface,* K. L. Mittal, Editor. Plenum Press: New York. pp. 605-626.

[48] **BOIZIAU and G. LÉCAYON**,(1986). Modelling the elementary mechanisms involved in grafting polymers onto metals - relationship between structure and properties of the resulting product. International Journal of Adhesion and adhesives, 6 (4), pp. 207-214.

[49] **B.V Deryagin and N.A Krotova**, (1948). Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 61, 843.

[50] **S. S. VOYUTSKII,** (1963). Autoadhesion and adhesion of high polymers. WileyInterscience and Sons: New York. 405 .

[51] **H. SCHONHORN and L. H. SHARPE**,(1963). Chemical and engineering news, 15. 67.

[52] **S. BUCHAN and W. D. RAE**, (1646) .Chemical nature of the rubber to glass bond. Trans. Inst. Rubb. Ind, 20, 205-216.

[53] **A. ROCHE**,(1983). Traitements chimiques et électrochimiques du titane et de ses alliages : caractérisation des surfaces créées. Adhésivité interfaciale dans des composites métal/résine. Villeurbanne, thèse de l'Université Lyon I, 250 .

[54] **C. FAUQUET**,(1992). Etude expérimentale d'une interface modèle aluminium/adhésif époxy. *Paris, thèse de l'Université Paris* 6, 130.

[55] **J. MARSH, L. MINEL, M. G. BARTHES-LABROUSSE, and D. GORSE,** (1996).The nature of the surface acidity of anodised titanium : an XPS study using 1,2- diaminoethane. *Applied surface science*, 99,. 335-343.

[56] **S. BENTADJINE**, (2000) .Mécanismes de formation et propriétés physico-chimiques et mécaniques des interphases epoxy-diamine / métal. Villeurbanne, thèse de l'INSA de Lyon, 157 .

[57] **Gent AN, Schultz J**. (1972). Effect of Wetting Liquids on the Strength of Adhesion of Viscoelastic Material. J. Adhes, Vol. 3 (4) : 281−294.

[58] **Jean-Baptiste Sauvage**, (2016). Caractérisation et modélisation de l'adhérence dans les assemblages collés. *Génie chimique*.10.

[59] **Cognard .P**.(2013). Collage des matériaux : Caractéristiques, mise en œuvre des colles. *Tech. de l'ingénieur*, Vol. BM 7 617: 1–20.

[60] **Petit J-A, Baziard Y, Nassiet V, Hassoune-Rhabbour B.** (2006). Durabilité des assemblages collés - *Approche prédictive,* Vol. BM 7 667: 1–16.

[61] **Li, G., P. Lee-Sullivan, and R.W.** (1999). Thring, Nonlinear finite element analysis of stress and strain distributions across the adhesive thickness in composite single lap joints. Composite Structures. 46(4): 395-403.

[62] **Diaz, J., et al.,** (2010). Benchmarking of three-dimensional finite element models of CFRP single-lap bonded joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, 30(3): 178-189.

[63] **Langella, A., et al.** (2012). An analytical closed-form model to evaluate the peel and shear stresses in middle plane for adhesively bonded composite single-lap joints. *Journal of Composite Materials*, 46(1), 3-17.

[64] **Asgari Mehrabadi, F**. (2012). Experimental and numerical failure analysis of adhesive composite joints. *International Journal of Aerospace Engineering.*

[65] **Stoumbos, T., et al.** (2014). Adhesively bonded joint modeling using finite element method for failure mode prediction Structures, *Structural Dynamics and Materials Conference.*15-20 .

[66] **Samuel, G** .(2016). étude expérimentale et modélisation des joints composites, collés, rivetés et hybrides.23.

[67] **Hoang-Ngoc, c.-T. and E. Paroissien**,(2010). Simulation of single-Iap bonded and hybrid (boltedlbonded) joints with flexible adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(3). 117-129 .

[68] **HART-SMITH, L.J,** (1985). Bonded-bolted composite joints. *Journal of Aircraft.* 22(11), 993-1000.

[69] **Goland, M. and E. Reissner**, (1944). The stresses in cemented joints. *Journal of applied mechanics.* 11(1). AI7-A27.

[70] **Dean, G , and L.Crocker**. (2001) .The use of finite element methods for design with adhesives .NPL Measurement Good Practice Guide , 48 .

[71] **Ezzine Mohamed Chams Eddine**. (2019). Endommagement et rupture des assemblages hybrides adhésif-rivets, 45 .

Chapitre II

Etude expérimentale

CHAPITRE II

ETUDE EXPERIMENTALE

Ce chapitre a pour objectif présenter les expériences réalisées afin d'évaluer de manière claire le comportement mécanique des joints collé, boulonné et hybride (collé/ boulonné). Des essais statiques de traction ont été réalisés sur plusieurs types d'assemblage, à savoir : joint collé, boulonné et hybride. De plus, l'influence de l'humidité, la température et le couple de serrage sur la résistance du joint hybride ont été analysé. A travers de ce chapitre, nous souhaitons en particulier quantifier le comportement global des assemblages, ainsi que l'influence de plusieurs facteurs sur la résistance des joints.

II.1. Introduction

Les assemblages boulonnés sont largement utilisés dans les structures métalliques en raison de la simplicité de leur réalisation, ainsi que de la facilité de leur mise en œuvre. Toutefois, leur comportement et analyse sont extrêmement complexes du fait de la variation du nombre de rangées de boulons, de l'espacement des boulons, des dimensions des plaques qui peuvent être débordante ou non débordante, des dimensions des poteaux et des poutres, de la force de précontrainte dans les boulons, des propriétés mécaniques de l'acier et des surfaces de contact ainsi que la présence des raidisseurs. La structure de la connexion boulonnée est facile à enlever, mais elle n'est pas imperméable à l'eau, et le boulon lui-même. Parmi les grands inconvénients de cette technique ; concentration de contraintes au niveau du trou qui augmente les risques de fissures, le boulonnage ne permet pas d'obtenir des joints étanches. D'où la nécessité d'ajouter d'un joint d'étanchéité**.**

Les joints collés offrent de nombreux avantages, en particulier l'assemblage de différents matériaux ou matériaux composites. L'assemblage entre les matériaux est continu, ce qui permet de répartir uniformément les efforts et d'éviter les concentrations de contraintes. Cependant, un inconvénient majeur de cette technique d'assemblage est une résistance à la chaleur limitée, une sensibilité à l'humidité et au vieillissement. Le collage exige une préparation des surfaces soignée et précise, ce qui peut être contraignant dans une chaîne d'assemblage. En plus, le collage ne permet pas un démontage aisé des structures assemblées **[1]**.

Pour éliminer les inconvénients de chaque type d'assemblage classique, un joint hybride associant les deux types d'assemblages standards (boulonnés/collés) vise à minimiser les

aspects négatifs de chacun des deux techniques, afin d'obtenir un joint avec un meilleur ensemble de propriétés **[2]**.

Ce chapitre est consacré à l'étude du comportement mécanique des trois types d'assemblage, boulonné, collé et hybride. Les effets du couple de serrage, de l'humidité et de la température sont mis évidence.

II.2.Procédure expérimentale

II.2.1. Assemblage boulonné

II.2.1.1. Caractéristiques des matériaux

Le matériau utilisé dans cette partie d'étude est un acier galvanisé, de nuance H300LAD+Z. Le tableau (II.1) représente la composition chimique du matériau utilisé.

Elément	C	Si	P	Mn	S	Al	Fe
% masse	0.1	0.5	0.03	1	0.025	0.025	Reste

Tableau II.1 : Composition chimique de l'acier **[1].**

La figure II.1 illustre comportement élasto-plastique de l'acier utilisé, schématisé par la courbe contrainte vraie-déformation vraie.

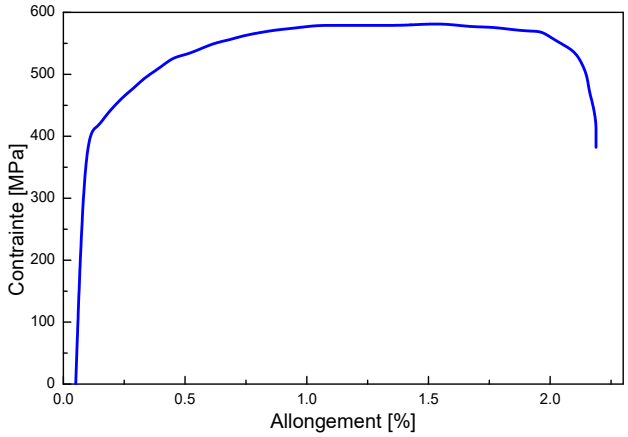


Figure II.1 : Courbe contrainte-déformation de l'acier galvanisé **[1]**

L'essai de traction uniaxial a permis de déterminer les principales caractéristiques mécaniques, résumées dans le tableau (II.2).

Re [MPa]	Rm [MPa]	E [MPa]	ε [%]
410.12	580.22	210317.9	0.195

Tableau II.2: Propriétés mécaniques de l'acier galvanisé de l'assemblage **[1]**

II.2.1.2.Eprouvettes et machines

La figure (II.2) illustre un exemple de préparation des éprouvettes pour le but d'effectuer des essais de traction monotone. Ces éprouvettes ont été découpées et trouées à l'aide d'une machine laser de l'entreprise FAMAG de Sidi Bel-Abbes. Quatorze (14) échantillons de dimensions 135x40x2 mm^3 sont préparés, selon les normes ISO 14234 : 2003 **[2]** et JIS Z 3138-1989 **[3].** La figure (II.3) illustre un exemple des éprouvettes découpées et percées.



Figure II.2: Découpage et perçage des tôles par laser



Figure II.3: Plaques usinées pour les assemblages

Pour ce type d'assemblage, les deux plaques d'acier galvanisé sont assemblées par un seul boulon. Une étude préliminaire a été effectuée pour choisir le boulon adéquat à ce type d'assemblage. La première série des boulons utilisés est en acier ordinaire. Lors de l'opération de serrage avec un couple minimal ($C = 19\,Nm$), nous avons remarqué l'usure des filets dans la partie supérieure du boulon (figure II.4). Pratiquement, ce type des boulons a été éliminé dans la présente étude.

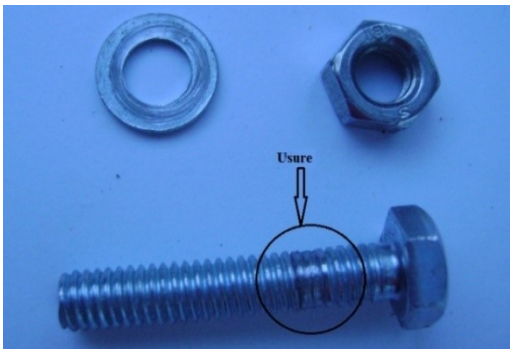


Figure II.4: Usure du boulon en acier ordinaire

La deuxième série des boulons utilisés est en acier trempé à l'huile M5×20×10. Cette fois-ci, le boulon présente une meilleure résistance, ce dernier est retenu dans la présente étude (figure II.5) , dont les dimensions sont :

- Diamètre nominal du boulon $= 5.8\ mm$

L'écrou hexagonal M5 - 10, dont les dimensions sont : d=6mm , L=15mm

La rondelle plate en acier de dimensions suivantes :

- Diamètre minimal $= 6.5\ mm$
- Diamètre maximal $= 12\ mm$
- Epaisseur $= 1.6\ mm$



Figure II.5: Type du boulon utilisé dans notre étude

Lors de la mise en place d'un assemblage (assemblage=boulonnage + vis + rondelle + écrou), il est primordial d'appliquer un couple de serrage adapté. Ce couple de serrage sert à mettre en tension le boulon pour tenir les éléments en contact. De ce fait, nous avons utilisé une clé dynamométrique de marque ECO BUDGET – 19-110 NM -1/2in (figure II.6).



Figure II.6 : Clé dynamométrique ECO BUDGET.

L'épaisseur de la tôle utilisée pour la fabrication des éprouvettes est de deux millimètres (2mm). Toutes les éprouvettes ont été testées en simple recouvrement. Pour éviter les effets du matage des plaques sous la tête de l'écrou, une rondelle d'appui a été utilisée. La Figure (II.7) illustre la position de deux tôles, destinée pour l'assemblage boulonné.

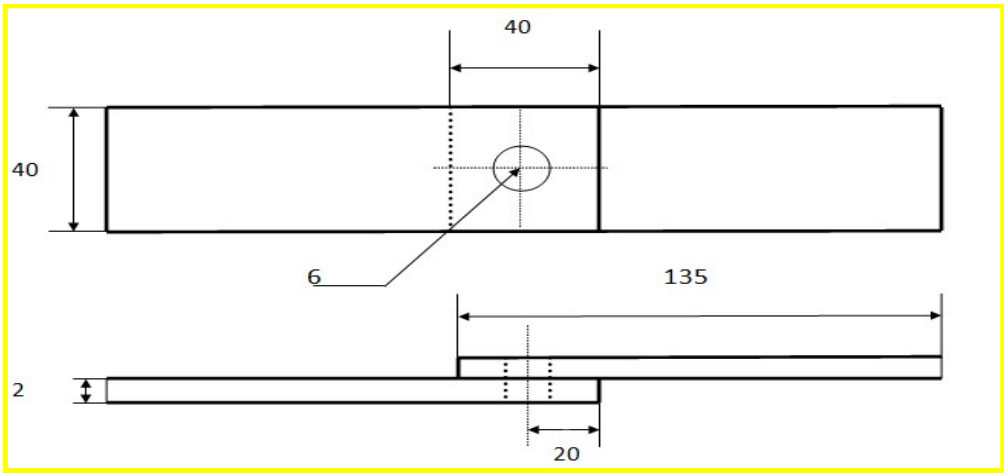


Figure II.7: Éprouvette d'un assemblage boulonné (une seule fixation)

On a préparé les assemblages boulonnés que nous voulons testés sous différent couple de serrage à partir de 19 N. m vers 39 Nm afin de nous pouvoir constater clairement l'impact de serrage du boulon sur le comportement général de la jonction boulonnée , sachant que les éprouvettes utilisées lors de l'assai de traction ce sont selon la norme ISO 14 234 , comme la figure II .8 nous illustre .



Figure II.8: Assemblages boulonnés préparés .

II.2.1.4.Conditions d'essais et configurations étudiées

Le protocole expérimental qui nous permet d'appliquer le couple de serrage est le suivant (figure II.9):

- **a-** Le corps du boulon est introduit à travers les deux alésages des deux plaques utilisées (figure. II.9a),
- **b-** Les éprouvettes sont placées sur une surface plane, pour le but d'éviter les défauts d'alignement (figure. II.9b) .
- **c-** Un couple de serrage est exercé sur l'écrou, en fixant la tête de vis jusqu'à ce que le dessous de la tête de boulon vienne en contact avec la supérieure, puis la rondelle et l'écrou viennent en contact avec la plaque inférieure (figure. II.9c).

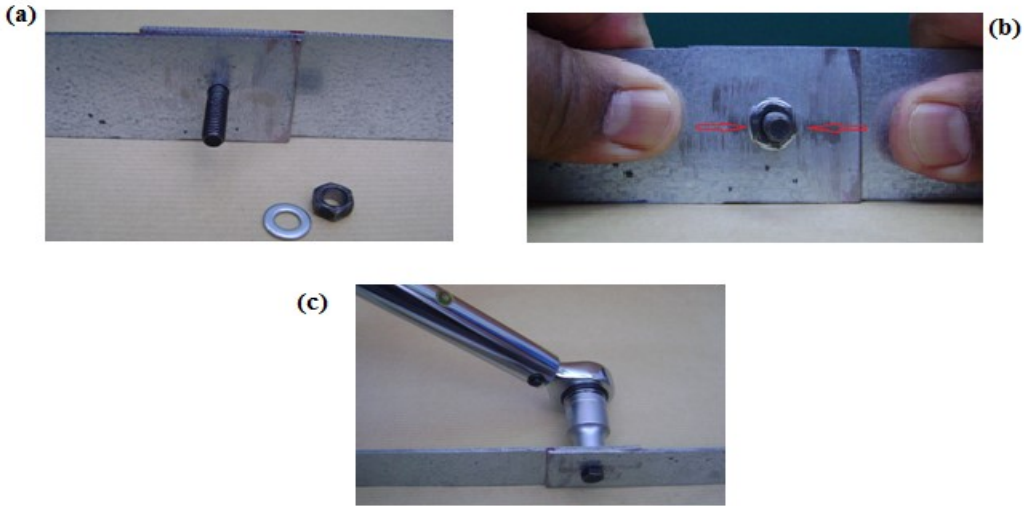


Figure II. 9: Procédure de serrage. (a) :montage du boulon, (b):la planéité, (c) :application du couple désiré.

Les caractéristiques mécaniques de l'assemblage ont été déterminées par des essais de traction sur une machine électro-hydraulique asservie INSTRON de capacité 50 KN en statique et 100 KN en dynamique. Les essais sont effectués au niveau de l'Université de Sidi Bel-Abbes ; Faculté de Technologie ; Laboratoire des essais de fatigue (figure II.10).

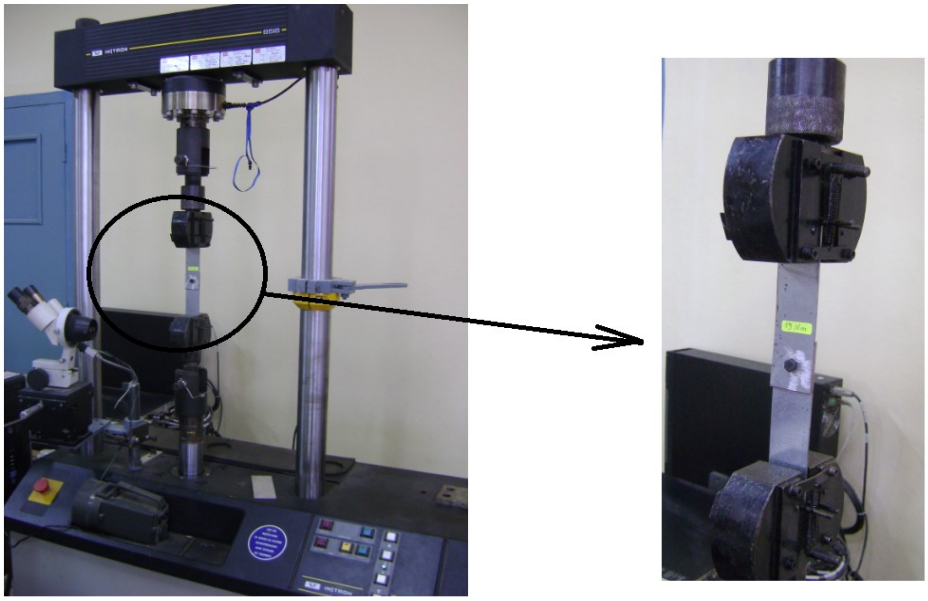


Figure II.10: Machine de traction INSTRON

Dans cette configuration, le boulon est sollicité essentiellement en cisaillement, mais cette sollicitation n'est pas pure. Un moment de flexion est induit qui a tendance à faire fléchir les tôles et à les écarter (figure II.11).



Figure II.11: Assemblage à recouvrement simple, sollicité en traction-cisaillement

II.2.1.5. Influence du couple de serrage

Afin de mieux cerner l'influence du couple de serrage sur le comportement global de l'assemblage, nous avons réalisé six essais, en utilisant six valeurs du couple de serrage (19, 25, 30, 33, 36, 39 et 40 Nm), appliquées sur un joint boulonné. Tous les échantillons possèdent un diamètre d'alésage de 6mm.

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés par les courbes de charge-déplacement, comme le montre la figure (II.12). Nous pouvons remarquer que :

a) Pour des valeurs du couple de serrage inférieur à 30Nm, plus le couple de serrage augmente, plus la charge maximale à la traction augmente,
b) Au-delà de la valeur 30Nm, une réduction dans la charge maximale à la traction est obtenue en fonction de l'augmentation dans les valeurs du couple de serrage.

En effet, les différences observées sur l'évolution de la charge maximale à la traction sont importantes, elle croît de 13933 à $17785N$ pour un couple qui varie entre 19et$30Nm$, par contre elle diminue à $10687\ N$ pour un couple égale à $39\ Nm$. D'après ces résultats, on peut dire aussi qu'il existe un couple de serrage critique ($C_{cr} = 30\ Nm$), au-delà de cette valeur, la charge maximale à la traction est presque indépendante de ce paramètre. La performance de ce type d'assemblage est nettement améliorée par l'augmentation du couple de serrage, néanmoins, une optimisation est nécessaire en tenant compte d'autres paramètres.

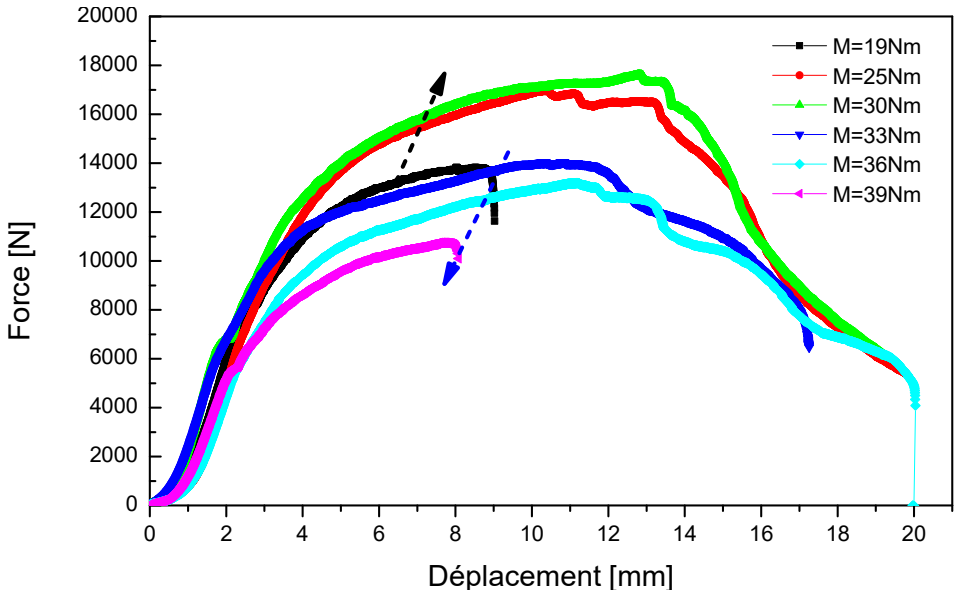


Figure II.12: Effet de la force de serrage

Pour une meilleure illustration de l'effet du couple de serrage, nous avons présenté sur la figure (II.13), l'évolution de la charge maximale à la traction due au changement dans les valeurs du couple de serrage. La courbe tracée peut être divisée en 04 stades :

a) On remarque d'abord que l'évolution de la charge maximale à la traction est symétrique par rapport à une couple de serrage égale à $26Nm$. Dans ce premier stade, l'augmentation de la charge maximale à la traction est plus rapide pour des couples de serrages varient entre 19 et $26Nm$. En effet, une augmentation de80%du couple conduit à une augmentation de 127 % de la charge maximale à la traction.
b) Dans le second stade, une diminution rapide de la charge pour des couples de serrages fluctuant entre 26 et $32Nm$. Les taux de variation de la charge présente des valeurs symétriques par rapport à un couple de serrage égale à $26Nm$. A titre indicatif, l'écart entre les charges maximales à la traction entre 19 et $26Nm$ est le même $entre\ 26\ et\ 32\ Nm$.
c) Dans le troisième stade, dans l'intervalle [33-$36Nm$], la charge maximale à la traction diminue lentement vers des valeurs symétriques pour se stabiliser.
d) Dans le dernier stade, l'augmentation du couple de serrage diminue considérablement la charge maximale à la traction pour des couples de serrages fluctuant entre 39 et $39Nm$, ce qui conduit à l'endommagement de l'assemblage.

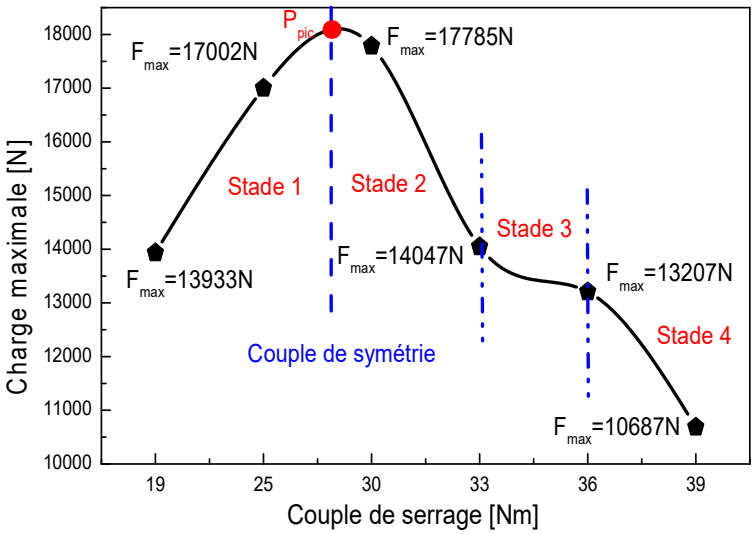


Figure II.13 : Variation de la charge maximale en fonction du couple de serrage

Afin d'évaluer la probabilité de risque d'endommagement, nous avons jugé utile d'étudier la croissance du couple de serrage. A cet effet, nous avons choisi d'étudier un couple de serrage important de 40Nm. Nous avons remarqué que le filetage est

endommagé par la rotation (Figure II. 14), avec la production de chaleur qui peut être influée directement sur la qualité de l'assemblage.



Figure II.14 : Rupture du filetage

Les valeurs optimales obtenues pour les couples de serrages sont comprise entre $25Nm$ et 30Nm. En effet, Ireman **[4]** a montré que le couple de serrage influe principalement sur la phase élastique, avant glissement ainsi que sur le niveau de la charge globale. Il a constaté aussi que le couple de serrage doit être correctement introduit par l'application d'une compression locale sur le substrat et par une traction du boulon, ce qui permet d'introduire les précontraintes dans les substrats.

Dans cette section, nous intéressons à l'étude des énergies d'adsorption calculées à partir des aires des surfaces des courbes force-déplacement (figure II.15). De ce fait, les six couples de serrages ont été étudiés afin de voir leurs influences sur la résistance du joint. La figure II.15 illustre la variation de l'énergie d'adsorption en fonction du couple de serrage.

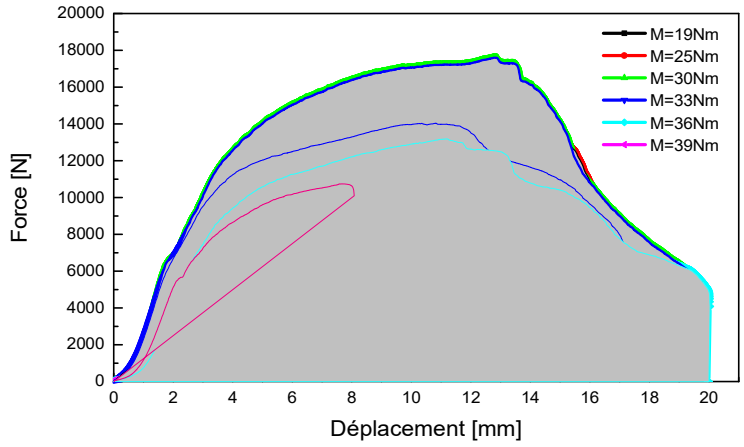


Figure II.15: L'aire sous la courbe de traction (la force vs déplacement).

L'analyse de la figure II.15 montre que l'énergie d'adsorption augmente avec l'augmentation du couple de serrage, dans l'intervalle varie entre 19 et 30 Nm. Par contre, cette énergie diminue avec l'augmentation du couple de serrage, varie entre 30 et 39 Nm.

L'étude des énergies d'adsorption a montré que les joints boulonnés possédant un couple de serrage égale à 30 Nm, qui nécessite une énergie supérieure à celle des autres joints de manière remarquable pour se rompre. Ceci confirme ce qui a été annoncé précédemment que l'utilisation d'un joint boulonné possédant un couple de serrage optimal égal à 30 Nm est recommandée pour le renforcement de structures boulonnées.

Si nous voulons clarifier la variation de l'énergie d'adsorption en fonction du couple de serrage, eh bien on peut le faire à travers l'allure représenté sur la figure II.16.

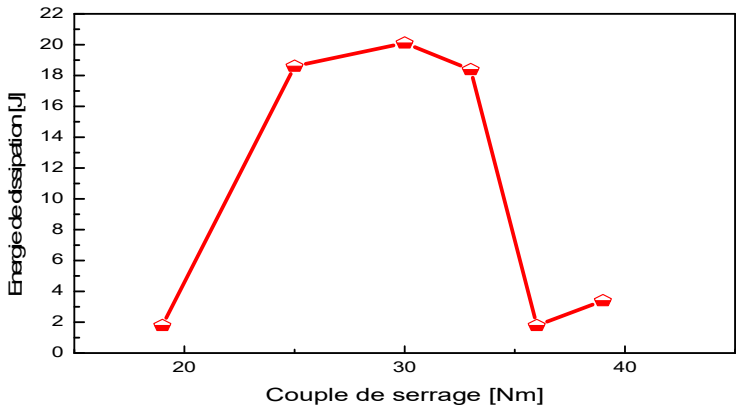


Figure II.16 : Variation de l'énergie d'adsorption en fonction du couple de serrage

II.2.1.6. Mode de rupture dans l'assemblage

Il est connu que lorsqu'on met un échantillon boulonné à recouvrement simple sous tension, on observe six modes de rupture, dont un est acceptable et cinq sont inacceptables. Il est acceptable d'avoir une rupture par matage ("bearing failure") mais inacceptable d'avoir une rupture en tension, en cisaillement longitudinal ("shear-out"), en tension-clivage ("cleavage-tension"), par arrachage de l'adhérent ("boit pulling through laminate") ou rupture de l'attache mécanique ("boit failure") **[9].**

Le mode de rupture recherché est donc par matage **[10]**. Les autres modes de rupture entraînent une rupture catastrophique ou une diminution significative de la résistance du joint.

Pour s'assurer d'avoir le bon mode de rupture, en utilise un rapport minimum w/d(largeur d'échantillon/diamètre du trou) de 4 et un rapport e/d (distance du centre du trou à l'extrémité du joint/diamètre du trou) égale à 2 **[11].** Dans ce sens, Aidas et al.**[3]** ont utilisé des ratios égale à 5 pour favoriser une rupture par matage. En effet, on peut noter que la diminution du rapport e/d **[3]** favorise une rupture en cisaillement, tandis que la diminution du rapport w/d **[3]** favorise une rupture en traction ou une rupture mixte. L'augmentation de ces deux rapports tend à diminuer la flexion secondaire.

Afin de quantifier la qualité des assemblages, les modes de rupture ont été analysés. Pour notre cas, l'utilisation de l'éprouvette à norme usuelle, nous a conduits à des bons résultats que celle de la norme NASM **[5],** qui conduit à un mode de rupture cisaillement longitudinal non recommandé, comme le montre la figure II.17.

Ce comportement est dû à la valeur de la distance entre le centre de l'alésage et le bord libre du substrat. En effet, cette distance est plus petite dans la norme NASM que celle donnée dans la norme usuelle. Pour les couples de $30Nm$ et $25Nm$, nous avons obtenu un type de défaillance par matage de la bordure du trou de l'adhérent, alors que l'on a un mode de rupture en cisaillement pur dans la norme NASM, par contre les autres couples $19Nm,\ 33Nm, 36Nm$ et $39Nm$ ont un effet inapproprié provoquant des défaillances inacceptables qui surviennent de manière brutale comme nous le montre la figure II.18.



Figure II.17 : Mode de rupture d'un assemblage à norme NASM **[5]**



Figure II.18 : Mode de rupture d'un assemblage à norme usuelle.

Concernant les modes de rupture des couples de serrage varient dans l'intervalle [19-39Nm], nous remarquons que la rupture s'est produite par cisaillement, au niveau du boulon, avec un faible déplacement au niveau de la structure : $5.8mm$ pour $M = 39Nm$ et $6.2mm$ pour $M = 19\,Nm$ (figure II.19). Le couple maximal crée une torsion au niveau du diamètre du boulon, avec l'endommagent du boulon avant d'effectuer l'essai de traction. Par contre, une faible valeur du couple $M = 19Nm$ ne crée pas l'adhérence nécessaire pour la structure, provoquant ainsi la rupture du boulon lors de l'essai de traction.



M=19Nm M=39Nm

Figure II.19: Mode de rupture pour les couples: $C = 19Nm$ et $C = 39Nm$

Pour les couples $C = 33Nm$ et $C = 36Nm$, d'après la figure II.20, on remarque que la résistance est comparable à celle du couple $C = 19Nm$, mais le déplacement est important par rapport à ce dernier, à cause de la valeur importante du couple de serrage, ce qui conduit à un mode de rupture mixte (traction – cisaillement).

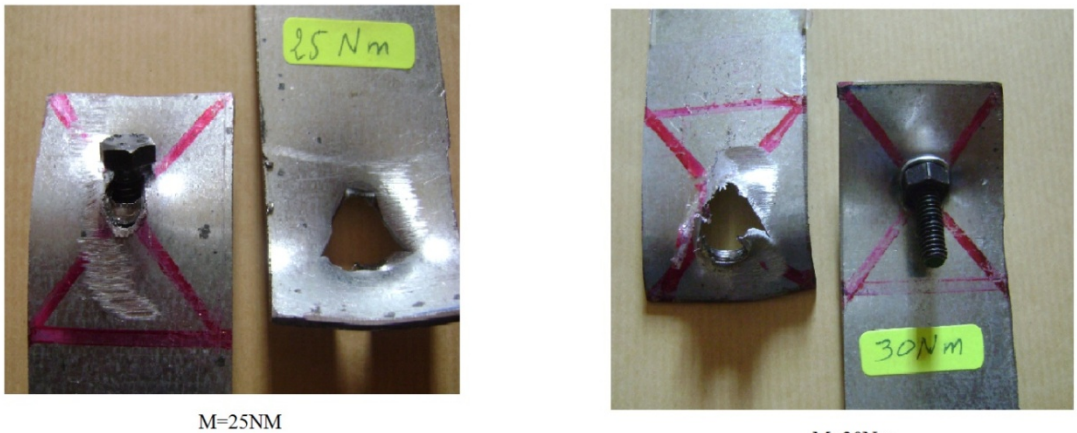


M=33Nm M=36Nm

Figure II.20: Mode de rupture pour les couples $C = 33Nm$ et $C = 36Nm$

Pour des valeurs du couple $C = 25Nm$ et $C = 30Nm$, selon la figure II.21, on constate que la résistance est importante par rapport aux valeurs du couple C. Dans ce cas-là, le mode de rupture est le déboutonnage, où la rupture s'est produite au niveau du trou du boulon et ce dernier n'a pas été cisaillé par l'opération de traction.

Comme conclusion, on peut constater que le choix du couple de serrage dans un joint boulonné est un facteur très important sur la qualité de l'assemblage, car un seul couple correct procure un assemblage fiable ; s'il aura trop faible couple, il y a un risque de desserrage, et aussi s'il y a trop fort couple alors nous aurons un risque de déformation des pièces à assembler ou de rupture de la vis.



M=25NM M=30Nm

Figure II.21: Mode de rupture pour les couples $C = 25Nm$ et $C = 30Nm$

II.2.2. Assemblages collés

II.2.2.1.Essais de caractérisation de l'adhésif

Grâce à de nombreux avantages, le collage remplace souvent les procédés traditionnels d'assemblages tels que le boulonnage, le rivetage, le vissage, l'agrafage ou bien même le soudage. Ce dernier élimine les concentrations de contraintes dues aux trous et les éléments de liaison. Les tensions sur les extrémités sont aussi réduites car la colle remplit tout l'espace entre les deux éléments rassemblés, ce qui favorise la répartition des efforts.

La seconde partie de cette thèse rend compte d'une comparaison du comportement globale d'un joint à simple recouvrement avec l'adhésif AB « *Kaftteng AB Glue* » et l'adhésif *« Quick Steel* » ou colle noire. Cette étude va nous permettre de quantifier la résistance d'un assemblage collé.

Avant d'entamer les essais de l'assemblage collé, des tests ont été réalisés pour caractériser la fiabilité des adhésifs utilisés. A cet effet, deux types de colles ont été utilisées : « **colle AB** » et la colle Quick Steel « **colle noire** », comme le montre la figure (II.22).



Colle AB Colle noire

Figure II.22 : Types de colles utilisées

Les éprouvettes de colles sont fabriquées à partir d'un moule (figure II.23-24). La forme des éprouvettes de traction utilisée dans cette étude a été définie selon la norme WP 300 **[12]**, sachant que cette machine de traction qu'on a exploité à ce moment ne fonctionne que manuellement et par conséquent nous n'avons pas pu mesurer la vitesse de traction à l'occurrence.

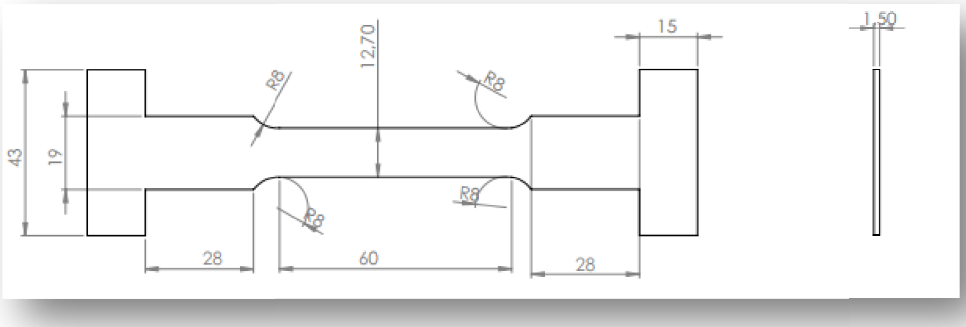


Figure II.23: Dimension des éprouvettes de colles, selon la norme WP 300 **[12].**

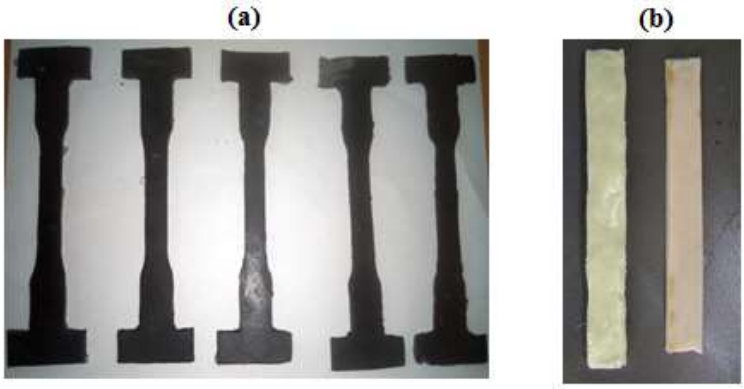


Figure II.24: Eprouvettes fabriquées dans un moule : a) colle noire, b) colle AB

Les essais de traction de la colle noire ont été réalisés sur une machine d'essai de traction de type « ZWICK » de capacité 25KN, spéciale pour les polymères, avec une vitesse de chargement de 0.1mm/min, (figure II.25).

La force d'essai est produite par un système hydraulique à commande manuelle, affichée sur un dynamomètre à cadran avec aiguille entrainée. La dilatation des éprouvettes est enregistrée via la mesure du déplacement, à l'aide d'un comparateur à cadran mécanique. Ces essais sont réalisés au laboratoire de mécanique, Lycée Mohamed Belkebir d'Ain Skhouna. Saïda.

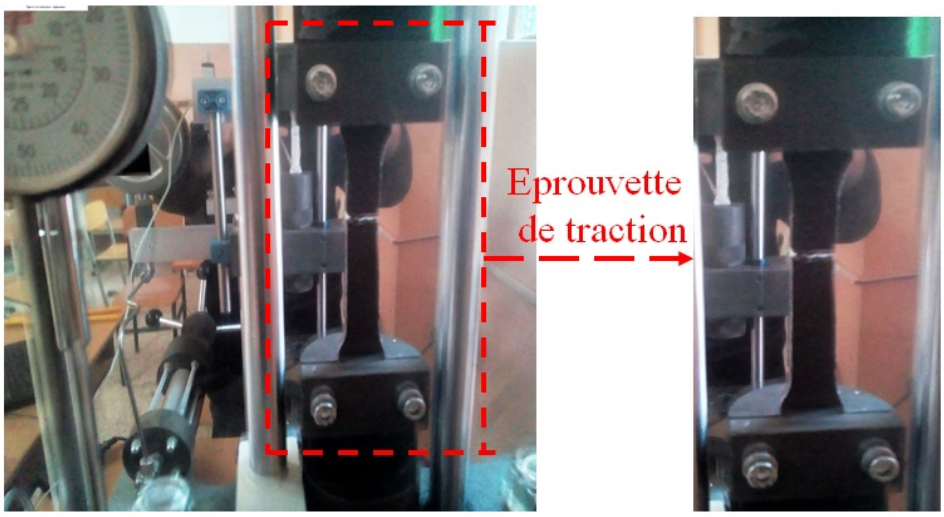


Figure II.25: Essai de traction de la colle noire

Les essais de traction effectués sur la colle AB sont réalisés sur une machine d'essai de traction didactique de type « BED 100 », de capacité de 10daN, avec une vitesse de chargement de 0.5mm/min, (figure II.26).

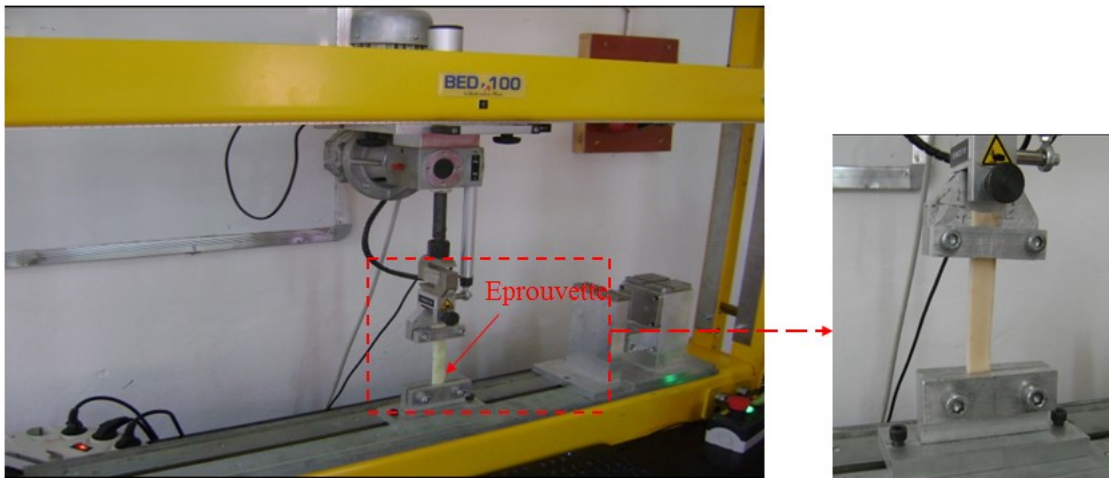


Figure II.26: Essai de traction (Colle AB)

Après la rupture de la colle noire sous traction nous avons vu que la plupart des échantillons rompre au fut de l'éprouvette selon la normalisation de la traction, et c'est pourquoi on a adopté le comportement mécanique de ce résultat, et cela n'empêche pas d'avoir des anomalies de l'experience comme l'exemple d'une éprouvette qui s'est cassée en dehors de la zone recommandée comme nous illustre la figure II.27 .

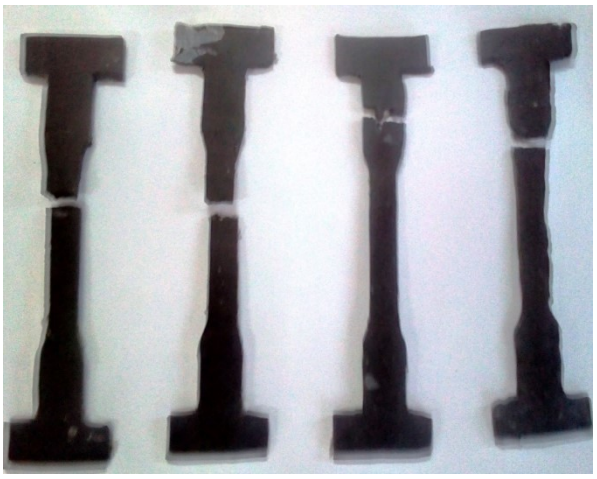


Figure II.27 : Mode de rupture de la colle noire

Les courbes du comportement mécanique pour les deux adhésifs, sont données par la figure II.28a-b, respectivement. Les essais de traction effectués ont permis de déterminer les principales caractéristiques mécaniques, regroupées dans le tableau II.3.

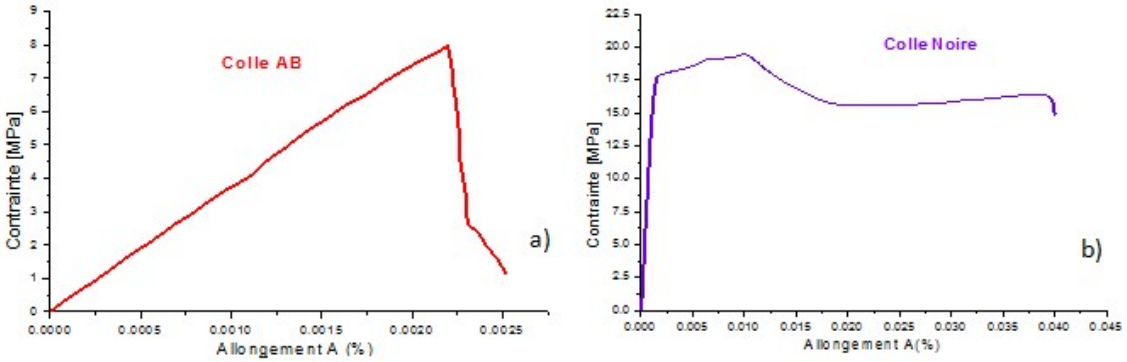


Figure II.28: Courbes rationnelles de l'essai de traction: a) colle AB, b) colle noire

Adhésif	σ_e (MPa)	σ_U (MPa)	σ_m (MPa)	A (%)	E (MPa)
Colle AB	7.97	8.01	8.05	0.0025	3795
Colle Noire	17.63	18.34	19.75	0.04	15120.06

Tableau II.3 : Propriétés mécaniques des colles utilisées

Nous avons tracé sur la figure II.29, les courbes de traction de l'assemblage collé, en utilisant la colle AB et la colle noire. Les résultats obtenus montrent que les valeurs de la force et du déplacement de la colle noire sont nettement supérieures dans le cas de l'assemblage avec la colle AB. La force maximale de $P_{max} = 14500N$ est enregistrée pour l'assemblage collé par l'adhésif AB. Par contre, la force maximale de $P_{max} = 3000$

N est obtenue pour l'assemblage collé par l'adhésif noir. Le rapport correspond entre les deux forces maximales dépasse la valeur de 4,84 fois supérieure de AB que la noire.

Le risque de rupture de l'assemblage qui utilise la colle noire est plus important que celui un assemblage avec la colle AB. Nous pouvons remarquer encore que, l'allongement dans le cas de l'assemblage collé par l'adhésif AB est important que celui de l'adhésif noir, avec des valeurs de 3.5 mm (pour la colle AB) et 1 mm (pour la colle noire).

Comme conclusion, on peut dire que la tenue mécanique de l'assemblage avec la colle AB est nettement meilleure que celui de la colle AB. Ceci nous conduit à exclure la colle noire dans les prochaines études.

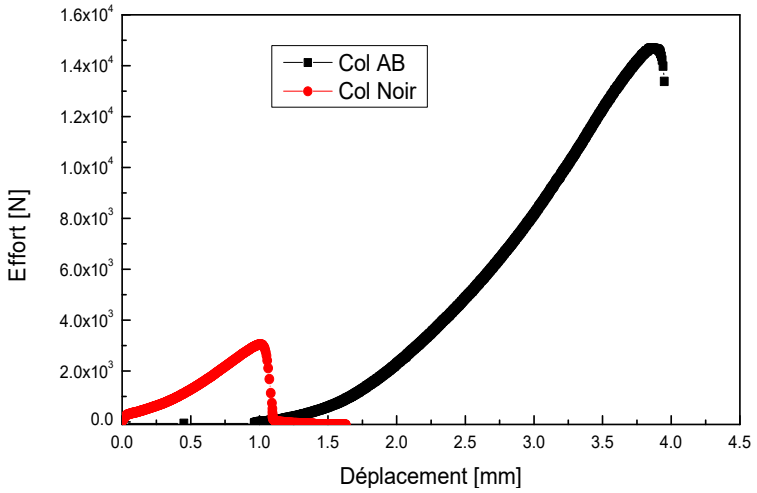


Figure II.29 : Courbes de traction de l'assemblage collé par les adhésifs AB et noir

On constate que pour un module de Young (E) plus élevé, la résistance est plus faible. Un adhésif est moins résistant si son module d'élasticité est plus élevé .Les recherches actuelles tentent d'améliorer cette propriété qui caractérise la résistance de l'adhésif **[3 - [4]**. Les Figures II.30 et II.31 illustrent respectivement, un exemple de l'assemblage collé avant et après l'essai de traction, en utilisant les adhésifs AB et noir.

La comparaison qu'on a effectuée sur les deux type de colles démontre que la colle AB se comporte comme étant un élément flexible et joue un role prépondérant lors du transfert de charge, par contre la colle noire qui était rigide et rompre dés le départ de l'essai, éventuellement c'est pourquoi nous l'avons éliminé comme étant adhésif d'une jonction collée et hybride notre cas de figure.

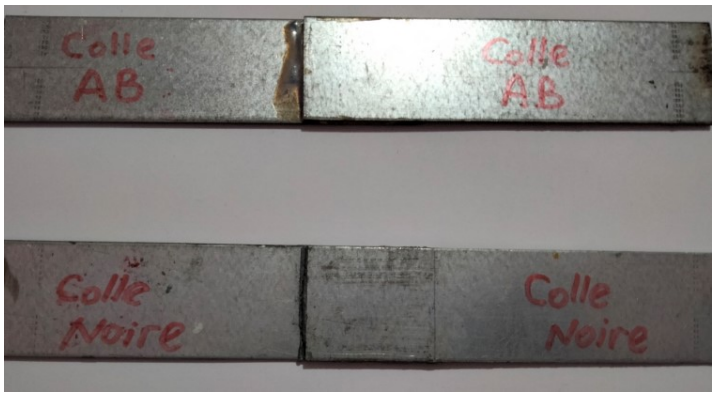


Figure II.30 : Assemblages collés avant l'essai de traction

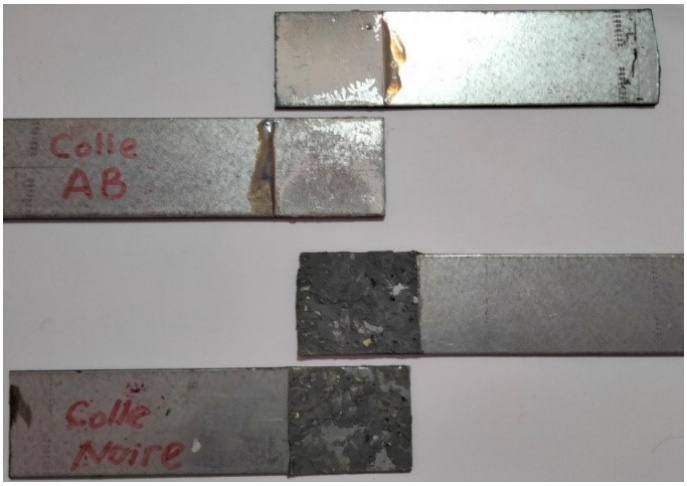


Figure II.31 : Assemblages collés après l'essai de traction (faciès de rupture)

II.2.3. Assemblages hybrides

Cette partie étude a pour objectif de présenter une étude expérimentale sur l'amélioration de l'assemblage lors du couplage des deux techniques (collage et boulonnage). Nous souhaitons en particulier, quantifier les forces maximales de résistance, obtenues dans les assemblages hybrides.

La figure II.32 illustre l'évolution de la charge en fonction de déplacement pour le joint hybride, en utilisant les deux colles, AB et noir. On peut remarquer deux types de joint hybride :

a) Le premier type réfère à un module d'élasticité faible de la colle AB. Dans cette situation, la colle prend plus de 90% de la charge et, seulement lorsqu'il y a rupture de l'adhésif les boulons reprennent 100% de la charge**.**

b) Le deuxième type survient lorsque le module d'élasticité de la colle est élevé (colle noire). Cette colle se déforme avant d'atteindre la rupture et la charge se répartie entre la colle et les attaches mécaniques (boulons).

c) La tenue mécanique d'un assemblage avec la colle AB est nettement meilleure que celui de la colle noire.

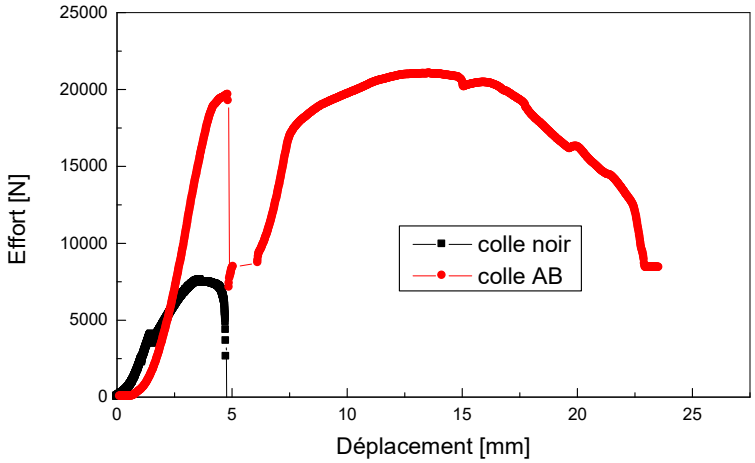


Figure II.32: Evolution de la charge en fonction de déplacement pour joint hybride

La figure II.33 illustre les 03 types d'assemblage retenu dans le cadre de cette étude. Le joint hybride testé réunit les deux types d'assemblages utilisés précédemment, à savoir, joint boulonné et collé, en gardant les mêmes dimensions pour les deux plaques, les boulons et l'adhésif. Les joints hybrides (collés/boulonnés) nécessitent les mêmes conditions de préparation des surfaces pour les substrats. Après avoir nettoyé les surfaces, l'adhésif a été mis soigneusement en assurant toute la surface à coller souhaité. Après la maitrise de l'adhésif, les boulons seront installés, en appliquant le couple de serrage.

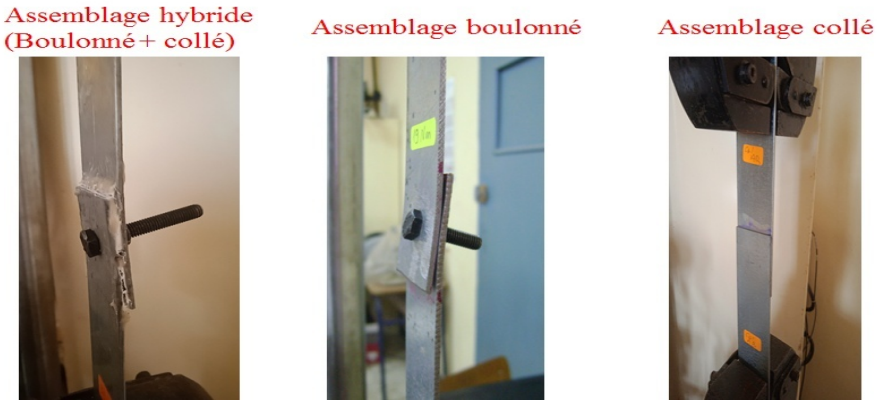


Figure II.33: Types d'assemblage ; Hybride, Boulonnage et Collage.

Dans cette section, nous présentons l'évolution de la charge en fonction du déplacement, en utilisant les trois configurations de l'assemblage, comme le montre la figure II.34. On peut remarquer clairement que le comportement d'un joint hybride est complètement différent des autres joints. Globalement, deux zones principales sont distinguées :

1. Zone de comportement élastique.
2. Zone ultime suivie d'une chute de la charge, traduisant la phase de rupture de l'adhésif, couvrant la phase de propagation instable.

Dans la première zone, la force augmente pour atteindre une résistance maximale à la traction proche de $22000N$. Dans la seconde phase, l'assemblage a subit une rupture brutale de l'adhésif, puis reprend sa raideur, jusqu'à atteindre la valeur de résistance maximale au point de traction finale, correspond à $23000N$.

L'analyse de la figure II.34 montre aussi que :

a) Le joint collé possède la plus faible résistance maximale à la traction, correspond à la valeur de 14900 N.
b) Pour le joint boulonné, la résistance maximale à la traction est de 16500 N, qui représente une augmentation de l'ordre de 10.77% par rapport le joint collé.
c) Après le couplage des deux techniques précédentes, l'assemblage hybride possède une résistance maximale à la traction de 23000N, soit une amélioration de 131.42% par rapport au joint boulonné contre 155% par rapport au joint collé.
d) Le déplacement le plus important est enregistré dans le cas de l'assemblage hybride, de 23.75mm. Cet allongement augmente avec un taux de 613% par rapport au joint collé, et 15% par rapport au joint boulonné.

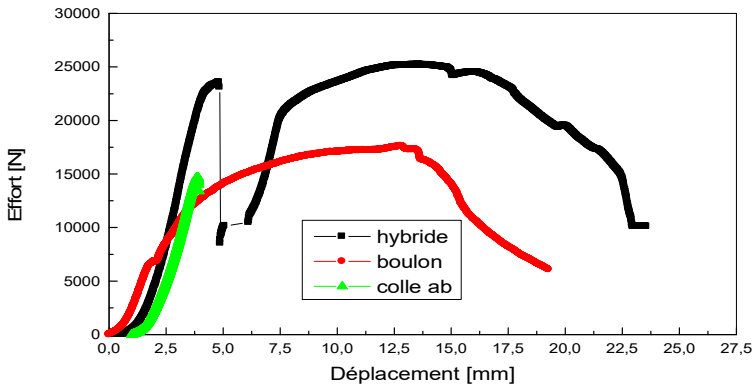


Figure II.34: Evolution de la charge en fonction de déplacement des trois configurations

À l'issue de cette étude, nous pouvons conclure que, l'adhésif AB minimise les concentrations de contraintes au voisinage du trou du boulon. En plus, le boulon réduit les contraintes sur les bords de l'adhésif, provoquant ainsi le décollement du joint.

L'étude comparative montre que l'utilisation des joints hybrides (boulonnés/collés) possède une résistance à la rupture plus élevée, comparativement au joint simple collé ou au joint boulonné.

Afin de confirmer les résultats précédents, les déplacements et les charges maximales de rupture ont été évaluées et comparées, en utilisant les trois configurations de l'assemblage. Cette étude est présentée sous forme d'histogramme, comme le montre la Figure II.35

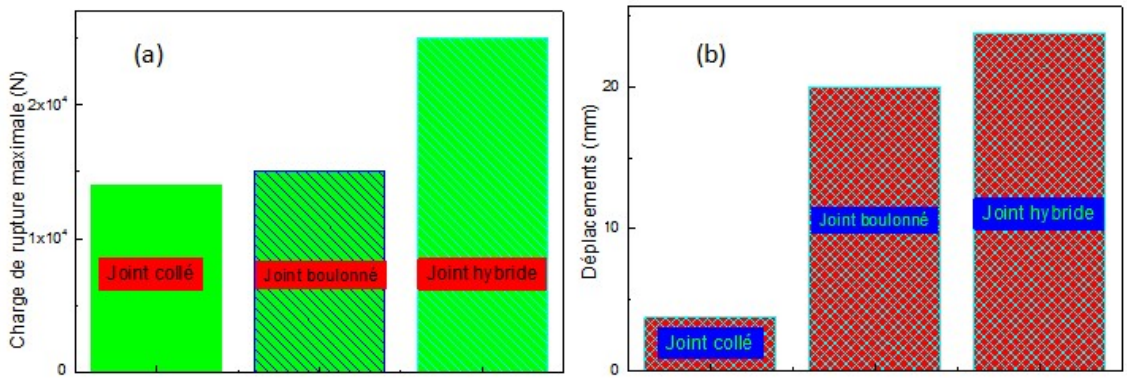


Figure II.35: Comparaison par l'histogramme:

a) Evolution des charges maximales; b) Evolution des déplacements

Les résultats obtenus nous permettent de conclure que le couplage entre les deux techniques engendre une augmentation dans les contraintes maximale de rupture et les déplacements correspondants. Cette augmentation permet d'améliorer la performance de l'assemblage.

Pour voir clairement l'avantage de l'association du collage avec le boulonnage on peut tracer le graphique qui va nous montrer l'énergie absorbée mesurée à travers l'aire sous la courbe de chaque type d'assemblage comme la figure II .36 nous illustre.

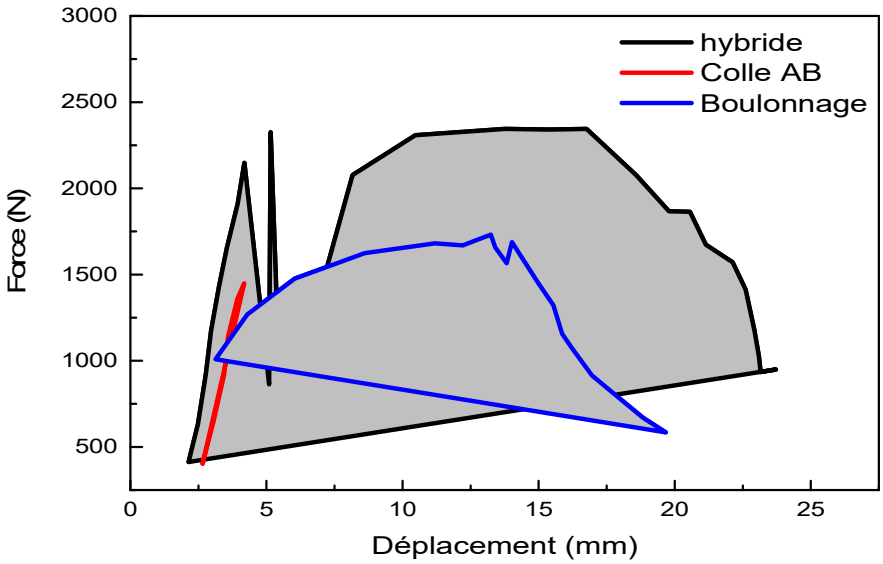


Figure II.36 : L'aire sous la courbe force vs déplacement.

La figure II.36 confirme en termes d'énergie les résultats précédents. Un joint hybride aura besoin d'une énergie supérieure à un joint collé et boulonné pour se rompre. En effet, l'énergie d'adsorption pour un joint hybride est égale 25764.35 J, par contre, elle est de et 31.60 J et 9349.64 J, pour un joint collé et boulonné, respectivement. À l'issue de cette étude on peut conclure que, l'ajout de l'adhésif au l'assemblage boulonné améliore la résistance de l'assemblage.

II.2.3.1. Effet du couple de serrage sur la tenue mécanique de l'assemblage hybride

Plusieurs facteurs peuvent influer sur la performance de l'assemblage hybride ; le facteur le plus important reste le couple de serrage et le choix de l'adhésif. Cette partie d'étude sera consacrée donc à l'étude du comportement du joint hybride. L'influence du couple de serrage et de l'humidité a été évaluée en parallèle avec l'étude de l'impacte de température.

Nous présentons sur la figure II.37 une comparaison entre les résultats expérimentaux, étudiant l'effet du couple de serrage sur la tenue mécanique de l'assemblage hybride. Trois couples de serrage ont été étudié : $19,30$ et $39Nm$.

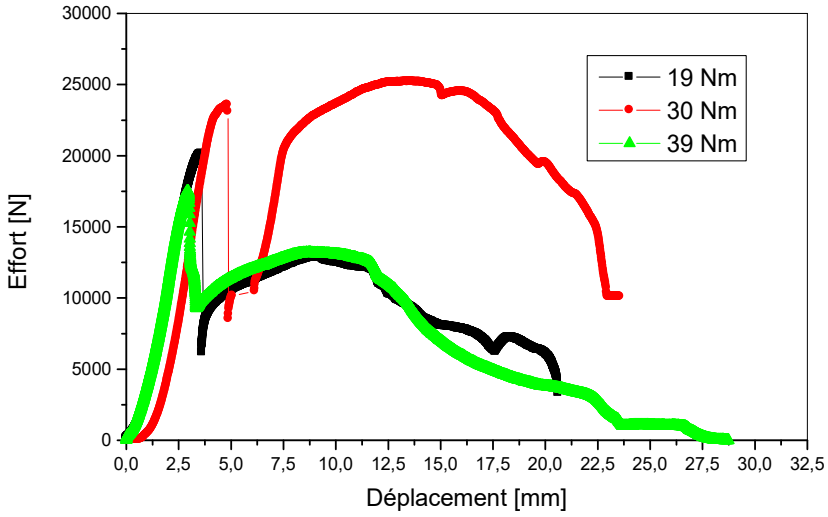


Figure II.37: Effet du couple de serrage sur la tenue mécanique de l'assemblage hybride

D'une façon générale, dans l'intervalle des couples utilisées on voit que pour les trois couples de serrage nous avons une chute de la résistance maximale à la traction traduisant la phase de rupture de l'adhésif par cisaillement.

Nous remarquons que le couple de serrage de $30Nm$ est le seul couple, son accroissement conduit à une augmentation de la charge maximale à la traction. En effet, une augmentation de 57.89% du couple conduit à une augmentation d'ordre 28.75% de la charge maximale à la traction. Par contre, au-delà de 30Nm, nous enregistrons une diminution dans les propriétés mécaniques. Donc, on peut dire qu'il existe un couple de serrage critique ($C_{cr} = 30Nm$) au-delà de lequel le couple contribue à la défaillance de l'assemblage hybride. Cet effet est plus marqué pour un couple de serrage égale à $39Nm$. En effet, une augmentation de 105.26% du couple conduit à une diminution d'ordre 28.75% de la charge maximale à la traction.

À titre indicatif, cette valeur correspond à la même valeur enregistrée pour le couple de $30Nm$, mais avec un signe négatif.

A partir de la figure II.37, nous pouvons aussi étudier l'effet du couple de serrage sur l'évolution du déplacement. L'analyse de cette figure montre qu'un accroissement au niveau du couple de serrage entraîne une augmentation du déplacement améliorant ainsi de la rigidité de l'assemblage. Nous pouvons constater aussi que l'assemblage réalisé par un couple de serrage égale à 39 Nm donne un déplacement assez important, avec une faible résistance de l'assemblage.

À l'issue de cette étude on peut conclure que l'effet du couple de serrage dans un joint hybride et différent à celui d'un joint boulonné. À titre indicatif, l'écart entre les deux joints est de l'ordre de 2.5 Nm. Cette augmentation du couple de serrage optimal est due à la couche de l'adhésif associant les deux types d'assemblages standard (boulonnés/collés).

Pour confirmer les résultats précédents, nous avons tracé dans la figure II. 38, l'évolution de la charge maximale à la traction et le déplacement en fonction du couple de serrage.

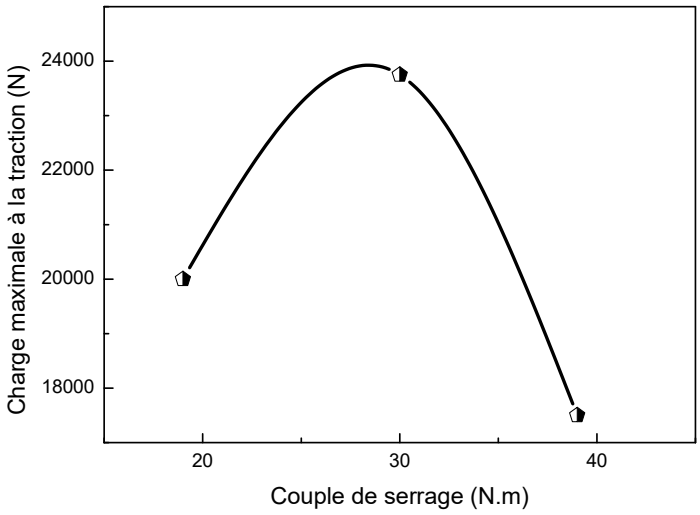


Figure II.38 : Evolution de la charge maximale en fonction du couple de serrage

Cette évolution peut être décrite par la relation:

$$P_{max} = 2438.13 \times C - 44.19 \times C^2 \textbf{(II-1)}$$

avec :

P_{max} : Charge maximale à la rupture (N)

C : Couple de serrage (Nm)

La figure II.39 illustre l'évolution du déplacement en fonction du couple de serrage. Cette évolution peut être régie par la relation :

$$l = 24.16 - 0.43 \times C + 0.013 \times C^2 \textbf{(II-2)}$$

avec :

l : Déplacement (mm)

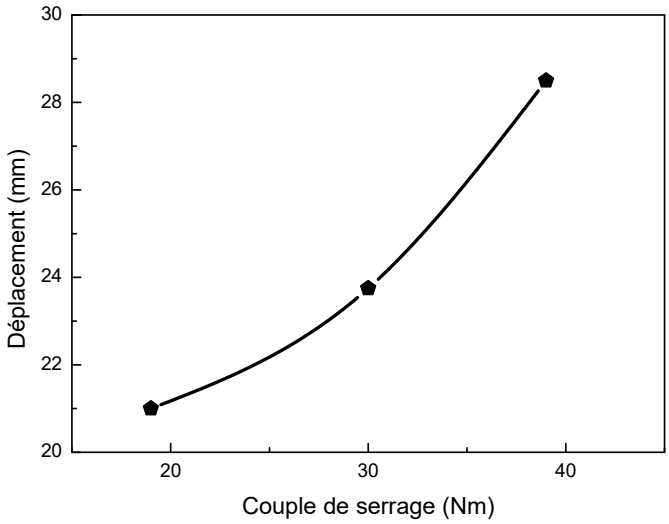


Figure II.39 : Evolution de la charge maximale en fonction du couple de serrage

II.2.3.2.Effet de l'environnement sur la tenue mécanique d'un assemblage hybride

Les assemblages mécaniques ont un rôle important dans le développement de l'ingénierie. Ils sont très utilisés dans l'industrie du bâtiment, aérospatiale, automobile ainsi que pour une utilisation à haute température avec des conditions humides qui vont sans doute provoquer une défaillance de la jonction et réduire sa durée de vie.

L'objectif de cette section est de présenter une étude expérimentale de l'effet de l'environnement, tel que la température et l'humidité, sur le comportement mécanique de l'assemblage hybride. A cet effet, des essais statiques de traction des joints hybrides ont été réalisés, en se basant sur la variation de l'agressivité du milieu utilisé, par la variation dans la température et l'humidité.

Pour atteindre notre objectif, on a effectuées des essais de traction des éprouvettes d'un assemblage hybride, boulonné et collé par l'adhésif AB, dans un milieu humide préparé selon la composition chimique l'eau de mer avec clore sodium **[16]** pendant 48 heures, à des températures de 26, 40 et 60°C à l'aide d'un bain de séchage, comme le montre la figure II.40. Les analyses ont été effectuées au sein de l'atelier de mécanique, de l'université Mustapha Stambouli de Mascara.



Figure II.40: Etuve de séchage.

II.2.3.3.Influence de la température sur le comportement mécanique de la colle AB

Dans cette étude, nous avons analysé le comportement mécanique de la colle AB, utilisés dans la structure hybride, traité sous l'effet de l'environnement (température et humidité). A travers les résultats présentés sur la figure (II.41), nous constatons que les échantillons exposés à la température et à l'humidité ont perdu leurs propriétés mécaniques. Nous pouvons toutefois remarquer, que les propriétés mécaniques enregistrées pour un échantillon exposé à la température ambiante sont plus élevées. Pour une température T= 25°C, la limite élastique σ_e=7.8 MPa, et lorsque la température T= 60°C, la limite élastique σ_e=4.83 MPa, et l'interprétation ces valeurs renvoie à l'impacte rigoureuse du milieu thermo-humide qui fait la carence du comportement mécanique en matière du module d'élasticité et la charge maximale à la traction de l'assemblage notamment sur la bonde collée.

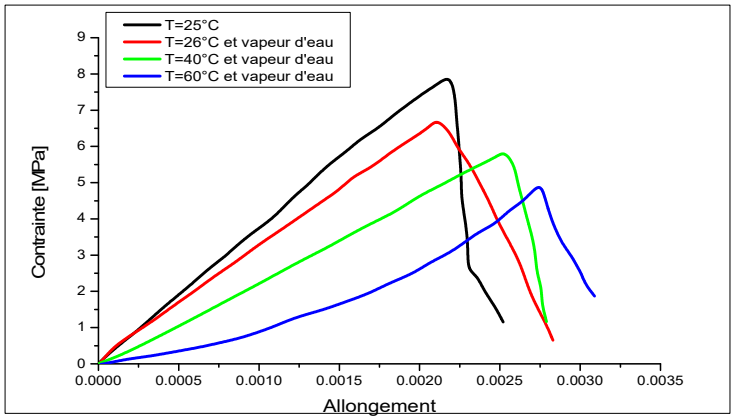


Figure II.41: Effet de la température sur le comportement thermomécanique de la colle AB

Les résultats de l'essai de traction effectué sur la colle AB, après le traitement sous différentes température sont regroupés dans le tableau II.4.

Température [°C]	**25 (sec)**	**26 +humidité**	**40 +humidité**	**60 +humidité**
Module de Young [MPa]	3795	3108.67	2324.42	1825.35
Contrainte maximale [MPa]	7.84	6.68	5.78	4.84

Tableau II.4 : Valeurs du Module de Young et contrainte maximale en fonction de la température

Pour mieux monter l'effet de la température sur le comportement mécanique de la colle AB, nous avons présenté sur la figure II.42, l'évolution de module d'élasticité et de la contrainte maximale en fonction de la température. On peut remarquer que:

a) Pour une température varie entre 26 et 60°C, l'augmentation de la température conduit à une diminution importante de la charge maximale à la rupture.

b) La colle AB a une tenue limitée sous l'effet de température. De ce fait, il est préférable d'éviter l'utilisation de cette colle au delà de la température de 30°C. l'utilisation de l'adhésif dans une température plus élevée provoque une modification directe sur les propriétés mécaniques, et par conséquent une diminution remarquable sur les qualités de résistance.

c) On remarque une chute significative dans les valeurs du module de Young et la contrainte maximale à la traction dans de différentes températures et sous la condition climatique définie auparavant, et cette diminution de ces caractéristiques due au facteur de température qui fait affaiblir la jonction par la plastification directe de la structure et cela empêche l' apparition de la zone élastique qui est considérée la phase préliminaire du comportement et aussi le paramètre essentiel de sécurité avant que le substrat se casse .

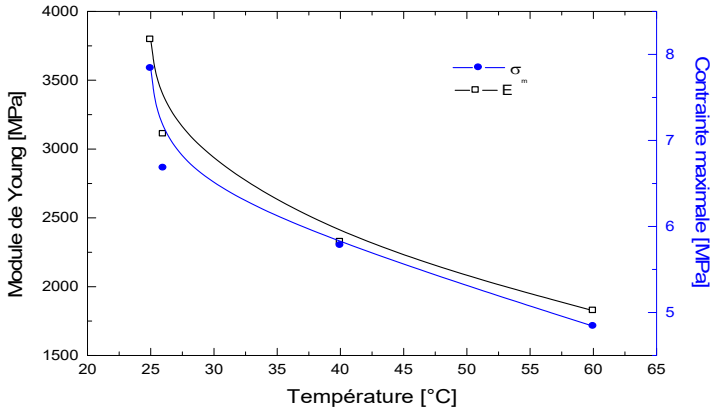


Figure II.42 : Evolution du module de Young en fonction de la température.

II.2.3.4.Influence de la température sur le comportement mécanique de l'assemblage hybride

L'objectif de cette section est de présenter une étude expérimentale du comportement mécanique des assemblages hybrides, sous l'effet de température et de l'humidité, en se basant sue le même protocole expérimental de l'étude précédente. Avant d'effectuer les essais de traction sur des assemblages hybrides, on a pesé ces assemblages, avant et après son traitement au niveau de l'étuve. Les mesures de masse des assemblages ont été réalisées sur une balance numérique de précision de sensibilité 0.0001g. Le taux d'absorption d'eau est calculé par:

$$A(\%) = \frac{M_t - M_0}{M_t}$$

avec :

M_t: la masse de l'échantillon après l'absorption de la vapeur.

M_0: la masse de l'échantillon avant le traitement

Le tableau II.5 résume les résultats obtenus de l'effet de la température sur la variation de la masse des joints hybrides.

Poids de l'éprouvette	Eprouvette 1 à 26°C	Eprouvette 2 à 40°C	Eprouvette 3 à 60°C
La masse de l'éprouvette avant le traitement au four	252.643g	257.894g	255.128g
La masse de l'éprouvette après le traitement au four	252.679g	257.952g	255.527g
Taux d'absorption [%]	0.014	0.022	0.15

Tableau II.5 : Comparaison des éprouvettes hybrides en matière du poids avant et après l'étuvage.

D'une façon générale, dans la gamme de températures étudiées, nous remarquons que la masse des assemblages hybrides augmente avec l'augmentation de la température. Cette élévation est due essentiellement à la vapeur d'eau absorbée au niveau de l'épaisseur des assemblages.

Afin d'évaluer de manière claire l'effet de l'environnement sur le comportement mécanique des joints hybrides, des essais de traction ont été réalisés avec une vitesse de

déformation de 2 mm/min. Ces essais sont réalisés au laboratoire de fatigue, du département de Génie mécanique de l'université UDL de Sidi Bel Abbes.

Nous présentons sur la figure II.43, les résultats expérimentaux de l'environnement (température et humidité) sur le comportement mécanique de l'assemblage hybride. Cette figure regroupe les courbes forces-déplacements obtenues à différentes températures dans le milieu humide. Nous remarquons que le comportement du joint reste identique quelle que soit la température étudiée, une chute de la résistance maximale à la traction traduisant la phase de rupture de l'adhésif (colle AB) par cisaillement.

L'analyse de cette figure nous permet de tirer les points suivants:

a) Le joint hybride révèle approximativement, la résistance maximale à la traction dans températures 26°C et 40°C. Pour les autres températures, cette résistance diminue avec l'augmentation de la température.
b) Une dégradation significative dans la résistance est remarquée à 60°C.
c) L'accroissement de la température conduit à une augmentation de la ductilité. Cet effet est plus marqué pour une température de 60°C.
d) Le changement dans les pentes des courbes est affecté par le changement de température. La pente diminue avec l'augmentation de la température. Ceci peut être interpréter par le fait que joint hybride devient moins efficace, qui entraîne une diminution dans la rigidité de l'assemblage.

On constate que les jonctions hybrides ont été influencées significativement par la condition thermo humide que nous avons préparé durant l'opération de l'étuvage, et la remarque captivante dans ce graphique est la différence apparente du comportement mécanique du joint hybride.

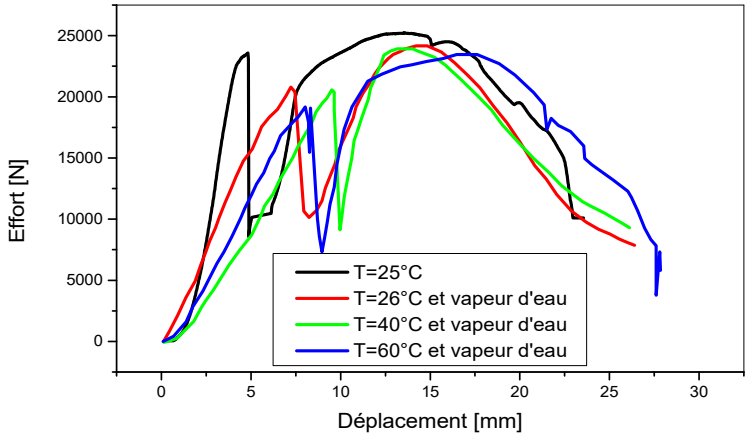


Figure II.43: Effet de l'environnement sur la tenue mécanique des assemblages hybrides

En reportant sur des graphes l'évolution de la charge maximale à la traction et la pente des courbes (charge de la limite élastique) en fonction de la température, nous avons pu mettre en évidence la dépendance du comportement du joint hybride avec la température, comme le montre la figure II.44.

L'analyse de cette figure montre qu'un accroissement dans la température entraîne , d'une part, une faible diminution de la charge maximale, et d'autre part, entraîne une forte diminution dans la charge de la limite élastique. Ce comportement peut s'expliquer par la déchirure du film de la colle affectée par la température et l'humidité, ce qui réduit l'effet bénéfique du couplage des deux techniques (boulonnage et collage). Ce résultat nous permet de constater que l'endommagement de la colle provoque une réduction dans la performance des assemblages hybrides.

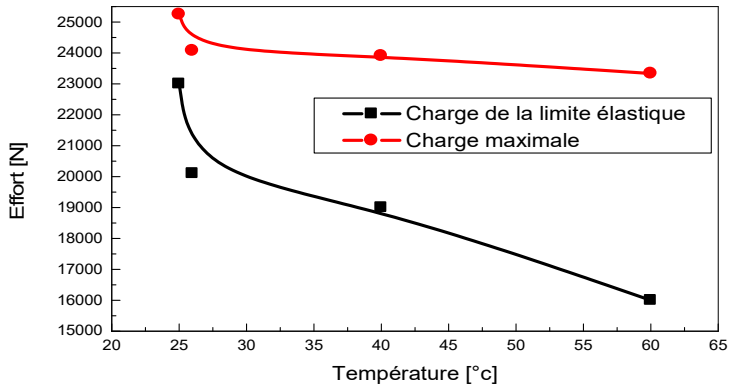


Figure II. 44 : Evolution de propriétés mécaniques du joint hybride en fonction de la température.

Référence bibliographiques

[1] **A.E.R.de Jong** .(1945) .Bibliography on Riveted Joints, American Society of Mechanical Engineers, New York,

[2] **Eric .P.** (2013) .Contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés) - application aux jonctions aéronautiques, A12, A13.

[3] **Samuel .G .**(2008). Etudes expérimentale et modélisation de joints composites collés, rivetés, et hybrides, mémoire à l'université de Québec.17.

[4] **Ekh, 1. and J. Schon,** Finite element modeling and optimization of load transfer in multi-fastener joints using structural elements. *Composite Structures*.82 (2). 245-256.

[5] Origin 2016. Guide d'utilisateur.

[6] **Xiao, y. and T. Ishikawa**. (2005). Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part Il: modeling and simulation). Composites science and technology, 65(7). 1032-1043.

[7] **Ireman, T.** (1998). Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints. Composite structures,43(3): p. 195-216.

[8] **Tserpes, K., P. Papanikos, and T. Kerrnanidis,** (2001). A three-dimensional progressive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading. Fatigue &Fracture of Engineering Materials &Structures.24(10) .663-675.

[9] **Hadhoud Amira**, (2016).Bibiograhie sur les assemblages boulonnés par platine d'about, mémoire de master académique, université de Tébessa, p 7,8.

[10] **A.Muheddine, A.Tannir, S.Soro**, (2011). fiche technique matière, fil galvanisé, , 2.

[11] **Thong DANG-HOANG,** (2009). Rupture et endommagement d'un assemblage boulonné :approche expérimentale et simulation numérique, thèse de doctorat, laboratoire de mécanique de Lille (CNRS UMR 8107). 29,79.

[12] **Campbell, F.C.,** (2010). Structural composite materials. ASM international.

[13] M**cCarthy, c., M. McCarthy, and V. Lawlor**, (2005). Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt- hole clearances. *Composites Part B: Engineering,.* 36(4): p. 290-305.

[14] **Kelly, G.** (2006). Quasi-static strength and fatigue life of hybrid composite single-lap joints. Composite Structures, 72(1): p. 119-129.

[15] **Aldas, K. and F. Sen,** (2013). Stress analysis of hybrid joints of metal and composite plates via 3D-FEM Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 20(2): p. 92-100.

[16] **Bachir .B.B,** (2002). Modélisation numérique des effets d'entaille sur le comportement en rupture des structures sollicitées mécaniquement, These de doctorat, université de sidi bel abbes, 147 .

[17] **Sun, C,** (2005). Development of Improved Hybrid Joints for Composite Structures.Composite Structures, 35. 1-20.

[18] **Hoang-Ngoc, c.-T. and E.** (2010). Paroissien, Simulation of single-Iap bonded and hybrid (boltedlbonded) joints with flexible adhesive. International Journal of Adhesion and Adhesives, 30(3). 117-129.

[19] **ESTEL.K,**(2011). Impact de l'humidité et des solutions salines sur le comportement dimensionnel de grès du Buntsandstein: Contribution à la sélection de faciès de restauration.58.

Chapitre III

Etude numérique

CHAPITRE III
ETUDE NUMERIQUE

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter une étude numérique de l'assemblage collé, boulonné et hybride à l'aide d'un code par éléments finis Abaqus. L'objectif de cette étude est d'apporter de la compréhension sur l'amélioration des tenues mécaniques d'assemblage lors du couplage des deux techniques. Plusieurs simulations sont réalisées, afin d'étudier l'évolution des contraintes dans les différents assemblages.

III.1. Introduction

Les éléments constitutifs des structures mécaniques sont généralement des assemblages collés, riveté, boulonnés etc... . Ces derniers, permettent d'assembler des plaques et des poutres faisant apparaître des discontinuités géométriques auprès desquelles se forment des zones de concentration de contrainte notamment au voisinage des trous de boulonnage. Les risques d'amorçage et de propagation des fissures de fatigue se situent près de ces zones. En plus, les endroits les plus sollicités sont aux extrémités de l'adhésif présentant plus de risques d'amorçage de fissures et par conséquent son renforcement est plus recommandé. La combinaison de ces deux techniques d'assemblage vise à minimiser les aspects négatifs de chacun des deux techniques **[1]**.

L'objectif de ce chapitre est de modéliser un assemblage simple par collage, boulonnage et hybride pour comprendre la répartition des contraintes et de formuler un ensemble de recommandations concernant le choix des différents facteurs, qui peuvent influer sur le processus du couplage des deux techniques. En plus, cette partie numérique permet d'obtenir plus d'informations dont celles qui sont difficilement accessibles expérimentalement mais il permet également d'envisager d'autres configurations rapidement et sans coût supplémentaire de matériaux. Ainsi, différents modèles seront présentés, du simple test de traction au joint collé, boulonné et hybride, afin de prédire le mode de défaillance et de connaitre de manière précise son degré de nocivité. Par conséquent, cette étude peut aider les responsables de la maintenance à définir les programmes d'entretien et de contrôle de façon convenable.

III.2. Modélisation de l'assemblage collé

III.2.1. Description du modèle et propriétés mécaniques

Avant de procéder au couplage des deux techniques (collage et boulonnage), il est important d'étudier la répartition des contraintes dans l'assemblage collé. Cette première étude a pour but de mettre en évidence :

- ✓ La répartition des contraintes dans la colle ainsi que les deux pièces à assemblées ;
- ✓ L'effet du module d'Young de la colle ;
- ✓ L'effet de la charge de traction sur la répartition des contraintes dans les différentes pièces
- ✓ L'anisotropie des contraintes en surface et en profondeur.

On considère deux plaques en acier galvanisé assemblées par deux types adhésifs de module de cisaillement $G_a$et d'épaisseur$e_a = 0.2\,mm$. Ces adhésifs sont très utilisés dans l'aéronautique vus ses propriétés mécaniques vis-à-vis les chargements mécaniques et thermiques. Les dimensions des différents substrats sont les mêmes dans les essais expérimentaux. Donc on va appliquer ces données expérimentales comme étant situation concrète et réelle afin d'arriver à un modèle fiable et simulateur de l'essai de traction d'un joint collé. Les dimensions sont montrées dans la figure III.1.

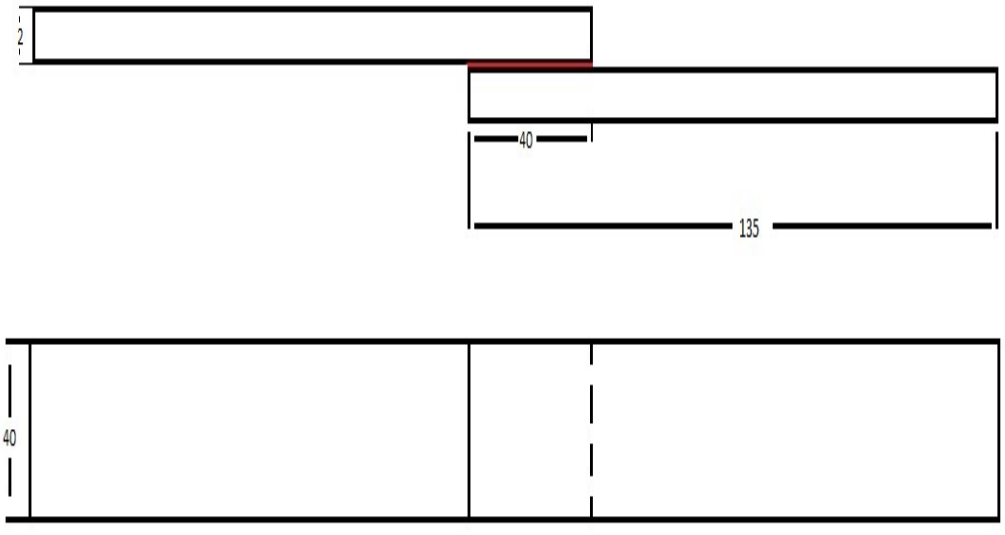


Figure III.1 : Géométrie du joint collé à simple recouvrement

Le matériau utilisé dans cette simulation 3D est l'acier galvanisé, caractérisé par la courbe de traction donnée par la figure.III.2. Les principales caractéristiques mécaniques sont regroupées dans le tableau III.1.

E **module de Young (MPa)**	σ_e **limite élastique (MPa)**	σ_{max} **contrainte maximale (MPa)**	$\boldsymbol{limite}$ **élastique** % **Allongement**
210317.9	410.12	580.22	0.195

Tableau III.1: Caractéristiques mécanique de l'acier galvanisé

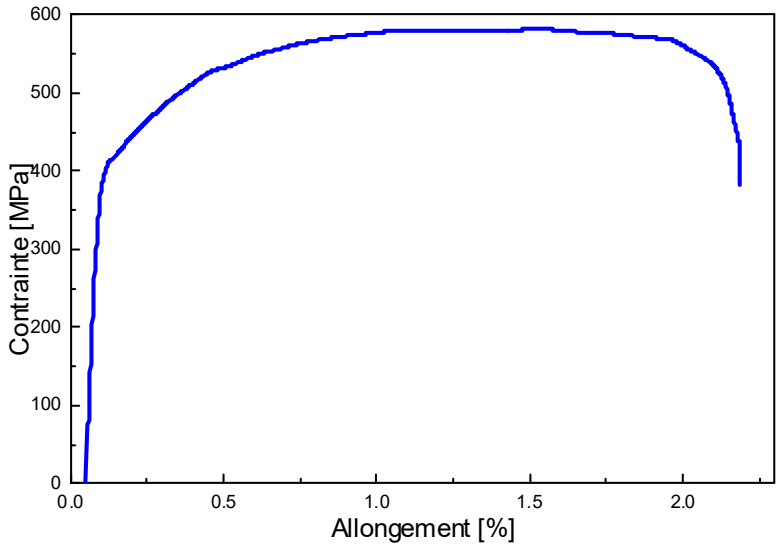


Figure III.2: Courbe typique Contrainte - Allongement de l'acier galvanisé

Les courbes de traction sous forme de « Contrainte-Allongement» des deux colles « AB » et « noire » sont données par les figures III.3 et III.4, respectivement.

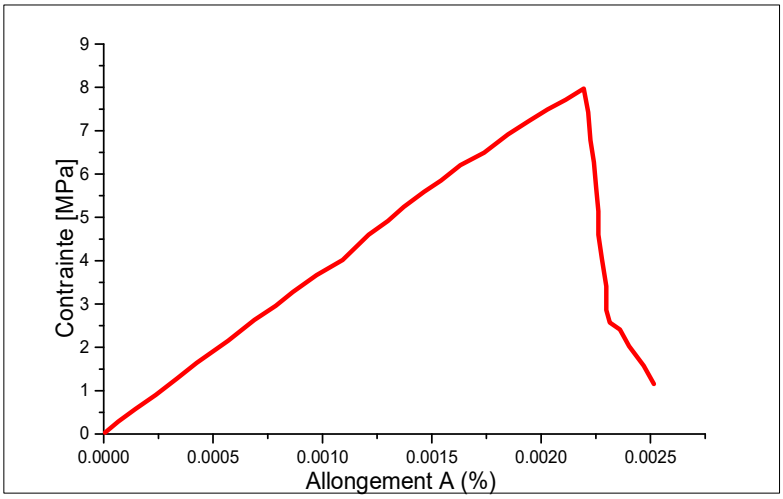


Figure III. 3: Courbe Contrainte - Allongement de la colle AB

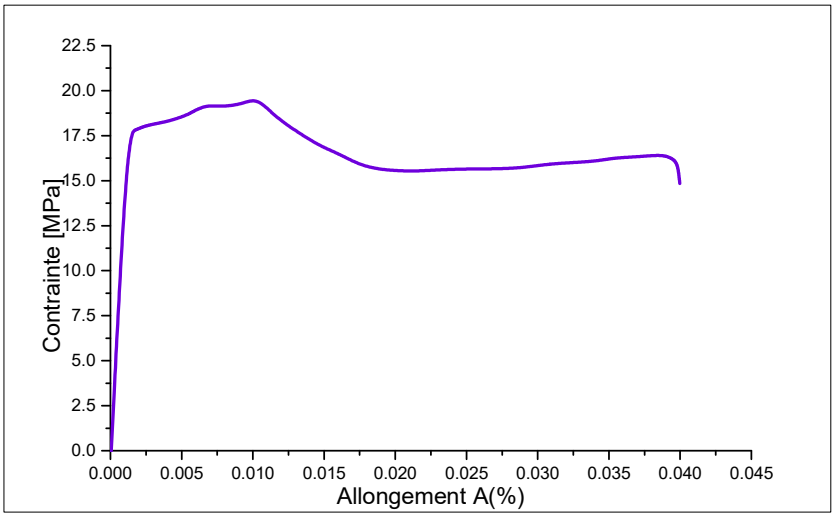


Figure III.4 Courbe Contrainte - Allongement de la colle noire

Les essais mécaniques effectués sur les deux colles ont permis d'obtenir les caractéristiques mécaniques suivantes :

Module d'Young de la colle AB $E_{Colle\ AB} = 3795MPa$ et une résistance élastique $\sigma_e = 7.97\ MPa$;

- ✓ Module d'Young de la colle noire $E_{Colle\ noire} = 15120.06\ MPa$ et une résistance élastique $\sigma_e = 17.63\ MPa$.
- ✓ Le module de cisaillement pour les deux colles est.$\mu = 0.34$

En utilisant le code de calcul par éléments finis « Abaqus », l'assemblage se compose de trois parties; deux plaques et une colle. Ces pièces sont assemblées dans le menue «Assembly». En esquissant les pièces en référence au même système de coordonnées, le processus d'assemblage peut être effectué plus efficacement, qui nous permet de gagner le temps de simulation. La figure III.5 représente le modèle géométrique du joint collé.

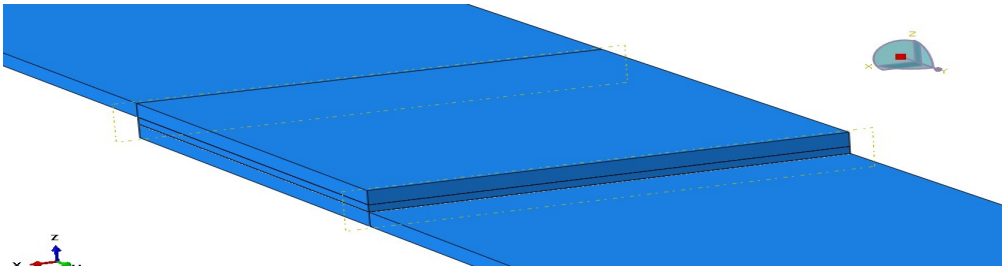


Figure III.5: Modèle géométrique du joint collé

III.2.2. Gestion de contact

Dans la simulation numérique du contact, pour piloter le comportement de l'assemblage des pièces, le code de calcul Abaqus ne considère qu'une seule surface, appelée « surface maître », à laquelle on associe un ensemble de nœuds qui forme la surface esclave. Le choix de ces surfaces doit suivre des critères relativement simples à mettre en pratique.

Si l'un des solides est rigide, la surface « maître » correspond à la pièce rigide. Si les deux pièces sont déformables, on prend la surface « maître » sur la pièce la plus rigide, ou celle dont le maillage est le plus grossier.

La figure III.6 illustre un exemple de la technique utilisée par Abaqus pour la gestion de contact entre les surfaces. Ce choix se justifie par le fait que les nœuds de la surface esclave ne peuvent pas pénétrer dans la surface maître, mais l'inverse est possible.

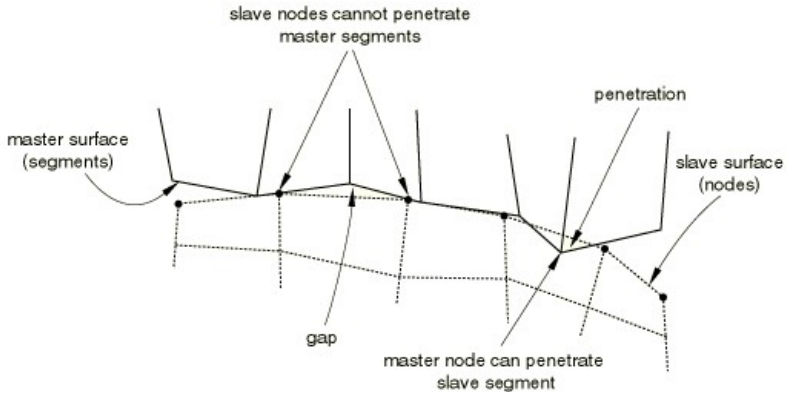


Figure III.6: Règles de pénétration des nœuds esclaves/maîtres

L'interaction entre les plaques et l'adhésif est une liaison mécanique parfaite, elle est déclarée selon l'option « Tie ». Le premier contact a été défini entre la partie interne de la plaque N°2 et la surface supérieure de la colle, pour cela la plaque est déclarée maître et la colle esclave. Tandis que, le second contact a été défini entre la surface supérieure de la colle et la surface supérieure de plaque N°1.

III.2.3. Maillage et Conditions aux limites

Dans cette partie d'étude, la pièce supérieure et inférieure au niveau du joint sont maillés de manière similaire. Le maillage utilisé est de type structuré (hyper-meshing). Les pièces sont modélisées par des éléments hexagonaux à huit nœuds C3H8R, chaque nœud possède 6 degrés de liberté.

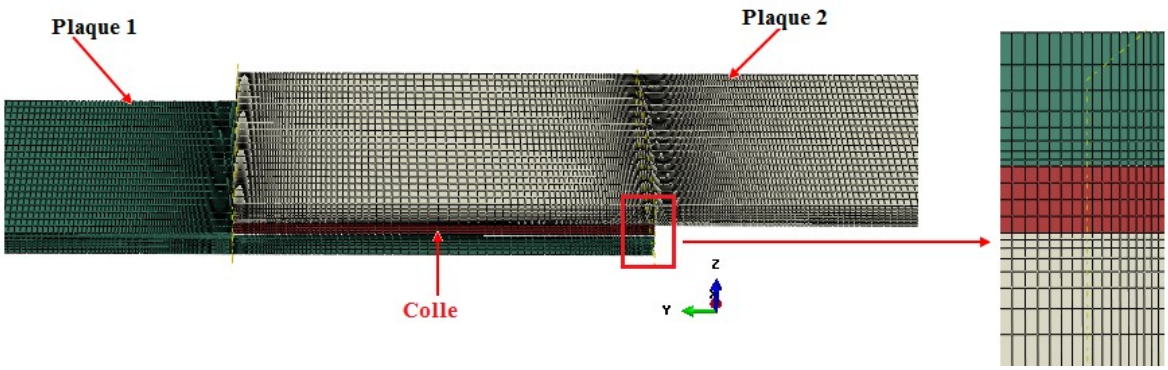


Figure III.7: Maillage de l'assemblage collé

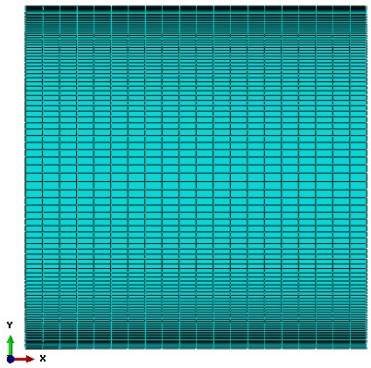


Figure III.8 : Maillage au niveau de la colle

La sollicitation de traction est assurée en imposant un encastrement (avec U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0) sur la partie gauche de l'assemblage. Une contrainte de traction 15 MPa est appliquée sur le côté libre de l'assemblage (figure III.9).

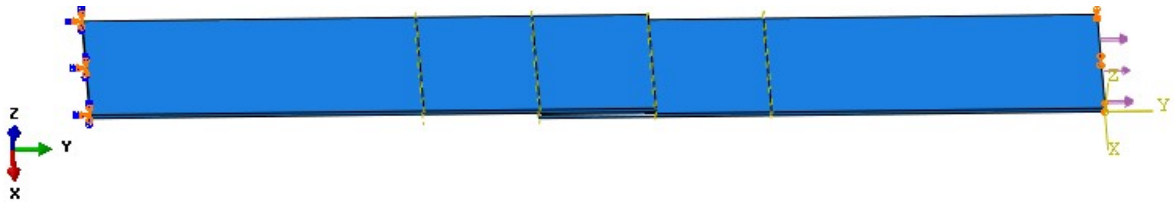


Figure III.9: Conditions aux limites dans le joint de colle

Une étude de convergence a été réalisée, en raffinant le maillage progressivement jusqu'à ce que les résultats obtenus ne varient que faiblement d'un maillage à l'autre et le modèle retenu et composé de 92400 éléments et 105845 nœuds, comme la figure III.10.

Nous avons adopté différente discrétisation afin de nous pouvoir atteindre la valeur maximale constante de contrainte de pelage de l'adhésif AB, et pour cela les nombres étaient comme suit : 80000, 100000, 120000 ; 140000 , 160000 , 180000 , 200000 , 220000 , 240000 , 260000 . On constate que la stabilisation a commencée à partir de la

valeur 92400 et c'est la raison pour la quelle on a maillé la structure avec ces partitions qui va nous réduire le temps de calcul et ensuite nous permettre d'éviter les problèmes de convergence connus dans telle situation de simulation comme la figure III.10 illustre.

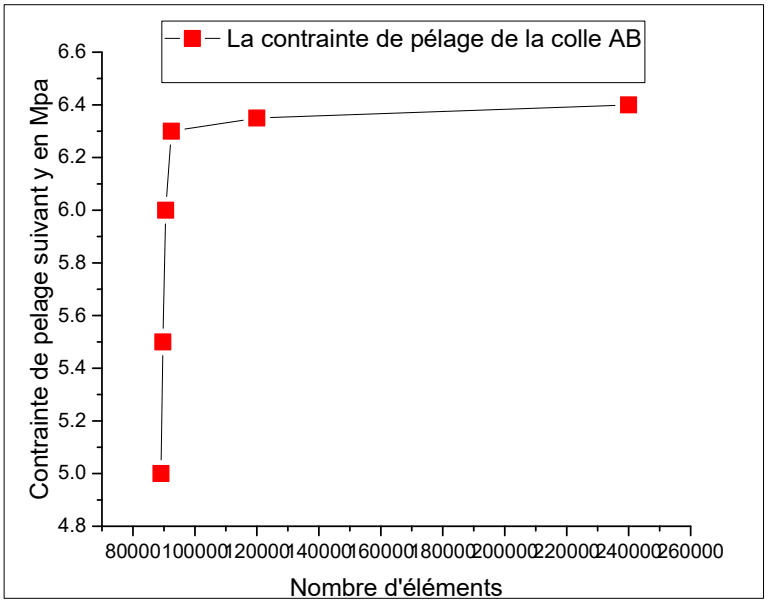


Figure III.10 : Etude de la convergence de la colle préférée AB .

III.2.4. Résultats

Lorsque la contrainte en cisaillement augmente dans l'adhésif, une contrainte pelage se développe à l'éxtirmité perpendiculairement au plan des adhérents, en raison d'un faible moment de flexion induit par la superposition des adhérents, cette contrainte diminue lorsque la longueur de recouvrement et l'épaisseur de l'adhésif sont faibles. Les concentrations de contrainte se trouvent dans le joint à environ 1 mm de l'éxtirmités de recouvrement tel que montré à la figure IIII .11

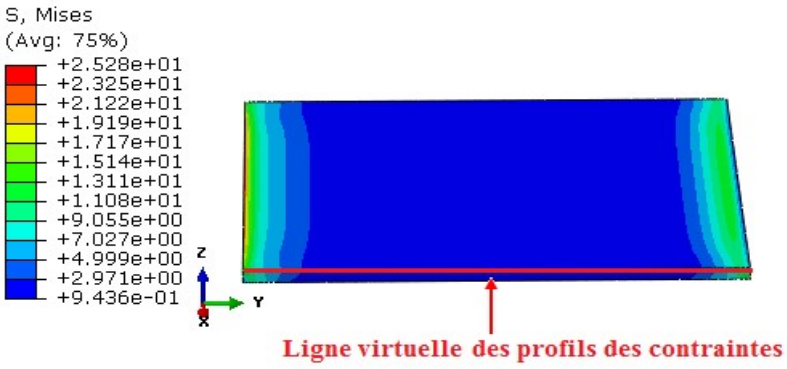


Figure III. 11 : Plans des profils des contraintes de Von Mises dans la colle

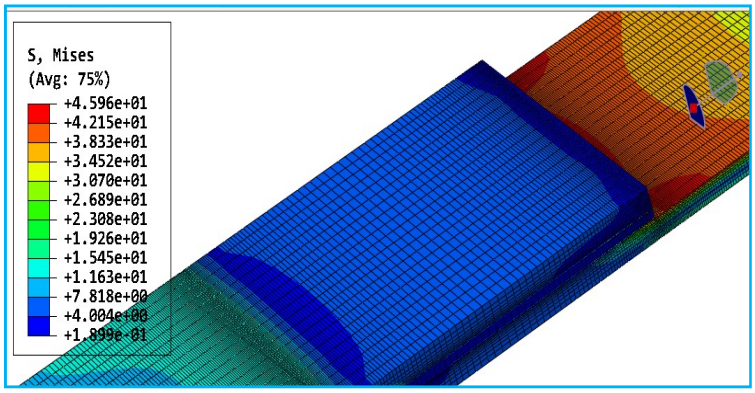


Figure III.12 : Niveaux de contrainte de Von Mises dans l'assemblage collé

La figure III.12 présente la distribution des contraintes de pelage dans la couche adhésive tangente à la longueur de recouvrement. L'analyse de cette figure montre que les contraintes sont concentrées sur les extrémités de l'assemblage, en utilisant les deux adhésifs utilisés. Cette analyse permet de mieux expliquer le mécanisme de rupture du joint de colle puisque celle-ci s'initie aux points où les contraintes sont maximales.

On remarque aussi que les contraintes sont minimales au centre du joint de colle, ce qui montre que la structure est équilibrée au tour du centre de la surface collée.

La meilleure adhérence est donc localisée au centre, et le risque de décollage est plus élevé au niveau des arêtes libres du joint de colle par effet de bord, ce qui est en accord avec les observations expérimentales. Il faut noter encore que les contraintes enregistrées sont très importantes par rapport à la limite élastique de la colle, ce qui provoque le décollement.

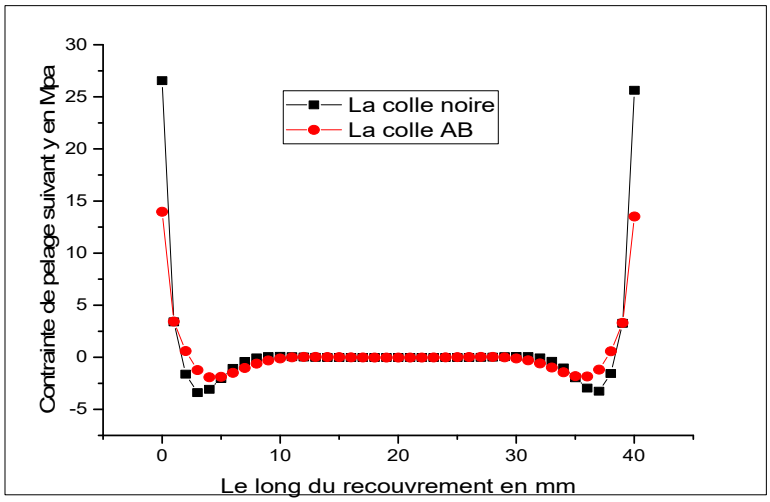


Figure III.13: Distribution des contraintes de pelage dans la couche adhésive (noire et AB).

Le module de cisaillement de l'adhésif est un facteur clé dans performance des assemblages collés comme figure III.13 nous illustre. L'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif conduit à une augmentation des contraintes maximales de pelage. En effet, la contrainte maximale colle noire est 27MPa, pour la colle AB elle est de 14 MPa, donc un rapport de 1.92 ; Ainsi, le risque de rupture de la colle noire est de 1.92 fois supérieur à celle de la colle AB. Ces résultats conduisent à conclure que l'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif entraîne à l'élévation des contraintes maximales, améliorant ainsi la performance de cette technique d'assemblage.

En général, les adhésifs résistent très bien au cisaillement. Dans toute la mesure du possible, quand on étudie une structure collée, on doit privilégier ce mode de contrainte par rapport aux autres. En plus, la détermination des caractéristiques de la technique d'adhésif nécessite l'analyse de la distribution des contraintes de cisaillement et du comportement des assemblages afin d'évaluer la probabilité de risque de rupture dans la couche adhésive. La figure III.14 représente la distribution des contraintes de cisaillement τ_{xy}, dans l'adhésif, le long d'une ligne virtuelle tangente au bord de l'adhésif, en utilisant les deux adhésifs (noire et AB).

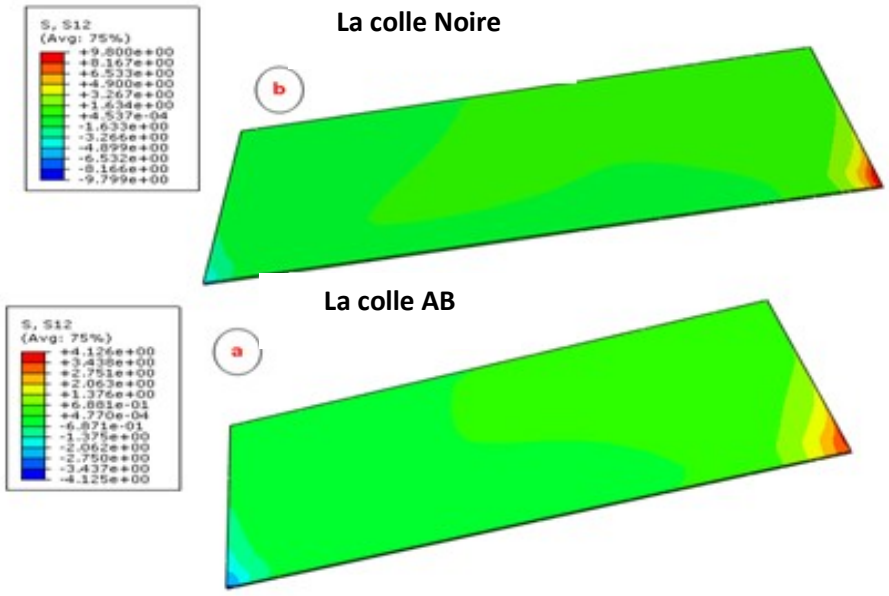


Figure III.14: Distribution des contraintes de cisaillement dans l'adhésif

a) Colle AB , b) Colle noire

Nous pouvons toutefois remarquer que :

a) Le niveau maximal des contraintes de cisaillement est localisé au bord du joint du coté de chargement. Par contre, les faibles valeurs des contraintes sont enregistrées sur le côté d'encastrement.

b) Un écart important est remarqué entre les contraintes maximales et minimales au bord du joint. Pour la colle noire, les niveaux de contraintes sont compris entre 4.12 et $-4.125\ MPa$. Pour la colle AB, les contraintes de cisaillement atteint des niveaux beaucoup plus élevés, qui varient entre 9.8 et $-9.79\ MPa$ pour la colle AB. Ceci peut être expliqué par le fait que le risque de rupture de la colle noire est de 2 fois supérieur à celle de la colle AB.

   Ce résultat nous permet de confirmer que l'utilisation de la colle noire n'est pas recommandée dans le cas du renforcement des structures et dans les assemblages hybrides.

III.3. Modélisation de l'assemblage Boulonné

III.3.1. Description du modèle et propriétés mécaniques

Les pièces de la simulation sont créées dans le code de calcul Abaqus/CAE. Ce dernier dispose d'un outil de CAO intégré qui permet de créer des modèles en 3D. Le modèle utilisé se compose de plusieurs pièces, dont les dimensions sont illustrées par la figure III.15.

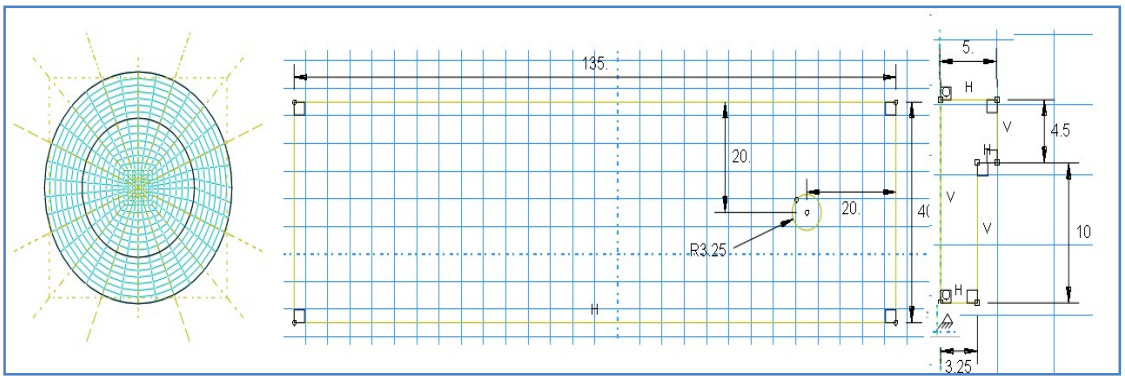


Figure III.15 : Dimensions de l'assemblage boulonné

L'assemblage se compose de quatre parties (deux plaques, boulons et un écrou), assemblées dans le menu « Assembly ». Pour gagner du temps, le processus d'assemblage peut être effectué plus efficacement, si en se basant sur le même système de coordonnées (figure III.16).

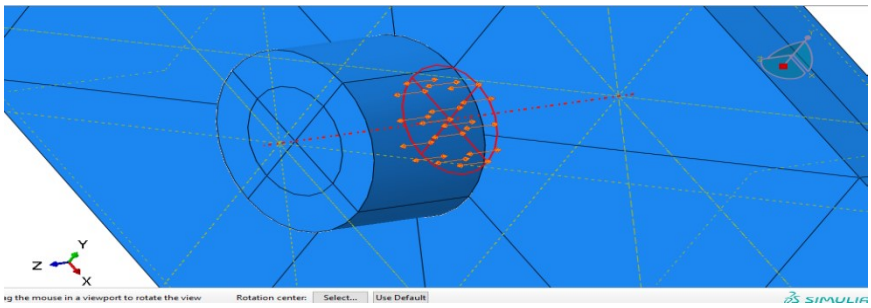


Figure III. 16: Assemblage des pièces

III.3.2.Matériaux utilisées

Les matériaux utilisés dans cette étude sont supposés élastiques linéaires, dont les propriétés mécaniques sont illustrées dans le tableau III.2.

Pièces	Matériaux	Module d'élasticité (E) [MPa]	Coefficient de poisson (v)
Plaque	Acier galvanisé	210317.9	0.3
Boulon-Ecrou	Acier	200000	0.3

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques

III.3.3.Maillage et conditions aux limites

Après avoir défini la géométrie et le matériau, des partitions ont été fait autour des trous qui permettent de définir des zones dans la pièce. Dans notre cas, ces zones sont intéressantes pour pouvoir définir un maillage plus fin autour des trous où il aura des concentrations de contraintes.

La définition du maillage est l'un des aspects les plus importants pour vérifier la convergence du maillage, et pour une meilleure modélisation du comportement de l'assemblage.

Étant donné qu'il y a une grande variété de types d'éléments disponibles, il est important de sélectionner l'élément correct pour chaque application particulaire. Il faut considérer différents aspects pour bien choisir l'élément. Pour mailler l'assemblage, les formes des éléments choisis sont : tétraèdre, prisme triangulaire et hexaèdre. Sur ABAQUS, les éléments triangulaires et tétraédriques sont très versatiles et sont très utilisés pour les géométries complexes. Ils sont moins sensibles à la forme initiale. Par contre, les éléments hexaédriques ont un taux de convergence meilleur que les triangles et les tétraèdres. Les éléments triangulaires et tétraédriques quadratiques donnent en théorie des résultats précis dans les problèmes où il n'y a pas de contact. Par contre, ces

éléments ne sont pas appropriés quand il y a un contact entre des surfaces gérées par une loi sans interpénétration « hard contact ». Dans ce cas-là, on peut avoir des problèmes de convergence.

Pour corriger ce problème on peut utiliser les éléments triangulaires et tétraédriques modifiés. Si on a un contact type « hard contact » présent dans le modèle, la meilleure option est d'utiliser un élément tétraédrique modifié comme le C3D10M. L'inconvénient est que ce type d'élément est un peu plus coûteux en termes de temps de calcul.

Le maillage de l'assemblage boulonné est illustré à la figure III.17. L'étude de convergence de la solution numérique est primordiale dans le cadre de notre étude. Un modèle hautement raffiné est nécessaire pour assurer cette convergence. Le maillage retenu est illustré par la figure III.17 comprends 19688 éléments et 29673 nœuds.

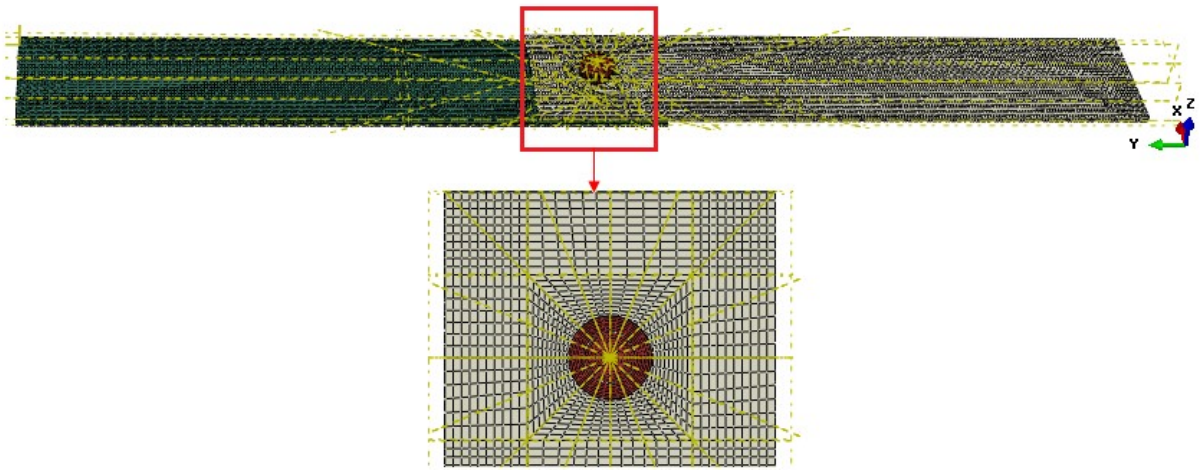


Figure III.17: Maillage de l'assemblage boulonné

Dans le cas d'un assemblage boulonné, un encastrement est imposé sur le côté gauche de la plaque (avec U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0). Un chargement de traction uniaxial est appliqué sur la deuxième extrémité **[3].** Les conditions aux limites et le chargement sont illustrées par la figure III.18.

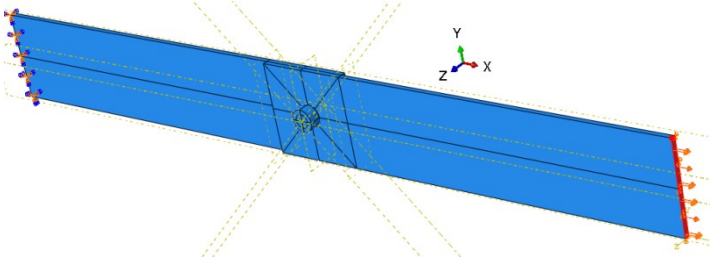


Figure III.18 : Conditions aux limites de l'assemblage

Le serrage des boulons est appliqué à l'assemblage à l'aide du solveur ABAQUS/Standard. Le pré-serrage est calculé par :

$$F_c = \frac{T}{K.d}$$

Où

T, *d* et *K* sont, respectivement, le couple de serrage, le diamètre nominal du boulon et le coefficient de couple (0.205). Dans notre cas, la force de serrage utilisée est de 1KN. Une « surface de partition » est créée sur le boulon, le long du diamètre du boulon, où la force de serrage du boulon est appliquée perpendiculairement à sa surface.

La partition de la section transversale du boulon où la force de serrage est appliquée est illustrée par la figure III.19. En tirant la partie inférieure des éléments vers le haut et la partie supérieure des éléments vers le bas, ABAQUS peut générer automatiquement des contraintes internes qui correspondent à la contrainte de serrage, modifiant ainsi la longueur du boulon.

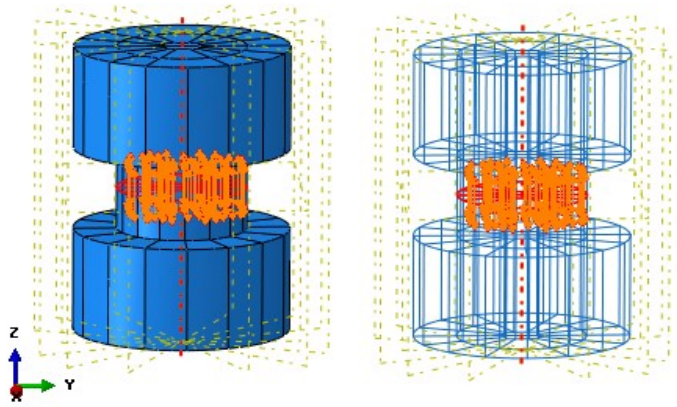


Figure III.19 : Représentation schématique du boulon où la force de serrage est appliquée

La conception et la mise en œuvre d'un assemblage boulonné nécessitent une méthodologie rigoureuse, car des erreurs peuvent provoquer des défaillances aux conséquences extrêmement lourdes, souvent très couteuses et parfois dramatiques. On sait que, parmi les différentes causes de défaillance est le serrage insuffisant, excessif, ou hétérogène représente à lui 30% des défaillances A cet effet, il est nécessaire d'aborder ce paramètre hyper intéressant aux assemblages boulonnés ou hybrides, notamment, dans les endroits critiques tels que l'automobile ou l'aéronautique.

III.3.4. Propriétés de contact

Les interactions de contact sont déclarées en utilisant une méthode de discrétisation basée sur la surface en appliquant une formulation de pénalité linéaire avec un glissement fini. La surface « maître » est affectée à des matériaux plus rigides pour éviter la pénétration dans la surface esclave, comme illustré par la figure III.20.

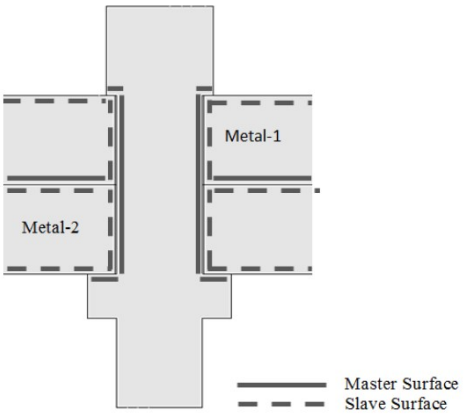


Figure III.20 : Représentation schématique des surfaces maîtres et esclaves

Dans l'assemblage, on va avoir un contact entre les deux plaques métalliques et un autre contact entre les boulons et les deux plaques. Dans cette simulation, il est nécessaire de définir le comportement normal et tangentiel du contact doivent être définis. De ce fait, deux propriétés d'interactions sont définies au modèle :

a) Interactions acier galvanisé-acier galvanisé, ce contact est introduit avec une loi de contact sans interpénétration « hard contact ». Le frottement est introduit grâce à un coefficient de frottement de 0.1 **[4]**.
b) Le second contact est entre boulon-acier galvanisé, deux contacts sont introduits un contact normal et tangentiel. Le contact tangentiel entre le trou et le boulon est modélisé avec un coefficient de frottement égal à 0.1. Le contact normal est modélisé avec une loi « hard contact » **[5].**

III.3.5. Résultats

III.3.5. 1.Comparaison entre les deux configurations

Pour le but d'évaluer l'effet de serrage sur le comportement de l'assemblage boulonné, nous avons comparé la distribution des contraintes dans deux cas différent de

chargement. Il s'agit de traction simple et de chargement combiné, entre la traction et la prétention de boulon.

La figure III.21 illustre, la répartition des contraintes suivant la ligne virtuelle des profils de contraintes sur le boulon.

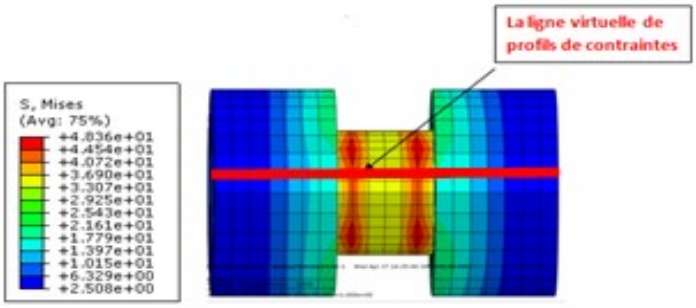


Figure III. 21 : Variation des contraintes de Von Mises avec et sans serrage

La Figure III. 21 illustre la variation des contraintes de Von Mises avec et sans serrage, en utilisant le couple de serrage égale 1.3 Nm. L'analyse de la figure III.21 montre que les contraintes dans le cas d'un serrage diminuent légèrement de 18 MPa pour atteindre une faible valeur de l'ordre de 16.5 MPa à environ 5mm par rapport à l'axe du boulon, puis une forte diminution des contraintes son observée après à environ 2.5 mm. En effet, une diminution des contraintes de l'ordre de 400 % est observée. Après cela, elles diminuent pour se stabiliser vers une valeur asymptotique. On remarque aussi que les contraintes sans serrage sont stables à environ 8.5mm, puis elles augmentent légèrement et diminué vers une valeur asymptotique. D'autre part, on remarque les contraintes dans le cas serrage sont plus importantes par rapport à celle sans serrage. Ces résultats montrent que le joint boulonné nécessite un choix judicieux du couple de serrage.

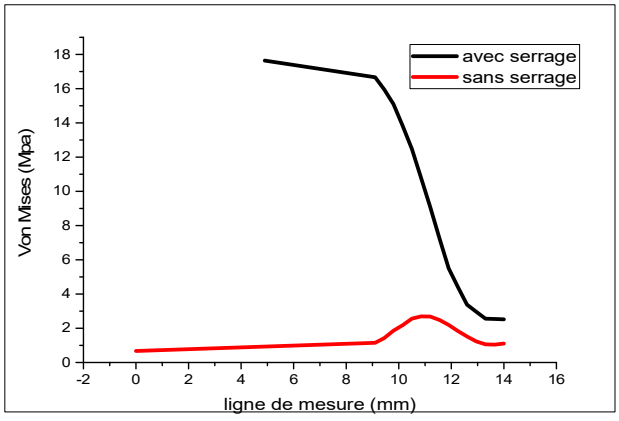


Figure III. 22 : Variation des contraintes de Von Mises avec et sans serrage

La figure III.22 montre la distribution des contraintes dans l'épaisseur du boulon due à la force de serrage. Comme on peut le voir, la tige du boulon est soumise à une contrainte de traction uniforme et des contraintes de compression ultérieures sont observées dans la tête de boulon et la plaque. De plus, des concentrations de contraintes importantes sont observées sur le bord de la région du trou de boulon causé par le roulement du boulon.

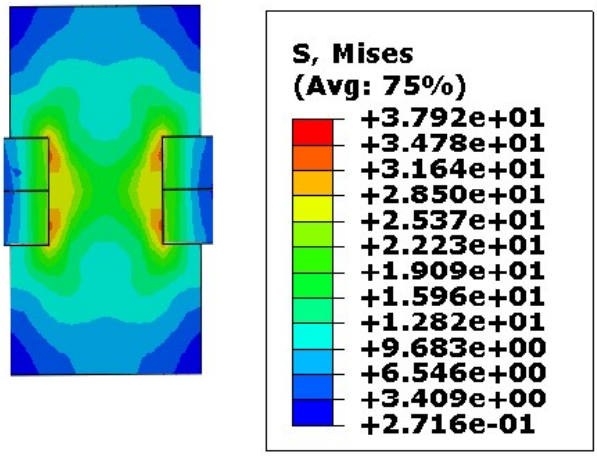


Figure III .23 : Contraintes développées dans la région du boulon, après l'application d'une force de serrage

On s'intéresse dans cette partie à l'effet du couple de serrage sur la distribution des contraintes de Von Mises dans le boulon. Dans l'assemblage boulonné du couple de serrage est le paramètre le plus important sans doute. Dans cette étude quatre couples ont été choisi 0.492, 0.738, 0.984 et 1.23Nm. La figure III.24 présente les niveaux de contraintes de Von Mises obtenues dans le boulon.

Nous pouvons remarquer d'abord une symétrie de la distribution des contraintes dans les boulons par rapport à l'axe central vertical du boulon et l'axe central horizontal de ce dernier. Les contraintes maximales sont réparties des deux côtés de la tête du boulon au-dessus du corps du boulon ainsi qu'au bord des alésages des plaques, qui sont la cause principale des fissurations dans les assemblages boulonnés. Ces concentrations sont dues à la fois aux effets de la traction et au cisaillement. Plusieurs travaux **[4, 5]** dans la littérature ont portés sur la chronologie et les mécanismes d'endommagement dans ce type de structures. Ils ont montré que les zones proches des points de contact entre le corps du boulon et la peau intérieure des alésages seront endommagées. Par

contre, les contraintes minimales sont enregistrées dans la partie extérieure du boulon. Ces zones ne présentent aucun risque de fissuration.

On note que les contraintes dans le boulon et au voisinage du trou dans les plaques augmentent avec le couple de serrage. En effet, une augmentation de $250\,\%$ du couple de serrage conduit à une augmentation de $197\,\%$ de la contrainte dans les boulons. Pour mieux cerner l'influence du couple de serrage sur la contrainte maximale de Van Mises, nous avons étudié l'évolution de cette dernière en variant le couple de serrage .

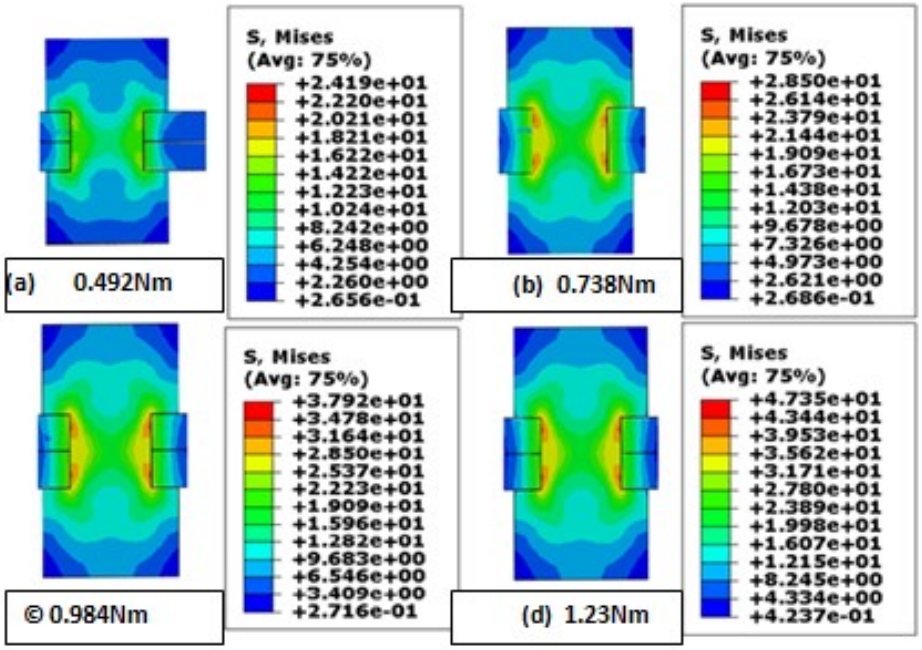


Figure III. 24 : Contour des contraintes de Von mises dans les boulons en fonction du couple de serrage

La figure III.25 présente cette variation pour les quatre couples. On peut voir clairement que les contraintes maximales sont proportionnelles au couple de serrage. Cette figure confirme le résultat des essais expérimentaux. Cette variation peut être décrite par la relation suivante :

$$\sigma_{max} = 2.05 - 4.31 \times C + 3.13 \times C^2 \qquad \textbf{(III-1)}$$

avec

σ_{max} : Contrainte maximale de Von Mises (MPa) .

C : Couple de serrage (N.m) ???

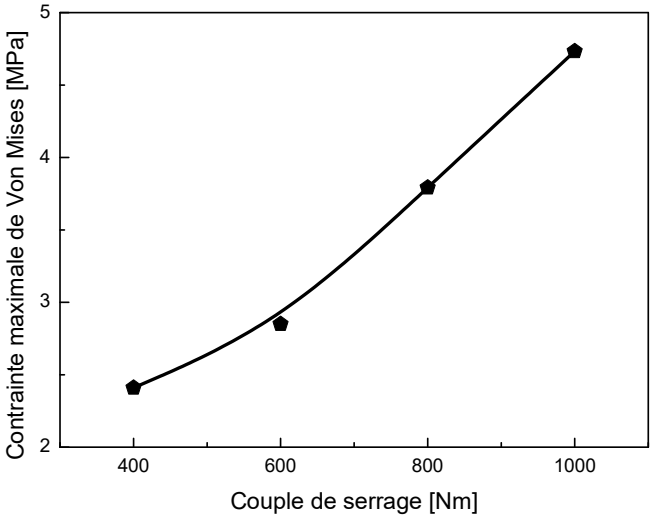


Figure III.25 : Variation de la contrainte maximale de Von Mises en fonction du couple de serrage

Dans cette section, nous nous intéressons à étudier la répartition des contraintes localisées aux circonférences des logements du boulon. La figure III.26 présente la distribution des contraintes normales suivant l'axe z, dans la plaque inférieure et supérieure.

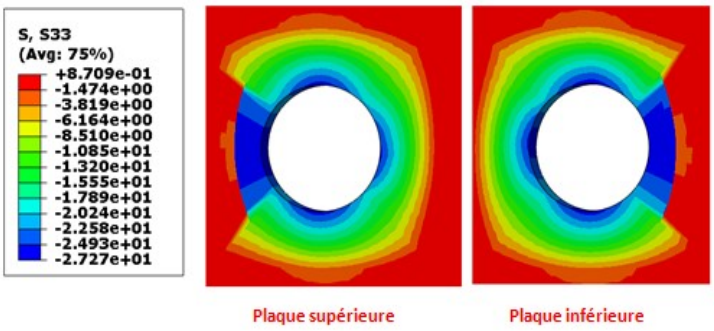


Figure III.26: Distribution des contraintes normales, suivant l'axe z, dans la plaque inférieure et supérieure

L'analyse de cette dernière montre que la compression totale produite par le serrage du boulon varie de $8.709.10^{-1}$ à $2.727.10^{-1}MPa$. Nous observons une concentration des contraintes autour des trous des deux substrats, nous constatons que ces contraintes atteignent des maximums dans la plaque inférieure. Elles sont dues à la compression exercée par le chargement sur les circonférences des logements des boulons. Ces trous peuvent être des zones d'amorçage et de propagation de fissures mêmes sous des faibles chargements, suite à des concentrations élevées de contraintes. D'où la nécessité d'ajouter un adhésif pour diminuer et homogénéisée cette concentration.

Nous remarquons dès que le boulon commence à transférer la charge, des concentrations de contraintes apparaissent sur la surface extérieure du trou, du côté de la tête du boulon. Cela est dû au cisaillement causé par le contact entre le boulon et la plaque lorsqu'une plaque se déplace par rapport à l'autre. En plus, l'analyse de figure III.27, montre que le mode de rupture est par matage ou déchirure de la plaque. Les autres modes de rupture entraînent une rupture catastrophique ou une diminution significative de la résistance du joint. En comparant ces résultats numériques avec les résultats expérimentaux, nous constatons que la rupture se produit au même endroit des contraintes maximales passant par la ligne centrale du trou. À partir de cette analyse, on peut noter une bonne corrélation entre le résultat expérimental et numérique. Ainsi, notre modèle semble pertinent, nous permettant de modéliser l'assemblage boulonné.

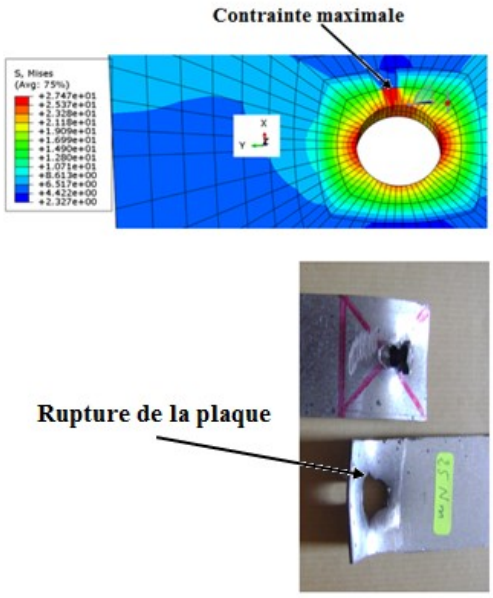


Figure III.27 : Profil de déformé du trou (étude numérique) et rupture de la plaque (résultat expérimental)

III.4. Modélisation d'un assemblage hybride

III.4.1. Description du modèle et propriétés mécaniques

Un assemblage est dit « hybride» quand il associe deux techniques d'assemblages différents. Dans cette partie on s'intéresse à l'association du boulonnage et du collage. La combinaison de ces deux techniques d'assemblage vise à minimiser les aspects négatifs de chacun des deux techniques. Sachant que la colle utilisée pour ce type d'assemblage et bien la colle AB.

Les deux plaques, le boulon et la colle sont pris avec les mêmes dimensions que celles de l'expérimental, avec les mêmes conditions aux limites utilisées dans les modèles précédents. L'assemblage est soumis à un encastrement d'un côté et un chargement de 10MPa appliqué sur l'autre coté.

Dans ce type d'assemblage, les partitions sont intéressantes pour pouvoir définir un maillage raffiné autour du trou, sur les deux extrémités de la longueur de recouvrement et l'adhésif, sur la tige du boulon où il aura la concentration des contraintes. L'adhésif et les zones extrêmes de la longueur de recouvrement doivent comporter un maillage très fin par rapport aux autres zones qui doivent comporter un maillage grossier pour éviter d'avoir un nombre volumineux de degrés de liberté inutilement. La figure III.28 montre la discrétisation dans différentes sections.

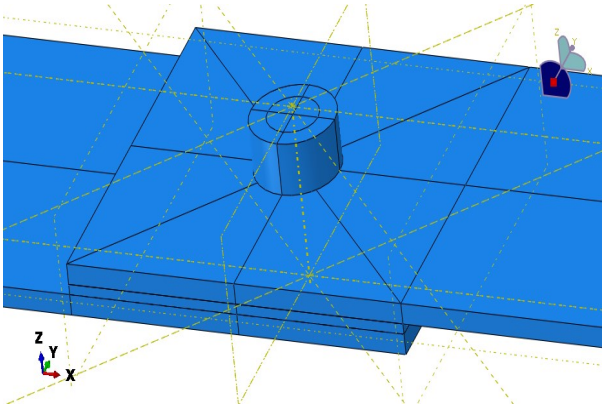


Figure III.28 : Partitions dans les différentes sections

Sur la figure III.29, nous avons montré le maillage typique du joint collé et boulonné. Le type de l'élément fini utilisé pour la discrétisation dans les plaques et l'adhésif est de type C3D8R. La version implicite a été utilisée pour le calcul numérique. Une interaction de type « penalty » entre les plaques et le boulon, et une interaction « hard contact » entre le boulon et les plaques ont étés choisies. Pour la colle une interaction de type « Tie » entre les plaques et la colle a été choisie.

Une étude de convergence a été réalisée en raffinant le maillage progressivement jusqu'à ce que les résultats obtenus ne varient que faiblement d'un maillage à l'autre. Le nombre d'éléments dans le modèle est de 26835 éléments, il comprend 20400 éléments dans la colle.

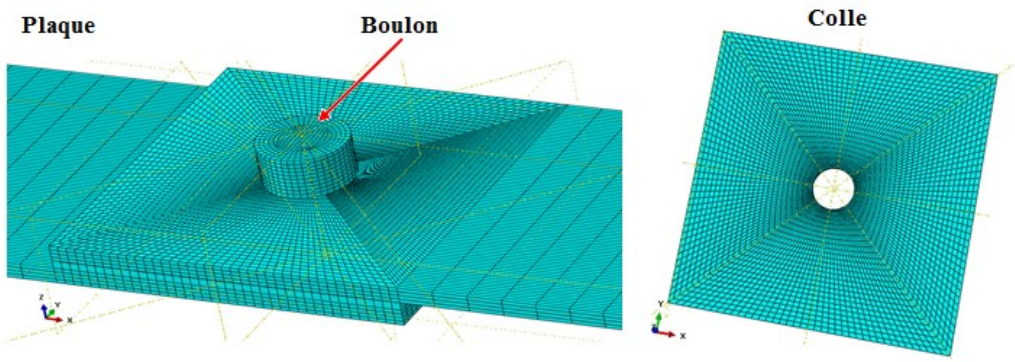


Figure III. 29 : Maillage du joint collé et boulonné

III.4.2. Résultat

Dans le but d'analyser les performances du couplage des deux techniques (collage et boulonnage), nous avons présenté une étude comparative entre l'assemblage boulonné et hybride, en se basant sur la variation du couple de serrage.

Les figures III.30~32 représentent le contour des contraintes normales σ_{zz}, localisées dans le boulon pour les deux assemblages, en fonction du couple de serrage. D'une façon générale, dans la gamme des couples de serrage étudiées, nous remarquons que la distribution des contraintes σ_{zz} dans le joint hybride sont différentes que celles du joint boulonné. On remarque aussi que les contraintes dans l'assemblage boulonné sont nettement supérieures, l'intensité de ces contraintes augmente avec l'augmentation du couple de serrage. Ces contraintes sont absorbées par la plaque à travers l'adhésif. En effet, pour un couple de serrage égale $0.492\ Nm$ la colle réduit les contraintes de 16.21%, pour un couple égale à $0.738\ Nm$ une réduction de 16.48%, contre une réduction de 16.70% pour une couple de serrage égale à $0.984\ Nm$.
Cette simulation permet donc de conclure que le couplage des deux techniques engendre une réduction des contraintes. Cette réduction prouve l'efficacité de la colle comme moyen de renforcement des zones fragiles, elle est constante quelle que soit le couple de serrage.

Pour une meilleure comparaison entre l'assemblage boulonné et hybride, nous avons jugé utile de voir la répartition des contraintes dans les substrats. Dans cette section, nous étudions la distribution des contraintes normales σ_z suivant l'axe z dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage hybride et boulonné, en utilisant trois couples de serrage (0.492, 0.738 et $0.984Nm$).

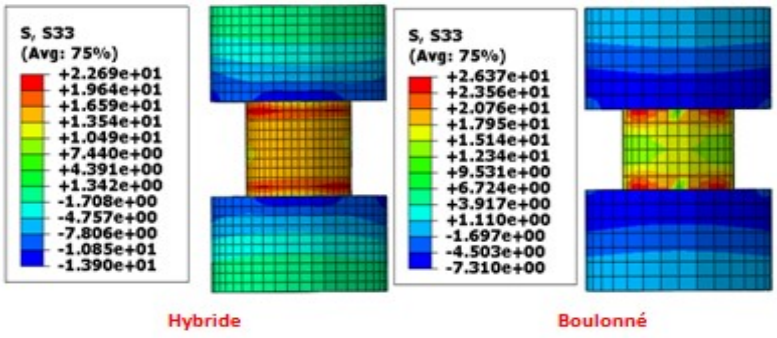


Figure III.30: Distribution des contraintes dans la région du boulon dans un assemblage boulonné et hybride ($C = 0.492Nm$)

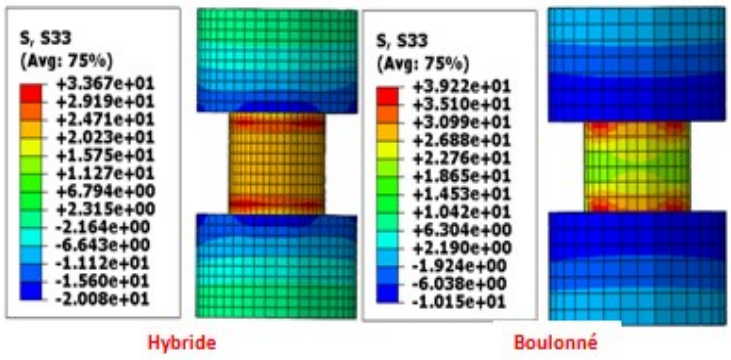


Figure III.31: Distribution des contraintes dans la région du boulon dans un assemblage boulonné et hybride ($C = 0.738Nm$).

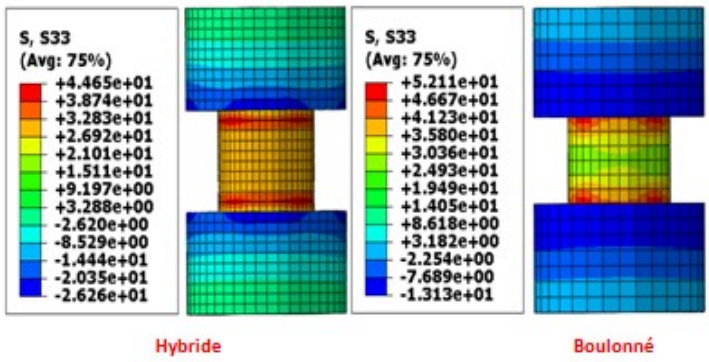


Figure III.32: Distribution des contraintes dans la région du boulon dans un assemblage boulonné et hybride ($C = 0.984\ Nm$).

Les figures III.33~38 illustrent la distribution des contraintes dans les deux plaques de l'assemblage boulonné et hybride. On remarque que :

a) Les contraintes sont presque constantes quel que soit la valeur du couple de serrage, elles sont de compression au fond d'entaille.

b) Les contraintes dans la plaque supérieure et inférieure sont très proches et la différence est très faible.

c) Les contraintes dans les substrats dans le cas d'un assemblage hybride sont nettement inférieures aux celles dans le cas des assemblages boulonnés. Ainsi, elles sont de $1.55\ MPa$ dans le cas d'un assemblage boulonné, alors que dans le cas d'un assemblage hybride elles sont de $4.54\ MPa$, donc un rapport de 2.92.

d) Le risque de rupture des substrats d'un assemblage boulonné est plus important que celui d'un assemblage hybride. Cette réduction prouve l'efficacité de la colle comme moyen de renforcement des zones fragiles.

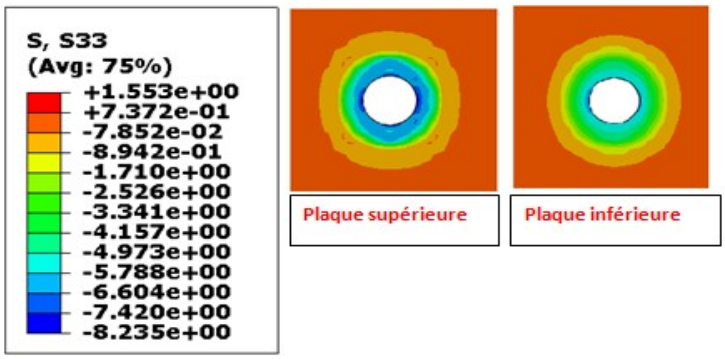


Figure III.33: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage hybride ($C\ = 0.492Nm$)

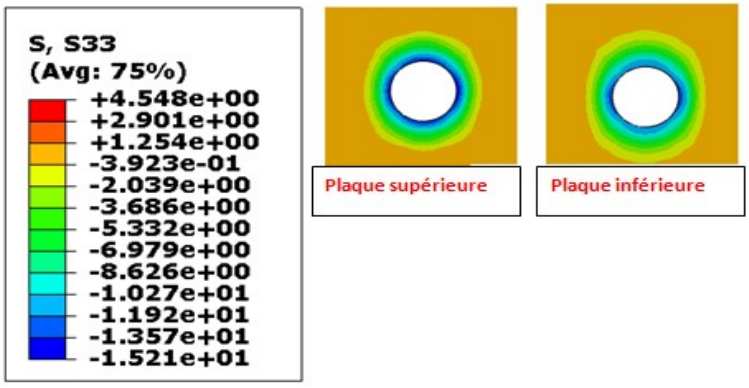


Figure III.34: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage boulonné ($C\ = 0.492Nm$)

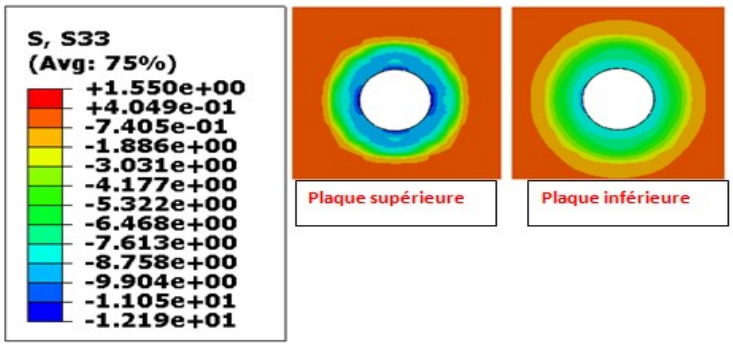


Figure III.35: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage hybride ($C = 0.738Nm$)

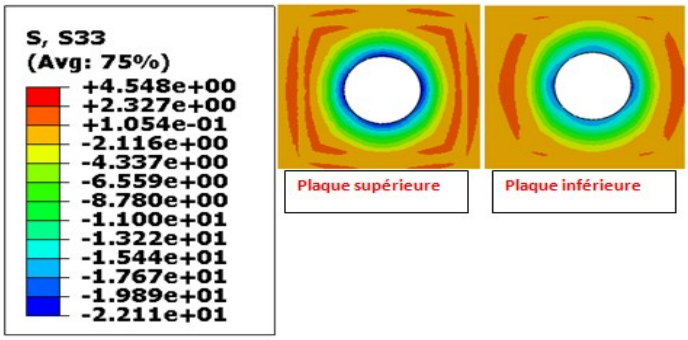


Figure III.36: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage boulonné ($C = 0.738Nm$)

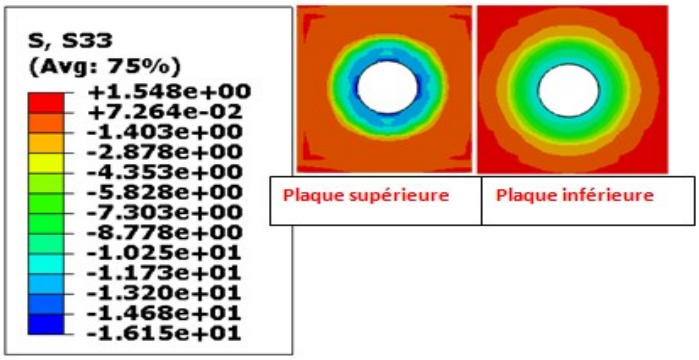


Figure III.37: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage hybride($C = 0.984\ Nm$)

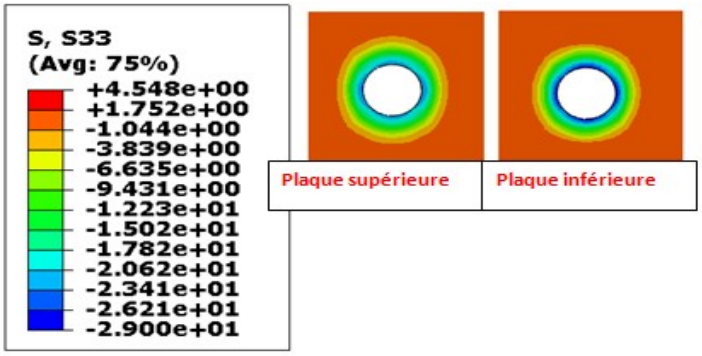


Figure III.38: Distribution des contraintes normales dans la plaque inférieure et supérieure d'un assemblage boulonné ($C = 0.984Nm$)

Nous nous intéressons dans cette partie d'étude à présenter une analyse comparative de la distribution des contraintes de Von Mises dans la colle de l'assemblage hybride, en utilisant des différents couples de serrage ($0.492, 0.738$ et $0.948Nm$).

Les figures III.39~41 présentent le contour des niveaux de contraintes de Von Mises dans l'adhésif pour les trois couples. L'analyse de ces figures montre que :

a) Les contraintes maximales sont localisées au fond de l'entaille et au bord, on peut aussi voir que les contraintes loin du fond d'entaille sont inférieures à celles du bord, dans le cas d'un couple de serrage élevé, cette différence est de l'ordre de 24%.
b) Les niveaux de contraintes sont très proches dans ces deux zones pour un couple inférieur à $0.948\ Nm$.
c) Les niveaux des contraintes dans l'adhésif pour un couple $C = 0.492Nm$ et $C = 0.738\ Nm$ sont très proches et la différence est très faible. Par contre, les contraintes dans l'adhésif pour un couple $C = 0.948\ Nm$ sont nettement supérieures.
d) L'augmentation du couple de serrage conduit à une augmentation des contraintes qui peuvent entraîné facilement un l'endommagement de l'adhésif. De ce fait, il est important d'optimiser le choix du couple de serrage pour assurer des faibles déformations afin d'éviter l'apparition des fissures dans la pièce.
e) Les contraintes dans l'adhésif sont symétriques de part et d'autre du fond de l'entaille, ce qui montre que l'absorption des contraintes par l'adhésif se fait à travers ses bords libres.

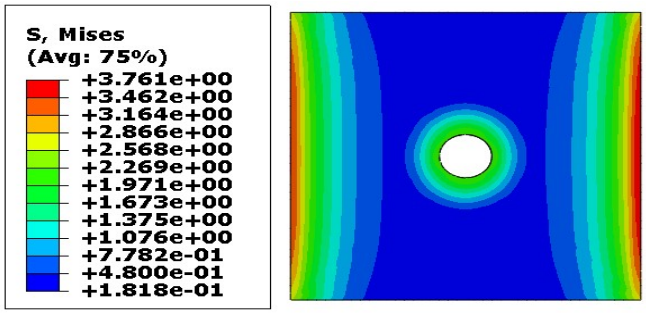


Figure III. 39 **:** Plans des profils des contraintes de Von Mises dans la colle de l'assemblage hybride ($C = 0.492Nm$)

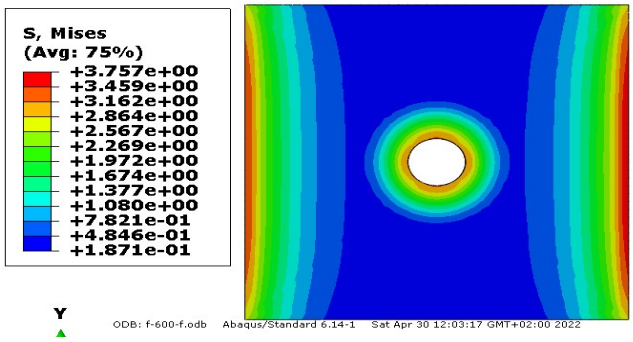


Figure III. 40 : Plans des profils des contraintes de Von Mises dans la colle de l'assemblage hybride ($C = 0.738\ Nm$)

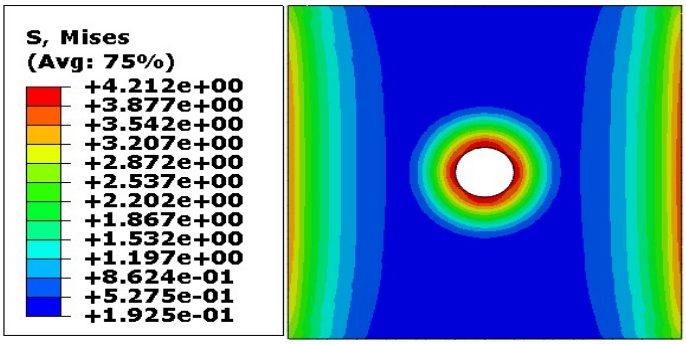


Figure III. 41 : Plans des profils des contraintes de Von Mises dans la colle de l'assemblage hybride ($C = 0.948\ Nm$)

III.4 2.1. Effet de la température sur les assemblages hybrides

Les joints collés devraient être soigneusement étudiés car il existe une gamme des limites supérieures de la température, selon le chargement appliqué. Ils ont une excellente résistance au cisaillement mais une mauvaise résistance aux forces de pelages, une faible tenue à la température, une dégradation par l'humidité et une faible mouillabilité de surface **[7].**

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'effet de la température sur l'état de contrainte de l'assemblage hybride.

Nous avons adopté là-dessus la modélisation précédente avec l'ajout du coefficient d'expansion thermique **[8]** afin se nous pouvoir constater l'effet de la temperature en chaque cas de figure **:**

- $\alpha = 1.17 * 10^{-5\circ}\, C^{-1}$ pour l'acier galvanisé.
- $\alpha = 7.3 * 10^{-5}\, \circ\, C^{-1}$ pour la bande adhesive.

En évitant l'injection de la conductivité thermique et la chaleur spécifique car nous voulons observer juste l'impacte du changement de la température incident sans passer au transfer de chaleur. Au niveau des conditions aux limites on va appliquer la temperature da chaque cas selon la méthode suivante à travers abaqus. Figure III. 42

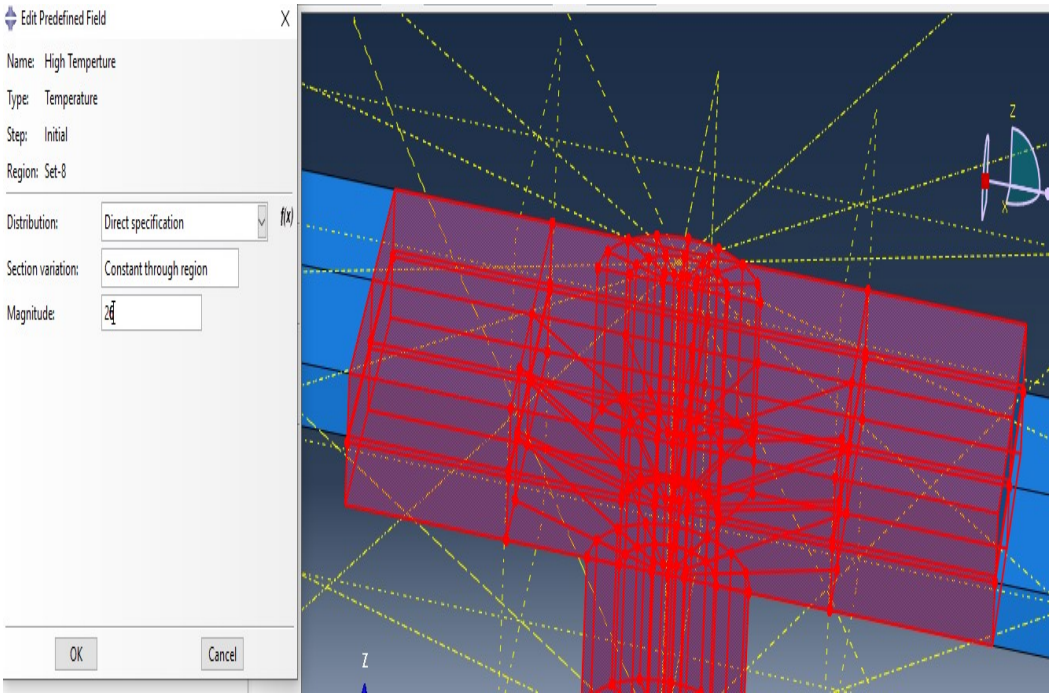


Figure III. 42 : Modélisation d'un assemblage hybride sous une température 26 .

Afin d'analyser l'effet de la température sur les assemblages hybrides, nous avons présenté sur les figures III.43~45, le contour des contraintes en fonction de la température.

L'analyse de ces figures montre que le niveau des contraintes est constant dans les substrats malgré l'augmentation de la température. Ceci peut engendrer le risque du décollement de l'assemblage hybride. Nous constatons que si la température de

fonctionnement est élevée, le chargement thermique statique engendre des contraintes provoquant ainsi la propagation de la fissure, indépendamment de la contrainte externe. Ceci confirme ce qui a été annoncé précédemment que la température modifiée les propriétés mécaniques des matériaux plastiques, l'augmentation de cette dernière diminue le module d'élasticité de la colle.

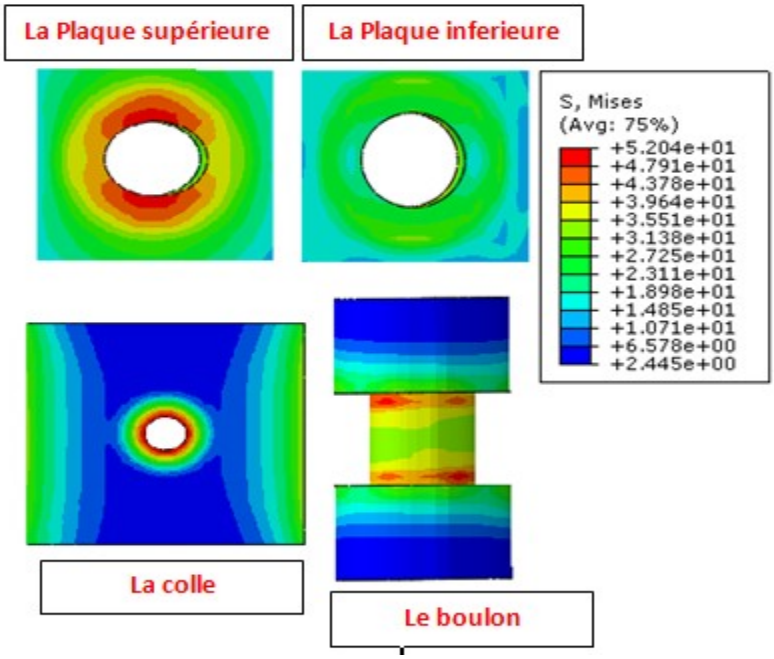


Figure III.43: L'assemblage hybride, avec la colle AB (à 26°C).

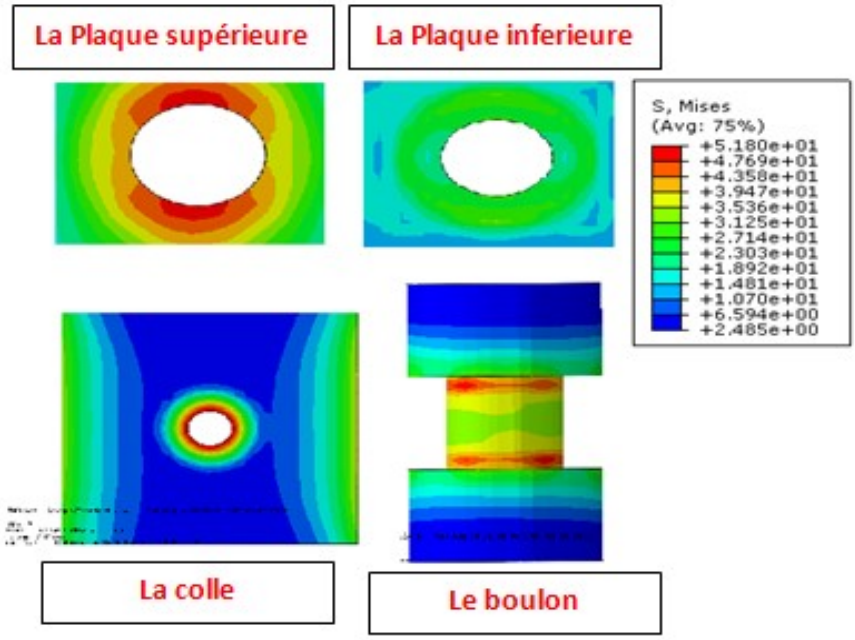


Figure III.44: L'assemblage hybride, avec la colle AB (à 40°C).

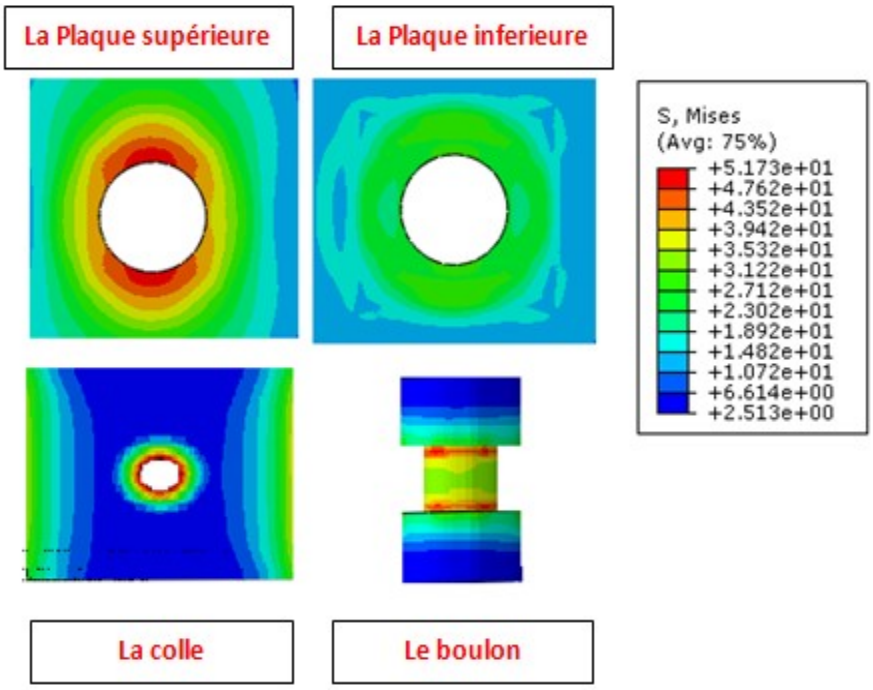


Figure III.45: L'assemblage hybride, avec la colle AB (à 60°C).

Au cours de la modélisation numérique des assemblages collés, boulonnés, et hybrides par la méthode des éléments finis, il sera nécessaire de prendre en considération la gestion de contact entre les surfaces selon le critère l'algorithme de la surface Maître-esclave et l'interaction entre les plaques et l'adhésif est une liaison mécanique parfaite, elle est déclarée selon l'option « Tie ». Le maillage doit être choisi en fonction des concertations de contraintes, un raffinement de maillage autour du bord de la colle en raison des gradients des contraintes et des déformations élevées à ces endroits. Cette analyse numérique nous a permis de mieux expliquer le mécanisme de propagation des contraintes à la fois au niveau de la colle et même la zone du boulon, et éventuellement le comportement hybride sera prédictible face aux effets extérieurs auxquelles il est exposé.

Référence bibliographiques

[1] **Kerati Swanpakpreak,** Study of adhesive bonded joint failure in composite-métal joining.13-15 .

[2] **Ezzine Mohamed Chams Eddine.** (2018). Endommagement et rupture des assemblages hybrides adhésif-rivets, These de doctorat à l'université de sidi bel abbes.

[3] Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.06.

[4] **Thong DANG-HOANG**, rupture et endommagement d'un assemblage boulonné : approche expérimentale et simulation numérique, thèse de doctorat, laboratoire de mécanique de Lille (CNRS UMR 8107), 29,79.

[5] **Eric. P,** (2006). Contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés) - application aux jonctions aéronautiques,.A12, A13.

[6] **OUELLET, M,** (2013). Conception axiomatique des joints hybrides à recouvrement simple en matériaux composites.

[7] **ALKATAN, F., ANDRIAMAMPIANINA, J., STÉPHAN, P., & GUILLOT, J.** (2013), Flexibility of hybrid load transfer assemblies: Influence of tightening pre-stress. A-erospace Science and Technology, 25(1), 84-92.

[8] **LA DILATATION THERMIQUE**. (2016) . LA DEFORMATION UNITAIRE SELON LA VARIATION DE TEMPERATURE. College Mérici .2.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail s'inscrit dans le cadre général de l'étude expérimentale et numérique du comportement mécanique global d'un assemblage boulonné, ainsi que de l'effet de l'environnement sur le comportement des assemblages hybrides collé et hybride (boulonné/collé) des tôles minces en alliage acier galvanisé du type H300LAD+Z.

La problématique des travaux présentée est basé sur l'étude de plusieurs configurations d'assemblage, en variant plusieurs paramètres afin d'améliorer les propriétés de résistances des joints. A cet effet, troisconfigurations d'assemblages ont été proposés :

- Assemblages collés
- Assemblages boulonnés
- Assemblages hybrides (boulonnés/collés)

L'étude expérimentale préliminaire s'avère nécessaire pour définir le couple de serrage idéale. et d'identifier l'impact de ce dernier sur les caractéristiques mécaniques des joints boulonnés.

Les résultats obtenus par l'étude expérimentale nous permettent de tirer les points suivants :

- La performance d'un assemblage boulonné est nettement améliorée par l'augmentation du couple de serrage, néanmoins, une optimisation est nécessaire en tenant compte d'autres paramètres.
- Il existe un couple de serrage optimale ($C_{opt} = 30\ Nm$)
- Le choix du couple de serrage dans un joint boulonné est un facteur très important, car un seul couple correct procure un assemblage fiable ; s'il aura trop faible couple, il y a un risque de desserrage, et aussi s'il y a trop fort couple il y aura risque de déformation des pièces à assembler ou de rupture de la vis.
- La tenue mécanique d'un assemblage avec la colle noire est nettement meilleure que celui de la colle AB.

- Lors du couplage des deux techniques collages et boulonnages, l'adhésif minimise les concentrations de contraintes au voisinage du trou du boulon.
- Un joint hybride (boulonné/collé) montre une résistance à la rupture plus élevée par rapport à un joint simple collé ou à un joint boulonné.
- Le couplage des deux techniques engendre une augmentation des contraintes de rupture maximale et des déplacements. L'augmentation de ces derniers améliore la performance de l'assemblage. Cela montre l'effet bénéfique du couplage des deux techniques (boulonnage/collage).
- La modification dans les paramètres d'environnement affecte la qualité du joint hybride.
- Le couple de serrage dans un joint hybride et différent à celui d'un joint boulonné.
- Une forte influence sur le comportement des joints hybrides pour des températures supérieures à 40°C, elle réduit notablement les caractéristiques mécaniques du joint hybride.
- La colle AB a une tenue limitée à la température, l'intervalle de température de travail est 25°C +35°C .

Bien que la présente étude fournisse de nouvelles informations précieuses sur l'assemblage boulonné, collé et hybride, l'analyse statique n'est pas suffisante pour caractériser complètement le comportement d'assemblage. Il est recommandé d'étudier la résistance à la propagation de ces joints. Cela permettrait de mieux comprendre les mécanismes exacts qui peuvent améliorer les propriétés de résistances de ces derniers.

La simulation numérique effectuée sur les configurations de l'assemblage nous permet de tirer les points suivants :

- Les contraintes sont élevées au niveau du bord ‘‘l'extrémité libre de la colle’’ et dans la plaque inférieure.
- La rupture du joint de colle s'initie aux points où les contraintes sont maximales.
- Les contraintes maximales sont de mêmes signes au bord, tandis qu'au centredu joint de colleles contraintes sont minimales ce qui prouve que la structure est équilibrée au tour du centre de la surface collée.

- Les contraintes maximales sont réparties des deux côtés de la tête du boulon au-dessus du corps du boulon ainsi qu'au bord des alésages des plaques, qui sont la cause principale des fissurations dans les assemblages boulonnés.
- Les contraintes dans le boulon et au voisinage du trou dans les plaques augmentent avec le couple de serrage.
- les contraintes maximales sont proportionnelles au couple de serrage dans un assemblage boulonné.
- Le couplage des deux techniques engendre une réduction des contraintes, Cette réduction prouve l'efficacité de la colle comme moyen de renforcement des zones fragiles.
- Le risque de rupture des substrats d'un assemblage boulonné est plus important que celui d'un assemblage hybride.
- Les joints collés devraient être soigneusement étudiés. Ils ont une excellente résistance au cisaillement mais une mauvaise résistance aux forces de pelages, une faible tenue à la température, une dégradation par l'humidité et une faible mouillabilité de surface.
- La température modifiée les propriétés mécaniques des matériaux plastiques, l'augmentation de cette dernière diminue le module d'élasticité de la colle, ce qui est en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Bien que la présente étude fournisse de nouvelles informations précieuses, l'analyse dynamique basée sur un comportement monotone n'est pas suffisante pour déterminer complètement les contraintes. Il est recommandé d'effectuer une analyse basée sur un comportement cyclique, cela permettrait de mieux définir les profils des contraintes et déformations.