Table of Contents

Remerciements iv

Sommaire v

Liste des figures x

Liste des tableaux xiii

Chapitre 1 : Introduction 1

1.1 Mise en contexte 1

1.2 Problématique 2

1.3 Approche proposée 3

Chapitre 2 : Revue de littérature 5

2.1 Les normes 5

2.2 Historiques de modélisation 6

2.2.1 Historique pour les joints collés 6

2.2.2 Historique pour les joints rivetés 7

2.2.3 Historique des joints hybrides 7

2.3 Préparation des échantillons 8

2.4 Les joints collés 8

2.4.1 Essais sur les échantillons 9

2.4.2 Paramètres géométriques et leurs effets sur le comportement et les propriétés des joints 10

2.4.3 Concentrations de contraintes et modes de rupture 14

2.5 Les joints boulonnés ou rivetés 17

2.5.1 Essais sur les échantillons 17

2.5.2. Paramètres géométriques et leurs effets sur le comportement et les propriétés des joints 18

2.5.3 Concentrations de contraintes et modes de rupture 21

2.6 Les joints hybrides 23

2.6.1. Paramètres géométriques et leurs effets sur le comportement et les propriétés des joints hybrides 23

2.6.2 Concentrations de contraintes et modes de rupture 23

2.7 Effets de la température et de l'humidité 26

2.8 Le modèle éléments finis 27

2.8.1 Propriétés des matériaux 27

2.8.3 Degrés de liberté du modèle 28

2.8.4 Choix des éléments 28

2.8.5 Application de la force de serrage 29

2.8.6 Le maillage 30

Chapitre 3 : Création des modèles éléments finis 31

3.1 COSMOS/M 31

3.2 Matériaux, choix d'éléments et généralité 32

3.3 Modèles à géométrie variable 39

3.4 Maillage du modèle 43

3.4.1 Maillage du composite et de la colle 43

3.4.2 Maillage du rivet et de la rondelle 46

3.4.3 Éléments de contact 48

3.5 Conditions aux rives et degrés de liberté 49

3.6 Résultats 52

3.6.1 Résultats du modèle collé 52

3.6.2 Résultats du modèle riveté 55

3.6.3 Résultats du modèle hybride 57

Chapitre 4 : Essais expérimentaux 62

4.1 Définition des échantillons à fabriquer 62

4.2 Choix des matériaux 65

4.3 Montage sur la machine de traction 66

4.4 Résultats des essais 69

4.4.1 Échantillons collés 69

4.4.2 Échantillons rivetés 71

4.4.3 Échantillons hybrides 74

Chapitre 5 : Comparaison du modèle et des essais expérimentaux et application pratique 79

5.1 Comparaison des résultats collés, rivetés et hybrides 79

5.4 Application pour une plaque 83

5.4.1 Géométrie de la plaque, matériaux et sollicitation 83

5.4.2 Méthodologie 84

5.4.3 Résultats pour une colle rigide 86

5.4.4 Résultat pour une colle flexible 89

Conclusion 93

Travaux futurs 96

Bibliographie 97

ANNEXE I 101

ANNEXE II 106

Liste des figures

Figure 1 : Paramètre d'un joint hybride à recouvrement simple [1]....4
Figure 2 : Dommages causés par un perçage dans un laminé [33]. 8
Figure 3 : Échantillon composite/aluminium collé [36] 9
Figure 4 : Échantillon composite/composite collé. 9
Figure 5 : Résistance en cisaillement en fonction du type de joint [37]. 11
Figure 6 : Résistance du joint en fonction de la longueur de recouvrement [36]. 12
Figure 7 : Résistance du joint en fonction de la pression de collage [36]....13
Figure 8 : Résistance du joint en fonction de l'épaisseur de l'adhérent [36]. 13
Figure 9 : Flexion dans l'échantillon [10, 37]. 14
Figure 10 : Contraintes dans le recouvrement d'un joint collé [2]. 15
Figure 11 : Points de concentrations de contraintes avec débordement de colle [13]. 15
Figure 12 : Modes de rupture d'un joint collé [33]. 16
Figure 13 : Échantillons à recouvrement simple boulonné [24]. 17
Figure 14 : 5 étapes de la courbe de traction d'un joint boulonné [21]. 18
Figure 15 : Effet du jeu dans un joint boulonné [39]. 19
Figure 16 : Rotation du boulon causé par un jeu dans un joint boulonné [33]. 19
Figure 17 : Effet du coefficient de frottement sur la courbe de traction [20]. 20
Figure 18 : Effet de la force de serrage sur la courbe de traction [20]....21
Figure 19 : Mode de rupture d'un joint fixé mécaniquement [33]. 22
Figure 20 : Échantillon hybride [48]. 23
Figure 21 : Graphique de la force appliquée en fonction du déplacement pour un joint hybride à colle fragile [26]. 25
Figure 22 : Graphique de la force appliquée en fonction du déplacement pour un joint hybride à colle flexible [27]. 25
Figure 23 : Résistances de différents joints collés pour différentes conditions environnementales [50, 51]. 27
Figure 24 : Échantillon contraint aux extrémités pour simuler l'essai de cisaillement [32]. 28
Figure 25 : Contraintes dues au serrage du boulon [45]. 30

Figure 26 : Maillage d'un échantillon [32]. 30
Figure 27 : Modules de COSMOS/M. 32
Figure 28: Empilement et orientation des plis. 36
Figure 29 : Modèle géométrique d'un joint collé à créer dans COSMOS/M. 40
Figure 30 : Position des points pour le modèle collé. 41
Figure 31 : Échantillon riveté à modéliser dans COSMOS/M. 41
Figure 32 : Numérotation des points pour bâtir le modèle. 42
Figure 33 : Échantillon hybride à modéliser dans COSMOS/M. 42
Figure 34 : Numérotation des points pour bâtir le modèle. 43
Figure 35 : Graphique montrant l'étude de convergence 44
Figure 36 : Maillage du modèle collé. 45
Figure 37 : Maillage des adhérents. 45
Figure 38 : Maillage de l'adhérent près du trou. 46
Figure 39 : Maillage des adhérents et de l'adhésif. 46
Figure 40 : Maillage du rivet et de la rondelle pour le modèle riveté. 47
Figure 41 : Maillage du rivet et de la rondelle pour le modèle hybride. 47
Figure 42 : Éléments de contact pour un joint riveté [45]. 48
Figure 43 : Éléments de contact de l'échantillon hybride [45]. 49
Figure 44 : Modèle contenant les surfaces bloquées et la force appliquée. 50
Figure 45 : Modèle contenant les surfaces bloquées et les forces appliquées. 51
Figure 46 : Modèle hybride contenant les surfaces bloquées et les forces appliquées. ... 52
Figure 47 : Déplacements des nœuds en x du modèle collé. 53
Figure 48 : Graphique de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon collé. 54
Figure 49 : Position de l'élément le plus sollicité dans la colle. 54
Figure 50 : Déplacements des nœuds en x du modèle riveté. 55
Figure 51 : Graphique de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon riveté. 56
Figure 52 : Position de l'élément le plus sollicité dans le composite. 56
Figure 53 : Position de l'élément le plus sollicité dans le rivet. 57
Figure 54 : Déplacements en x des nœuds de l'échantillon hybride. 58
Figure 55 : Courbe de traction pour l'échantillon hybride. 59

Figure 56 : Position de l'élément le plus sollicité dans la colle.....59
Figure 57 : Position de l'élément le plus sollicité dans le composite.....59
Figure 58 : Position de l'élément le plus sollicité dans le rivet.....60
Figure 59 : Contraintes de cisaillement d'un joint hybride.....61
Figure 60 : Modèle dimensionnel.....63
Figure 61 : échantillon riveté.....64
Figure 62 : Échantillon collé.....65
Figure 63 : Modèle avec différents matériaux.....66
Figure 64 : Illustration du banc d'essai pour les essais de traction.....66
Figure 65 : Positionnement de l'extensomètre.....68
Figure 66 : Échantillons collés après rupture.....70
Figure 67 : Courbe typique d'un essaie collé.....70
Figure 68 : Courbe de traction des échantillons collés.....71
Figure 69 : Échantillons rivetés après rupture.....72
Figure 70 : Courbe typique pour un échantillon riveté.....73
Figure 71 : Courbe de traction des échantillons rivetés.....73
Figure 72 : Échantillon hybride au moment où les fissures apparaissent.....75
Figure 73 : Échantillon hybride au moment où les fissures apparaissent.....76
Figure 74 : Courbe typique d'un échantillon hybride.....77
Figure 75 : Courbe de traction des échantillons hybrides.....77
Figure 76 : Graphique de comparaison des résultats pour le joint collé.....80
Figure 77 : Graphique montrant la comparaison pour l'échantillons riveté.....80
Figure 78 : Graphique de la comparaison des résultats pour le joint hybride.....81
Figure 79 : Modélisation de la plaque à optimiser.....84
Figure 80 : Graphique du pourcentage des contraintes atteint par rapport à la limite élastique du rivet et la résistance de la colle (adhésif rigide). a) échelle 0-100% et b) échelle 85-100%.....88
Figure 81 : Graphique des contraintes en fonction de la largeur exprimées par rapport à leur limite à la rupture (adhésif flexible).....91

Liste des tableaux

Tableau 1 : Dimensions normalisées d'un joint collé. 10
Tableau 2 : Dimensions normalisées d'un joint boulonné ou riveté. 19
Tableau 3: Propriétés mécaniques de composites à fibres de graphite. 33
Tableau 4: Propriétés mécaniques par pli du composite à fibres de graphite. 34
Tableau 5: Propriétés du rivet en acier inoxydable. 35
Tableau 6: Propriétés du rivet en aluminium. 35
Tableau 7: Propriétés de l'aluminium. 36
Tableau 8 : Listes de propriétés des matériaux dans COSMOS/M. 38
Tableau 9 : Paramètres dimensionnels d'un échantillon riveté. 63
Tableau 10 : Paramètres dimensionnels d'un joint collé. 64
Tableau 11 : Configuration des spécimens pour les essais de traction. 67
Tableau 12 : Dimensions des coupons collés. 69
Tableau 13 : Mesures des coupons rivetés. 72
Tableau 14 : Mesures des coupons hybrides. 74
Tableau 15 : Écarts entre les résultats. 82
Tableau 16 : Sources d'erreur pour chaque type de joint 83
Tableau 17 : Contraintes de cisaillement dans la colle et dans le rivet pour différentes largeurs (adhésif rigide). 87
Tableau 18 : Contraintes de cisaillement dans la colle et dans le rivet pour différentes largeurs (adhésif flexible). 90
Tableau 19 : Guidelines for mechanical fastened joints. 102
Tableau 20 : Guidelines for adhesive joints. 104

Rapport-Gratuit.com

Chapitre 1 : Introduction

1.1 Mise en contexte

De nos jours, l'industrie adopte de plus en plus les matériaux composites lorsque le domaine s'y prête bien. Un bon exemple est l'industrie aéronautique. La quête du plus faible poids, à faible coût, sans perdre de qualité et de propriétés mécaniques est à l'origine de ces développements. Au Québec, les entreprises dominantes dans ce secteur sont Bombardier et Pratt & Whitney. Ces entreprises ont beaucoup de sous-traitants, dont Delastek Inc., située à Grand-Mère en Mauricie et œuvrant dans le domaine des composites depuis 1990.

Pour certains projets, il est nécessaire d'assembler des pièces en composites entre elles ou à une pièce en aluminium. Les joints ainsi obtenus seront en général soit collés, soit rivetés ou les deux, à la fois rivetés et collés. Ces assemblages sont soumis à des charges variant selon la fonction de la pièce. Ces charges étant notées, Delastek doit concevoir les joints pour éviter la rupture. Dans ce cas-ci, la norme demande à ce que les joints soient hybrides, donc qu'ils soient collés et rivetés.

L'effet combiné de la colle et des rivets est difficile à modéliser. Cela laisse place à beaucoup de progrès dans ce domaine. De nombreux auteurs tentent de créer le modèle idéal pour prédire la contrainte de rupture d'un joint donné. Cette difficulté fait en sorte que les concepteurs augmentent le niveau de sécurité pour contrer l'incertitude face à la limite à la rupture réelle de la pièce. Chez Bombardier, une façon de faire consiste à ajouter des rivets au joint collé afin d'augmenter le niveau de sécurité au cas où les rivets céderaient prématurément.

Delastek Inc. (ci-après "Delastek") souhaite donc revoir son modèle d'assemblage collé et riveté afin de réduire le nombre de rivets présents dans un joint à recouvrement simple. Ce type d'assemblage est une pratique courante et ce depuis des années dans le domaine aéronautique. Ce projet a débuté suite à une entente de Delastek avec Bombardier pour la fabrication de pièces allant dans la cabine de pilotage des avions C-Series. Les pièces sont fabriquées et assemblées manuellement. La colle est un mélange de deux parties (résine et catalyseur) et est appliquée à l'aide d'un pinceau. Avant que la colle sèche, les rivets sont posés au pistolet riveteur.

1.2 Problématique

Le modèle analytique actuel de calcul d'un joint chez Delastek ne tient pas compte de la présence de la colle, mais seulement des rivets. Cela entraîne deux questions importantes. Comment peut-on modéliser la colle dans un assemblage composite-composite hybride (collé et riveté) afin de permettre au modèle de prévoir l'influence de la colle sur le joint? Serait-il possible éventuellement de réduire le nombre de rivets en ayant une meilleure compréhension de l'apport des rivets et de la colle dans le joint ? Tout en gardant les modèles simples (comportement linéaire), nous tenterons d'apporter à ces questions des éléments de réponse utiles aux ingénieurs en charge de concevoir l'assemblage des pièces.

Il s'agit d'une recherche de type appliquée en raison de la nécessité de fabriquer des échantillons pour faire les essais expérimentaux et obtenir des résultats devant s'appliquer éventuellement à la conception de pièces réelles. L'étude s'inspire des travaux réalisés à date sur la modélisation et la caractérisation des joints composites, et les essais expérimentaux permettront de valider ces travaux. Le client partenaire pourra bénéficier des résultats de cette recherche. De plus, il s'agit d'une recherche quantitative. Tous les paramètres initiaux sont contrôlables et les résultats des essais sont mesurables. Les résultats seront obtenus expérimentalement et analytiquement et seront comparés pour valider les modèles d'éléments finis de chaque type de joint (collé, riveté et hybride).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.3 Approche proposée

Pour répondre aux questions soulevées dans la problématique, il faut d'abord bien comprendre comment modéliser la colle dans un assemblage composite-composite à recouvrement simple. Il faut ensuite créer un modèle de comportement paramétrique, les éléments finis se prêtant bien à ce genre d'exercice, tenant compte des rivets et de la colle et ce, dans le but de faire varier les paramètres importants afin d'évaluer leur effet sur la rigidité et la résistance à la rupture du joint. Pour valider le modèle, s'en suit une comparaison des résultats du modèle aux courbes expérimentales obtenues sur des joints rivetés, collés et à la fois rivetés et collés (hybrides). Les essais expérimentaux servent aussi à comprendre le comportement d'un joint dans des conditions de sollicitation. Nous considérerons ici que la sollicitation entraînera du cisaillement simple dans la colle et dans le centre du rivet. Les sollicitations hors-plan et en flexion sont donc exclues de l'analyse pour simplifier les travaux, qui seraient autrement d'une complexité dépassant largement le cadre de cette étude. Cette simplification se justifie dans le cas de pièces flexibles minces soumises à des conditions de chargement pour lesquelles les charges en flexion et hors-plan pourraient être considérées négligeables par rapport au cisaillement direct. Cela suppose donc une analyse préalable des conditions de chargement permettant de justifier le cisaillement comme chargement prépondérant. Ceci étant dit et en tenant compte de ces limites de l'étude, l'objectif ultime est d'optimiser un joint composite hybride soumis à une sollicitation de cisaillement simple dans le but de maintenir ou d'augmenter sa résistance à la rupture tout en diminuant le nombre de rivets dans l'assemblage. Un nombre de rivets moindre se traduisant en une diminution des coûts et du temps de production et ce, sans diminuer la qualité du produit pour le client.

Les variables dépendantes sont les résultats qu'on désire connaître. Une première variable est le coût de fabrication d'un échantillon (C) en dollars puisqu'on cherche à minimiser le coût. Une deuxième variable est la résistance (Sut) en mégapascals (MPa) de l'assemblage puisqu'on cherche à avoir la meilleure résistance possible. La dernière variable est la rigidité du joint, puisqu'on cherche à maintenir la rigidité des joints réels. Les variables indépendantes correspondent aux paramètres qu'on fait varier. Ceux-ci ont

un effet direct sur les variables dépendantes. Les variables indépendantes sont l'épaisseur de la colle (t_a) en millimètres (mm), le module d'élasticité de la colle (E_c) en mégapascals (MPa), la rigidité moyenne des adhérents en composite (Q) en mégapascals (MPa), la largeur du joint (w) en millimètres (mm), la longueur de recouvrement (L) en millimètres (mm), l'épaisseur des adhérents (t) en millimètres (mm) et le nombre de rivets (N). Ces variables sont affichées à la **Figure 1**.

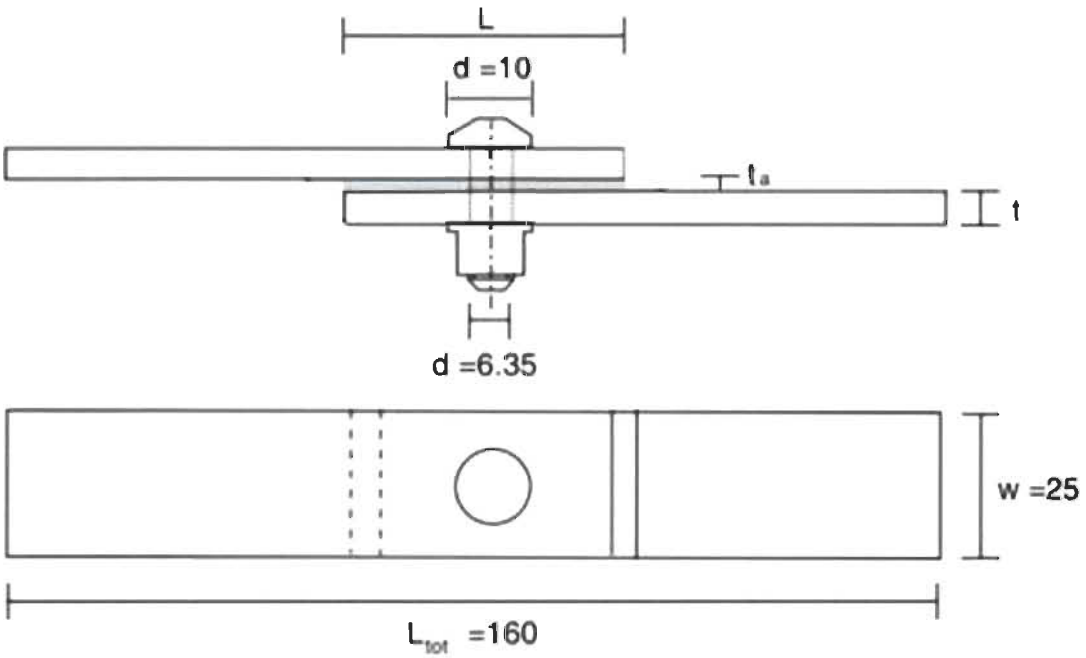


Figure 1 : Paramètre d'un joint hybride à recouvrement simple [1].

Une hypothèse statistique prend en considération les variables dépendantes et indépendantes pour créer des relations entre les deux. Il existe une relation entre les propriétés des matériaux en présence, les paramètres dimensionnels du joint et la résistance en traction de l'assemblage. Il y a une relation directe entre le temps d'assemblage, le nombre de rivets et les coûts de fabrication d'un joint. Il existe un lien entre le nombre de rivets et la répartition des contraintes dans l'assemblage. Il existe une relation entre la rigidité de la colle et l'efficacité du joint hybride. Certaines de ces relations seront abordées dans le cadre de cette étude.

Chapitre 2 : Revue de littérature

Dans ce chapitre, la revue de littérature sera consacrée aux normes d'assemblage riveté et collé, aux joints collés, aux joints rivetés (ou boulonnés), aux joints hydrides, aux méthodes expérimentales et à la modélisation par éléments finis.

2.1 Les normes

Il y a plusieurs normes utilisées dans ce type d'expérimentation. Elles permettent la reproductibilité des assemblages entre autres afin de pouvoir comparer les résultats entre eux puisque l'échantillon de base ainsi que les méthodes utilisées restent les mêmes.

ASTM D3165-07 est la norme la plus importante [2]. Il s'agit du standard d'essai pour déterminer la résistance d'un joint composite collé à recouvrement simple soumis à une tension. Cette norme stipule que la préparation de la surface collée affecte la résistance en cisaillement de la colle. Il s'agit d'une façon de contrôler la qualité d'un joint collé. Pour ce faire, les essais destructifs sont utilisés.

ASTM D4896 est la norme utilisée pour les essais réalisés sur les échantillons à recouvrement simple collés. Les essais les plus courants permettent de trouver la résistance en cisaillement d'un joint de colle lorsque les adhérents sont minces.

ASTM D1002 est la norme utilisée pour trouver la résistance en cisaillement d'un joint à recouvrement simple collé dont les adhérents sont en métal. La norme contrôle les effets de la préparation de surface et les facteurs environnementaux.

ASTM D5656 est la norme utilisée pour trouver la résistance en cisaillement d'un joint à recouvrement simple collé dont les adhérents sont en métal et sont épais.

ASTM D5961 est la norme pour évaluer l'endommagement progressif par matage d'un échantillon composite. Il est important de bien comprendre comment progresse l'endommagement puisque ce comportement doit être modélisé par éléments finis pour obtenir le comportement non-linéaire comme dans la pratique.

2.2 Historiques de modélisation

2.2.1 Historique pour les joints collés

Les premiers essais sur le sujet ont été réalisés par O. Volkersen en 1938 [3] et par M. Goland et E. Reissner en 1944 [4]. Ces articles ont permis d'avoir une première définition d'une problématique en ingénierie qui est encore présente aujourd'hui. C'est à partir de ces premiers modèles que, dès les années 70, d'autres auteurs ont emboîté le pas.

En 1973, Hart-Smith reprend les travaux précédents sur les joints collés et développe les joints à recouvrement simple collés [5]. En 1974, le même auteur reprend ses travaux pour les appliquer aux adhérents en composite [6].

Les années 90 marquent l'introduction du modèle non-linéaire dans les joints collés. En 1992, Crocombe et Bigwood introduisent un modèle élasto-plastique pour les adhérents [7]. En 1994, Oplinger a repris le travail fait pendant les années 70 dans le but de découpler les phénomènes liés à l'adhésif et ceux liés aux adhérents [8]. De plus, en 1995, Tsai et Morton ont comparé des essais expérimentaux aux modèles non-linéaires [9].

Dès la fin des années 90, ce sont les modèles par éléments finis qui prennent la place dans les travaux. En 1999, Li développe un modèle éléments finis permettant de prédire la distribution des contraintes dans un joint à recouvrement simple [10]. En 2001, Dean développe le modèle éléments finis pour l'appliquer à une géométrie collée (pièce quelconque) [11].

Plus récemment, les auteurs tentent d'améliorer les modèles éléments finis et numériques dans le but de s'approcher des courbes expérimentales. Pour se faire, les auteurs passent d'un modèle 2-D à un modèle 3-D avec des éléments qui simulent la non-linéarité géométrique et des matériaux, tel que montré par Diaz, Asgari Mehrabadi et Stoumbos [2, 12, 13]. Une autre approche avec les modèles numériques considère les comportements non-linéaires de la colle et des adhérents, tel que développés par Langella [14].

2.2.2 Historique pour les joints rivetés

Différents modèles ont été réalisés pour les fixations mécaniques. Ekh et Schön ont développé un modèle 1-D avec des éléments structurels dans lequel il est possible d'ajouter les effets du serrage, du frottement et du jeu entre le rivet et le trou [15]. D'autres auteurs ont préféré l'approche 2-D [16, 17]. Cette modélisation est rapide et donne une certaine précision, mais ne permet pas de connaître le comportement complet du joint. Pour modéliser les concentrations de contraintes, le serrage et l'endommagement progressif des matériaux, il faut un modèle 3-D.

En 1998, Ireman développe un modèle 3-D pour les joints à recouvrement simple boulonnés [18]. Le modèle tient compte de nombreux paramètres dont la force de serrage et concorde bien avec l'expérimentation. Pour améliorer ce modèle, l'ajout d'un coefficient de frottement entre les adhérents augmente la force nécessaire pour déformer le joint [19-21]. D'autres auteurs ont modélisé le jeu entre le diamètre du boulon et le diamètre du trou ainsi que l'effet de rotation du boulon lorsque l'échantillon est sous tension [22-25]. Finalement, d'autres auteurs ont voulu modéliser l'endommagement progressif d'un composite une fois que le boulon est en contact avec l'adhérent [19, 25]. La combinaison de tous ces paramètres permet d'obtenir un modèle s'approchant de plus en plus des résultats d'essais expérimentaux.

2.2.3 Historique des joints hybrides

Les deux méthodes des sections précédentes ont été combinées pour améliorer la résistance et l'efficacité d'un joint. Depuis 2005, des auteurs tentent de montrer

l'avantage des joints hybrides par rapport aux deux types précédents [26, 27]. Par ailleurs, certains auteurs développent des modèles éléments finis plus fiables pour prédire la résistance de l'assemblage [1, 28-31]. Pour optimiser ce type de joint, Hoang-Ngoc et Paroissien choisissent d'étudier l'effet de la flexibilité de la colle sur le transfert de charge dans la colle et dans les boulons [32].

2.3 Préparation des échantillons

Avant de coller, il faut préparer les adhérents. Les principales étapes sont le sablage des surfaces collées et le nettoyage à l'acétone [2, 29, 33-35]. Les étapes pour créer un joint collé efficace sont décrites en annexe I [33]. La principale étape de préparation d'un assemblage riveté ou boulonné consiste à percer les matériaux sans endommager l'aluminium et sans induire de délaminage au composite, tel que montré à la **Figure 2** [33]. Le guide complet pour réaliser un joint boulonné ou riveté de qualité est disponible en annexe II [33]. Pour les échantillons hybrides, il faut combiner les étapes des deux méthodes précédentes.

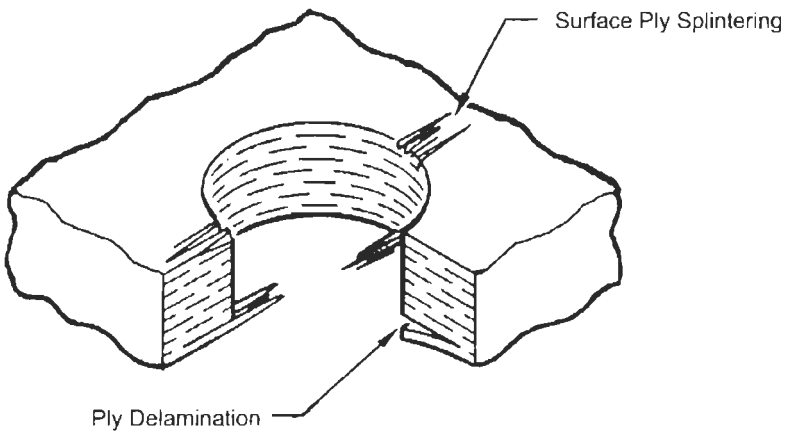


Figure 2 : Dommages causés par un perçage dans un laminé [33].

2.4 Les joints collés

Un joint collé à recouvrement simple est fabriqué à l'aide de deux adhérents (pièces composites ou pièces aluminium) assemblés par un adhésif. Les deux cas étudiés

sont les joints composite/aluminium (**Figure 3**) et les joints composite/composite (**Figure 4**).

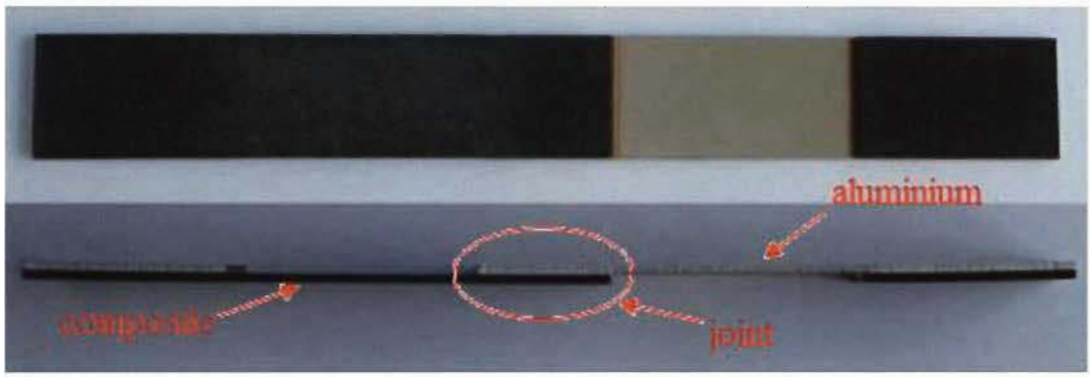


Figure 3 : Échantillon composite/aluminium collé [36]

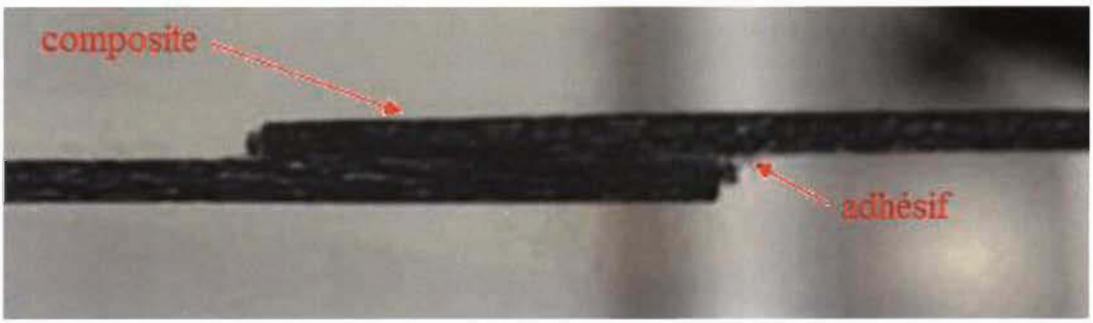


Figure 4 : Échantillon composite/composite collé.

2.4.1 Essais sur les échantillons

L'échantillon est placé sous tension et on cherche à obtenir la résistance en cisaillement de la colle. Vu le nombre d'étapes pour réaliser un bon joint collé, les sources d'erreur sont nombreuses. Il faut donc de la reproductibilité dans la fabrication des échantillons. De plus et en général, la résistance expérimentale de la colle est plus faible que la résistance théorique [33]. Les essais permettent donc de déterminer la résistance la plus précise possible de l'assemblage à l'étude.

2.4.2 Paramètres géométriques et leurs effets sur le comportement et les propriétés des joints

Selon les normes, les dimensions sont celles qu'on voit dans le **Tableau 1** (**Figure 1**) [2, 10, 12-14, 34-37] :

Tableau 1 : Dimensions normalisées d'un joint collé.

Longueur de recouvrement L, po (mm)	1 (25,4)
Épaisseur d'adhérent t, po (mm)	~0,1968-0,2362 (5-6)
Épaisseur d'adhésif t_a, po (mm)	~0,008-0,02 (0,2-0,5)
Longueur d'adhérent L_{tot}, po (mm)	~3,94 (100)
Largeur du joint w, po (mm)	1 (25,4)
Angle de débordement du joint de colle α	45°

Plusieurs paramètres affectent le comportement d'un joint collé, notamment le type de joint, la longueur de recouvrement, la vitesse de chargement, la pression de collage et l'épaisseur des adhérents. Pour le type de joint, il y a trois possibilités d'assemblage, soit aluminium/aluminium, composite/composite et composite/aluminium. Selon Rudawska [37] et tel que montré à la **Figure 5**, le meilleur joint collé est 100% en composite (item 2 en bleu) et le pire est la combinaison composite/aluminium (item 3 en rose). De plus, la résistance en cisaillement est meilleure pour un composite unidirectionnel comparativement aux composites faits de plusieurs matériaux avec différentes orientations des plis [36].

Rapport-Gratuit.com

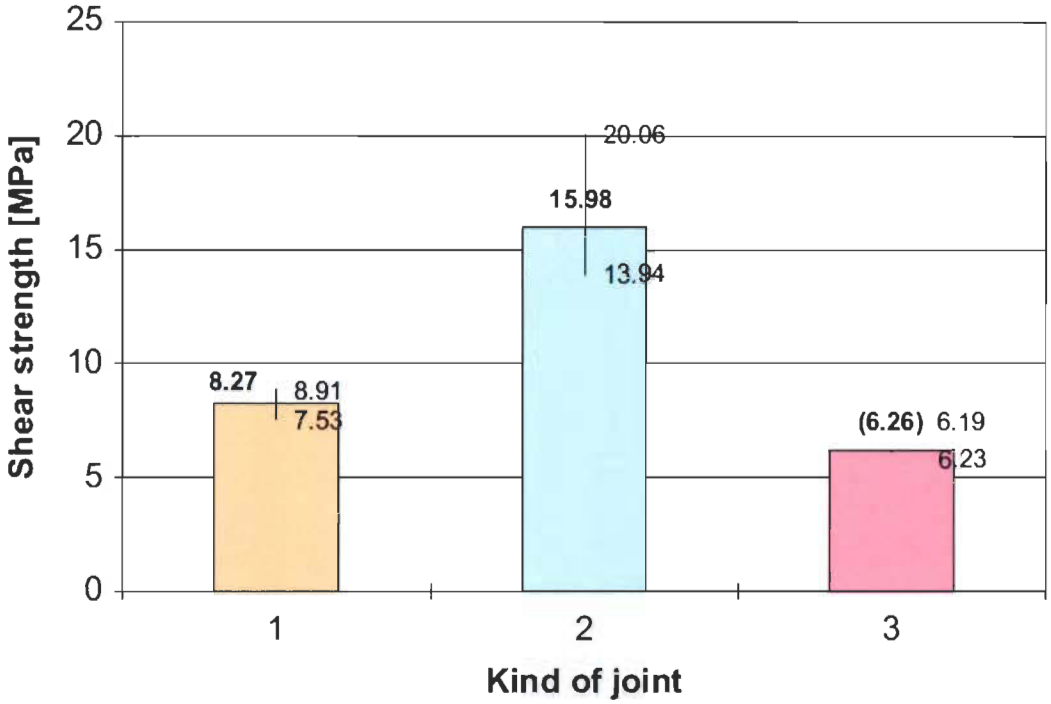


Figure 5 : Résistance en cisaillement en fonction du type de joint [37].

La suite de l'analyse considère uniquement le joint composite-aluminium. Pour la longueur de recouvrement, il semble que, lorsque celle-ci augmente, la résistance diminue, mais la force de rupture augmente [2]. À partir d'une longueur de recouvrement de 30 mm, la résistance demeure à peu près stable, tel que montré à la **Figure 6**. L'effet de la force est plus important aux extrémités de la longueur de recouvrement qu'en son centre. L'effet des extrémités du recouvrement demeure le même puisqu'on n'augmente pas la largeur. Donc, plus la longueur de recouvrement augmente, plus l'augmentation de la force diminue [36]. De plus, en augmentant la longueur de recouvrement, l'aire de la surface collé augmente plus rapidement que la force de rupture, de telle sorte que la contrainte moyenne (résistance au cisaillement) diminue pendant que la force de rupture augmente.

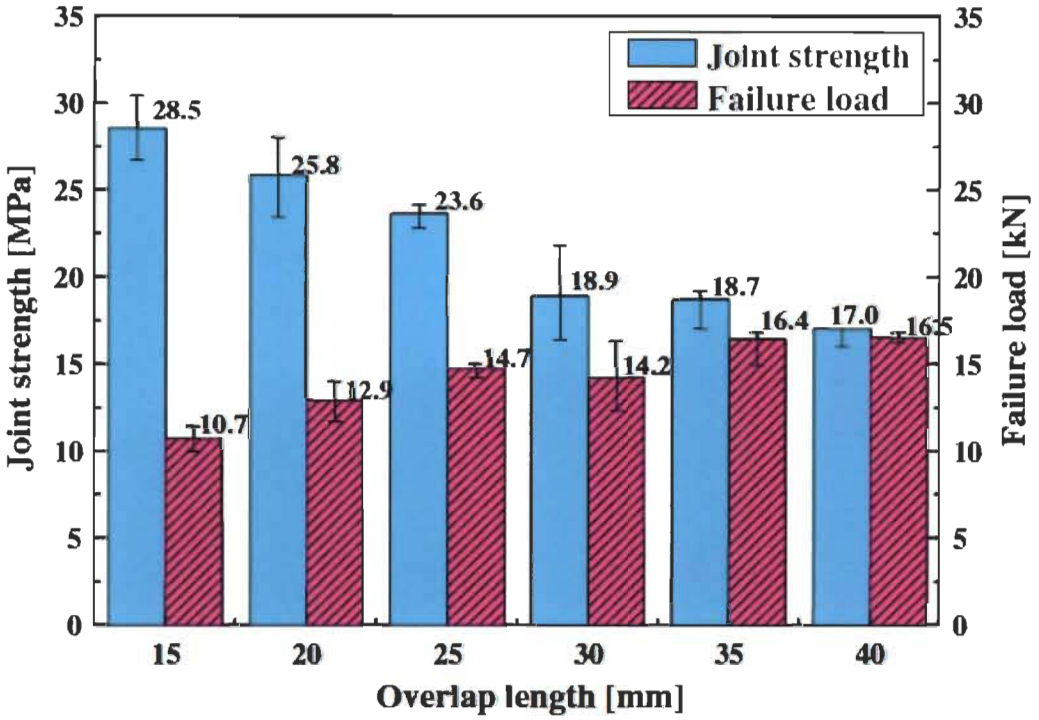


Figure 6 : Résistance du joint en fonction de la longueur de recouvrement [36].

Pour la vitesse de chargement en tension, la résistance diminue avec la vitesse de chargement. Cependant, plus on augmente la vitesse, moins la diminution de la résistance est importante [36].

Pour la pression de collage, Seong observe que la résistance du joint augmente avec celle-ci [36]. De plus, l'auteur spécifie qu'à partir de 4 atmosphères, l'augmentation de la résistance devient de moins en moins importante, tel que montré à la **Figure 7**.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

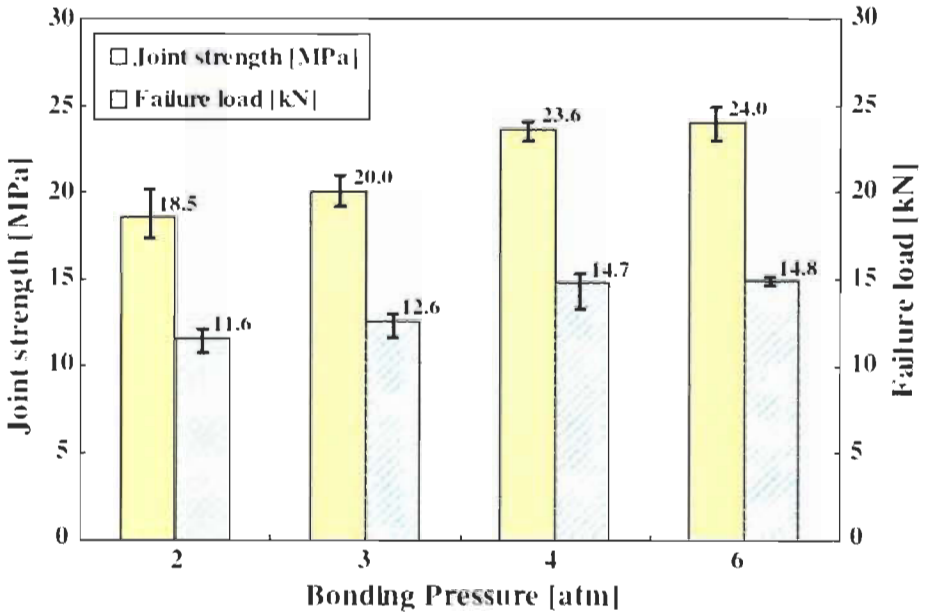


Figure 7 : Résistance du joint en fonction de la pression de collage [36].

Finalement et toujours selon Seong, la résistance augmente avec l'épaisseur de l'adhérent et l'écart s'accentue lorsque la longueur de recouvrement augmente, tel que montré à la **Figure 8** [36].

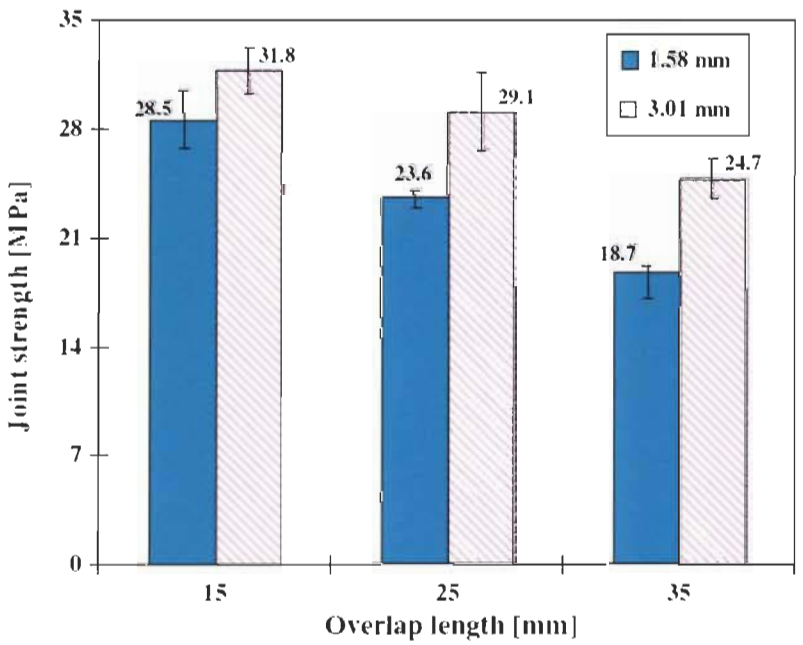


Figure 8 : Résistance du joint en fonction de l'épaisseur de l'adhérent [36].

2.4.3 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 [33] (**Figure 9**). Cette contrainte diminue lorsque la longueur de recouvrement et l'épaisseur de l'adhésif sont faibles, lorsque le module de l'adhésif augmente et lorsque l'adhérent est épais et rigide [10, 12, 14, 33, 38]. Les concentrations de contraintes se trouvent dans le joint de colle à environ 1 mm de l'extrémité du recouvrement [2, 10, 12, 14] tel que montré à la **Figure 10**. Cela est dû au changement brusque de géométrie et à la contrainte de pelage qui s'ajoute aux contraintes de cisaillement (**Figure 9**). S'il y a débordement de colle à l'extrémité de l'adhérent, des points de concentration de contraintes supplémentaires s'ajoutent, comme on peut le voir à la **Figure 11** [13, 33].

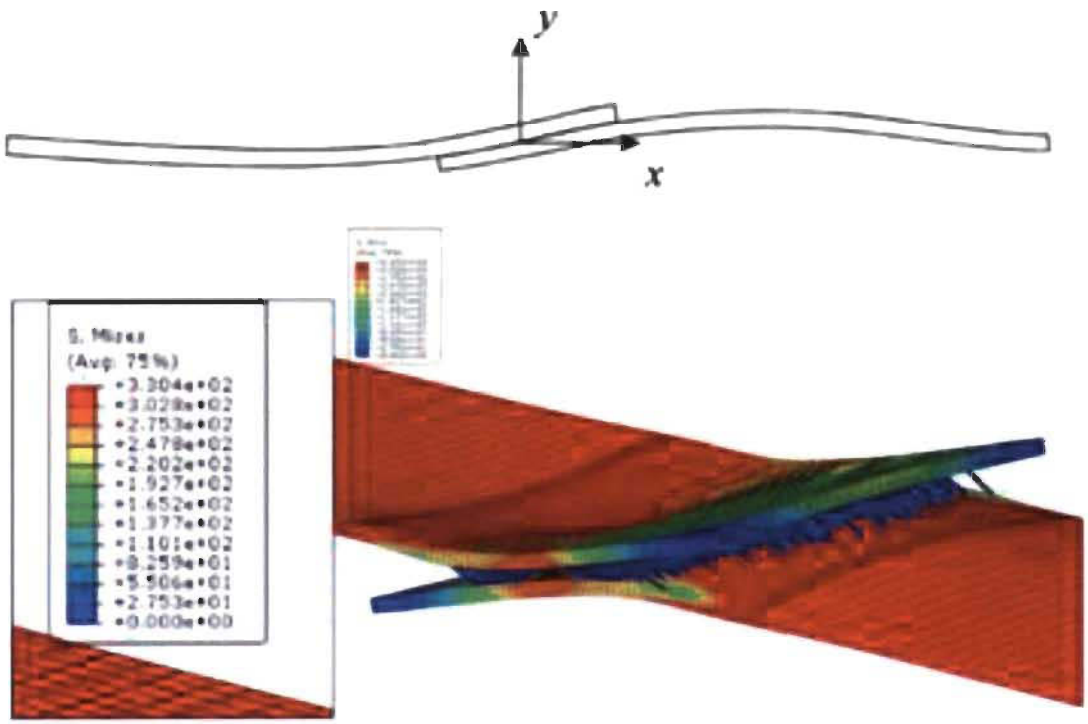


Figure 9 : Flexion dans l'échantillon [10, 37].

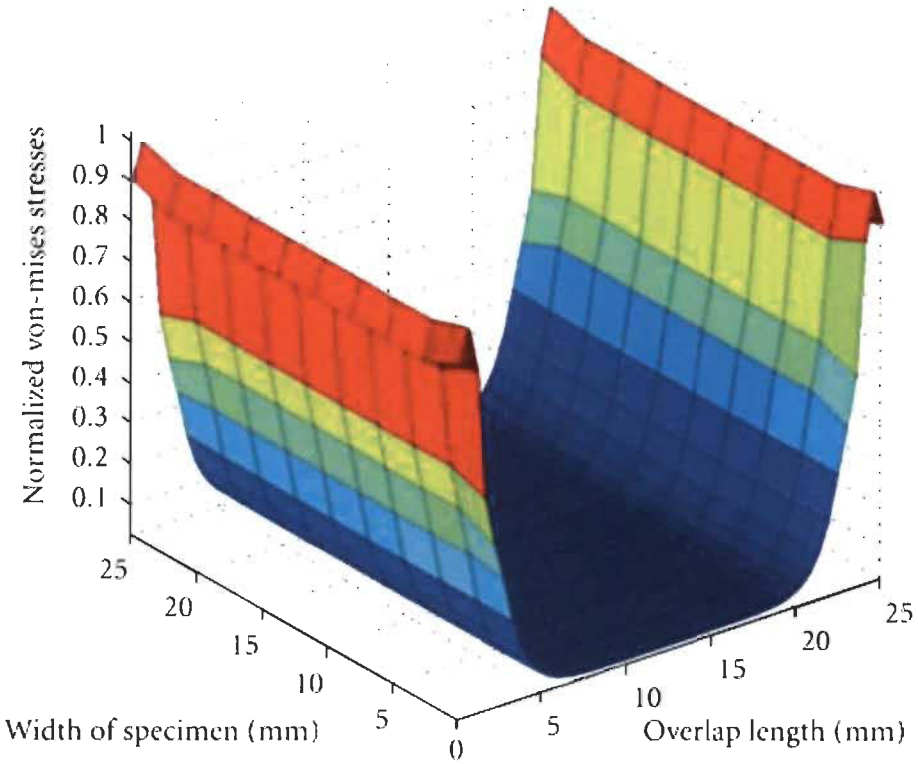


Figure 10 : Contraintes dans le recouvrement d'un joint collé [2].

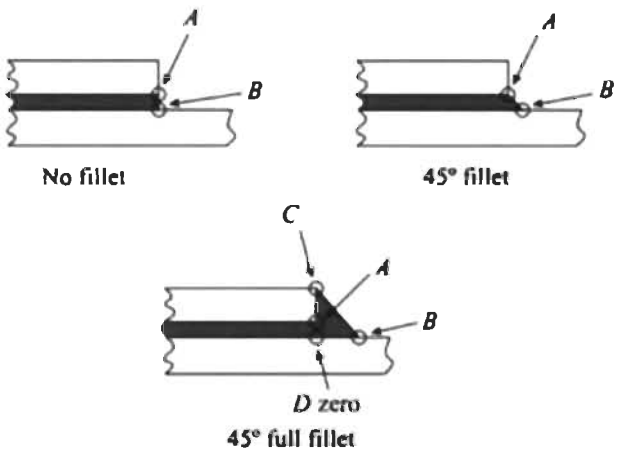


Figure 11 : Points de concentrations de contraintes avec débordement de colle [13].

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 12**. 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 [33]. 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 comme il est expliqué dans la section 2.3.

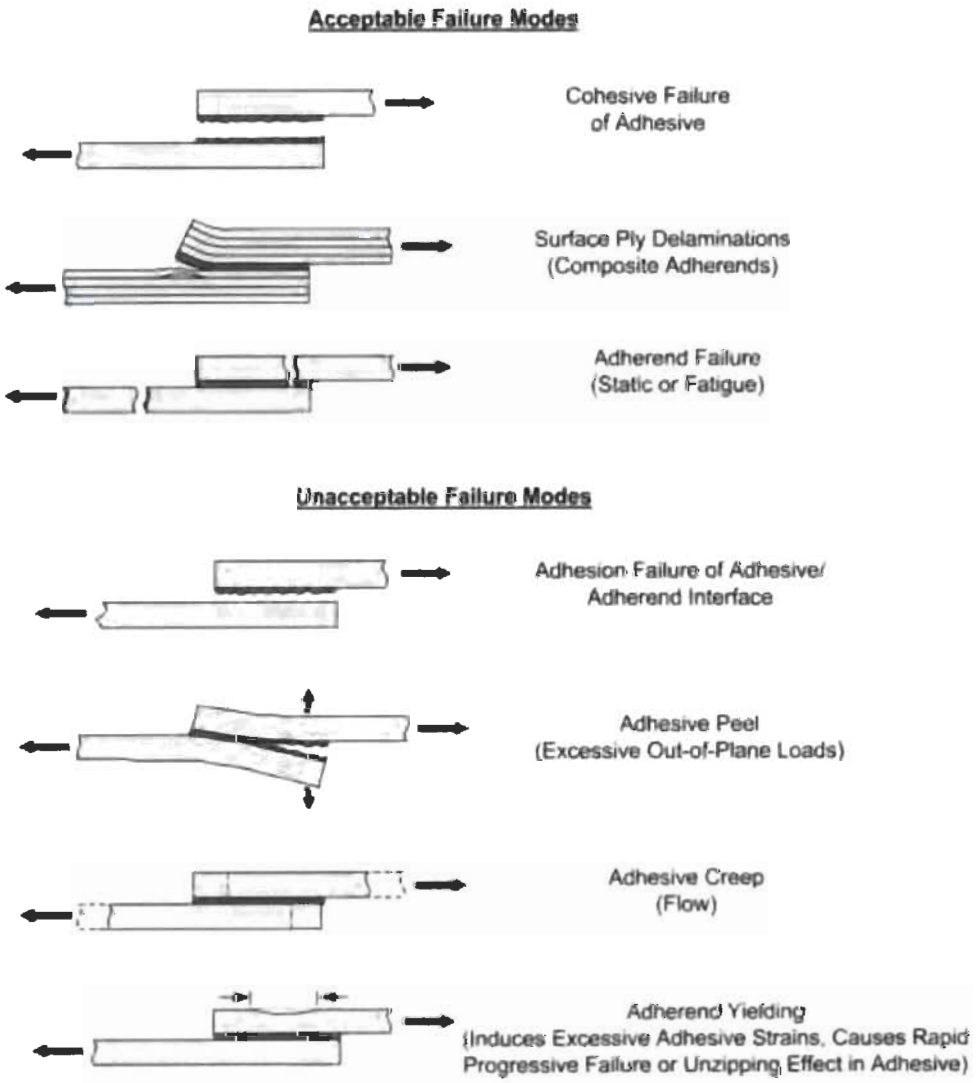


Figure 12 : Modes de rupture d'un joint collé [33].

2.5 Les joints boulonnés ou rivetés

Un joint boulonné ou riveté, à recouvrement simple, est fabriqué à l'aide de deux adhérents assemblés avec une attache mécanique. Un trou est percé au centre du recouvrement et on y insère un boulon ou un rivet. Les deux cas principalement étudiés dans la littérature sont les joints composite-aluminium et composite/composite (**Figure 13**).

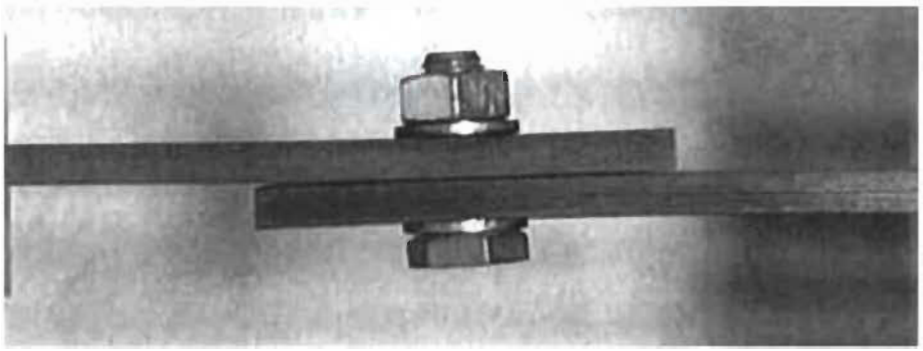


Figure 13 : Échantillons à recouvrement simple boulonné [24].

2.5.1 Essais sur les échantillons

L'échantillon est placé sous tension et on cherche à déterminer la charge transférée par les boulons ou les rivets [23-25, 39, 40]. Plusieurs facteurs peuvent influencer le résultat, tel que la force de serrage du boulon, le frottement entre les composantes et le jeu entre le diamètre du boulon et celui du trou [19-24, 39, 41, 42]. Il faut s'assurer de la reproductibilité de fabrication des échantillons pour obtenir des résultats le plus répétitifs possible. Un serrage manuel de 0,5 N-m doit être appliqué selon de nombreux auteurs [22, 25, 39, 43]. La force induite par l'application d'un rivet au pistolet est de 2 kN selon Sadowski [42]. Les coefficients de frottement entre les surfaces composite-composite, composite-métal et métal-métal sont respectivement de 0,234 et 0,05 pour les deux autres combinaisons selon certains auteurs [29, 40, 44].

Selon Stocchi et coll. et pour un joint boulonné, au début de l'essai la force augmente de manière constante et le joint passe par cinq étapes, tel que montré à la **Figure 14** [21]. Le comportement est linéaire dans le premier stade et devient ensuite

non-linéaire. Le coefficient de frottement ajoute la non-linéarité à partir du stade 2. Le contact entre le boulon et les adhérents entre en jeu au stade 3 puis l'endommagement progressif entre en jeux à partir du stade 4 pour se terminer par la rupture au stade 5.

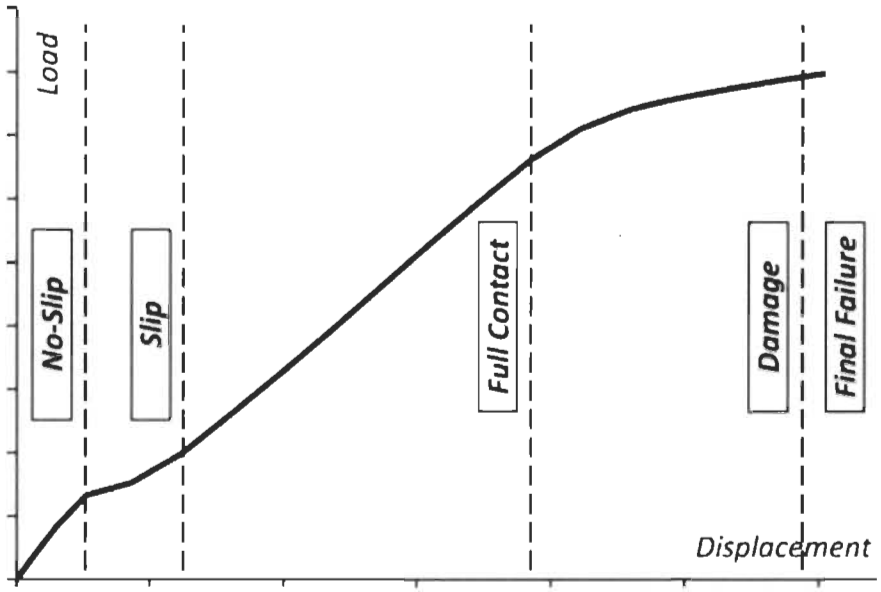


Figure 14 : 5 étapes de la courbe de traction d'un joint boulonné [21].

2.5.2. Paramètres géométriques et leurs effets sur le comportement et les propriétés des joints

Selon les normes, les dimensions utilisées sont tel que montrées au **Tableau 2** (voir **Figure 1** pour les paramètres) [19-21, 25, 39-45]. Les autres paramètres sont identiques à ceux du joint collé, mais la largeur du joint est d'environ le double de celle des joints collés. Le jeu entre le boulon et le trou cause un retard de la prise de charge par le boulon [22-25]. S'il y a plusieurs boulons dans le joint, celui ayant le plus petit jeu prendra la charge en premier alors que les autres seront sollicités plus tard si le déplacement augmente de manière constante (**Figure 15**). De même, si le jeu est trop grand, cela peut engendrer une rotation du boulon, causant une charge supplémentaire sur les adhérents, tel que montré à la **Figure 16** [22, 25, 33, 39].

Tableau 2 : Dimensions normalisées d'un joint boulonné ou riveté.

Diamètre de la tige d, po (mm)	~0,315 (8)
Diamètre de la tête D, po (mm)	~0,472 (12)
Diamètre extérieur de la rondelle (DR)	~0,591 (15)

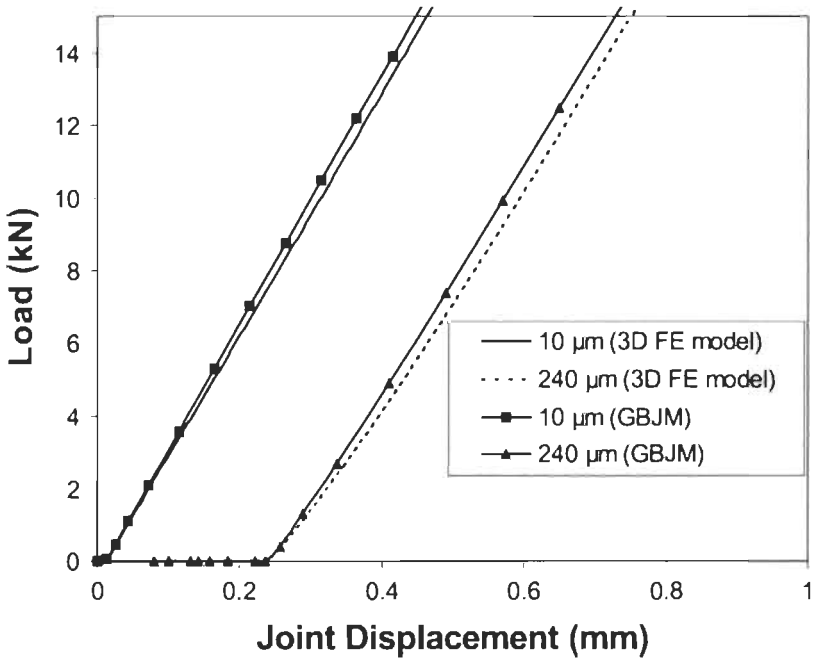


Figure 15 : Effet du jeu dans un joint boulonné [39].

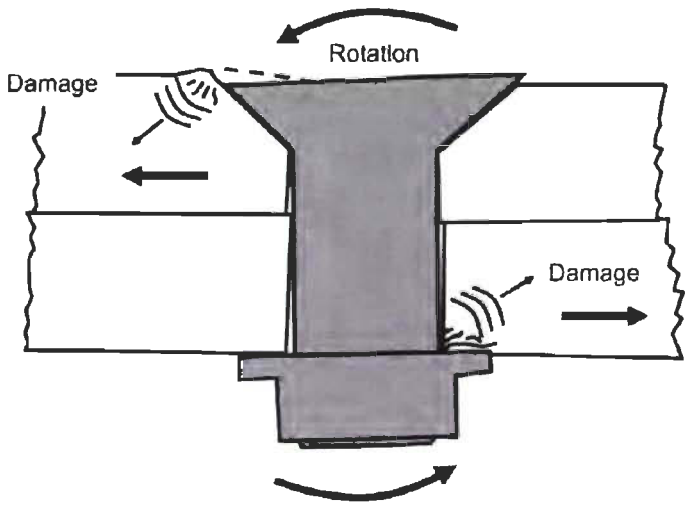


Figure 16 : Rotation du boulon causé par un jeu dans un joint boulonné [33].

Un premier paramètre à vérifier est donc le jeu entre le diamètre du boulon et le diamètre du trou [22-25]. Tel que montré à la **Figure 15**, plus le jeu est grand, plus il y aura un retard avant que le boulon transfert la charge. Ce paramètre ne modifie pas la résistance du joint mais si le jeu est grand, le déplacement dans le joint sera aussi plus grand. Un deuxième paramètre à vérifier est le coefficient de frottement entre les adhérents [19-21]. Plus le coefficient de frottement est grand, plus la résistance du joint augmente. Un coefficient élevé augmente la force requise pour obtenir le même déplacement dans le joint que pour un échantillon à coefficient plus faible. La **Figure 17** illustre cette tendance. Le dernier paramètre à vérifier est la force de serrage du boulon [20]. Plus elle augmente, plus la résistance du joint augmente. L'effet est plus important dans les deux premiers stades du comportement (**Figure 14**). La force de frottement étant égale au coefficient de frottement multiplié par la force normale, sans serrage, la pression exercée devient faible et le frottement perd de l'influence sur la résistance. La **Figure 18** montre ce comportement.

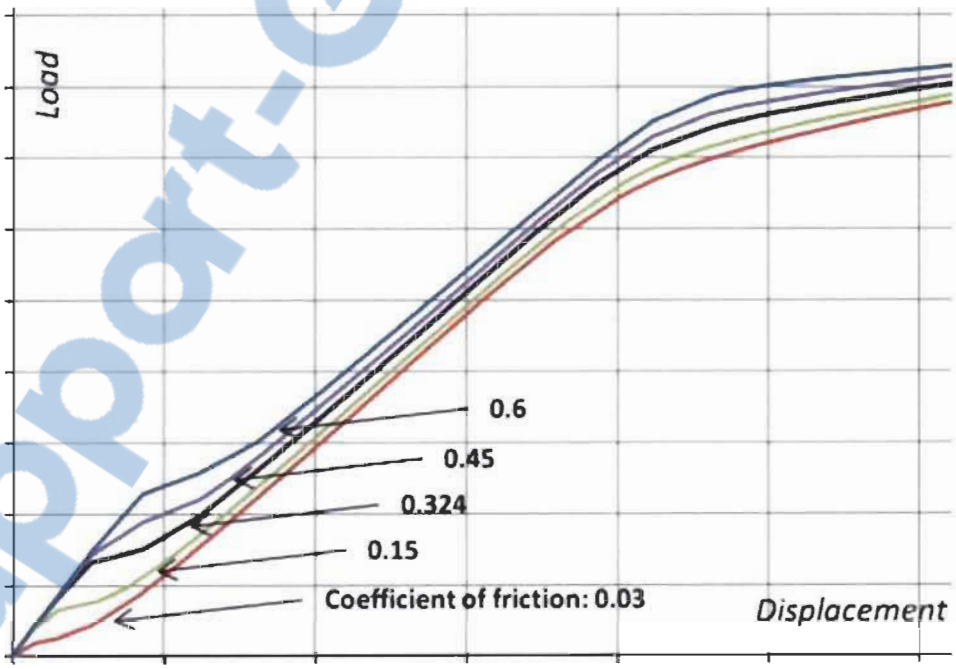


Figure 17 : Effet du coefficient de frottement sur la courbe de traction [20].

Rapport-Gratuit.com

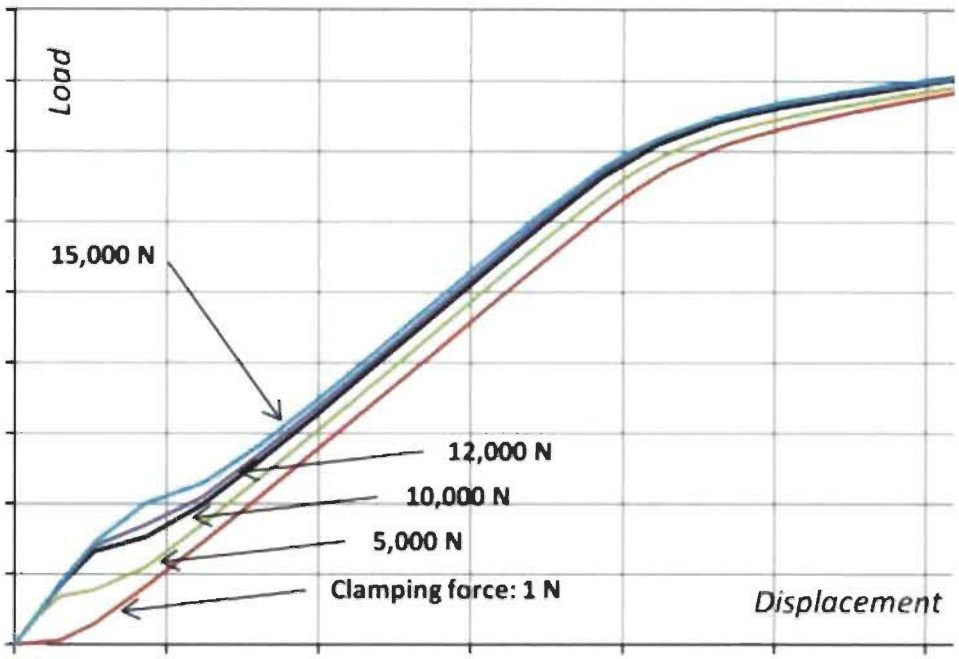


Figure 18 : Effet de la force de serrage sur la courbe de traction [20].

2.5.3 Concentrations de contraintes et modes de rupture

Un premier endroit où il y a concentration de contraintes est sur le pourtour du trou [30, 39, 41-43]. Le transfert de charge se faisant directement par le boulon ou rivet, une réduction importante de l'aire portante (ou section portante) est obtenue et, lorsque l'adhérent est un laminé, les dommages causés par le perçage viennent aussi influencer les contraintes en bordure du trou. Dès que les boulons ou les rivets commencent à transférer la charge, des concentrations de contraintes apparaissent sur la surface extérieure du trou, du côté de la tête du rivet [21, 22, 25, 42]. Cela est dû au cisaillement causé par le contact entre le boulon et la surface de l'adhérent lorsqu'un adhérent se déplace par rapport à l'autre. Une dernière concentration de contrainte survient lorsqu'il y a rotation du boulon causée par le jeu entre le boulon et le trou. Tout cela s'ajoute aux concentrations de contraintes causées par le trou dans la plaque [46]. Les endroits critiques sont ceux indiqués à la **Figure 16**. 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, tel que montré à la **Figure 19** [33]. 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 ("bolt pulling through laminate") ou rupture de l'attache mécanique ("bolt failure").

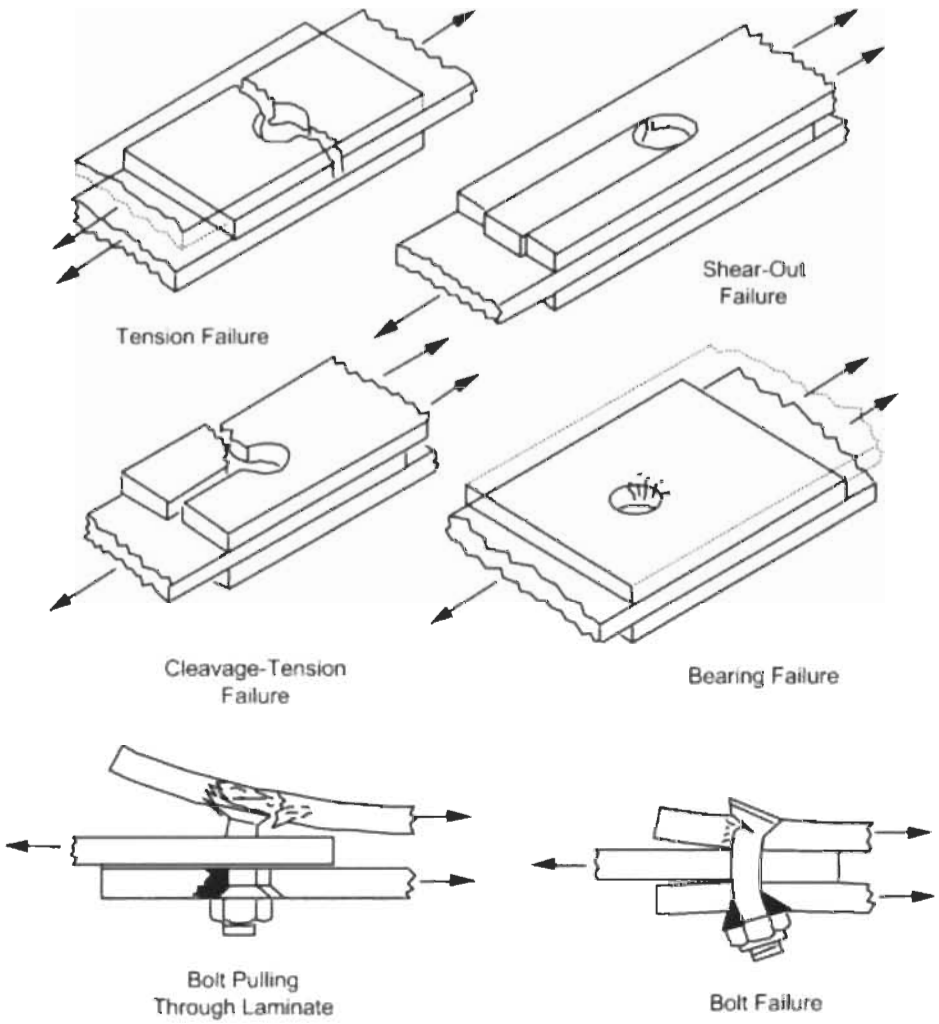


Figure 19 : Mode de rupture d'un joint fixé mécaniquement [33].

Le mode de rupture recherché est donc par matage [25, 33, 40, 47]. 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, les auteurs utilisent 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) de 2 [29, 33]. Aldas utilise des ratios de 5 partout pour s'assurer une rupture par matage [30].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.6 Les joints hybrides

Un joint hybride à recouvrement simple est fabriqué à l'aide de deux adhérents assemblés à l'aide d'une attache mécanique et de la colle. Il s'agit de la combinaison des deux méthodes d'assemblage précédentes. 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 (**Figure 20**).

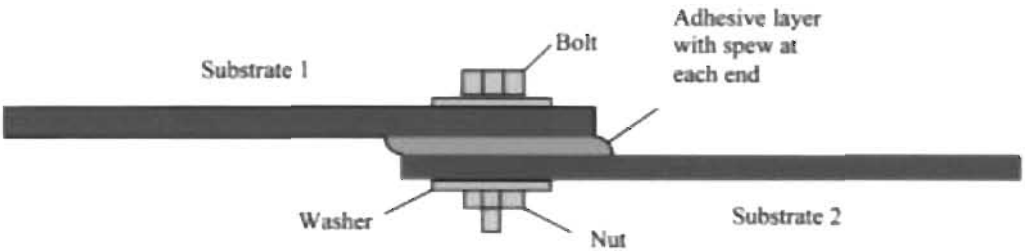


Figure 20 : Échantillon hybride [48].

2.6.1. Paramètres géométriques et leurs effets sur le comportement et les propriétés des joints hybrides

Selon les normes, les dimensions utilisées sont les mêmes que celles qu'on retrouve pour les joints collés et boulonnés (**Figure 1**). Pour ce type de joints, les effets de la variation des paramètres sont les mêmes que dans les sections 2.4.2 (joint collé) et 2.5.2 (joint riveté ou boulonné). Il faut donc de tout combiner pour optimiser ce type de joint. Dans ce cas cependant, il faut ajouter l'effet du module d'Young de la colle. Un module élevé aura comme effet de transférer une grande partie de la charge par la colle (et moins par les boulons ou rivets) alors qu'un module plus faible aura pour effet de répartir la charge de façon plus uniforme entre la colle et les boulons [32].

2.6.2 Concentrations de contraintes et modes de rupture

L'échantillon est placé sous tension et on essaie de déterminer la charge transférée par les boulons ou les rivets ainsi que par la colle. Beaucoup de facteurs peuvent influencer le résultat, tel que la qualité du collage, la force de serrage, le

frottement entre les composantes (entre la tête du rivet et le composite, le composite et la rondelle, la rondelle et la partie déformée du rivet et la tige du rivet et l'intérieur du trou) et le jeu entre le boulon et le pourtour du trou. Les essais mécaniques permettent en partie de valider le comportement. La contrainte due au serrage manuel du boulon (ou à la fixation du rivet) agit de la même façon qu'à la section 2.5.2. Les effets causés par le jeu entre le boulon ou le rivet et le trou sont les mêmes que dans la section 2.5.2. Lorsque la contrainte en cisaillement augmente dans l'adhésif, la contrainte de pelage (perpendiculaire au plan du joint) augmente aussi. La force de serrage et les dimensions des rondelles ont aussi un effet sur la contrainte de pelage puisque la flexion dans le joint est réduite [48].

Il y a deux types de joint hybride. Le premier type réfère à un module d'élasticité élevé de la colle. Dans cette situation, la colle prend plus de 90% de la charge et, seulement lorsqu'il y a rupture de l'adhésif les boulons ou les rivets reprennent 100% de la charge [26]. La **Figure 21** montre une courbe contrainte-déplacement typique pour ce cas. Le deuxième type survient lorsque le module d'élasticité de la colle est faible. La colle se déforme avant d'atteindre la rupture et la charge se répartie entre la colle et les attaches mécaniques [32]. La **Figure 22** montre la courbe contrainte-déplacement pour ce cas. Entre les deux figures, on observe une différence majeure causée par le module d'élasticité de la colle. La première figure montre que la rupture de la colle se produit à 0,5 mm de déplacement. Cela veut dire que tout se concentre dans la colle et que le rivet contribue très peu. Dans la seconde figure, le déplacement atteint entre 2 et 3 mm avant rupture de la colle. Le module d'élasticité de la colle étant beaucoup plus faible que dans le premier cas, le rivet et la colle travaillent conjointement. Il s'agit d'un aspect très important à considérer dans la présente étude afin d'atteindre l'objectif de diminution du nombre de rivets. Pour réduire le nombre de rivets, il faut être dans une situation où le rivet et la colle travaille conjointement.

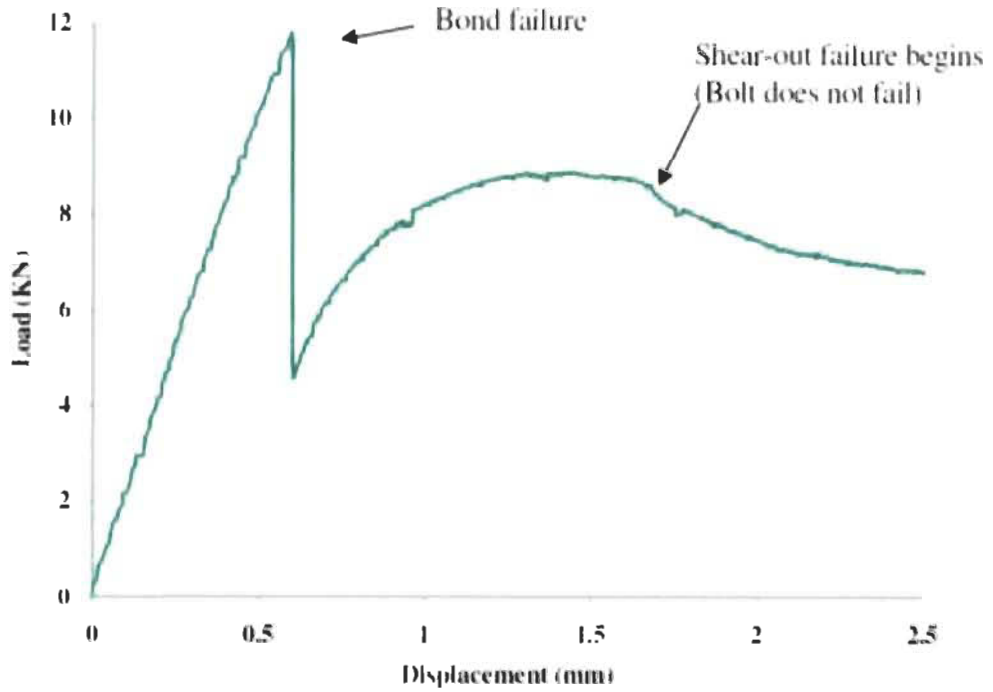


Figure 21 : Graphique de la force appliquée en fonction du déplacement pour un joint hybride à colle fragile [26].

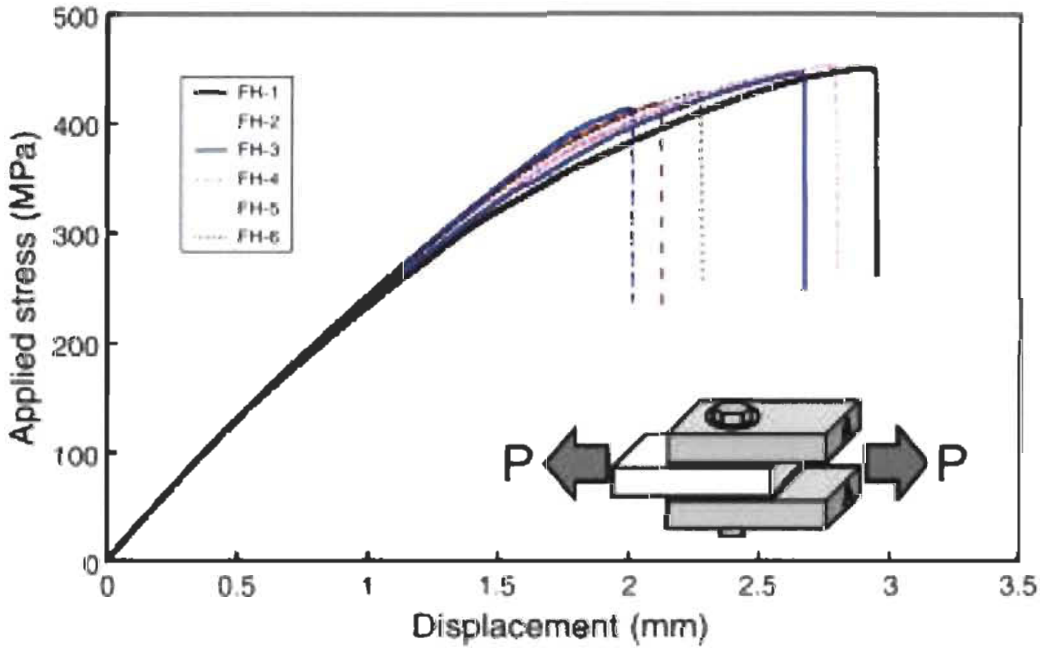


Figure 22 : Graphique de la force appliquée en fonction du déplacement pour un joint hybride à colle flexible [27].

Les concentrations de contraintes se trouvent autour du trou, dans la tige du boulon, dans la partie du boulon prêt de la tête et près de l'écrou ainsi que dans la colle, à 1 mm des extrémités du recouvrement. Il s'agit de la combinaison des deux cas des sections précédentes. Les modes de rupture de ce type de joint sont les mêmes que dans les sections 2.4.3 et 2.5.3 puisqu'on combine la colle avec une fixation mécanique. Les modes de rupture recherchés sont donc la rupture par cohésion de l'adhésif (recherché pour un joint collé) et par matage (recherché pour un joint boulonné ou riveté) [33, 49]. Les autres modes de ruptures entraînent une rupture catastrophique ou une diminution significative de la résistance du joint [33].

2.7 Effets de la température et de l'humidité

La température modifie les propriétés mécaniques des matériaux plastiques. Le module d'élasticité diminue lorsqu'on augmente la température et augmente lorsqu'on diminue la température. L'augmentation du pourcentage d'humidité aura pour effet de nuire à la cohésion de l'adhésif, réduisant ainsi sa résistance à la rupture [50, 51]. Un adhérent chauffé nécessitera également une meilleure préparation de surface pour conserver un mode de rupture adéquat [50, 51]. La **Figure 23** montre les résultats d'une étude sur différents types de joints soumis à différentes conditions environnementales. Dans cette figure, CCN, CCA, SEB, COB, CTD, RTD et ETW réfèrent respectivement à une cuisson sans adhésif en utilisant le surplus de résine des préimprégnés, une cuisson entre deux adhésifs non-cuits, un ajout de colle entre deux adhérents déjà cuits, une cuisson entre deux adhérents dont un des deux est cuit et l'autre non, une température froide avec un faible taux d'humidité, une température ambiante avec un faible taux d'humidité et une haute température avec un haut taux d'humidité.

En général, plus la température augmente, plus la résistance du joint augmente. Le taux d'humidité n'influence pas de façon majeure la résistance du joint [50, 51]. Les meilleures joints sont ceux qui contiennent le moins de colle, soit les types CCN et SEB. Lorsqu'il y a présence de l'adhésif entre chaque pli, la résistance tend à être inférieure. L'exception dans les résultats concerne le joint COB qui a une meilleure résistance à faible température. Cela s'explique par son mode de rupture qui diffère des autres à basse

température, soit le délaminage au lieu de la rupture cohésive. Un module plus élevé dans la colle et la présence de celle-ci sont les causes de ce changement.

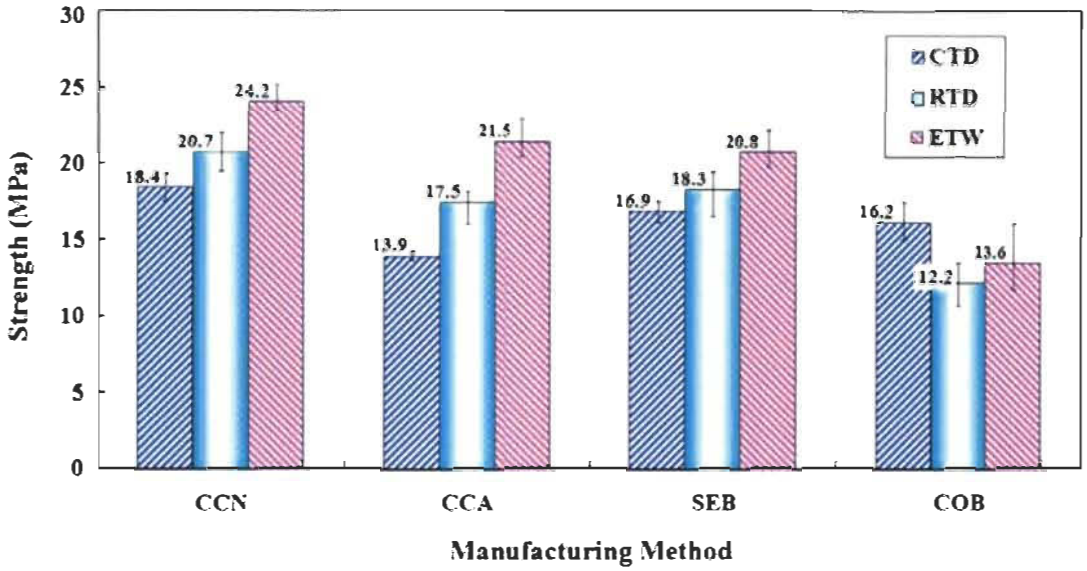


Figure 23 : Résistances de différents joints collés pour différentes conditions environnementales [50, 51].

2.8 Le modèle éléments finis

Il faut introduire un modèle du joint tridimensionnel dans un logiciel d'analyse par éléments finis. Un modèle 2-D est une bonne approximation, mais pour avoir le comportement complet, il est important d'étudier ce qui se passe sur la largeur de l'échantillon, surtout lorsqu'il y a présence de boulons.

2.8.1 Propriétés des matériaux

Il faut configurer les matériaux qui seront utilisés. Pour ce faire, il y a plusieurs propriétés des matériaux à considérer. Pour la colle, l'adhérent en aluminium, le boulon et les rondelles, il faut entrer le module d'Young (E), la masse volumique (ρ), le coefficient d'expansion thermique (α) et le coefficient de Poisson (ν) [29, 30]. Pour l'adhérent en composite et une modélisation 3D, il faut entrer les modules d'Young dans les trois directions (E_1, E_2 et E_3), le module de cisaillement dans le plan du laminé (direction 12) et perpendiculaire au plan du laminé à partir des directions 1 et 2

(directions 13 et 23), G_{12}, G_{13} et G_{23}, les coefficients de Poisson correspondants (ν_{12}, ν_{13} et ν_{23}), le coefficient d'expansion thermique dans les trois directions (α_1, α_2 et α_3) et la masse volumique (ρ).

2.8.3 Degrés de liberté du modèle

Il faut bloquer des degrés de liberté du modèle selon le schéma de la **Figure 24**. L'extrémité de l'adhérent supérieur (extrémité gauche sur la figure) est bloqué en translation et en rotation dans toutes les directions pour simuler la fixation dans la machine de traction [32]. L'extrémité de l'adhérent inférieur est aussi bloquée en translation et en rotation dans toutes les directions, sauf le déplacement dans la direction de la force appliquée (en X). Cela permet de simuler la tension pure dans les adhérents et le cisaillement dans le joint.

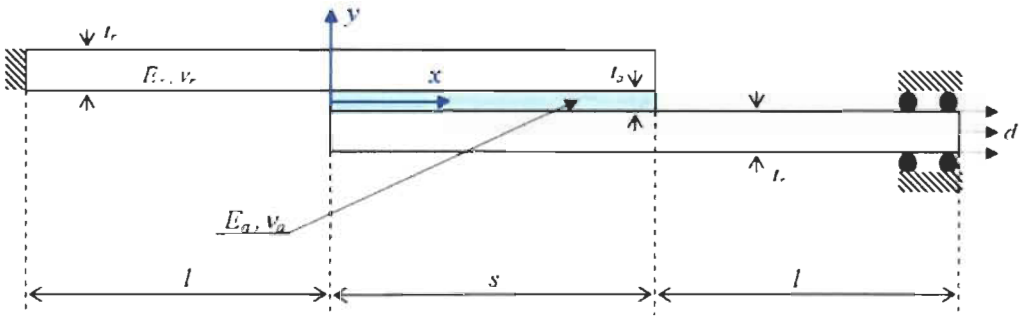


Figure 24 : Échantillon contraint aux extrémités pour simuler l'essai de cisaillement [32].

2.8.4 Choix des éléments

Pour choisir les éléments dans un environnement 3-D et, selon les matériaux, il faut déterminer si on doit utiliser un élément aux propriétés isotropes ou anisotropes. De même, selon la précision requise des résultats, on choisi des éléments cubiques linéaires à 8 nœuds ou isoparamétriques à 20 nœuds.

Les principaux logiciels utilisés par les auteurs sont ANSYS et ABAQUS. En deux dimensions, les auteurs utilisent soit des éléments coques [28, 39] ou des éléments quadratiques à 4 nœuds [14]. En trois dimensions, les auteurs utilisent soit des éléments

briques hexaèdres d'ordre 1 [21], des éléments multicouches à 8 nœuds (SOLID46) [19], des éléments briques multicouches (BRICK 46) [44], un élément SOLID45 par pli [28], des éléments solides linéaires à 8 nœuds (C3D8I) [40], un élément orthotrope par pli ou des éléments briques linéaires [25, 29]. Chaque partie du joint possède son nombre d'éléments dans l'épaisseur. Le composite stratifié possède un élément par pli, l'aluminium a un nombre variable allant de 1 à 8 éléments dans l'épaisseur et la colle possède un nombre variable allant de 1 à 5 éléments dans l'épaisseur. Pour les adhérents en aluminium, les auteurs utilisent des éléments (SOLID45) [19] ou des éléments briques (BRICK 45) [44]. L'adhésif est modélisé par des éléments cohésifs COH3D8 [2, 37] ou des éléments solides quadratiques à 20 nœuds (SOLID186) [52].

Il y a un contact entre l'attache mécanique et les rondelles, un autre entre les rondelles et les adhérents et un dernier entre la tige du boulon ou rivet et la surface intérieure du trou où l'on associe une tolérance [24]. Dans le cas du joint boulonné ou riveté, il faut ajouter un contact entre les adhérents. À chaque élément de contact, il faut lui associer un coefficient de frottement en fonction des matériaux en contact.

2.8.5 Application de la force de serrage

En plus des coefficients de frottement, il faut ajouter une précontrainte induite par le serrage de l'attache mécanique, tel que montré à la **Figure 25**. Deux méthodes sont couramment utilisées. La première consiste à ajouter une pression sur la surface occupée par la rondelle, correspondant à la force induite par un serrage manuel [45]. La deuxième consiste à simuler une augmentation de température sur les rondelles, ce qui augmentera le volume et viendra créer une pression sur l'adhérent pour simuler la pression de contact [45]. Tenir compte de la force de serrage et du frottement entre les éléments permet de mieux simuler le comportement non-linéaire qu'on observe dans la courbe contrainte-déplacement.

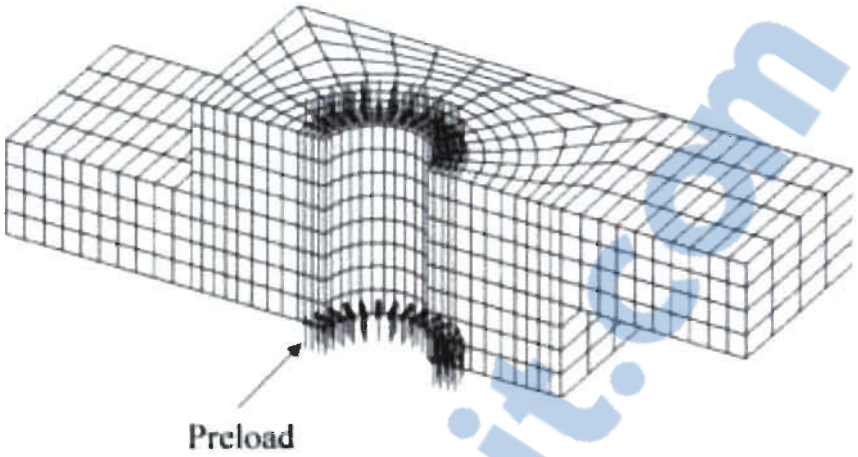


Figure 25 : Contraintes dues au serrage du boulon [45].

2.8.6 Le maillage

Le maillage doit être choisi en fonction des concentrations de contraintes. Cela veut dire que le maillage doit est plus raffiné prêt du trou et des extrémités du recouvrement, tel que montré à la **Figure 26**. Au niveau du trou, un maillage radial est réalisé pour revenir ensuite à un maillage rectangulaire lorsqu'on s'éloigne du trou [32]. Le maillage à utiliser est de type structuré (« map meshing »).

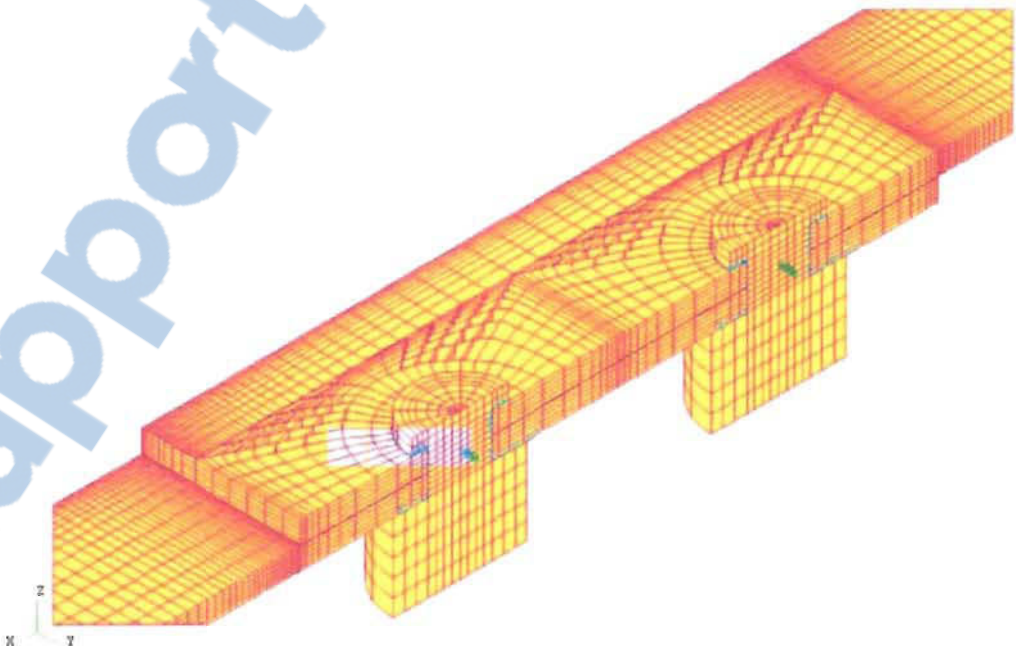


Figure 26 : Maillage d'un échantillon [32].

Rapport-Gratuit.com

Chapitre 3 : Création des modèles éléments finis

Pour améliorer une pièce, il existe des façons plus efficaces que de fabriquer plusieurs combinaisons de joint et de faire des essais sur chacune d'elles. C'est ici qu'entre en jeu la modélisation par éléments finis. Cela consiste à créer un modèle le plus fidèle à la réalité et de modifier les paramètres géométriques et les sollicitations selon les besoins. Le chapitre qui suit expliquera brièvement le logiciel utilisé pour créer les modèles d'éléments finis de même que les détails de modélisation des échantillons collé, riveté et hybride.

3.1 COSMOS/M

COSMOS/M est un logiciel d'éléments finis développé par Structural Reasearch and Analysis Corporation (SRAC). Tel que le montre la **Figure 27**, ce logiciel est compatible avec de nombreux autres logiciels de modélisation et d'éléments finis et contient de nombreux modules selon les besoins de l'utilisateur. GEOSTAR est le module pré- et post-processeur du logiciel (module d'élaboration géométrique et de traitement des résultats après calcul) tandis que STAR et NSTAR sont les modules de calcul linéaire et non-linéaire respectivement. Dans le cadre de ce projet, le module utilisé sera celui permettant de réaliser des analyses statiques linéaires, soit STAR. L'option "Geometry" permet de créer la pièce qu'on désire analyser à l'aide de génération de points, de surfaces et de volumes. L'option "Meshing" permet de faire un maillage paramétrique et de contrôler la dimension et l'orientation des éléments. L'option "PropSets" permet de choisir un type d'élément ainsi que leurs propriétés et les propriétés des matériaux. L'option "LoadsBC" permet de contraindre les degrés de liberté de certain nœuds et d'ajouter des sollicitations. Finalement, les options "Analysis" et "Results" permettent d'exécuter l'analyse éléments finis et d'afficher tous les résultats de contraintes, déformations et déplacements nécessaires

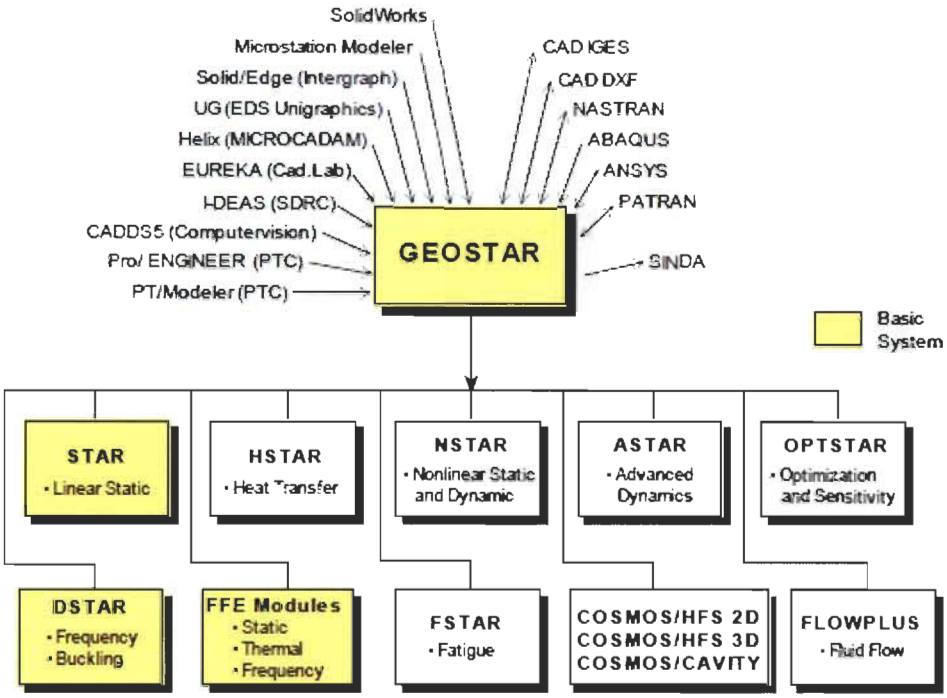


Figure 27 : Modules de COSMOS/M.

3.2 Matériaux, choix d'éléments et généralité

Avant de choisir les dimensions pour les échantillons, il faut entrer les propriétés mécaniques des matériaux utilisés pour les adhérents et l'adhésif. Les propriétés sont les modules d'Young dans les directions principales du composite global ou de chaque couches individuelles (dépendant de l'approche de modélisation), leurs coefficients de Poisson et les modules de cisaillement dans les trois directions. Pour les composites, il faut prévoir des propriétés différentes dans les trois directions (longitudinale, transversale et hors plan du laminé). Il y a deux approches possibles. La première consiste à utiliser les orientations de chacun des plis qui constitueront l'adhérent. La deuxième consiste à utiliser la théorie des laminés pour trouver les propriétés générales (propriétés d'ensemble) de l'adhérent. La première méthode permet de savoir ce qui se passe dans chacun des plis (ex : contraintes, déformations, séquence de rupture des plis, contraintes hors plan à l'intérieur du laminé). Cependant, si on s'intéresse uniquement aux contraintes dans l'adhésif, la deuxième méthode est envisageable. La première méthode est utilisée pour les modèles éléments finis.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Les propriétés des matériaux proviennent des standards de Bombardier. La compagnie fournie une fiche technique qui indique quelles propriétés doit avoir un pli composite à renfort tissé pour satisfaire les normes de qualité du produit. Donc, les matériaux utilisés par Delastek se trouvent à l'intérieur des tolérances fournies dans le **Tableau 3**. Les tissus équilibrés 50-50 (dans les directions chaîne et trame) de fibres de graphite (Class III: 8 Harness Satin Weave Graphite Fabric) sont combinés à une résine phénolique. Les propriétés par pli sont fournies dans le **Tableau 4**.

Tableau 3: Propriétés mécaniques de composites à fibres de graphite.

Propriétés	Mesure
Pourcentage massique de résine M_m	41 ± 3 %
Pourcentage volumique de fibre V_f	54 ± 5 %
Pourcentage de porosité max V_v	5 %
Épaisseur d'un pli t, po (mm)	0,0156 (0,396)
Résistance en tension F_{1t} et F_{2t}, ksi (MPa) pour un laminé $[90]_6$	88 ± 6 (606,7 ± 41,4)
Module d'élasticité en tension E_{1t} et E_{2t}, Msi (GPa) pour un laminé $[90]_6$	8,3 ± 0,1 (57,227 ± 0,689)
Résistance en compression F_{1c} et F_{2c}, ksi (MPa) pour un laminé $[90]_8$	70,5 ± 5,5 (586,1 ± 37,9)
Module d'élasticité en compression E_{1c} et E_{2c}, Msi (GPa) pour un laminé $[90]_8$	7,5 ± 0,3 (51,711 ± 2,068)
Résistance en cisaillement hors plan, ksi (MPa) pour un laminé $[90]_6$	6,45 ± 0,35 (44,5 ± 2,4)
Résistance en cisaillement dans le plan, ksi (MPa) pour un laminé $[\pm 45]_{2s}$	7,85 ± 0,45 (54,1 ± 3,1)
Coefficient de Poisson ν_{12}	≈ 0,3

Tableau 4: Propriétés mécaniques par pli du composite à fibres de graphite.

Épaisseur t, po (mm)	0,0158 (0,40132)
Module de tension dans la direction 1 E_1, Msi (GPa)	8,88 (61,2)
Module de tension dans la direction 2 E_2, Msi (GPa)	8,72 (60,1)
Coefficient de poisson ν_{12}	0,047
Module de cisaillement G_{12}, Msi (GPa)	0,64 (4,41)
Résistance en tension dans la direction 1 σ_{1t}, ksi (MPa)	113,0 (779,1)
Résistance en tension dans la direction 2 σ_{2t}, ksi (MPa)	106,5 (734,3)
Résistance en compression dans la direction 1 σ_{1c}, ksi (MPa)	88,0 (606,7)
Résistance en compression dans la direction 2 σ_{2c}, ksi (MPa)	87,5 (603,2)
Résistance en cisaillement τ_{12}, ksi (MPa)	9,82 (67,7)

Pour la colle, on utilise un durcissant Hysol EA 9309.3NA mélangé avec des billes de verre (« glass bubble 3M k-20series ») de la compagnie 3M Inc. La résistance en cisaillement de la colle est de 28,9 MPa (4400 Psi). Pour un joint de 25,4 mm par 12,7 mm par 0,254 mm (largeur × longueur × épaisseur), la force maximale devrait donc être de 9322,6 N (2095,8 lbf). Cependant, en laboratoire, les valeurs obtenues sont environ deux fois plus faibles. Il y a donc d'autres sollicitations que le cisaillement pur qui entre en compte. La colle est mélangée aux billes pour augmenter sa viscosité et facilité le collage. Également, le choix du « glass bubble 3M k-20 » ajoute des particules permettant de contrôler l'épaisseur du joint à 0,254 mm.

Les rivets utilisés sont soit un NAS1399 C4-4 en acier inoxydable ou un MS20470AD4-9 Solid Rivet en aluminium. Les dimensions et propriétés des matériaux sont fournies dans le **Tableau 5** pour les rivets en acier inoxydable et dans le **Tableau 6** pour les rivets en aluminium. Dans le cas de l'adhérent en aluminium, on choisi un alliage anodisé "2024-T3 Black Anodized per MIL-A-8625". Les propriétés sont

fournies dans le **Tableau 7**. L'empilement pour les échantillons des essais collés avec l'orientation des plis est montré à la **Figure 28**. L'empilement choisi est $[0/45/90/-45]_s$. Puisque nous avons un tissu 50-50, il est possible d'écrire l'empilement comme étant $[0/45/0/45]_s$.

Tableau 5: Propriétés du rivet en acier inoxydable.

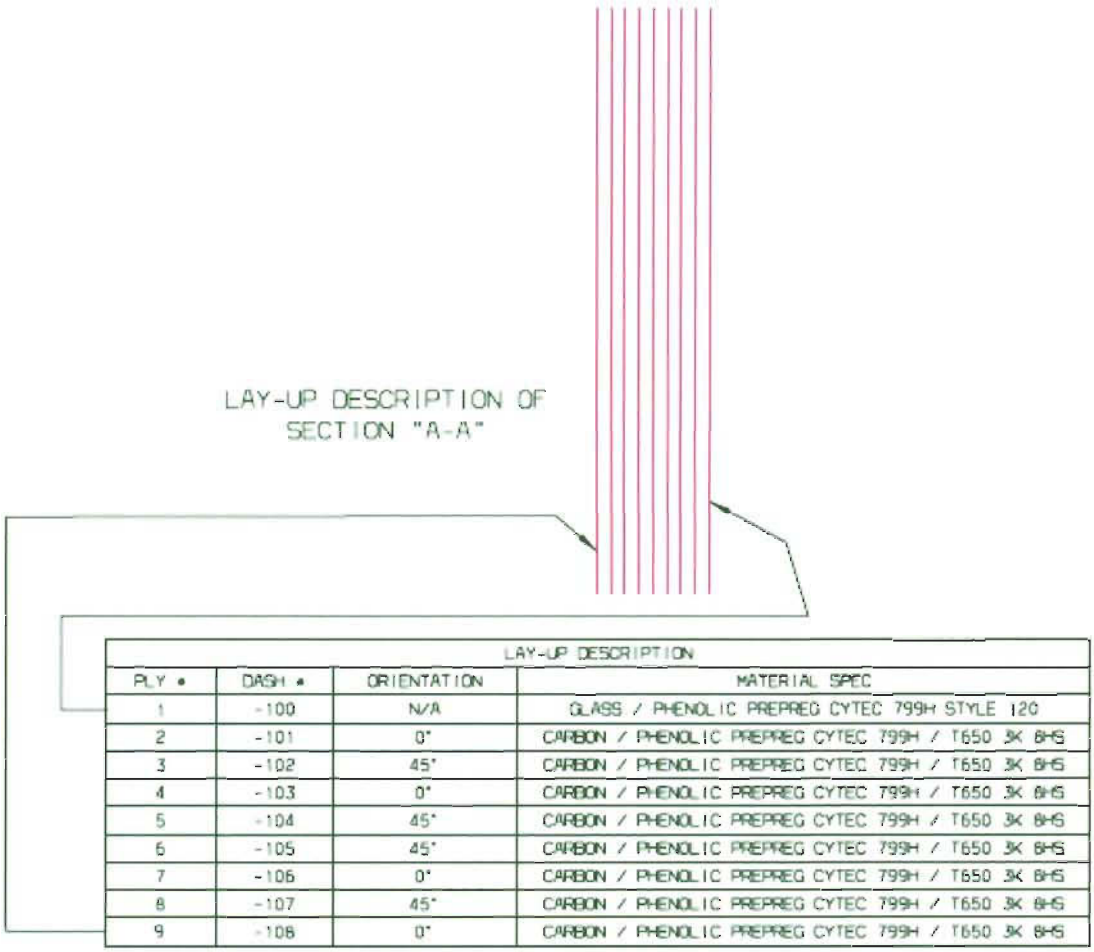
Matériau	Acier résistant à la corrosion A-286
Diamètre de la tige, po (mm)	$0{,}125^{+0{,}003}_{-0{,}001}$ ($3{,}175^{+0{,}0762}_{-0{,}0254}$)
Diamètre de la tête, po (mm)	0,225 ± 0,004 (5,715 ± 0,1016)
Hauteur de la tête, po (mm)	0,225 (5,715)
Angle d'ouverture, degré	100,0 ± 1,5
Module de tension, Msi (GPa)	29,1 (201)
Module de cisaillement, Msi (GPa)	11,14 (76,8)
Coefficient de Poisson	0,306
Résistance en cisaillement, psi (MPa)	75 000 (517)

Tableau 6: Propriétés du rivet en aluminium.

Matériau	Alliage d'aluminium 2117	Aluminium pure 1100
Diamètre de la tige, po (mm)	0,125 (3,175)	0,125 (3,175)
Diamètre de la tête, po (mm)	0,250 (6,35)	0,250 (6,35)
Hauteur de la tête, po (mm)	0,225 (5,715)	0,225 (5,715)
Angle d'ouverture	N/A	N/A
Module d'élasticité, Msi (GPa)	10,3 (71)	10,2 (70,3)
Module de cisaillement, Msi (GPa)	3,87 (26,7)	3,83 (26,4)
Coefficient de Poisson	0,33	0,33
Résistance en cisaillement, psi (MPa)	28 000 (193)	10 000 (68,9)
Résistance en tension, psi (MPa)	43 000 (296,5)	16 000 (110,3)

Tableau 7: Propriétés de l'aluminium.

Résistance en tension, psi (MPa)	70 000 (482,6)
Limite élastique en tension, psi (MPa)	50 000 (344,7)
Module d'élasticité, Msi (GPa)	10,6 (73,1)
Coefficient de Poisson	0,33
Résistance en cisaillement, psi (MPa)	41 000 (282,7)
Module de cisaillement, Msi (GPa)	4,1 (28,3)



LAY-UP DESCRIPTION

PLY #	DASH #	ORIENTATION	MATERIAL SPEC
1	-100	N/A	GLASS / PHENOLIC PREPREG CYTEC 799H STYLE 120
2	-101	0°	CARBON / PHENOLIC PREPREG CYTEC 799H / T650 3K 8HS
3	-102	45°	CARBON / PHENOLIC PREPREG CYTEC 799H / T650 3K 8HS
4	-103	0°	CARBON / PHENOLIC PREPREG CYTEC 799H / T650 3K 8HS
5	-104	45°	CARBON / PHENOLIC PREPREG CYTEC 799H / T650 3K 8HS
6	-105	45°	CARBON / PHENOLIC PREPREG CYTEC 799H / T650 3K 8HS
7	-106	0°	CARBON / PHENOLIC PREPREG CYTEC 799H / T650 3K 8HS
8	-107	45°	CARBON / PHENOLIC PREPREG CYTEC 799H / T650 3K 8HS
9	-108	0°	CARBON / PHENOLIC PREPREG CYTEC 799H / T650 3K 8HS

Figure 28: Empilement et orientation des plis.

Le rivet NAS1399 ne sera pas modélisé en raison d'un problème de disponibilité. Pour être en mesure de poursuivre le projet, les rivets solides MS20470 ont été utilisés. Nous sommes conscient qu'un rivet solide qu'on déforme risque d'endommager le trou (par matage). Cependant, et comme nous le verrons suite aux essais, puisque la

résistance en cisaillement du rivet est plus faible que la résistance en matage du trou, nous pouvons accepter cet écart puisque les résultats n'en seront pas significativement affectés. Un autre facteur à considérer est la corrosion galvanique. De même ici, puisque les échantillons fabriqués ont rapidement été testés après la fabrication, cette source d'erreur est elle aussi négligeable. Finalement, le pli en fibre de verre ne sera pas modélisé puisqu'il n'a qu'un rôle esthétique et offre très peu de résistance comparé à la fibre de carbone.

Dans nos modèles, le composite stratifié à fibres de carbone est représentée par un élément solide 3D multicouche. La colle, le rivet et l'adhérent en aluminium (au besoin) sont représentés par un élément 3D isotrope. Pour l'élément 3D multicouche, il faut ajuster l'orientation du système d'axe de chaque élément par rapport à la géométrie de la pièce. Ceci est important afin d'assurer la conformité entre l'orientation des couches composites du modèle en lien avec celle de la pièce réelle. Pour les éléments multicouches, il faut aussi spécifier le type d'empilement, l'épaisseur de chaque pli et l'orientation de ceux-ci. Pour les coupons fabriqués par Delastek, chaque pli a une épaisseur de 0,396 mm et l'empilement est de type $[0/45/90/-45]_s$. Finalement, il faut entrer les modules d'Young dans chaque direction, les modules de cisaillement dans chaque direction et le coefficient de Poisson dans chaque direction des couches du composite (notamment) mais aussi pour chacun des matériaux utilisés dans le modèle. Le **Tableau 8** montre les propriétés de tous les matériaux utilisés dans la modélisation. Puisque ce sont les propriétés de chaque couche, les axes de la **Figure 24** ne correspondent pas toujours, puisque nous avons des couches à 45°. La direction 1 est dans le sens des fibres, la direction 2 est perpendiculaire aux fibres et la direction 3 est hors plan. Donc, dans le tableau, 1 = X, 2 = Z et 3 = Y, d'où 12 = XZ, 23 = ZY et 13 = XY. Pour les matériaux isotropes, les valeurs vont évidemment se répéter. Il faut également s'assurer que l'application de la force n'affectera pas nos résultats. Le principe de Saint-Venant s'applique ici et une distance suffisante entre le point d'application de la force et le joint est maintenue pour éviter toute influence venant des extrémités de l'échantillon [53].

Tableau 8 : Listes de propriétés des matériaux dans COSMOS/M.

Propriétés	Carbone (1)	Colle (2)	Aluminium (3)
MPROP EX, Msi (GPa)	8,3 (57,2)	0,324 (2,23)	10,6 (73)
MPROP EY, Msi (GPa)	2,0 (13,8)	0,324 (2,23)	10,6 (73)
MPROP EZ, Msi (GPa)	8,3 (57,2)	0,324 (2,23)	10,6 (73)
MPROP NUXY	0,5	0,42	0,33
MPROP NUYZ	0,089	0,42	0,33
MPROP NUXZ	0,047	0,42	0,33
MPROP GXY, Msi (GPa)	0,74 (5,1)	0,124 (0,85)	4,06 (28)
MPROP GYZ, Msi (GPa)	0,59 (4,1)	0,124 (0,85)	4,06 (28)
MPROP GXZ, Msi (GPa)	0,64 (4,4)	0,124 (0,85)	4,06 (28)

Dans le tableau ci-dessus, les propriétés ne sont pas entièrement connues. Seules les valeurs en rouge proviennent des tables fournies par Bombardier. Pour compléter le reste du tableau, il fallait aller chercher l'information dans une autre table des propriétés. On trouve un tissu 50-50 en fibres de carbone AGP370-5H/3501-65. Ces propriétés sont $V_f = 0{,}62$, $\rho = 1{,}6$ g/cm³, $E_1 = 77$ GPa, $E_2 = 75$ GPa, $E_3 = 13{,}8$ GPa, $G_{12} = 6{,}5$ GPa, $G_{23} = 4{,}1$ GPa, $G_{13} = 5{,}1$ GPa, $\nu_{12} = 0{,}06$, $\nu_{23} = 0{,}37$ et $\nu_{13} = 0{,}5$ [54]. Ces valeurs sont probablement surestimées. Il s'agit d'un matériau très près du matériau utilisé par Delastek. On sait également que, en faisant varier dans le modèle les différentes propriétés, EY, NUYZ et GYZ, cela affecte très peu la déformation du modèle. NUXY et GXY font une différence sur les résultats, mais la différence est très faible. Cela permet d'accepter les valeurs ci-dessus.

Le choix d'un élément structuré entraîne certaines limites au modèle. La bonne façon de procéder aurait été de faire un maillage non-structuré à l'aide d'éléments tétraédriques quadratiques (10 nœuds). Il est possible de faire ce choix dans COSMOS/M. Cela pourrait permettre de mieux modéliser le passage des formes rondes aux formes carrés (et ainsi limiter les effets de distorsion). Également, le raffinement du maillage serait meilleur. Il serait plus simple de faire un algorithme de raffinement

jusqu'à l'obtention d'une erreur assez faible sur les résultats qu'on désire obtenir. Cependant, il faut tenir compte de la limite imposé par le logiciel. Un élément tétraédrique multicouche n'est pas toujours disponible. Même s'il existe, il faut faire le maillage de façon à avoir le vecteur normal dans la direction de l'empilement. Aussi, il ne faut pas qu'un élément chevauche deux couches adjacentes du laminé. Des travaux futurs permettraient d'en savoir plus sur ce type de problématique, laquelle dépasse largement le cadre de la présente étude.

Normalement, un coefficient de Poisson de 0,5 pose problème pour un matériau isotrope en raison de la division par 0 qui peut survenir dans un modèle numérique. Dans ce cas-ci, nous sommes en présence d'un matériau orthotrope, donc nous avons 6 coefficients de Poisson différents. Si on se réfère aux équations donnant les termes de la matrice de rigidité, il faut que tous les coefficients aient 0,5 comme valeur pour qu'on obtienne une valeur indéterminé [54]. Toutes les équations contiennent une constante Δ et, si on observe l'équation (1), c'est cette constante qui peut être nulle. Puisqu'elle se trouve au dénominateur pour toutes les autres équations, c'est ce terme qu'on doit surveiller. Dans notre cas, un seul coefficient de Poisson vaut 0,5, donc on évite ce problème.

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21} - \nu_{23} \cdot \nu_{32} - \nu_{13} \cdot \nu_{31} - 2 \cdot \nu_{21} \cdot \nu_{32} \cdot \nu_{13}}{E_1 \cdot E_2 \cdot E_3} \tag{1}$$

3.3 Modèles à géométrie variable

Connaissant les échantillons fabriqués par Delastek, nous savons exactement quelles dimensions fournir au modèle d'éléments finis. De plus, dans le but d'optimiser l'échantillon, il faut construire le modèle dans COSMOS/M de façon à permettre de le modifier facilement et rapidement. Pour ce faire, il faut définir chaque dimension à l'aide d'une variable. On utilise les paramètres tels que définis dans les section 2.4.2 et 2.5.1, soit « w » pour la largeur, « l » pour la longueur de recouvrement, « t » pour l'épaisseur de l'adhérent, « ta » pour l'épaisseur de l'adhésif, « ltot » pour la longueur d'un adhérent, « dtige » pour le diamètre de la tige du rivet, « dtete » pour le diamètre de la tête du

rivet, « ddef » pour le diamètre de la partie déformée du rivet, « dwasher » pour le diamètre extérieur de la rondelle, « hwasher » pour l'épaisseur de la rondelle, « htete » pour l'épaisseur de la tête du rivet et « hdef » pour l'épaisseur de la partie déformée du rivet. On définit ensuite chaque point du modèle géométrique à l'aide des coordonnées x, y et z. Les coordonnées sont fonctions des paramètres énumérés précédemment. Une fois les points obtenus, nous pouvons définir chacun des volumes à l'aide de huit points. Plusieurs volumes sont ainsi créés en fonction des différents matériaux et du raffinement requis du maillage.

Le premier échantillon à modéliser est composé des deux adhérents en composite assemblés à l'aide d'un joint de colle. On ajoute ensuite deux autres pièces composites collées pour aligner le plus possible les forces appliquées et éliminer ainsi la rotation du joint. Un modèle typique est montré à la **Figure 29** (l'image n'est pas à l'échelle, donc la colle est volontairement plus épaisse afin de bien la montrer sur la figure). Les adhérents sont en gris et l'adhésif en rose.

Figure 29 : Modèle géométrique d'un joint collé à créer dans COSMOS/M.

La **Figure 30** (l'image n'est pas à l'échelle) montre la répartition des points utilisés pour bâtir le modèle.

Rapport-Gratuit.com

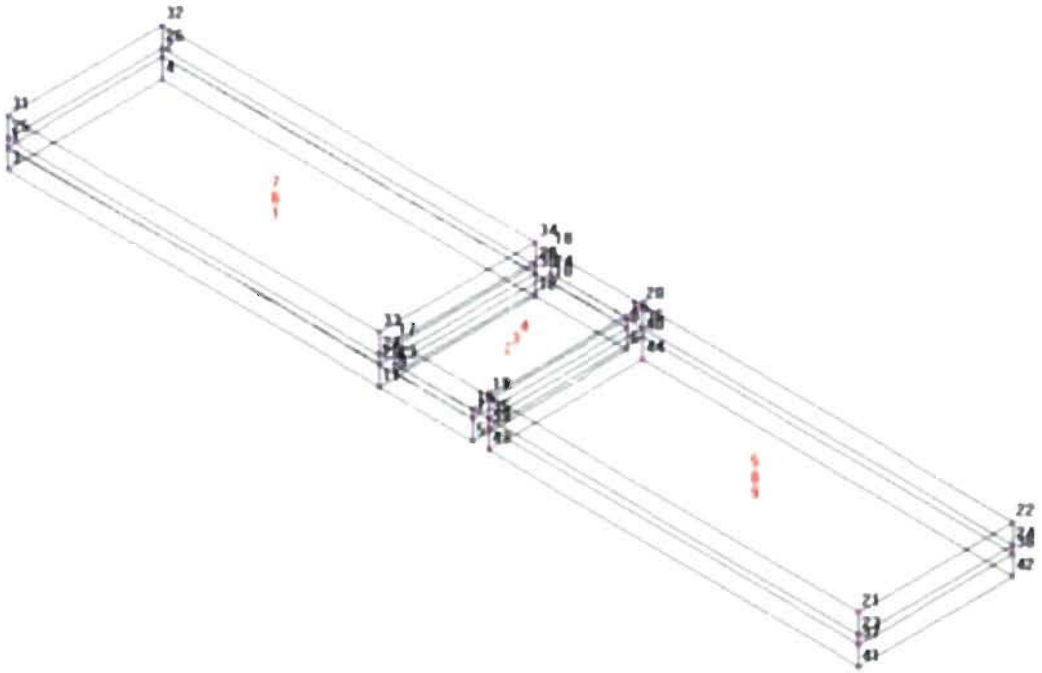


Figure 30 : Position des points pour le modèle collé.

Le deuxième échantillon à modéliser est composé de deux plaques composites à fibres de carbone trouées et d'un rivet. On ajoute deux retailles en composite pour aligner les forces dans l'axe principal de l'échantillon (pour éviter la rotation) comme cela a été fait pour le modèle collé. Un modèle typique est montré à la **Figure 31** (l'image n'est pas à l'échelle). Le composite est en gris et le rivet et la rondelle sont en beige.

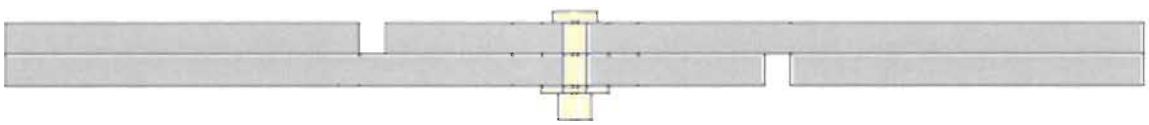


Figure 31 : Échantillon riveté à modéliser dans COSMOS/M.

La **Figure 32** (l'image n'est pas à l'échelle) montre la répartition des points utilisés pour bâtir le modèle.

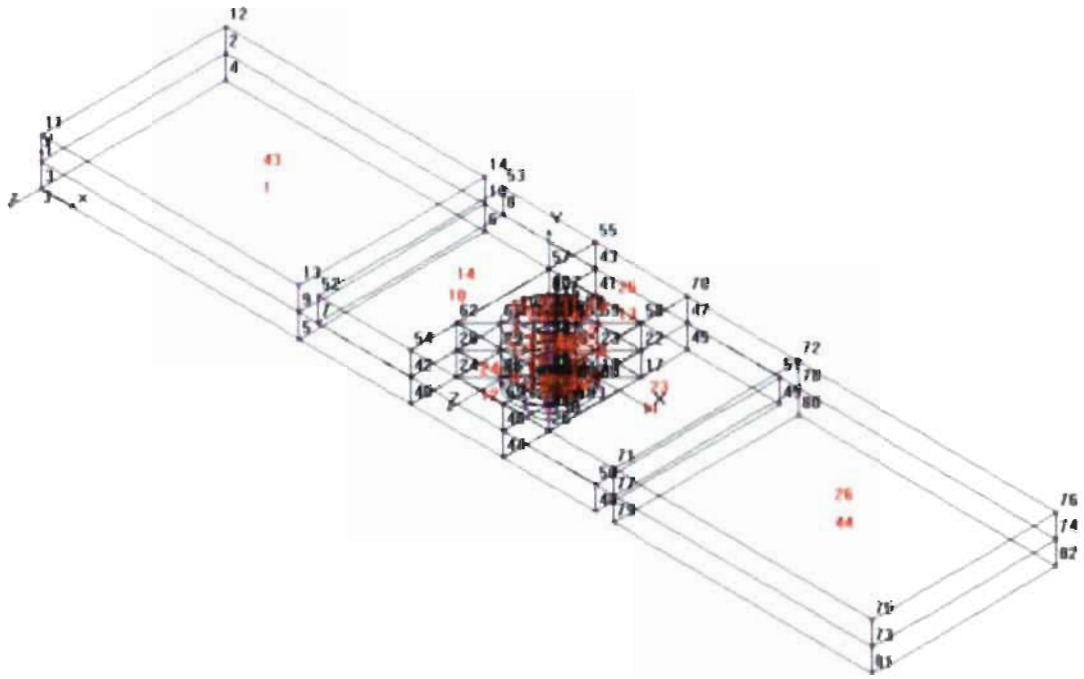


Figure 32 : Numérotation des points pour bâtir le modèle.

Le troisième échantillon à modéliser est composé des deux plaques composites trouées et collées (avec une certaine longueur de recouvrement) et d'un rivet. Un modèle typique est montré à la **Figure 33** (l'image n'est pas à l'échelle). Le composite est en gris, la colle est en rose et le rivet et la rondelle sont en beige.

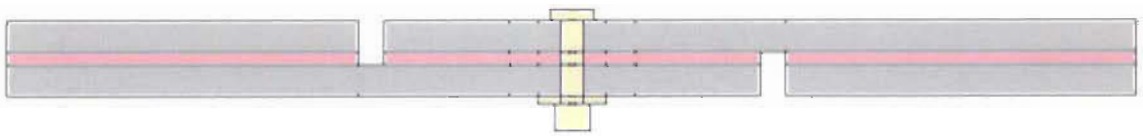


Figure 33 : Échantillon hybride à modéliser dans COSMOS/M.

La **Figure 34** (l'image n'est pas à l'échelle) montre la répartition des points utilisés pour bâtir le modèle.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

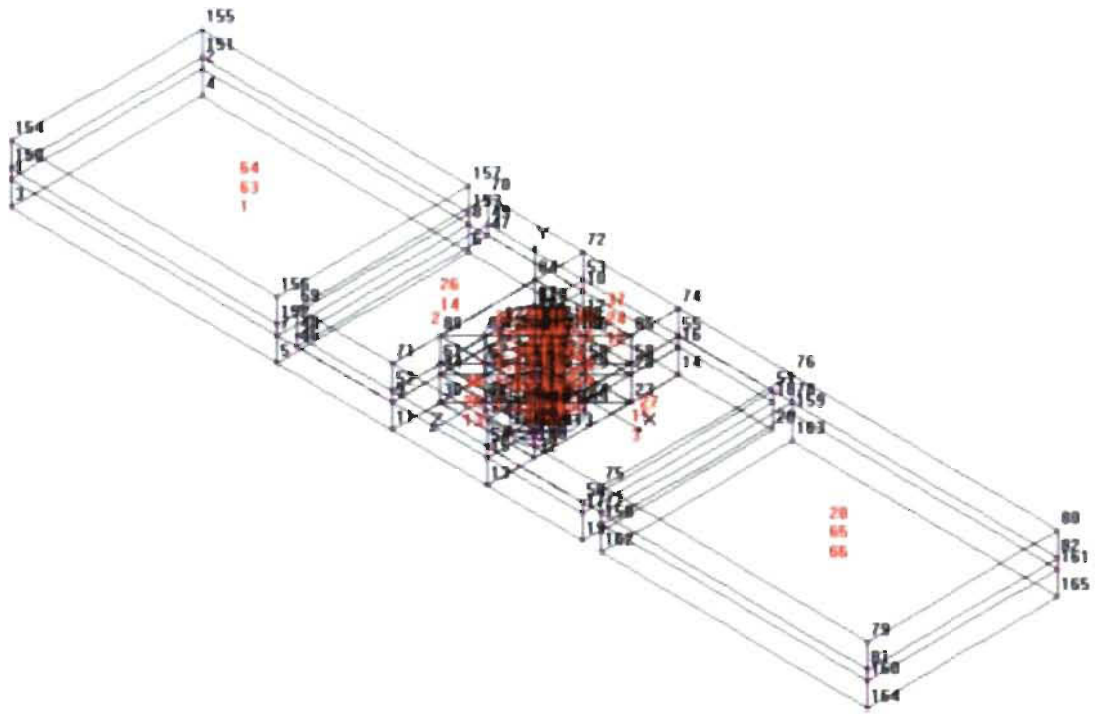


Figure 34 : Numérotation des points pour bâtir le modèle.

3.4 Maillage du modèle

Une fois les modèles géométriques obtenus, il faut les mailler à l'aide d'hexaèdres (éléments à six faces et huit nœuds). La stratégie de maillage varie selon la présence ou non du rivet. Bien que le modèle soit à géométrie variable (pour voir à minimiser le nombre de rivets), il faut autant que possible conserver la taille et la forme des éléments.

3.4.1 Maillage du composite et de la colle

La dimension finale des éléments a été choisie à l'aide d'une étude de convergence (voir **Figure 35**). À partir d'un certain raffinement, les résultats des déplacements des nœuds en x ne changent plus. Cependant, si on poursuit le raffinement, il est possible d'aller chercher avec plus de précision la concentration de contrainte à un endroit précis. Cela a comme conséquence d'augmenter considérablement le temps de l'étude. Le choix de la taille des éléments fait dans les paragraphes suivants proviennent d'un équilibre entre le temps de simulation et la précision des contraintes obtenues. Une fois choisie, la taille des éléments fut maintenue pour tous les modèles afin de minimiser les erreurs de maillage pour l'analyse

comparative des résultats. À la **Figure 35**, la courbe de convergence n'est pas parfaite puisque nous forçons le raffinement dans le joint collé. Un bon algorithme de raffinement laisse le logiciel décider des endroits où le maillage est raffiné et nous donne une courbe plus réaliste. Encore ici cependant, ce genre de considération dépasse largement le cadre de la présente étude et devrai faire l'objet de travaux futurs dédiés à cet aspect.

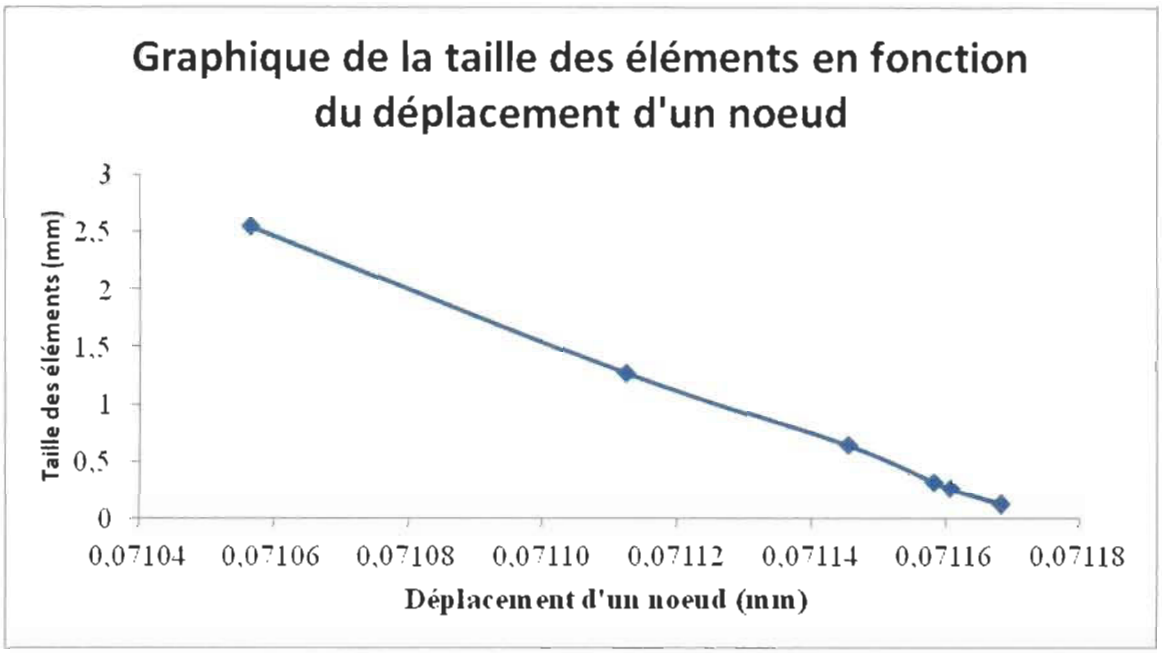


Figure 35 : Graphique montrant l'étude de convergence

Pour le modèle collé, on conserve en z (la largeur) une taille d'élément de 0,1 pouces (2,54 mm). En x (la longueur), on maintien la taille à 0,1 pouces (2,54 mm) loin du joint et 0,05 pouces (1,27 mm) près du joint (**Figure 36**). Finalement, en y (l'épaisseur), on maintien toujours quatre éléments dans le composite et trois éléments dans la colle. Ces choix font aussi en sorte que tous les nœuds vont concorder dans le but de pouvoir éliminer les doublons (lorsque deux nœuds se superposent). La **Figure 36** (l'image n'est pas à l'échelle) montre le résultat.

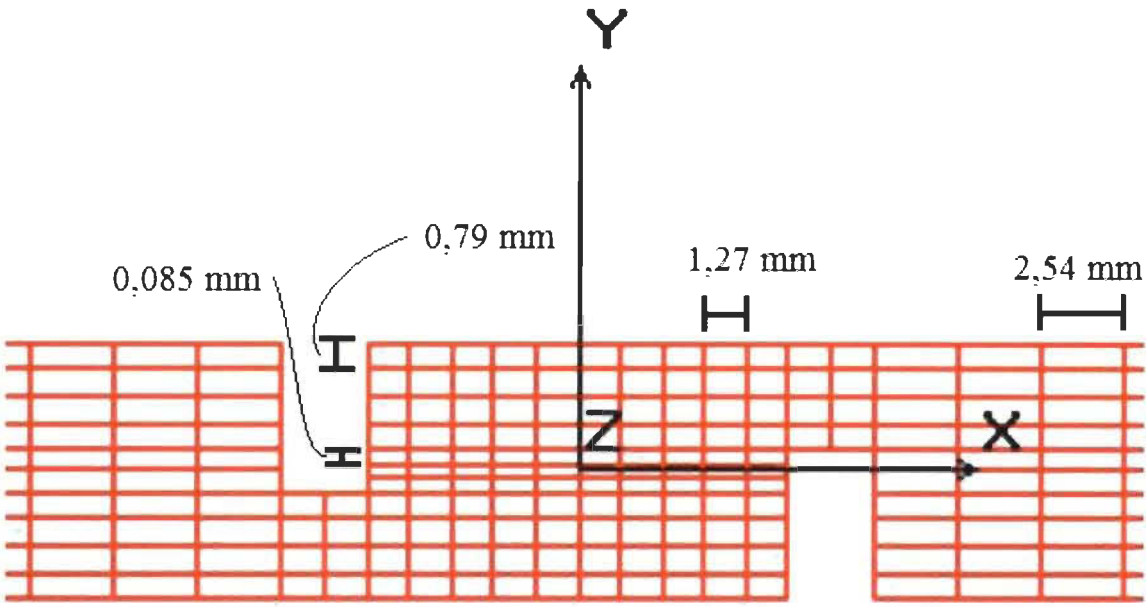


Figure 36 : Maillage du modèle collé.

Pour les modèles riveté et hybride, on conserve en z (la largeur) une taille de 0,05 pouces. En x (la longueur), on contrôle la taille à 0,1 pouces (2,54 mm) loin du joint et 0,05 pouces (1,27 mm) près du joint. En y (l'épaisseur), on veut toujours quatre éléments dans le composite et, lorsqu'il y a de la colle, on a trois éléments dans la colle. Près du trou, il faut utiliser le système de coordonnées cylindriques. Donc, près du trou, on maintien dix éléments par quart de cercle selon θ et un multiple de 1/64 pouces (0,4 mm) selon r. Ces choix font aussi en sorte que tous les nœuds des surfaces qui se superposent vont concorder dans le but de pouvoir éliminer les doublons (lorsque deux nœuds se superposent). Les **Figures 37** à **39** montrent le résultat du maillage dans le composite et dans la colle.

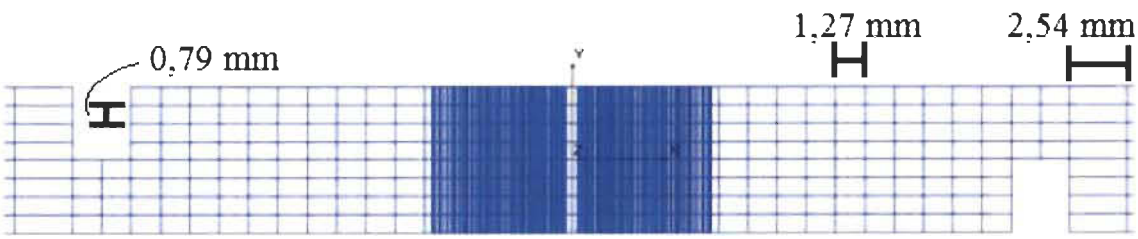


Figure 37 : Maillage des adhérents.

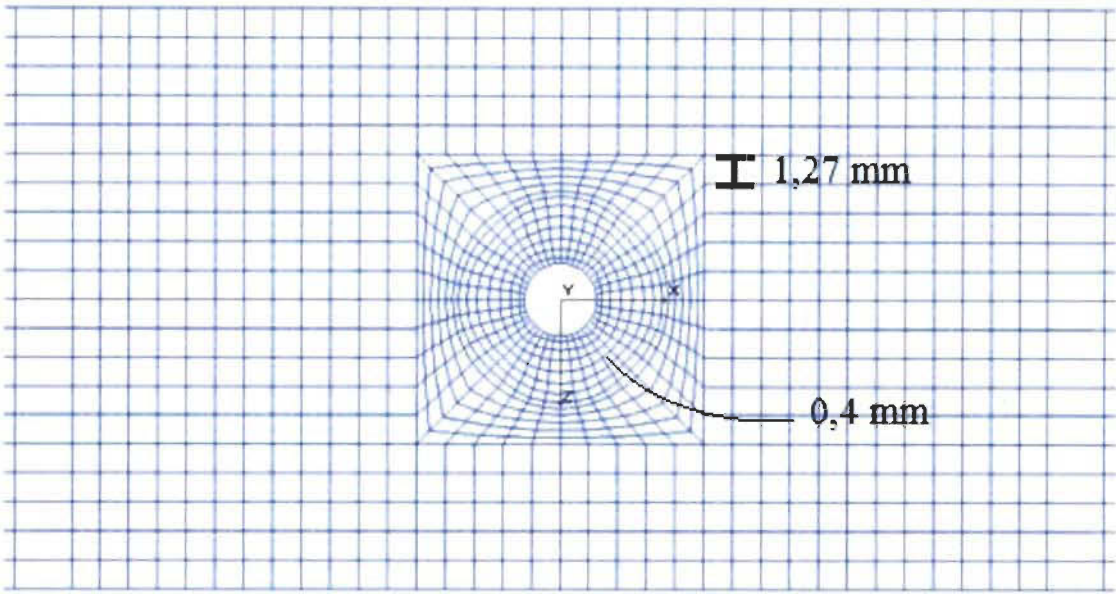


Figure 38 : Maillage de l'adhérent près du trou.

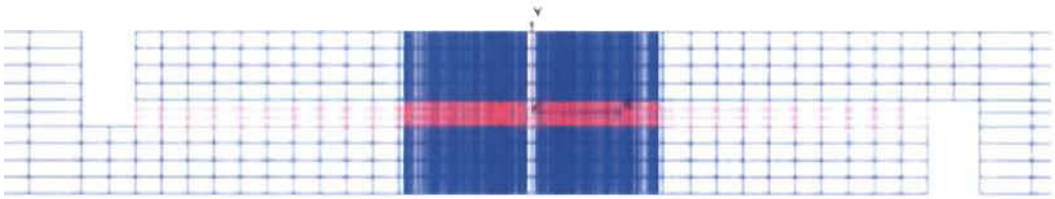


Figure 39 : Maillage des adhérents et de l'adhésif.

3.4.2 Maillage du rivet et de la rondelle

Pour les modèles rivetés et hybrides, il faut mailler le rivet et la rondelle. Le maillage du rivet est un multiple de 1/64 de pouces (0,4 mm) en θ et dix éléments par quart de cercle en r. En y (l'épaisseur), on maintien deux éléments pour la tête du rivet, un élément pour la rondelle et trois éléments pour la partie déformée du rivet. Puisque nous avons deux plaques en composite et la rondelle, il faut donc neuf éléments dans l'épaisseur de la tige du rivet. Si le rivet provient du modèle hybride, il faut douze éléments dans l'épaisseur de la tige pour considérer les trois éléments dans l'épaisseur de la colle. Ces choix font aussi en sorte que tous les nœuds des surfaces qui se superposent vont concorder dans le but de pouvoir éliminer les doublons (lorsque deux nœuds se superposent). Ce principe ne s'applique pas lorsqu'il y a des éléments de contact

puisqu'on veux garder deux nœuds distincts sur les surfaces en contact. Les **Figures 40** et **41** montrent le résultat du maillage.

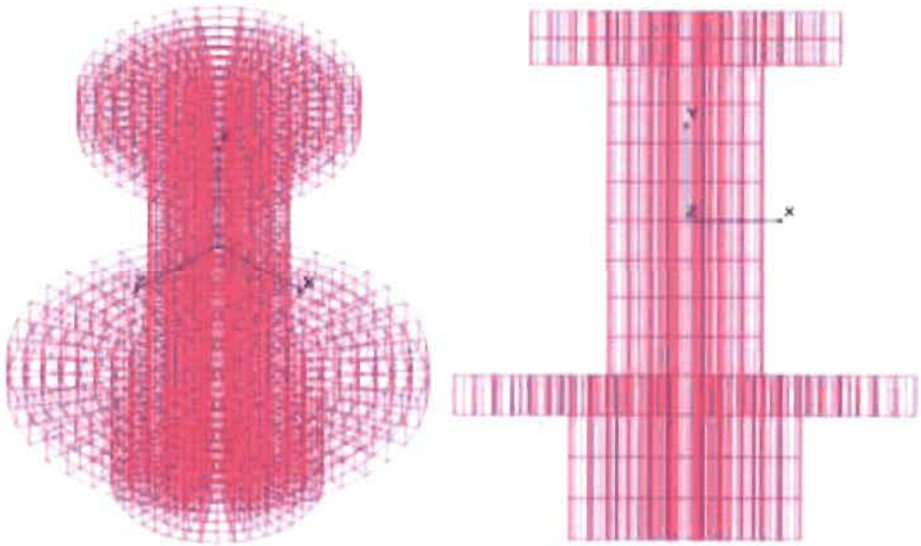


Figure 40 : Maillage du rivet et de la rondelle pour le modèle riveté.

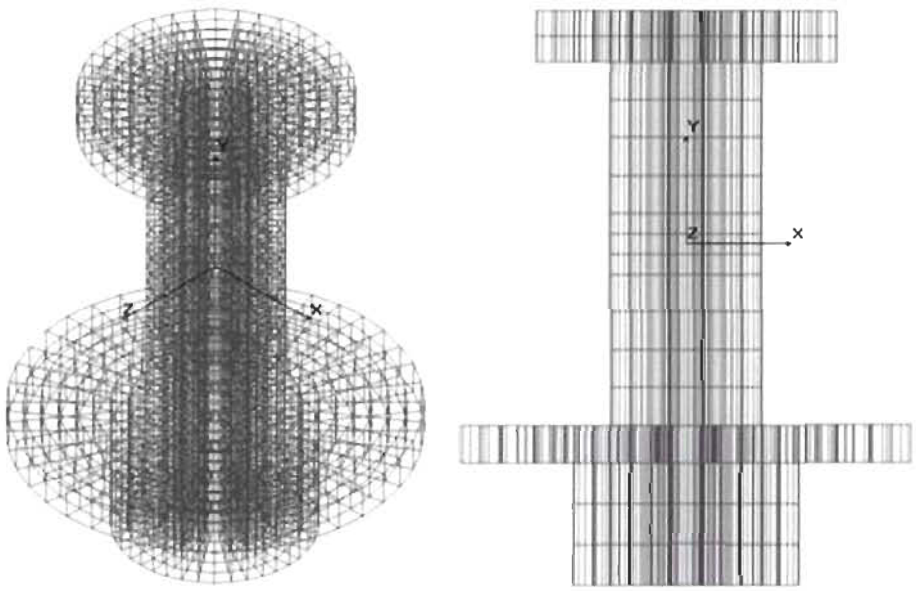


Figure 41 : Maillage du rivet et de la rondelle pour le modèle hybride.

Avec le maillage structuré en quadrilatère, il est impossible de mailler le rivet jusqu'au centre puisque le solveur ne termine pas sa solution si plusieurs éléments en pointe arrivent tous au même nœud au centre du rivet. Pour régler ce problème, un trou

de faible diamètre a été modélisé au centre du rivet. Cette simplification amène un changement dans les résultats par rapport à la réalité (puisque les rivets sont pleins). La rigidité sera différente, donc la contrainte de cisaillement maximale sera différente. En comparant les contraintes dans la colle et dans le rivet, il faudra tenir compte de cette source d'erreur. Ce problème aurait pu être évité en utilisant un maillage non-structuré pour le rivet, tel que mentionné précédemment. Le rivet aurait pu être modélisé au complet, sans trou au centre, et sans risque d'obtenir un Jacobien négatif (le Jacobien doit être positif pour que le solveur fonctionne dans le logiciel d'éléments finis).

3.4.3 Éléments de contact

Pour les modèles rivetés et hybrides, il faut ajouter des éléments de contact aux endroits indiqués à la **Figure 42** pour le modèle riveté et à la **Figure 43** pour le modèle hybride. Ces figures montrent un exemple basé sur la littérature. Dans notre cas, il faut aussi ajouter une rondelle entre l'adhérent inférieur et la partie inférieure du rivet. Cela entrainera une série d'éléments de contact supplémentaire. Il faut utiliser les éléments « gap element » de COSMOS/M entre la tête du rivet et l'adhérent supérieur, entre les deux adhérents (modèle riveté seulement), entre l'adhérent inférieur et la rondelle, entre la rondelle et la partie déformée du rivet, entre la tige du rivet et la partie intérieure du trou des adhérents et entre la tige du rivet et la partie intérieure du trou de la rondelle.

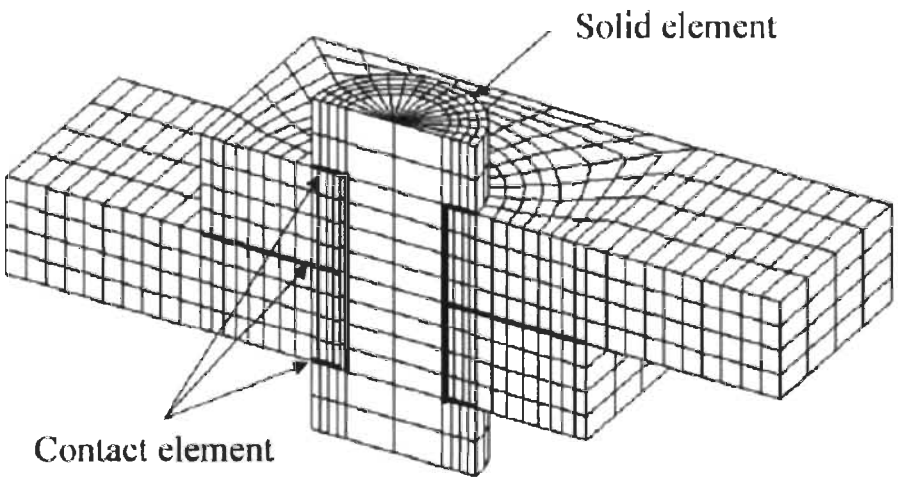


Figure 42 : Éléments de contact pour un joint riveté [45].

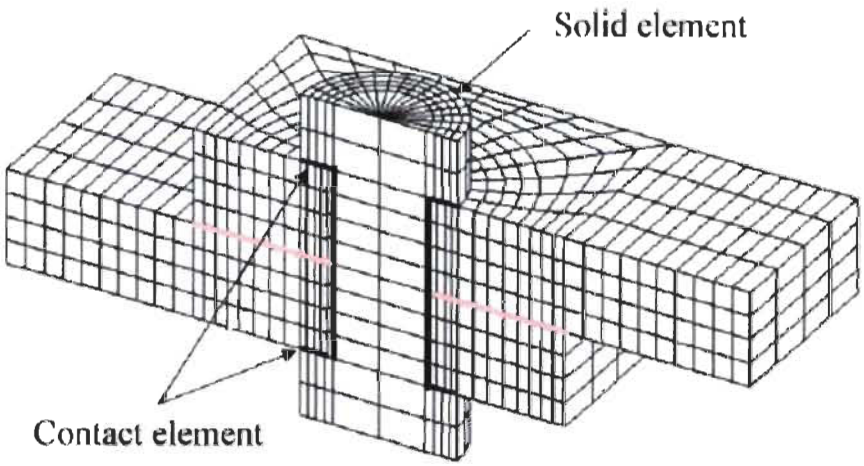


Figure 43 : Éléments de contact de l'échantillon hybride [45].

3.5 Conditions aux rives et degrés de liberté

Puisqu'on simule un essai de traction, il faut bloquer une des deux extrémités du coupon et appliquer une force sur l'autre extrémité. La **Figure 44** (l'image n'est pas à l'échelle) montre le résultat final du modèle collé lorsque tout a été configuré. Pour les faces 1, 31 et 37, on bloque les 6 degrés de liberté. Pour les faces 27, 43 et 49, on bloque les trois rotations, les déplacements en y et les déplacements en z. On ajoute finalement une force en x sur la face 27 en contraignant les faces 43 et 49 pour que les nœuds de ces faces suivent le même déplacement en x que les nœuds de la face 27.

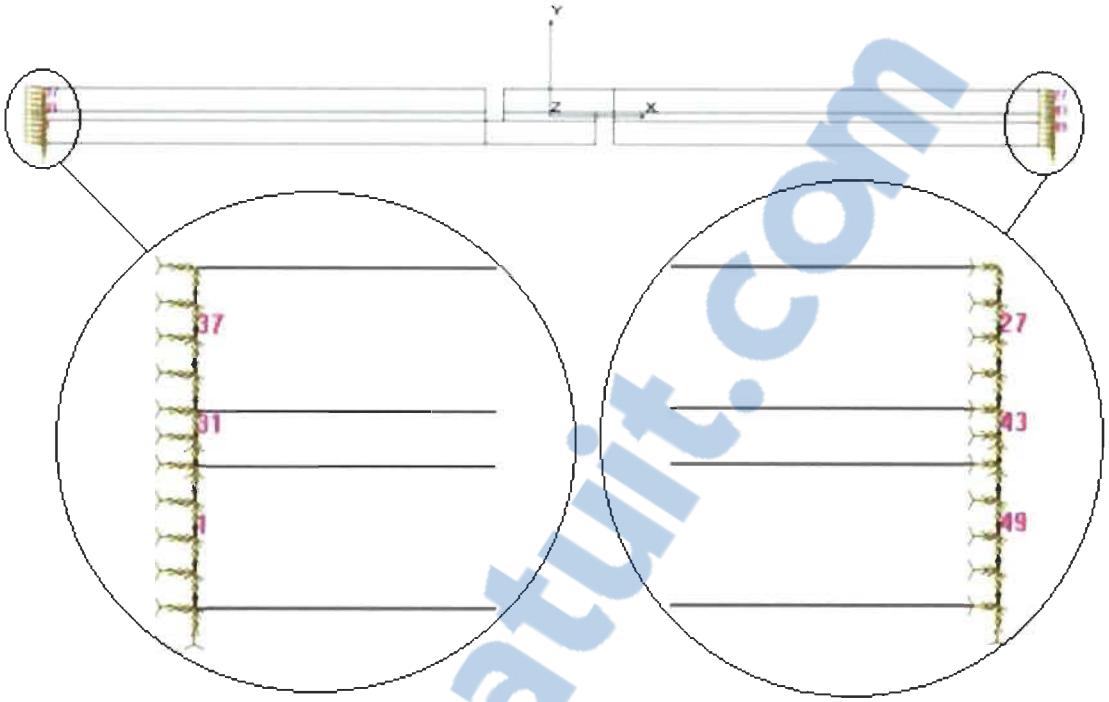


Figure 44 : Modèle contenant les surfaces bloquées et la force appliquée.

Sur l'image ci-dessus, la flèche triple sur les faces 1, 31 et 37 montre que les trois translations sont bloquées. De l'autre côté, la flèche double montre que les translations sont bloquées en y et en z pour les faces 27, 43 et 49. Les flèches grises (très pâles) sur la face 27 représentent la pression appliquée en x. La **Figure 45** (l'image n'est pas à l'échelle) montre le résultat final pour le modèle riveté lorsque tout a été configuré. Pour les faces 1 et 217, on bloque les 6 degrés de liberté. Pour les faces 132 et 224, on bloque les trois rotations, les déplacements en y et les déplacements en z. La face 224 est contrainte de façon à ce que les nœuds de cette surface suivent le déplacement en x des nœuds de la surface 132. Les flèches grises appliquées à la surface 132 représentent la pression appliquée en x. On ajoute une force en x sur la face 132. Il faut aussi ajouter, au besoin, une pression de 0.62 MPa (90 psi) induite par le serrage du rivet.

Rapport-Gratuit.com

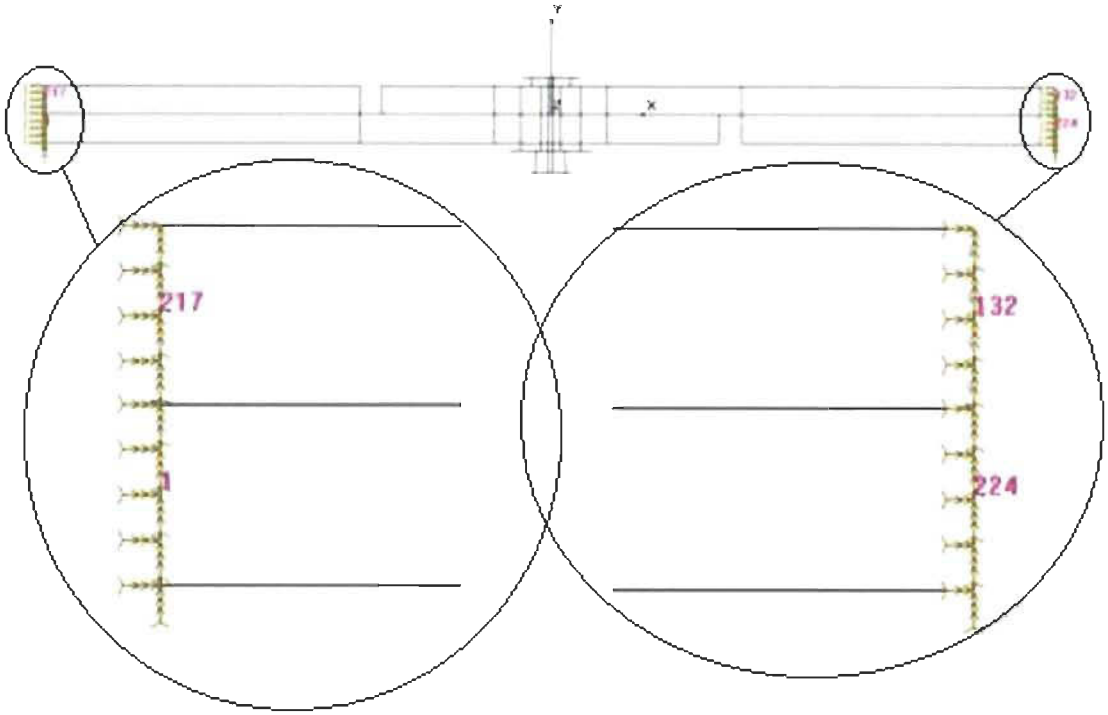


Figure 45 : Modèle contenant les surfaces bloquées et les forces appliquées.

Il est possible d'ajouter des forces de serrage sur le dessus et le dessous du rivet pour simuler l'effet d'un serrage. Cependant, en étude linéaire, cela n'affectera pas le résultat car le frottement ajouté entre les composantes nécessite une étude non-linéaire pour que la force de serrage ait un impact. Cela provient de l'explication à la section 2.5.1 et la **Figure 14**. Puisqu'il n'y a pas de jeu, le comportement du joint riveté commence dans la zone 3. Le frottement influence fortement lorsqu'il y a un jeu et qu'il y a glissement entre les adhérents avant d'obtenir un plein contact. Donc, dans notre situation, l'effet du jeu est minime et il est possible d'obtenir un bon résultat uniquement avec une étude linéaire.

La **Figure 46** (l'image n'est pas à l'échelle) montre le résultat final du modèle hybride lorsque tout a été configuré. Pour les faces 1, 297 et 303, on bloque les 6 degrés de liberté. Pour les faces 132, 310 et 316, on bloque les trois rotations, les déplacements en y et les déplacements en z. On ajoute une force en x sur la face 132. On contraint ensuite les faces 310 et 316 de façon à ce que les nœuds de ces deux faces suivent le déplacement en x des nœuds de la face 132. Il faut aussi ajouter, au besoin, une pression

de 0.62 MPa (90 psi) induite par le serrage du rivet. Comme pour la section traitant le cas du modèle riveté, l'effet de la force de serrage sera important uniquement s'il y a un jeu et si l'étude est non-linéaire.

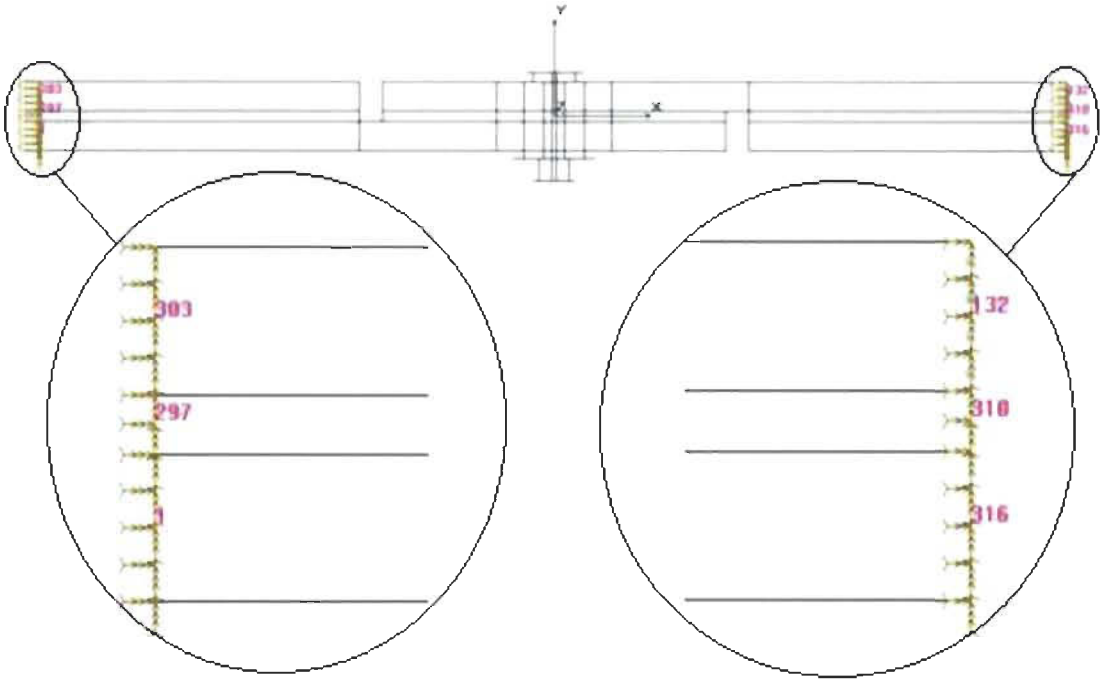


Figure 46 : Modèle hybride contenant les surfaces bloquées et les forces appliquées.

3.6 Résultats

Une fois l'étude linéaire terminée, il est possible d'afficher et d'analyser les résultats individuels des modèles éléments finis collés, rivetés et hybrides.

3.6.1 Résultats du modèle collé

Pour une longueur de composite de 101,6 mm, une largeur d'un pouce, une longueur de recouvrement de 12,7 mm, une épaisseur de colle de 0,254 mm et une épaisseur de composite de 3,170 mm, on obtient les résultats des **Figures 48** et **49** (l'image de la **Figure 49** n'est pas à l'échelle). La **Figure 47** montre le déplacement des nœuds en x. À l'extrémité de l'assemblage, le déplacement maximal en x est de 0,15743 mm pour une force de 3560 N (correspondant à une force de rupture de 800 lbs telle qu'obtenu lors des essais expérimentaux comme nous le verrons plus loin). Pour pouvoir

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

comparer avec les essais expérimentaux discutés au chapitre 4, il faut la courbe force-allongement. C'est ce qui est montré à la **Figure 48**. Celle-ci provient de deux nœuds distancés de 25,4 mm (ce qui correspond à la longueur de l'extensomètre), dont un nœud est situé avant le joint et l'autre après (nœuds 4312 et 9669 sur la **Figure 48**). Il est alors possible de tracer une courbe de la force en fonction du déplacement une fois le déplacement obtenu de ces nœuds.

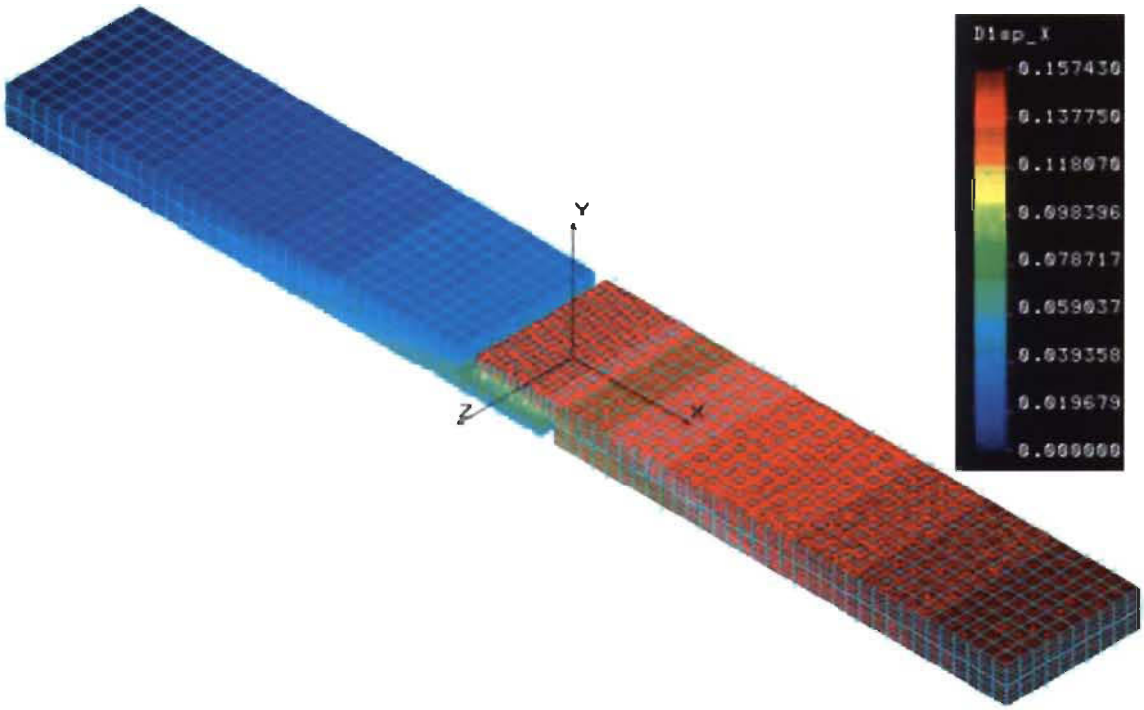


Figure 47 : Déplacements des nœuds en x du modèle collé.

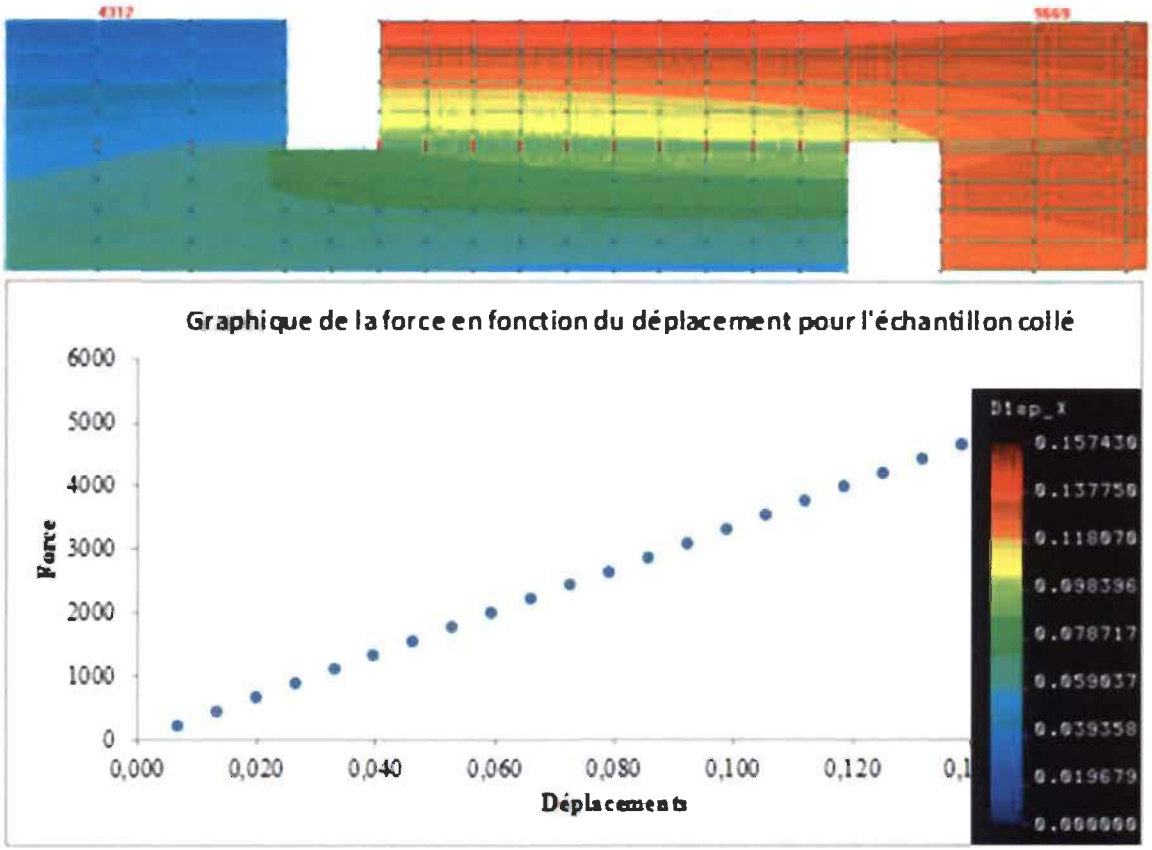


Figure 48 : Graphique de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon collé.

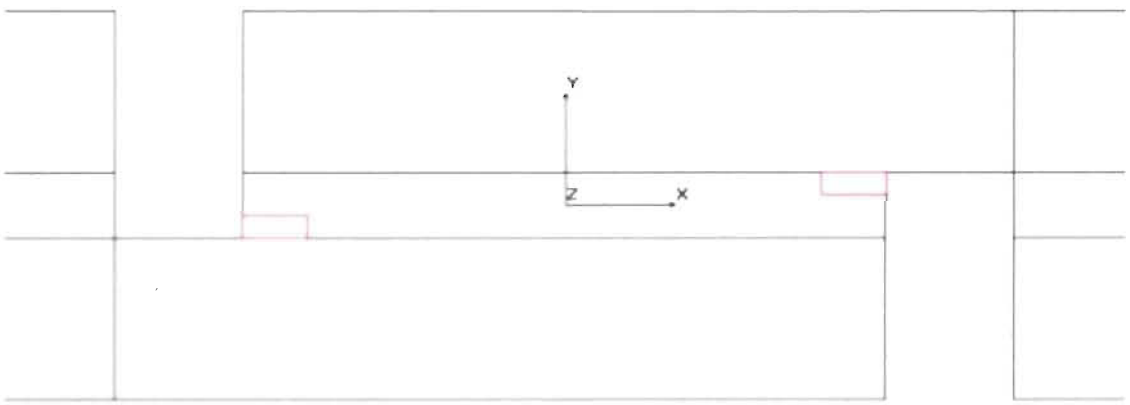


Figure 49 : Position de l'élément le plus sollicité dans la colle.

La **Figure 49** montre les éléments les plus sollicités, dans les coins supérieur droit et inférieur gauche de la colle, causé en grande partie par les efforts hors-plans. C'est à cet endroit que se produira le début de la rupture du joint de colle.

3.6.2 Résultats du modèle riveté

Pour une longueur de composite de 101,6 mm, une largeur de 25,4 mm, une longueur de recouvrement de 38,1 mm, une épaisseur de composite de 3,170 mm et un diamètre de rivet de 3,175 mm, on obtient les résultats des **Figures 50** à **53** La **Figure 50** montre les déplacements en x de chacun des nœuds. Le déplacement maximal au bout du coupon est de 0,121 mm pour une force de 1335 N (correspondant à une force de rupture expérimentale de 300 lbs comme nous le verrons plus loin).

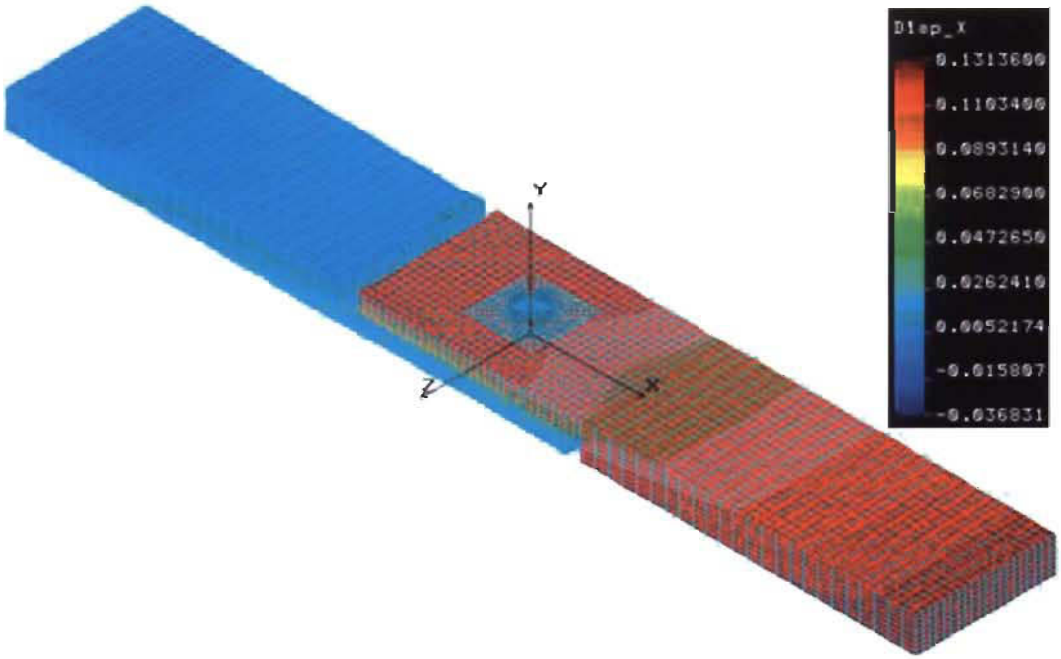


Figure 50 : Déplacements des nœuds en x du modèle riveté.

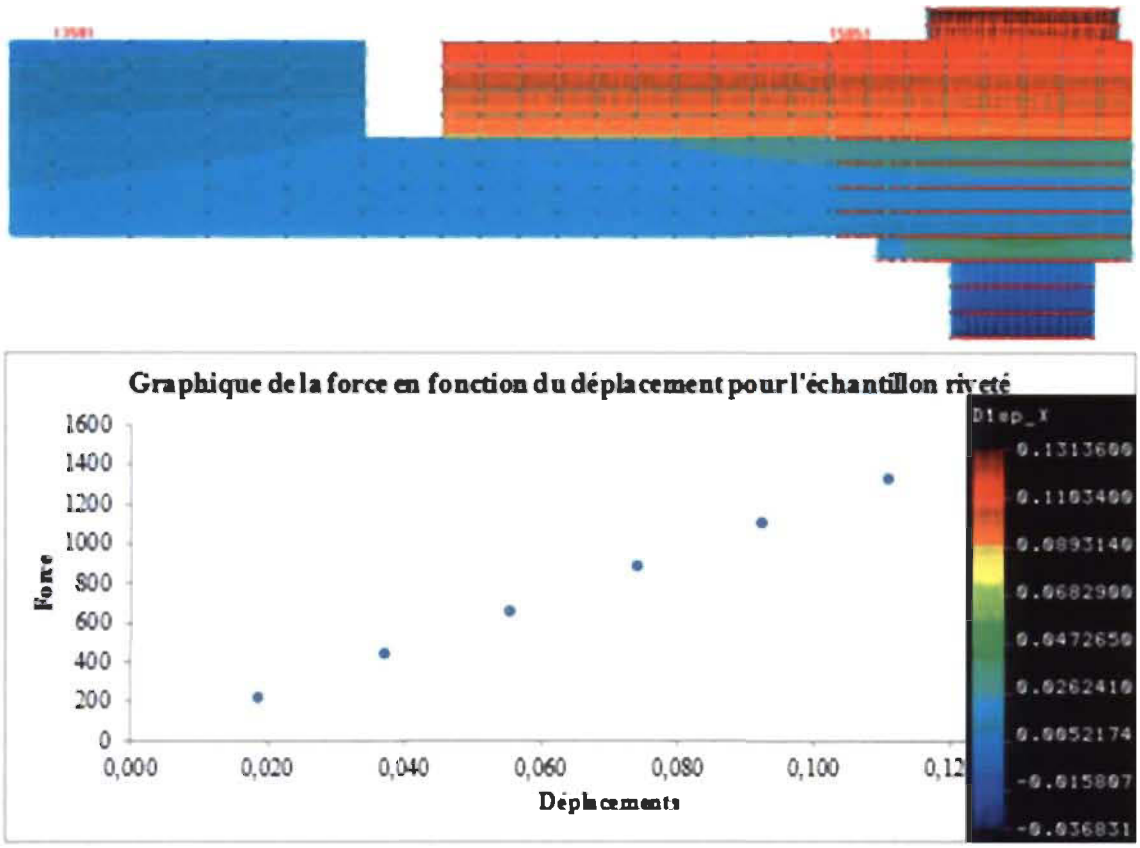


Figure 51 : Graphique de la force en fonction du déplacement pour l'échantillon riveté.

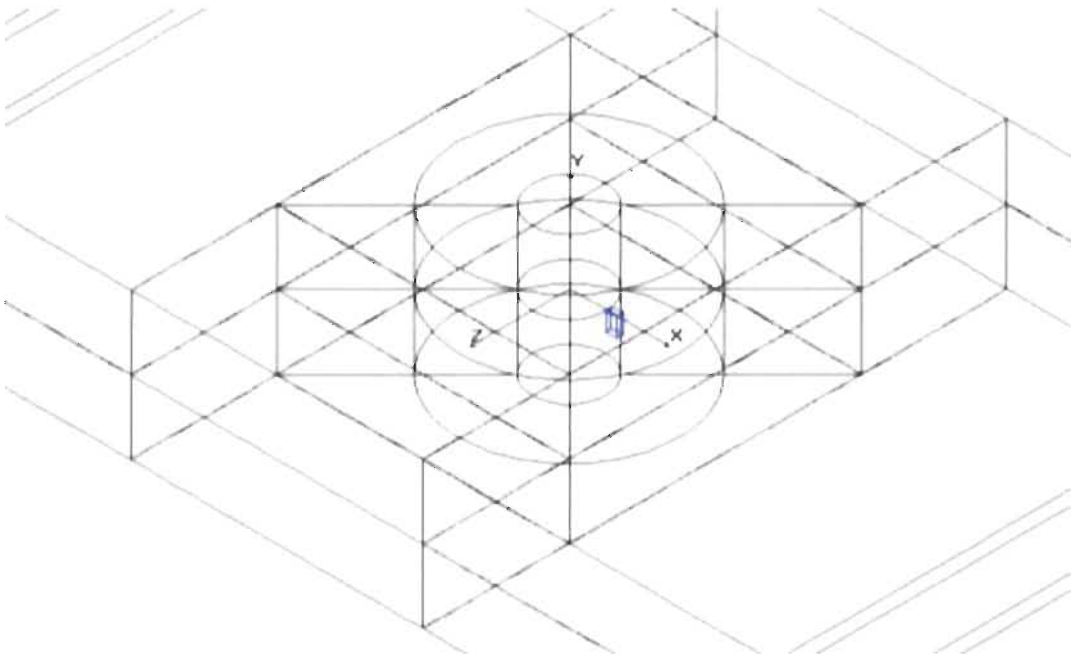


Figure 52 : Position de l'élément le plus sollicité dans le composite.

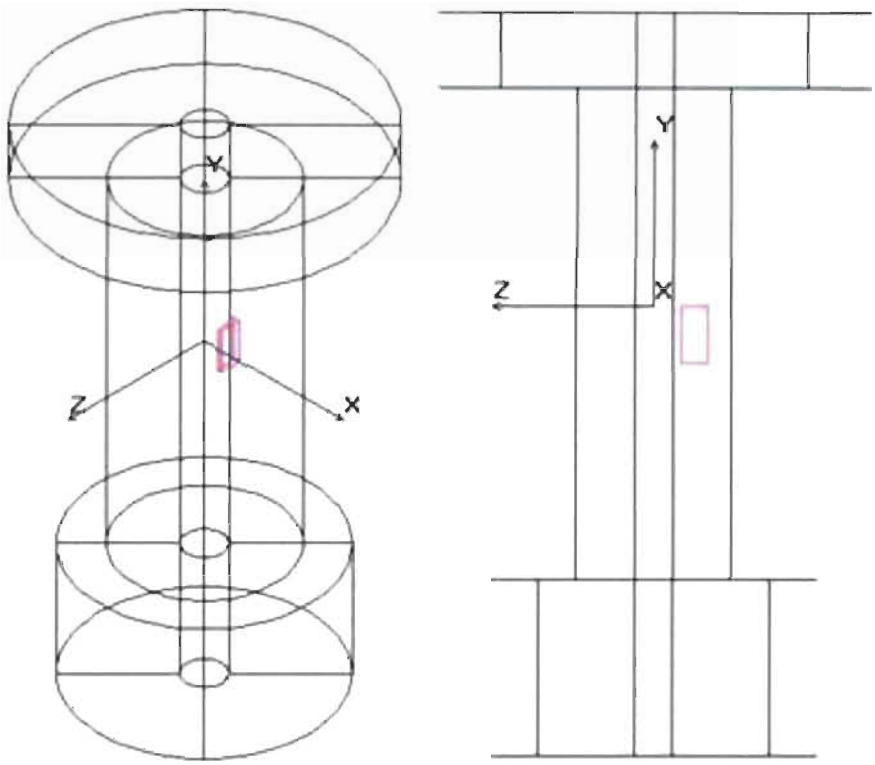


Figure 53 : Position de l'élément le plus sollicité dans le rivet.

Les **Figures 52** et **53** montrent respectivement les éléments les plus sollicités dans le composite et dans le rivet lors de l'application d'une charge. Dans le composite, le bord du trou devrait commencer à écraser à l'élément le plus sollicité. Dans le rivet, c'est à cet endroit qu'aura lieu le début de la rupture en cisaillement par déformation plastique de la matière.

3.6.3 Résultats du modèle hybride

Pour une longueur de composite de 101,6 mm, une largeur de 25,4 mm, une longueur de recouvrement de 38,1 mm, une épaisseur de composite de 3,170 mm, une épaisseur de colle de 0,254 mm et un diamètre de rivet de 3,175 mm on obtient les résultats des **Figures 54** à **58** (Les **Figures 56** à **58** ne sont pas à l'échelle). La **Figure 54** montre le déplacement des nœuds en x. Le déplacement maximal à l'extrémité de l'échantillon est de 0,0999 mm pour une force de 2670 N (force de 600 lbs correspondant à un point un peu avant la fin de la linéarité du comportement). Pour comparer ce résultat avec les essais expérimentaux, il faut créer une courbe de traction.

Pour ce faire, on regarde le déplacement entre deux nœuds séparés selon x de 25,4 mm l'un de l'autre, comme pour les cas précédents, le premier nœud se trouvant à l'extérieur du joint alors que le deuxième se situe sur le joint, les deux points correspondant à la position des tiges de l'extensomètre utilisé lors des essais discutés plus loin. La **Figure 55** montre ce résultat avec les numéros des deux nœuds utilisés.

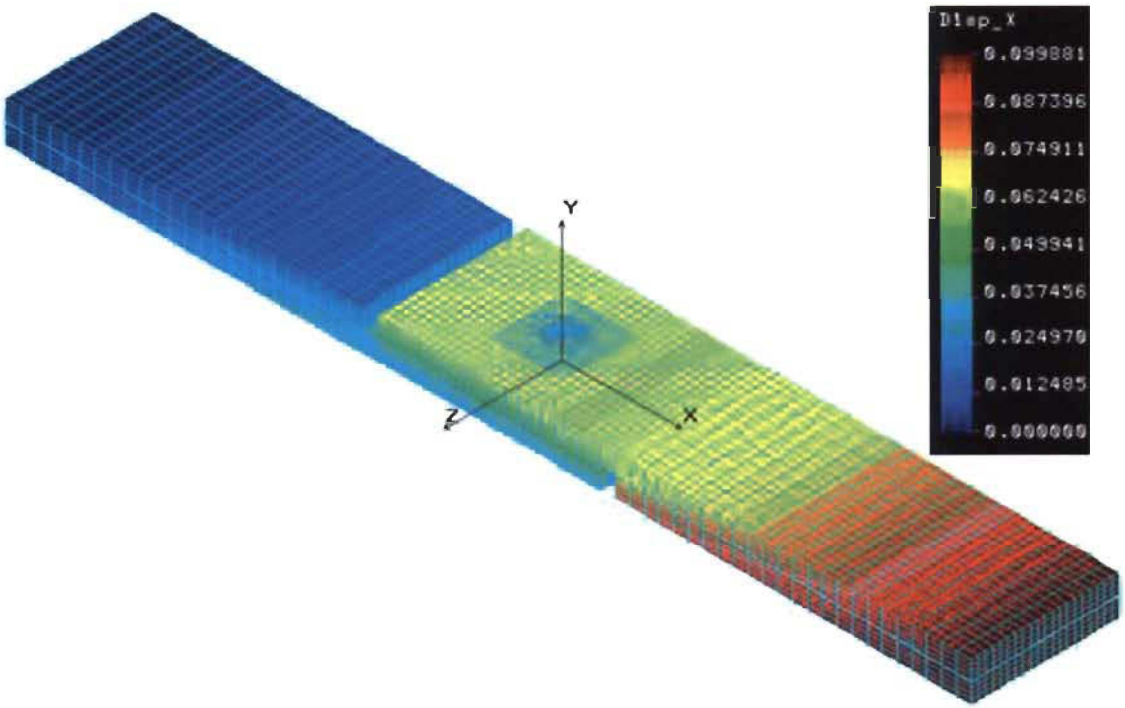


Figure 54 : Déplacements en x des nœuds de l'échantillon hybride.

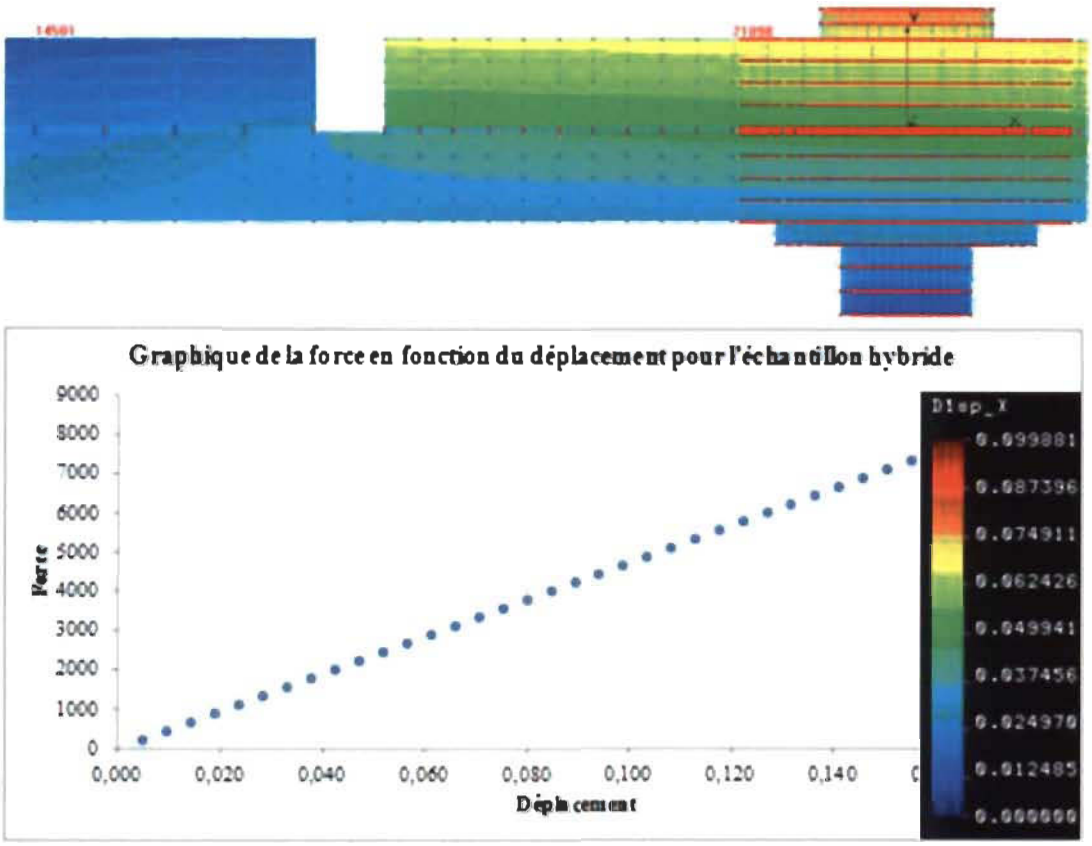


Figure 55 : Courbe de traction pour l'échantillon hybride.

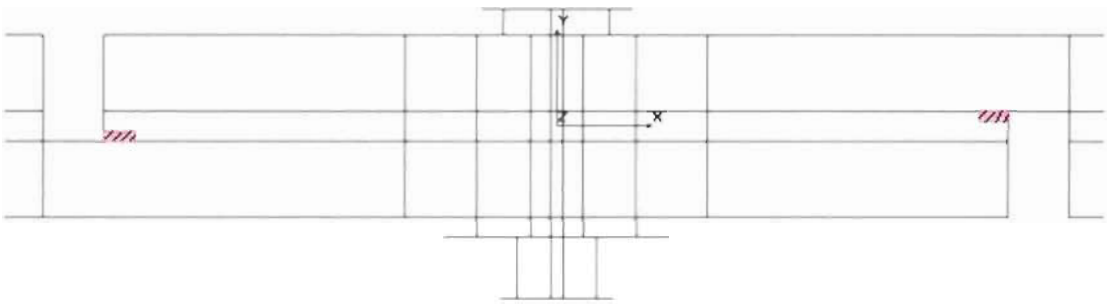


Figure 56 : Position de l'élément le plus sollicité dans la colle.

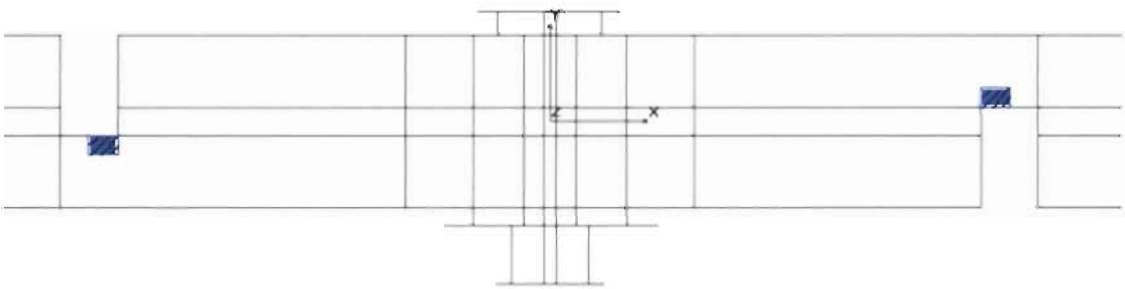


Figure 57 : Position de l'élément le plus sollicité dans le composite.

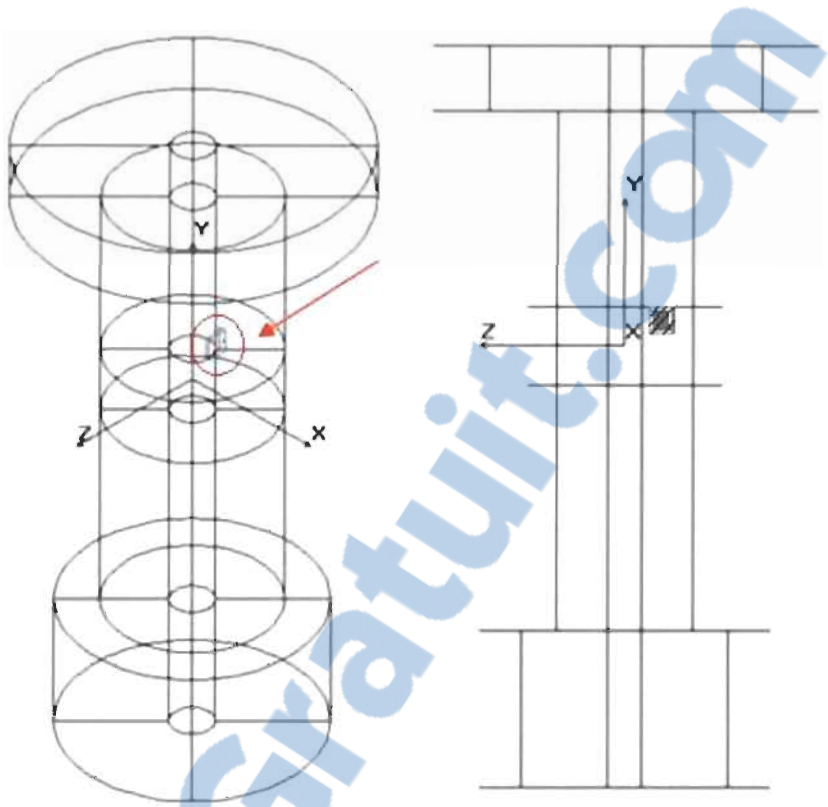


Figure 58 : Position de l'élément le plus sollicité dans le rivet.

Les trois dernières figures (**Figures 56** à **58**) montrent les éléments les plus sollicités dans le rivet, la colle et le composite lors de l'application d'une charge. La **Figure 59** montre la répartition des contraintes dans la pièce. On remarque une assez bonne symétrie entre les adhérents. La différence peut être causée par la dissymétrie du rivet (tête versus rondelle). Des analyses plus poussées, dépassant largement le cadre de ce travail, seraient nécessaires à ce sujet. On voit aussi que les extrémités de la colle sont les éléments les plus sollicités. Pour le composite, contrairement au résultat obtenu dans le joint riveté, la contrainte maximale n'est pas près du trou puisque la colle retient les plaques et atténue la pression de contact rivet-trou en bordure du trou. Cela veut dire que, pour le type de rivet choisi (aluminium), on ne considère pas la contrainte limite dans le composite puisqu'on sait que, lorsqu'il y a rupture du rivet, on est encore loin de la limite du composite près du trou. Dans le rivet (**Figure 58**), c'est à cet endroit qu'il y aura le début de la rupture en cisaillement par écoulement plastique.

Rapport-Gratuit.com

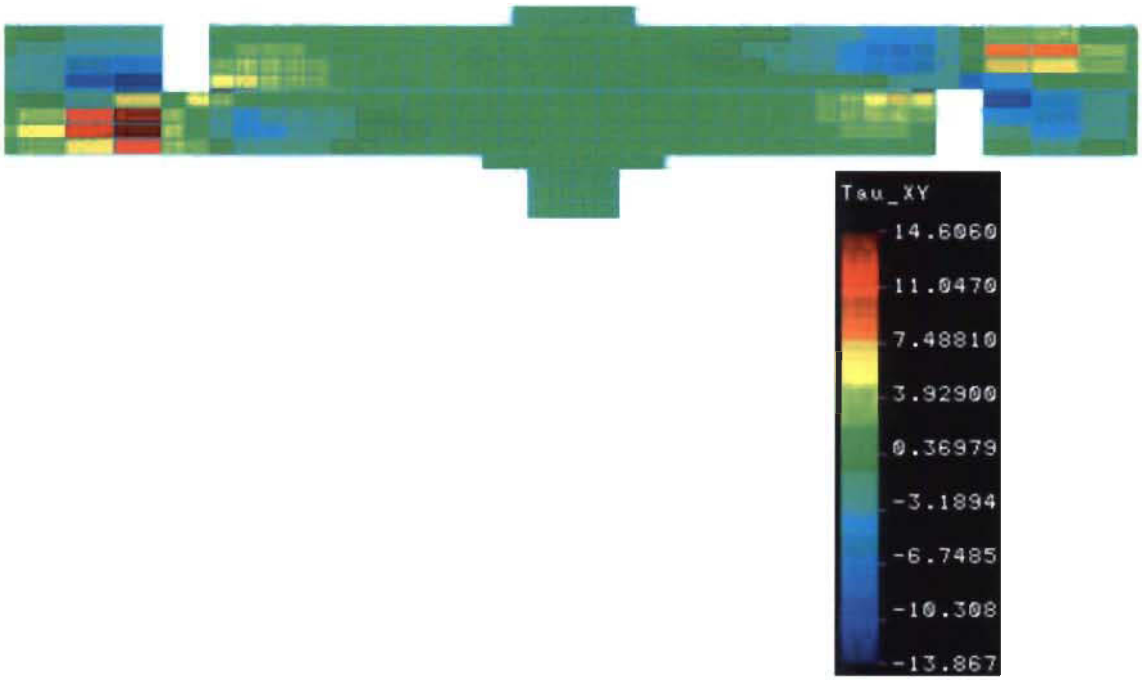


Figure 59 : Contraintes de cisaillement d'un joint hybride.

Chapitre 4 : Essais expérimentaux

Ce chapitre décrit la procédure utilisée pour réaliser les essais expérimentaux de traction sur les échantillons décrits dans les modèles du chapitre précédent. Les essais sont réalisés dans les laboratoires de Delastek, sur des matériaux couramment utilisés par la compagnie et ciblés pour ce projet. Les résultats obtenus seront utilisés pour comparer et valider les modèles.

4.1 Définition des échantillons à fabriquer

Il faut d'abord définir les dimensions des échantillons. La **Figure 60** montre une vue de côté d'un joint hybride (collage et rivetage), où L est la longueur de l'adhérent (plaque composite) qui dépasse du joint, b la longueur de recouvrement du joint, t_a l'épaisseur de l'adhésif, t l'épaisseur de l'adhérent, D le diamètre de la tête de la fixation mécanique et d le diamètre de la fixation à l'intérieur du trou. Nous devons aussi considérer la largeur w de l'échantillon, comme troisième dimension des plaques, laquelle sera importante pour évaluer l'influence du nombre de rivets sur les rigidités et résistances d'un joint hybride. L'angle produit par le surplus de colle est normalement de 45°, mais il est possible de retirer ce surplus et considérer un angle de 90°, ce qui fut fait lors de la préparation des échantillons (d'où les modèles éléments finis hybrides avec la colle à 90°).

Les paramètres intéressants à faire varier dans le modèle sont l'épaisseur de la colle t_a, la longueur de recouvrement b, la largeur w et le diamètre d du trou. Cependant, de par la difficulté à faire approuver de nouveaux matériaux dans le domaine aéronautique, l'épaisseur de la colle et le diamètre du rivet sont préétablis et il n'y aura pas possibilité d'en utiliser d'autres que ceux fournis. Cela veut dire que le diamètre du trou et l'épaisseur du joint de colle seront maintenus constants. Cependant, il sera possible d'enlever l'un ou l'autre des éléments d'assemblage (colle ou rivet) pour

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

évaluer l'influence respective de la colle ou du rivet pris séparément. Donc, il restera uniquement la longueur de recouvrement b et la largeur du joint w à faire varier librement pour optimiser le joint en termes de nombre de rivets requis pour maintenir l'efficacité de transfert des charges. Il sera possible de faire varier les autres paramètres à titre de recommandations seulement.

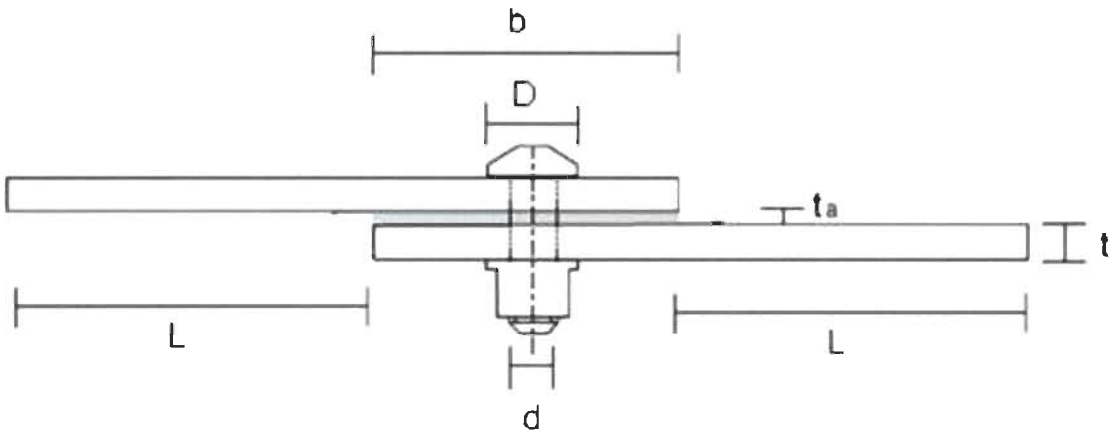


Figure 60 : Modèle dimensionnel.

Les dimensions utilisées dans les modèles éléments finis correspondent à celles des échantillons utilisés chez Delastek pour les expériences de rivetage et de collage. Les paramètres des échantillons avec rivet sont montrés à la **Figure 61** et dans le **Tableau 9**. Il y a deux types de rivet, soit NAS1399 C4-3 (pour un laminé à 4 plis) et NAS1399 C4-4 (pour un laminé à 8 plis). Pour tous les essais expérimentaux, en raison de la disponibilité des matériaux, le rivet solide MS20470AD4-9 fut utilisé.

Tableau 9 : Paramètres dimensionnels d'un échantillon riveté.

Épaisseur d'adhérent t, po (mm)	0,055 ± 0,010 (1,400 ± 0,254) (4 couche) 0,115 ± 0,010 (2,921 ± 0,254) (8 couches)
Longueur de recouvrement L, po (mm)	1,500 ± 0,100 (38,100 ± 2,540)
Largeur de l'échantillon w, po (mm)	0,560 ± 0,030 (14,224 ± 0,762)
Diamètre de la tige du rivet d, po (mm)	0,128 ± 0,010 (3,251 ± 0,254)
Diamètre de la tête du rivet D, po (mm)	D = 0.225 ± 0,010 (5,715 ± 0,254)

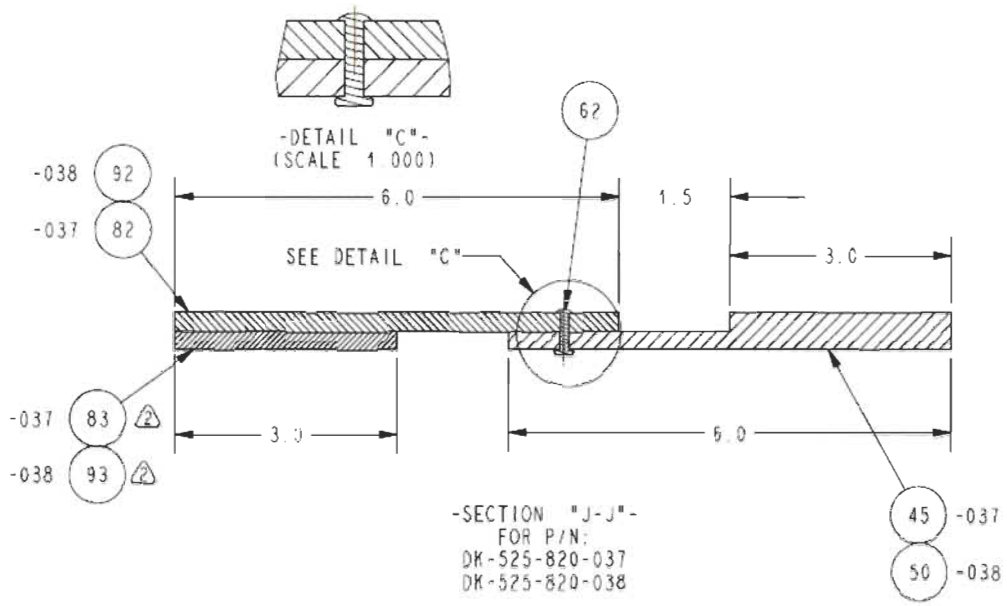


Figure 61 : échantillon riveté.

Les dimensions requises des échantillons collés sont montrées à la **Figure 62** et dans le **Tableau 10**. L'épaisseur de la colle est contrôlée à partir du volume des microbilles de verre ajoutées dans le mélange de colle époxy. Celles-ci avaient un diamètre moyen de 0,005 po (0,127 mm). Cependant, nous utiliseront 0,010 po (0,254 mm) puisqu'en pratique, nous n'obtenons jamais la valeur théorique parfaite. Lors du collage, les billes peuvent se chevaucher, créant ainsi un joint plus épais.

Tableau 10 : Paramètres dimensionnels d'un joint collé.

Épaisseur d'adhérent t, po (mm)	0,250 ± 0,030 (6,350 ± 0,762) (8 plis)
Longueur de recouvrement b, po (mm)	0,500 ± 0,010 (12,700 ± 0,254)
Largeur de l'échantillon w, po (mm)	1,000 ± 0,010 (25,400 ± 0,254)
Épaisseur de la colle t_a, po (mm)	0,005 ± 0,001 (0,127 ± 0,025)

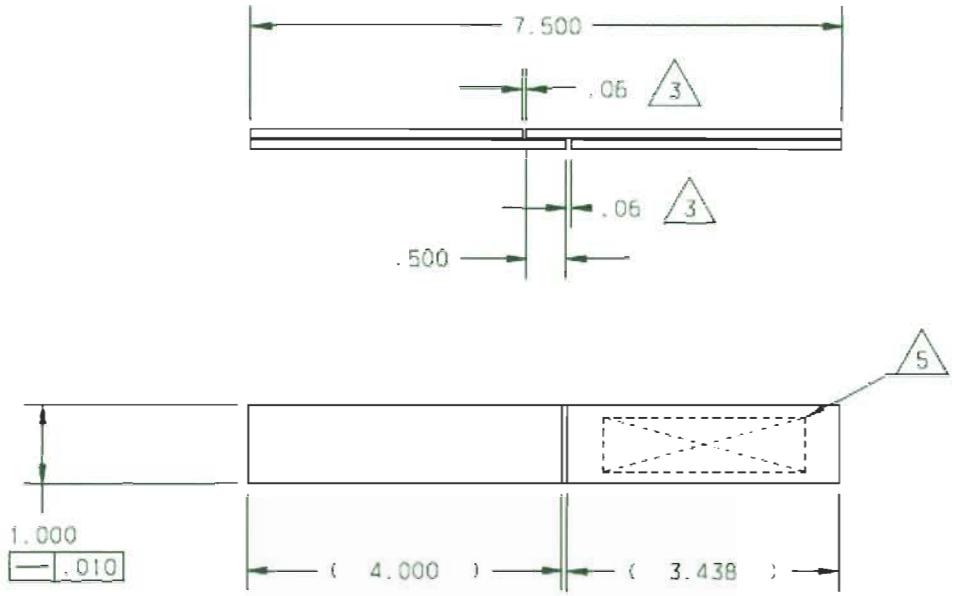


Figure 62 : Échantillon collé.

Un échantillon avec des dimensions très similaires peut être utilisé pour le joint hybride. Il est très important que les modèles par éléments finis aient les mêmes dimensions que les échantillons d'essai puisque l'objectif est de recréer le plus fidèlement possible les courbes expérimentales force-déplacement des joints collés, rivetés et hybrides.

4.2 Choix des matériaux

Les trois échantillons sont fabriqués avec les mêmes matériaux pour obtenir les résultats les plus cohérents possibles d'un essai à l'autre. Il est possible d'avoir un agencement composite-composite ou métal-composite pour les essais (**Figure 63**). Dans les joints étudiés, le composite est fait de fibres de graphite imprégnées d'une matrice phénolique (Class III: 8 Harness Satin Weave Graphite Fabric). Les échantillons ont un pli supplémentaire mince en surface en fibres de verre pour l'aspect esthétique ou pour diminuer les risques de corrosion galvanique entre le carbone et l'aluminium. Cependant, le pli de surface est beaucoup plus mince et en moins grand nombre que ceux en graphite (0,004 po (0,1016 mm) versus 0,0156 po (0,39624 mm), 1 pli versus 8 plis), de sorte qu'il fut négligé dans les modèles éléments finis. Il est possible de faire cette

simplification puisque, par un calcul avec le logiciel « The Laminator », le changement de module lorsqu'on ne considère pas le pli de surface cause une erreur de 1,25%. Il y a deux agencements de matériaux pour les trois types d'assemblage possibles. Donc, pour les joints rivetés, collés et hybrides, il y aura modélisation des agencements composite-composite et métal-composite. Delastek souhaite des résultats pour ces deux agencements, mais seule la première est utilisée dans le cas présent pour développer la méthodologie.

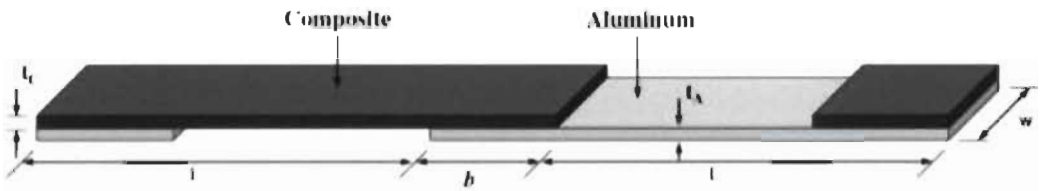


Figure 63 : Modèle avec différents matériaux.

4.3 Montage sur la machine de traction

Les essais sont effectués à la température et humidité de la salle où se trouvent les équipements selon les normes ASTM D5961 et ASTM D3165. Il s'agit de 23 ± 3°C et 30 ±10 % d'humidité relative. Le banc d'essai pour les essais de traction est montré à la **Figure 64**.

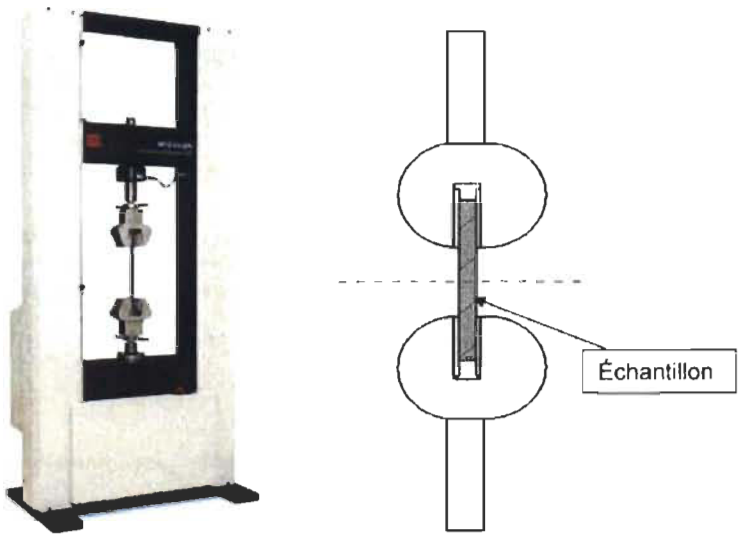


Figure 64 : Illustration du banc d'essai pour les essais de traction.

Selon MIL-HDBK-17B, 85% d'humidité relative est considéré le pire cas en aéronautique au niveau des facteurs environnementaux. Également, selon la fiche technique de l'adhésif, la température maximale admissible est 82°C. Si nécessaire, il est possible d'utiliser une deuxième condition à 65 ± 3°C et 85 ± 10%. Plusieurs configurations des échantillons ont été testées, tel que montré dans le **Tableau 11**.

Tableau 11 : Configuration des spécimens pour les essais de traction.

# de configuration	Adhérent dessus	Adhérent dessous	Type de joint
1	$[0/45/0/45]_s$	$[0/45/0/45]_s$	Collé
2	$[0/45/0/45]_s$	Aluminium	Collé
3	$[0/45/0/45]_s$	$[0/45/0/45]_s$	Riveté
4	$[0/45/0/45]_s$	Aluminium	Riveté
5	Aluminium	$[0/45/0/45]_s$	Riveté
6	$[0/45/0/45]_s$	$[0/45/0/45]_s$	Hybride
7	$[0/45/0/45]_s$	Aluminium	Hybride
8	Aluminium	$[0/45/0/45]_s$	Hybride

On prépare des échantillons des trois types, selon les différentes configurations. Donc, neuf échantillon collés composite-composite (configuration 1), sept échantillons rivetés composite-composite (configuration 3) et 11 échantillons hybrides composite-composite (configuration 6) ont été fabriqués. Certains cas semblent redondants (configuration 4 et 5 par exemple), mais ils ont été inclus puisque la dissymétrie du rivet (tête versus rondelle, voir Figure 58) peut avoir un certain effet sur les résultats. Les autres configurations, qui n'ont pas été évaluées dans le cadre de ce travail, sont tout de même citées puisqu'elles peuvent être utiles selon les besoins de l'entreprise. Avant tout essai, il faut mesurer au millième de pouce près les longueurs de recouvrement, les largeurs et les épaisseurs des deux adhérents de l'échantillon.

On utilise un extensomètre de 25 mm de longueur de jauge pour obtenir le déplacement sur les échantillons. L'extensomètre est positionné de façon à avoir une tige appuyée à l'extérieur du joint et l'autre sur le joint. Dans le cas des échantillons

contenant un rivet, la deuxième tige est placée tout juste avant le rivet. Cette approche s'est avérée valable puisque lors des essais, aucune différence ne fut observée dans les résultats lorsque la tige de l'extensomètre était positionnée tout juste avant ou tout juste après le rivet (avec ou sans chevauchement du rivet). La **Figure 65** montre un exemple de positionnement de l'extensomètre.

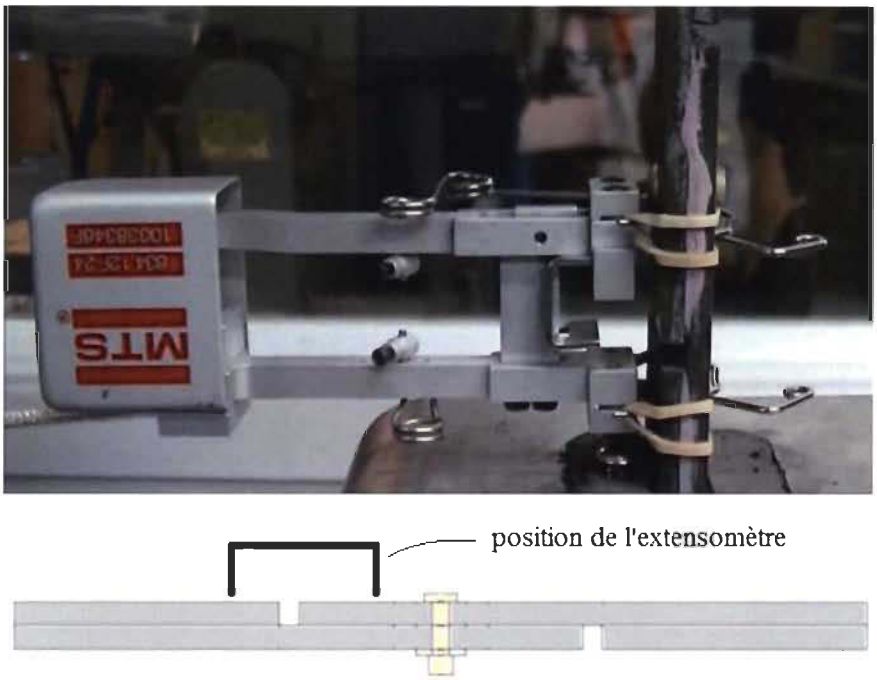


Figure 65 : Positionnement de l'extensomètre.

Avant de débuter l'essai, il faut d'abord mettre la machine en position initiale afin de garantir une distance entre mords uniforme pour l'ensemble des tests. On installe ensuite l'échantillon dans les mords. Il est important de vérifier que l'échantillon sont toujours à la même position pour chaque essai. Une vitesse de déplacement de 0,050 po/min (1,25 mm/min) est appliquée au vérin de traction jusqu'à la rupture de la pièce (ou jusqu'à ce que la force soit redescendue à 30% de la force maximale atteinte). Pendant les essais, la force et le déplacement sont enregistrés en continu (chaque seconde) ou à intervalles réguliers. À la fin de l'essai, la force et le déplacement maximum obtenus de l'échantillon sont enregistrés par le logiciel de TestWorks 4, un logiciel d'acquisition de donnés qui fonctionne avec la machine à traction et l'extensomètre.

4.4 Résultats des essais

Cette section présente les résultats de la force en fonction du déplacement des échantillons. Il y a aussi présentation des modes de rupture ainsi que l'analyse des résultats.

4.4.1 Échantillons collés

Le **Tableau 12** donne les dimensions de tous les coupons collés. Pour ceux-ci, la contrainte se concentre dans la colle, surtout aux extrémités où on obtient des contraintes de pelage, et on observe une légère rotation du joint. La rupture débute dans la colle aux extrémités du joint et se propage ensuite vers le centre. Puisque le recouvrement est court (0,5 pouces (12.7 mm)), la rupture est quasi-instantanée. Le mode de rupture des échantillons est principalement de type cohésif avec un peu de délaminage du premier pli pour quelques coupons. La **Figure 66** montre un échantillon après rupture. On remarque qu'il y a combinaison de deux modes de rupture, soit la décohésion et le délaminage. Il s'agit de deux modes de rupture acceptable selon la section 2.4.3.

Tableau 12 : Dimensions des coupons collés.

Coupons	Largeur, po (mm)	Recouvrement, po (mm)	Épaisseur, po (mm)
C1	1,02 (25,91)	0,55 (13,97)	0,26 (6,67)
C2	1,00 (25,40)	0,56 (14,22)	0,28 (7,09)
C3	1,01 (25,65)	0,57 (14,48)	0,26 (6,58)
C4	1,02 (25,91)	0,56 (14,22)	0,25 (6,45)
C5	1,02 (25,91)	0,54 (13,72)	0,26 (6,53)
C6	1,01 (25,65)	0,57 (14,48)	0,25 (6,44)
C7	1,01 (25,65)	0,57 (14,48)	0,25 (6,45)
C8	1,00 (25,40)	0,50 (12,70)	0,26 (6,63)
C9	1,00 (25,40)	0,48 (12,19)	0,26 (6,52)

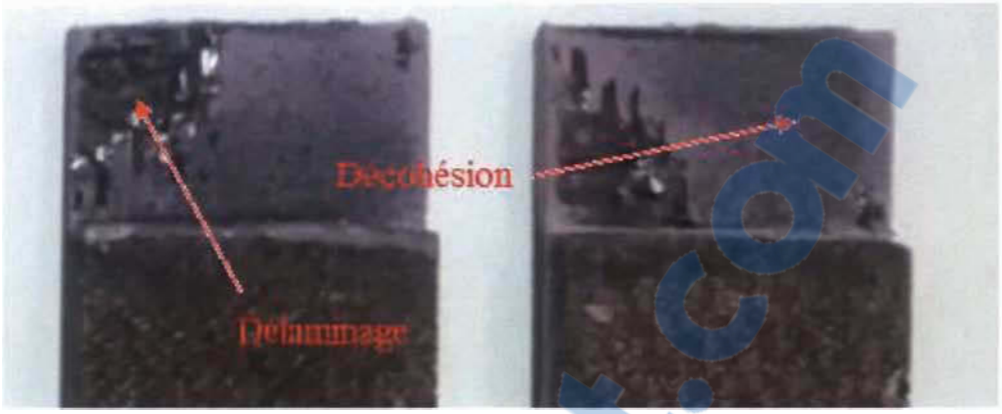


Figure 66 : Échantillons collés après rupture.

La **Figure 67** montre une courbe de traction typique d'un joint collé. Il y a eu rupture de l'échantillon à 4500 N pour un déplacement de 0,135 mm mesuré de l'extensomètre. Jusqu'à environ 1800 N, on remarque un comportement linéaire. À partir de ce point, la décohésion débute et la pente diminue. La **Figure 68** montre les résultats de tous les essais.

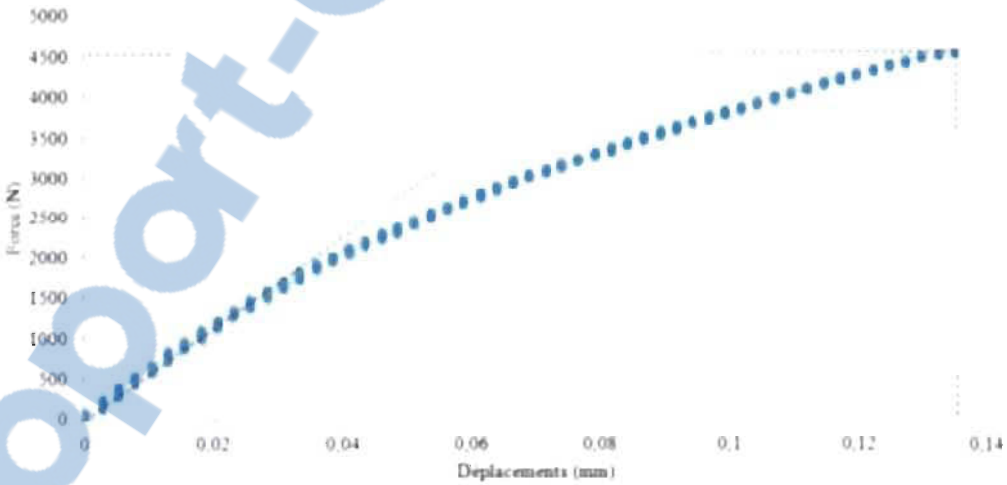


Figure 67 : Courbe typique d'un essaie collé.

Rapport-Gratuit.com

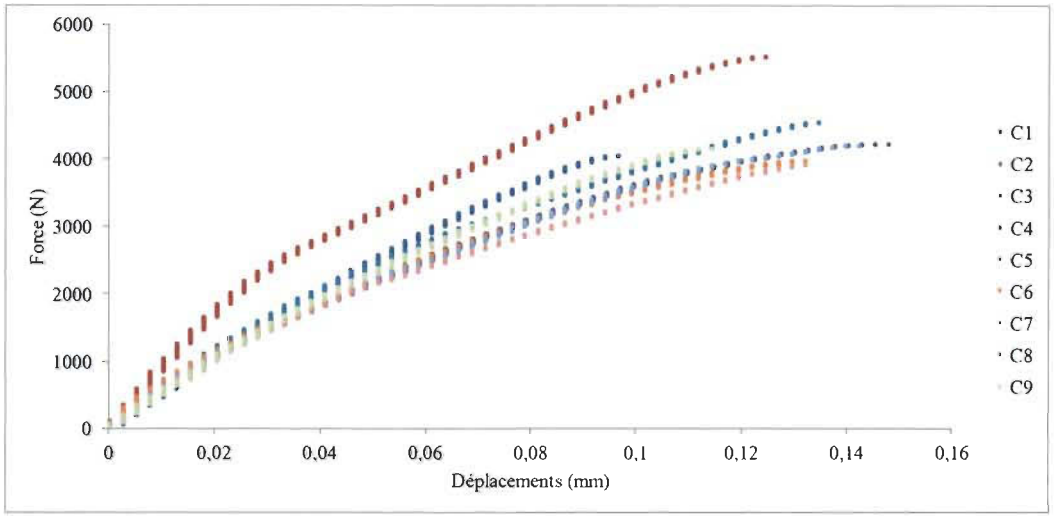


Figure 68 : Courbe de traction des échantillons collés.

Au final, huit des neuf essais se superposent jusqu'à une force d'environ 1750 N (~400 lbf). De par la méthode de fabrication, la colle n'a pas exactement la même épaisseur partout. Cela induit de la non-linéarité pendant l'essai qui varie d'un essai à l'autre tel que montré par les courbes. Donc, plus on s'approche de la limite à la rupture de la colle, plus il y a d'écart entre les courbes. L'essai numéro deux présente une rigidité (pente initiale de la courbe) et une résistance à la rupture beaucoup plus élevés. Cela pourrait s'expliquer par l'épaisseur plus grande du joint de colle par rapport aux autres échantillons (0,030 pouces au lieu de 0,010 pouces). Cet échantillon a été rejeté pour la comparaison avec le modèle d'éléments finis.

4.4.2 Échantillons rivetés

Le **Tableau 13** montre les dimensions de tous les coupons rivetés. Pour ceux-ci, la contrainte se concentre dans le centre du rivet, à la jonction entre les deux adhérents, et en bordure du trou. Il y a aussi une légère rotation du joint pendant l'essai. La tête du rivet se déplace dans la direction de la force alors que c'est le contraire pour le bas du rivet. À partir de 890 N (200 lbf), le rivet commence à se déformer légèrement et, lorsque la déformation du rivet atteint une valeur assez élevée, il y a rupture du rivet en cisaillement. Le reste de la déformation provient du composite. Le mode de rupture est la rupture du rivet et par léger matage du trou du composite.

Tableau 13 : Mesures des coupons rivetés.

Coupons	Largeur, po (mm)	Recouvrement, po (mm)	Épaisseur, po (mm)
R1	1,01 (25,65)	1,50 (38,10)	0,25 (6,45)
R2	1,00 (25,40)	1,50 (38,10)	0,25 (6,35)
R3	1,01 (25,65)	1,50 (38,10)	0,25 (6,30)
R4	1,01 (25,65)	1,50 (38,10)	0,25 (6,38)
R5	1,01 (25,65)	1,50 (38,10)	0,25 (6,36)
R6	1,01 (25,65)	1,50 (38,10)	0,25 (6,36)
R7	1,01 (25,65)	1,50 (38,10)	0,25 (6,34)

La **Figure 69** montre un échantillon typique après rupture. On remarque la rupture en cisaillement du rivet en plein centre du joint. La déformation par matage de la bordure du trou de l'adhérent en composite est minime et négligeable. Le mode de rupture n'est pas celui désiré, soit par matage. Cependant, puisque des rivets en aluminium ont été utilisés, ce résultat était prévu.

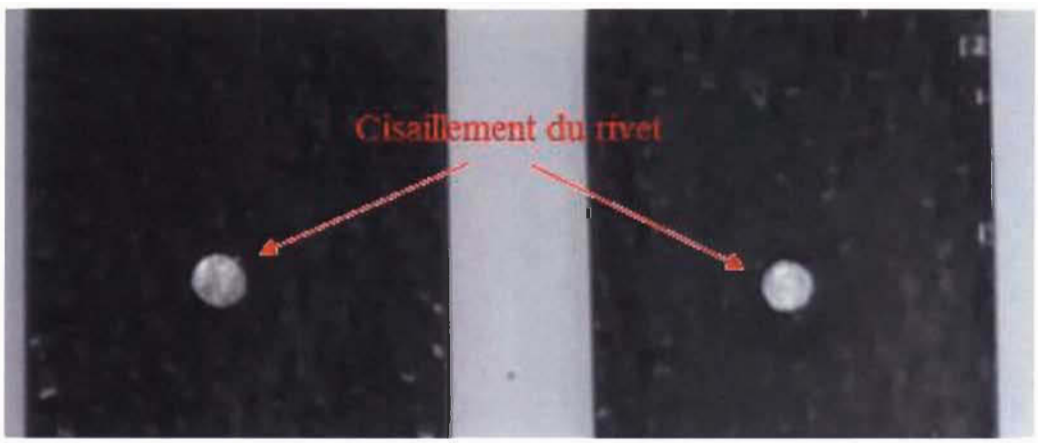


Figure 69 : Échantillons rivetés après rupture.

La **Figure 70** montre une courbe de traction typique d'un essai. On observe la rupture à une force de 1700 N pour un déplacement de 0,75 mm obtenu de l'extensomètre. On remarque que le comportement est linéaire jusqu'à environ 900 N. À

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

partir de ce point, le rivet se déforme plastiquement jusqu'à l'obtention de la rupture. La **Figure 71** montre tous les résultats expérimentaux.

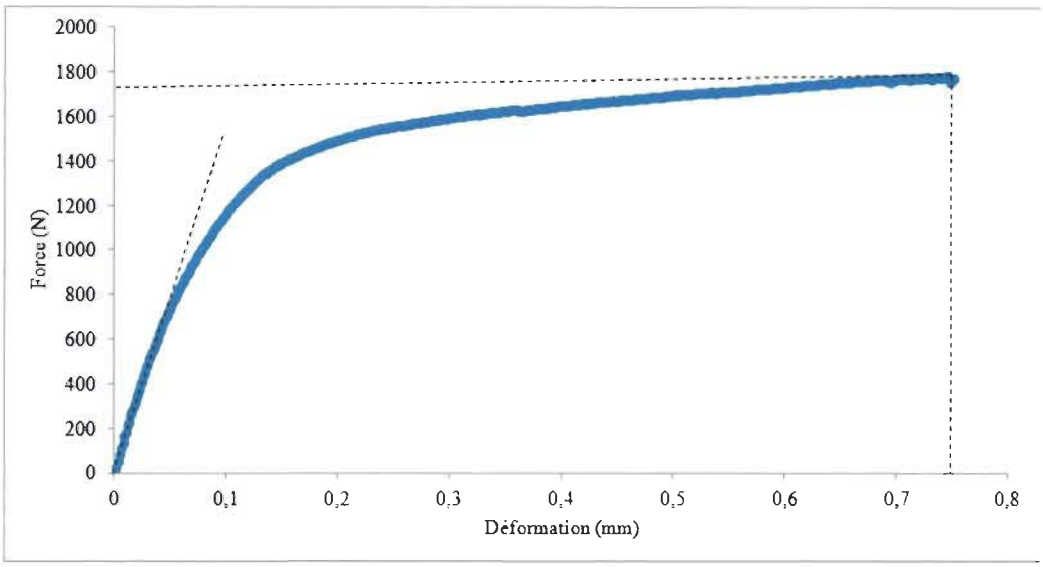


Figure 70 : Courbe typique pour un échantillon riveté.

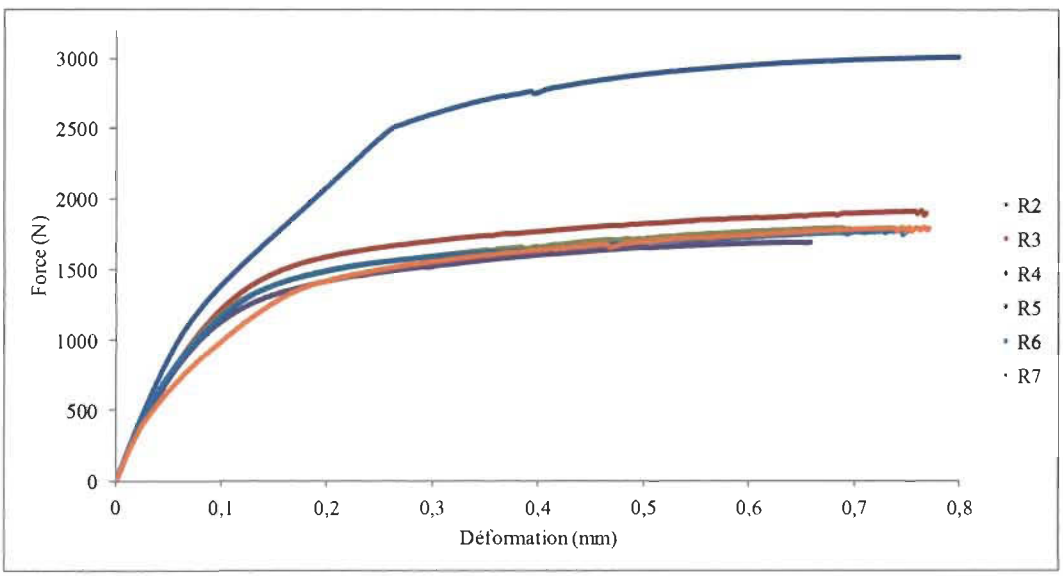


Figure 71 : Courbe de traction des échantillons rivetés.

Au final, quatre des six courbes de traction se superposent jusqu'à environ 1113 N (250 lbf). On considère les autres comme étant des anomalies. Le perçage des trous peut avoir endommagé le composite. Cela affecte le moment où on atteint la plasticité du

rivet. Donc, plus on s'approche de la limite de rupture du le rivet, plus il y a d'écart entre les courbes. L'essai R1 n'a pas été enregistré en raison d'une erreur dans la mesure obtenue de l'extensomètre et l'essai R2 se démarque de façon importante et inexpliquée et n'a donc pas été retenu pour valider le modèle d'éléments finis.

4.4.3 Échantillons hybrides

Le **Tableau 14** montre les dimensions de tous les coupons. Les essaies hybrides se comportent de façon à combiner les comportements des échantillons des deux sections précédentes. La **Figure 72** montre le moment où les fissures apparaissent dans la colle pendant l'essai.

Tableau 14 : Mesures des coupons hybrides.

Coupons	Largeur, po (mm)	Recouvrement, po (mm)	Épaisseur, po (mm)
H1	1,01 (25,65)	1,41 (35,81)	0,25 (6,40)
H2	1,01 (25,65)	1,46 (37,08)	0,25 (6,25)
H3	1,01 (25,65)	1,44 (36,58)	0,26 (6,50)
H4	1,02 (25,91)	1,44 (36,58)	0,25 (6,34)
H5	1,02 (25,91)	1,44 (36,58)	0,26 (6,50)
H6	1,02 (25,91)	1,45 (36,83)	0,26 (6,59)
H7	1,02 (25,91)	1,44 (36,58)	0,25 (6,38)
H8	1,02 (25,91)	1,45 (36,83)	0,26 (6,53)
H9	1,01 (25,65)	1,41 (35,81)	0,25 (6,46)
H10	1,02 (25,91)	1,41 (35,81)	0,24 (6,15)
H11	1,02 (25,91)	1,46 (37,08)	0,25 (6,46)

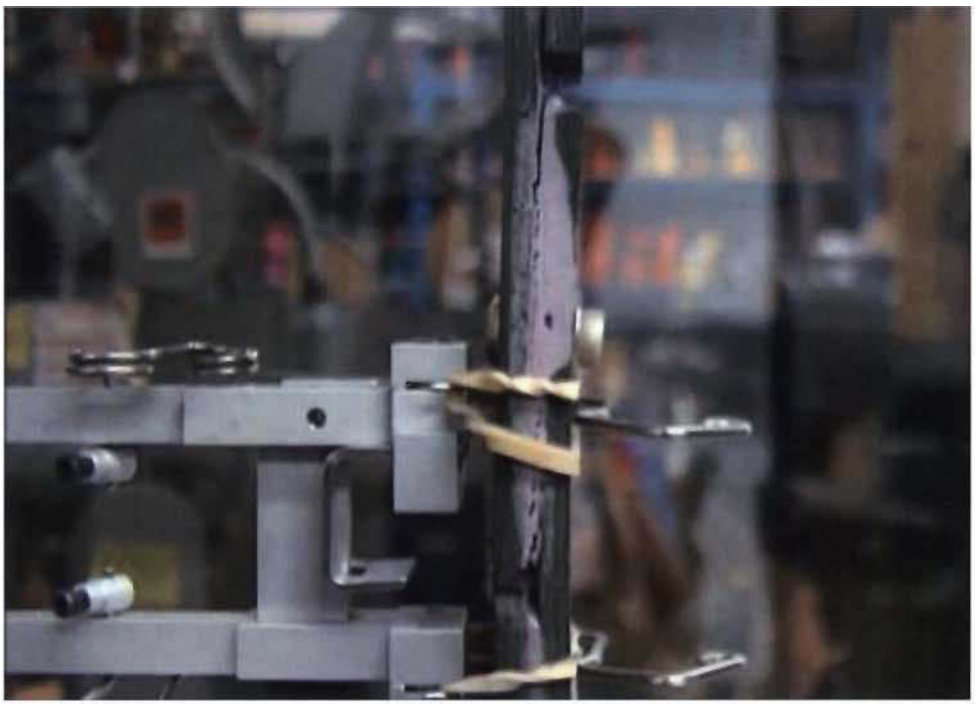


Figure 72 : Échantillon hybride au moment où les fissures apparaissent.

La **Figure 73** montre un échantillon après rupture. On remarque la combinaison des modes de rupture des essais collés et rivetés, soit le délaminage, la décohésion et la rupture en cisaillement du rivet. Dans la partie inférieure de la figure, on voit clairement la rupture dans la colle et le cisaillement du rivet (léger décalage de la tête et du bas du rivet) juste avant séparation de la partie inférieure et supérieure du coupon. Dans tous les essais, la rupture par cisaillement du rivet est toujours survenue avec très peu de déformation par matage du trou des adhérents composites. Cette constatation a permis de maintenir l'utilisation des rivets solides MS20470 compte tenu des considérations soulevées à la section 3.2.

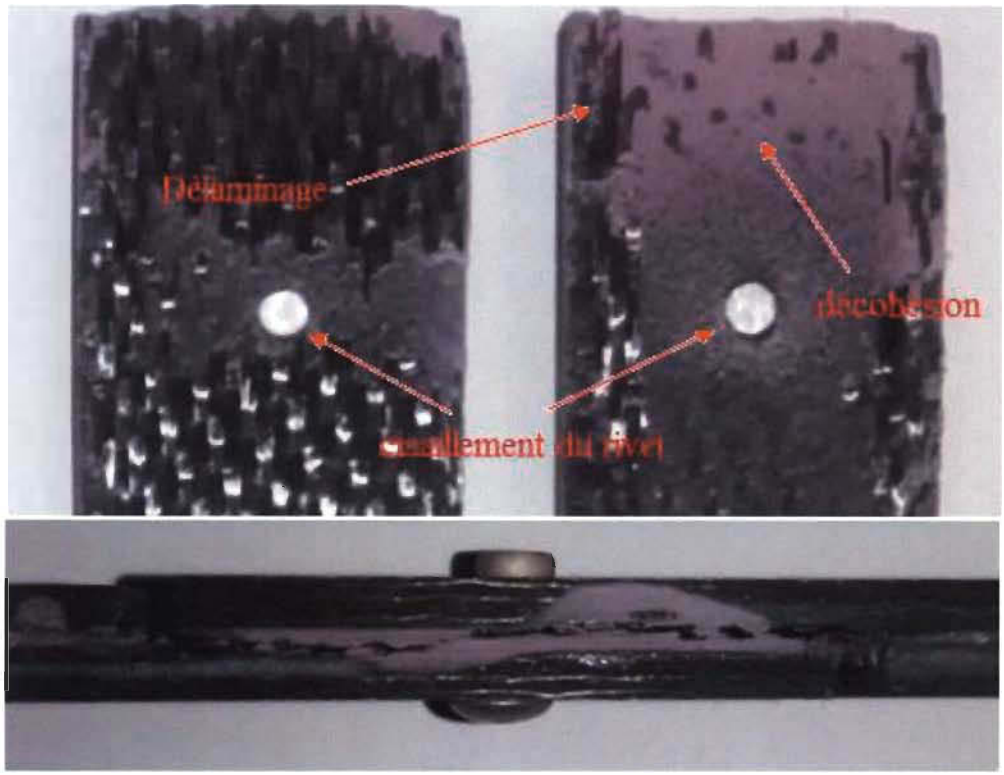


Figure 73 : Échantillon hybride au moment où les fissures apparaissent.

La **Figure 74** présente une courbe typique d'un essai hybride. Le comportement est linéaire jusqu'à une force d'environ 3800 N. À partir de ce moment, la pente change en raison de début de décohésion. À environ 7500 N, la rupture dans la colle débute aux extrémités du joint et à 8000 N, la rupture de la colle survient. À ce moment, la force chute rapidement et le rivet reprend la totalité de la charge. Dès que la colle casse, et puisqu'il n'y a que très peu de déplacement dans la colle jusqu'à la rupture de celle-ci, il y a retour élastique des adhérents, mais celui-ci n'est pas suffisant pour briser le rivet qui ne fait que s'écraser. Puisque le déplacement est contrôlé, le rivet absorbe momentanément une certaine déformation, laquelle se poursuit jusqu'à la rupture du rivet. La **Figure 75** montre les courbes de chacun des essais.

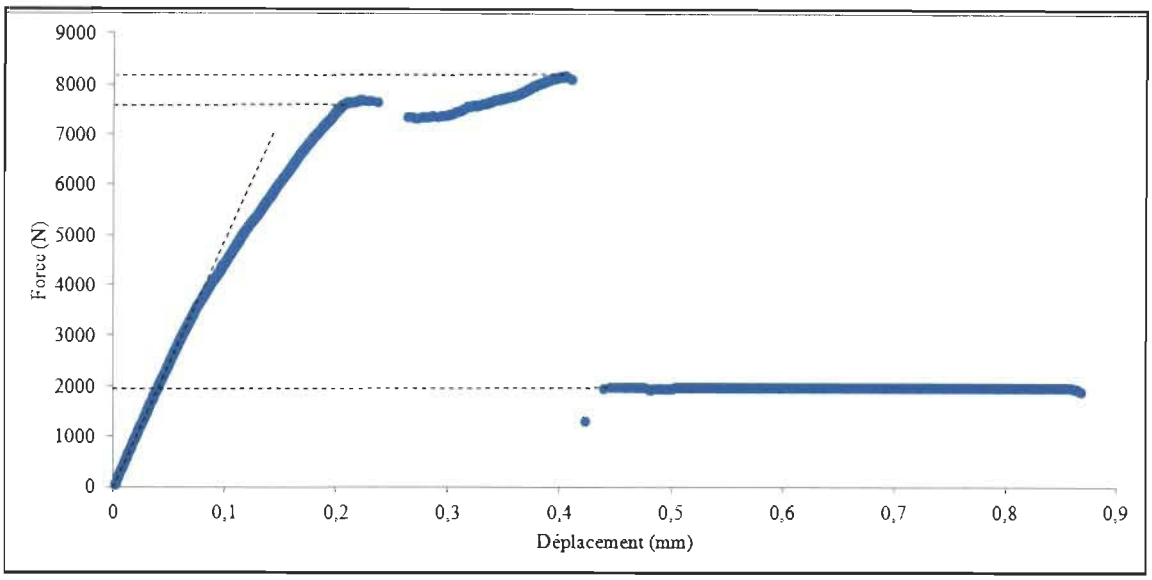


Figure 74 : Courbe typique d'un échantillon hybride.

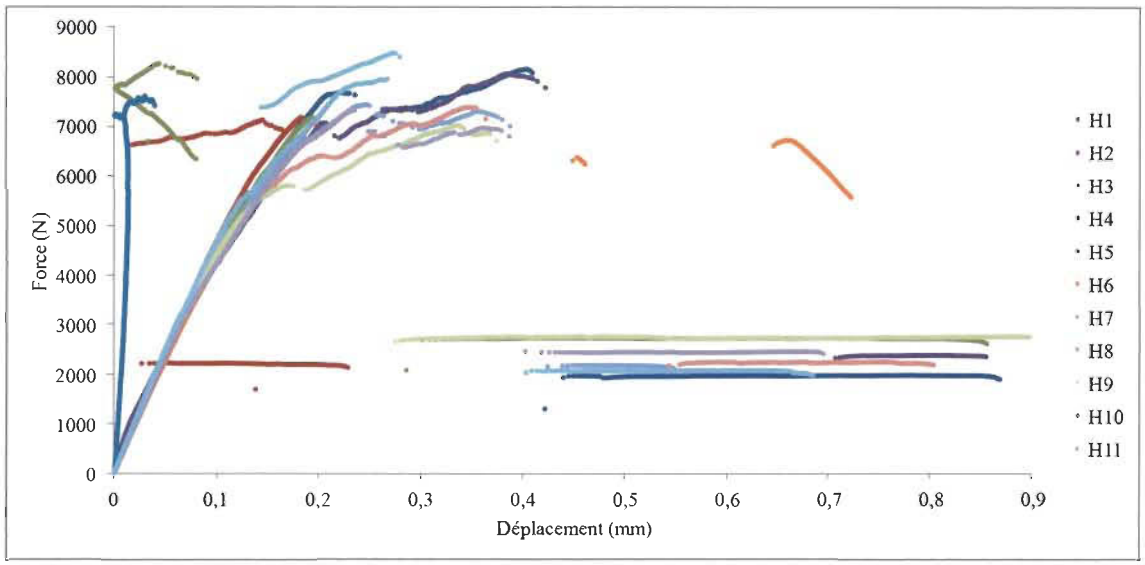


Figure 75 : Courbe de traction des échantillons hybrides.

Pour deux des essais, deux positions de l'extensomètre ont été essayées. Premièrement, il y a l'essai H5 où l'extensomètre a été positionné sur le joint, chevauchant le rivet, avec le rivet situé entre les deux tiges. Le résultat est la courbe bleu collée sur l'axe des y de la **Figure 75**. On note une très faible déformation dans le joint. L'autre position est associée à l'essai H4. Une tige de l'extensomètre est à l'extérieur du recouvrement alors que l'autre est localisé juste après le rivet. Le résultat est une courbe

qui se superpose aux autres. Globalement, cela signifie que pendant l'essai, la portion des adhérents situé au niveau du rivet subissent très peu de déformation (allongement très faible de l'extensomètre) tandis que, dès que l'extensomètre enjambe l'extrémité du joint de colle, des déplacements élevés sont mesurés. Ce qui veut dire que placer l'extensomètre de façon à enjamber l'extrémité du joint de colle (jusqu'au début du rivet) est acceptable et prend en compte les déformations nécessaires à l'analyse.

Au final, dix des onze courbes de traction se superposent jusqu'à environ 5300 N (1200 lbf). De par la méthode de fabrication, le perçage des trous peut avoir endommagé le composite et l'épaisseur de la colle n'est pas uniforme partout. Cela apporte de légères différences dans le moment où on atteint la plasticité dans la colle et dans le rivet. Ainsi, plus on s'approche de la limite à la rupture, plus il y a d'écart entre les courbes. L'essai H5 a été manqué en raison d'un mauvais positionnement de l'extensomètre. Tous les autres coupons ont été utilisés pour valider le modèle d'éléments finis. Lorsqu'il y a rupture de la colle, il y a eu léger glissement de l'extensomètre pour environ la moitié des essais. Cependant, ce glissement n'affecte pas les conclusions du projet puisque seulement la partie linéaire des essais nous intéresse.

Chapitre 5 : Comparaison du modèle et des essais expérimentaux et application pratique

Ce chapitre reprend les résultats des deux chapitres précédents afin de comparer et d'améliorer la capacité du modèle d'éléments finis à prévoir la défaillance d'un joint hybride. Une fois la méthodologie développée, le modèle sera utilisé pour évaluer la possibilité de réduire le nombre de rivets dans l'assemblage de deux plaques dont les dimensions sont connues.

5.1 Comparaison des résultats collés, rivetés et hybrides

Une fois obtenus les résultats d'essai des échantillons collés, rivetés et hybrides, il est possible de les utiliser pour valider les modèles éléments finis. Si la courbe de traction générée par COSMOS/M reproduit bien la partie linéaire des essais expérimentaux, cela contribue à valider le modèle d'éléments finis. À partir de ce moment, il est possible d'utiliser les modèles pour modifier la taille des échantillons en maintenant une certaine confiance sur les résultats. Les **Figures 76** à **78** montrent les résultats des chapitres 3 et 4 pour les trois types de joint sous forme d'une courbe moyenne, superposés dans un même graphique avec les résultats par éléments finis.

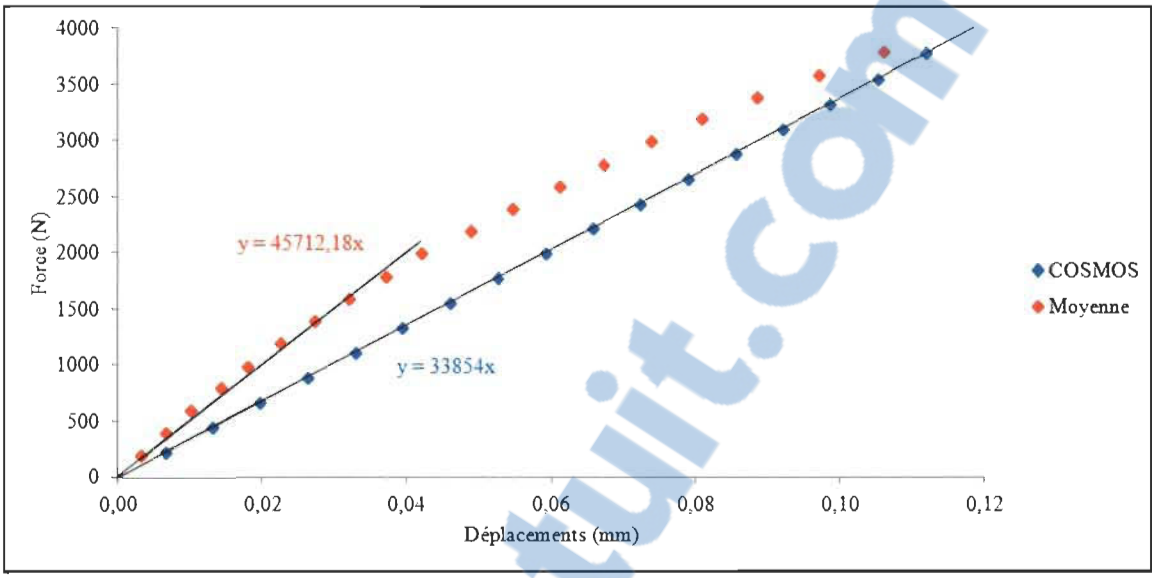


Figure 76 : Graphique de comparaison des résultats pour le joint collé.

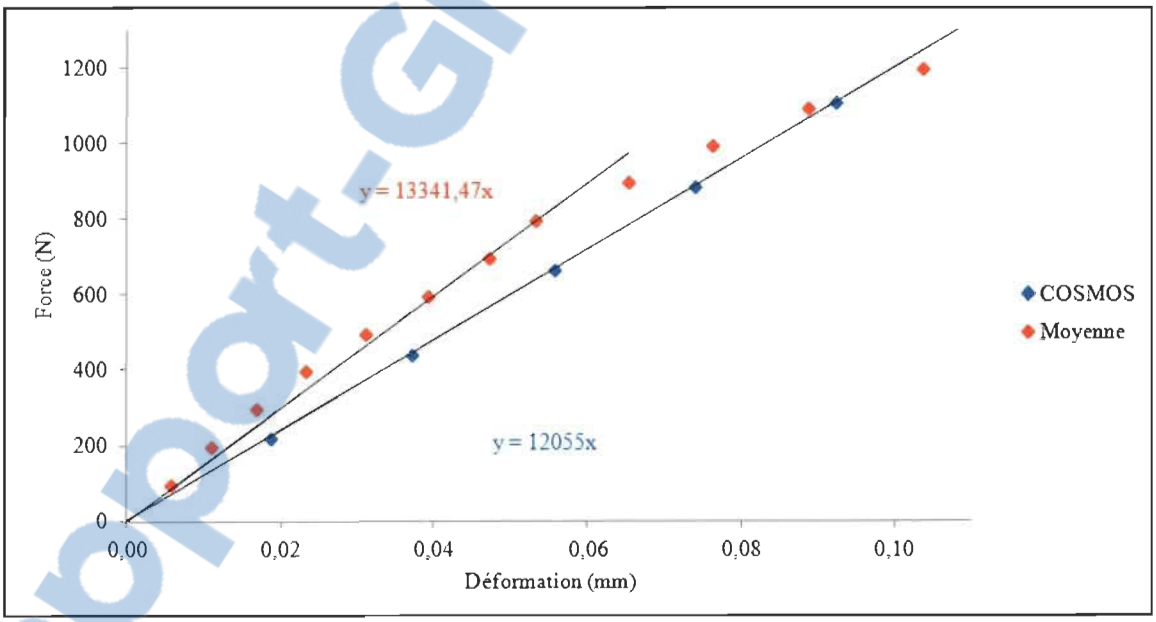


Figure 77 : Graphique montrant la comparaison pour l'échantillons riveté.

Rapport-Gratuit.com

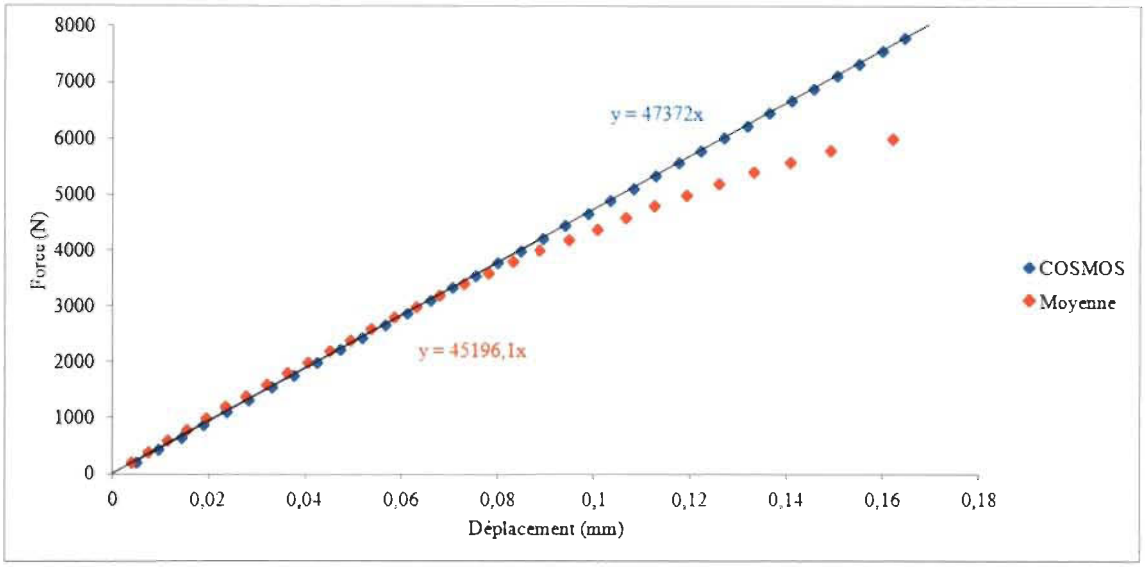


Figure 78 : Graphique de la comparaison des résultats pour le joint hybride.

On observe un écart entre le modèle de COSMOS/M et les résultats expérimentaux des joints collés et rivetés. Dans COSMOS/M, les propriétés mécaniques de la colle et du composite sont considérés linéaires. Du point de vue expérimental, pour le joint collé, la non-uniformité et les débordements de la colle ainsi qu'un possible glissement de l'extensomètre ont pu causer un certain pourcentage d'erreur dans la section linéaire de la courbe de traction. Également, les longueurs de recouvrement varient entre 12,19 et 14,48 mm. Il s'agit d'une erreur de 18% par rapport à la longueur désirée de 12,7 mm (longueur utilisées dans les modèles). La même chose se produit pour l'épaisseur de la colle qui va jusqu'à 0,030 pouces pour l'échantillon C2 (alors qu'on désire avoir 0,010 pouces). Selon la **Figure 68**, on remarque aussi que l'échantillon C2 est le plus à l'écart par rapport aux autres courbes de traction. Pour le joint riveté, le pourcentage d'écart provient de la préparation de l'échantillon (le perçage et la pose du rivet). Également, le modèle riveté ne considère pas le frottement entre les adhérents qui peut retarder la déformation. Les propriétés des matériaux utilisés ne sont probablement pas exactement identiques à celles de la fiche technique. De plus, on ne considère pas les contraintes résiduelles dues à la cuisson de l'adhésif. Cependant, nous n'avons pas validé la précision de ces efforts par rapport à la réalité. Le **Tableau 15** montre les écarts entre les résultats (à l'aide de l'équation (2)). Pour le joint hybride cependant, le modèle éléments finis concorde très bien avec les résultats expérimentaux. Les échantillons

hybrides ayant été fabriqués en dernier, un meilleur contrôle sur la fabrication (moins de débordement de la colle) et la réalisation des essais (extensomètre fixé à l'aide d'élastiques) a pu contribuer à améliorer la concordance. Il faut aussi considérer que pour le cas hybride, le frottement composite-composite (source d'erreur du joint riveté) n'existe pas de par la présence de la colle et inversement, la présence du rivet peut possiblement atténuer les erreurs induites par la colle seule. Le **Tableau 16** résume les sources d'erreur pour chaque type de joint.

$$\text{Pourcentage d'erreur} = \frac{|Exp - E.F.|}{E.F.} \cdot 100\% \qquad (2)$$

Tableau 15 : Écarts entre les résultats.

Configuration	Rigidité moyenne exp. (N/mm)	Écart type (N/mm)	Rigidité éléments finis (N/mm)	Pourcentage d'erreur (%)
Collé	45 712,18	3824,88	33 854	25,94
Riveté	13 341,47	349,40	12 055	9,64
Hybride	45196,10	1537,38	47 372	4,81

Cette section met en application tout ce dont il a été question dans les sections et chapitres précédents. On analyse deux plaques en composite assemblées avec de la colle et des rivets. On utilise les modèles de COSMOS/M pour voir l'effet sur la résistance, pour une contrainte donnée, du joint hybride comparé aux situations avec uniquement de la colle ou uniquement des rivets. Par la suite, les sous-sections suivantes démontreront en détail la méthodologie suivie pour réduire le nombre de rivets.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 16 : Sources d'erreur pour chaque type de joint

Type	Collé	Riveté	Hybride
Sources d'erreur	Approximation de certaines propriétés mécaniques du laminé Glissement de l'extensomètre Néglige les contraintes thermiques de cuisson de l'adhésif Les efforts hors-plan ne sont pas vérifiés		
	Non-uniformité de l'épaisseur de l'adhésif Manque de contrôle sur les débordements de colle Variation de la longueur de recouvrement	Défauts de perçage du laminé Néglige les contraintes induites par la pose du rivet Néglige le frottement entre les adhérents	Manque de contrôle sur les débordements de colle Défauts de perçage du laminé Néglige les contraintes induites par la pose du rivet

5.4 Application pour une plaque

5.4.1 Géométrie de la plaque, matériaux et sollicitation

Nous savons à partir des résultats expérimentaux des essais rivetés qu'un rivet en aluminium peut résister à une force de 890 N. Nous choisissons de travailler avec deux plaques en composite de fibres de carbone de 101,6 mm de long chacune et de largeur indéfinie. On les assemble d'abord avec des rivets distancés de 25,4 mm et un joint de colle sur une longueur de recouvrement de 38,1 mm. S'il n'y a pas de colle et qu'on répartit la force également entre les rivets, il est possible d'appliquer une force de 890 N multipliée par le nombre de rivets comme sollicitation pour une plaque de largeur quelconque. Cependant, pour l'échantillon hybride, il y a présence de l'adhésif. En se référant à la **Figure 74**, la courbe typique nous indique une force d'environ 3800 N lorsque la limite linéaire-élastique est atteinte. Pour considérer l'ensemble des essais, et selon la **Figure 78**, la force moyenne à la limite de linéarité de la courbe est d'environ 3560 N. Nous utiliserons donc cette force pour la suite du chapitre. La **Figure 79** montre

l'assemblage des plaques, les dimensions ainsi que les sollicitations. Nous réutilisons les mêmes matériaux et les mêmes propriétés mécaniques qu'au chapitre 4.

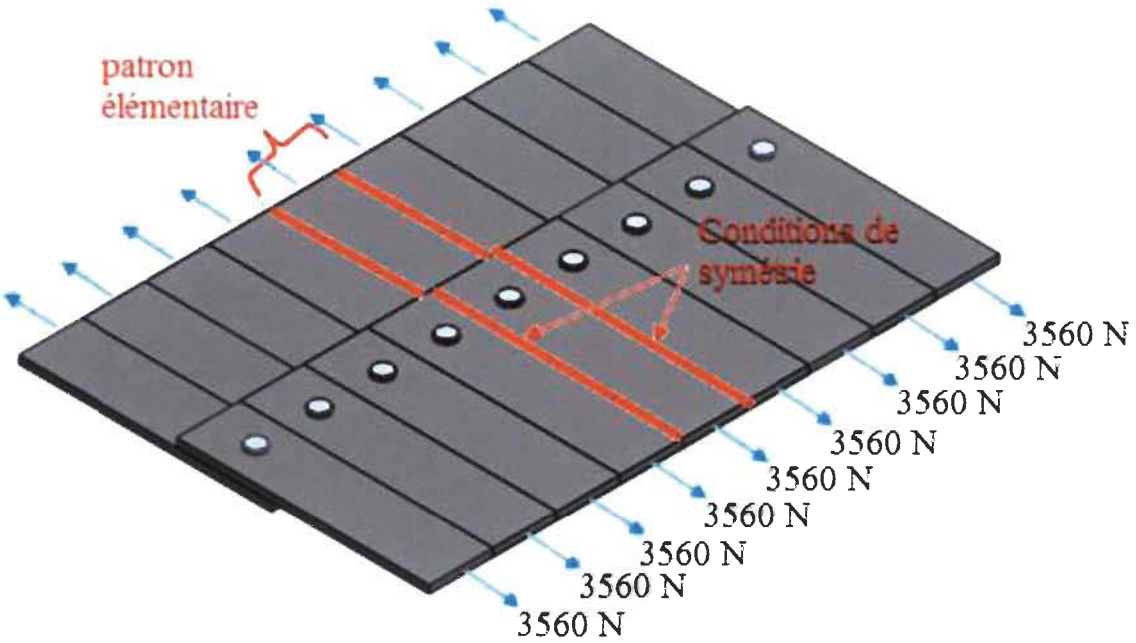


Figure 79 : Modélisation de la plaque à optimiser.

5.4.2 Méthodologie

Pour arriver à réduire le nombre de rivets dans cet assemblage, il faut d'abord aller voir ce qu'il se passe lorsqu'on assemble uniquement avec de la colle et uniquement avec des rivets. Puisque nous voulons réutiliser le modèle de COSMOS/M du chapitre 3, on ramène l'assemblage des deux plaques à une largeur de 25,4 mm, avec un seul rivet, en appliquant des conditions de symétrie au modèle d'éléments finis sur les faces situées de chaque côté de l'échantillon modélisé (faces en rouge à la **Figure 79**). Cela revient à supposer que la distribution des contraintes sera la même d'un échantillon à l'autre dans une plaque contenant plusieurs rivets, comme celle montrée à la **Figure 79**, ce qui est tout à fait normal puisque la charge appliquée est supposée constante sur la plaque et donc la même sur chaque échantillon. En appliquant la force de 890 N (force limite des rivets) et 1800 N (limite élastique de la colle du joint collé, obtenue de la **Figure 76**), on exécute les modèles éléments finis individuels des coupons collé et riveté pour noter les valeurs des contraintes aux points critiques où la rupture débute pour chaque type

d'échantillon. Une fois ces informations obtenues, nous pouvons passer au modèle hybride. Nous appliquons dans ce cas la force correspondant à la limite élastique du joint hybride (3560 N obtenue de la **Figure 78**) par patron élémentaire (coupon modélisé). Pour pouvoir comparer les modèles collés et hybrides, il faut utiliser une même longueur de recouvrement et une même force appliquée dans les deux cas. Puisque le modèle hybride devait avoir une longueur de recouvrement de 38,1 mm (pour assurer une rupture par matage advenant le cas où le rivet aurait préséance sur la colle), le modèle collé a aussi été modélisé à une longueur de recouvrement de 38,1 mm (plutôt que celle de 12,7 mm des essais) en utilisant également une force de 3560 N obtenue de la limite élastique du joint hybride. Ce faisant, une contrainte de 22,62 MPa fut obtenue dans la colle du joint collé (comme nous le verrons à la section 5.4.3), ce qui est légèrement plus élevée que la contrainte de 20,72 MPa obtenue dans le joint collé de 12,7 mm de recouvrement chargé à 1800 N. L'auteur est conscient de l'écart. Cependant, cela n'affectera pas les analyses des prochaines sections, puisque nous chercherons à évaluer l'influence des rivets sur les contraintes générées et ce, en supposant que les joints demeurent toujours dans le domaine linéaire élastique de comportement de la colle. Donc peu importe la force appliquée, les contraintes dans la colle et le rivet demeurent toujours linéairement proportionnelles à la force et de plus, nous verrons que pour le modèle du joint hybride la contrainte dans la colle s'est toujours maintenue en-dessous de la limite de 20,72 MPa du modèle expérimentale.

Finalement, pour le joint hybride et pour une largeur de 25,4 mm, les contraintes seront plus faibles aux points critiques de la colle (comparativement au cas collé seulement) puisque la force est répartie à la fois dans la colle et dans le rivet. Ce qui veut dire que nous pouvons augmenter la largeur du coupon modélisé (avec un seul rivet, cela revient à diminuer le nombre de rivets par unité de largeur du joint), tout en maintenant la contrainte appliquée constante (en augmentant la force de 3560 N proportionnellement à la nouvelle largeur pour maintenir la contrainte) jusqu'à ce que la hausse des contraintes aux points critiques dans la colle soit négligeable. Il faut finalement trouver une largeur pour laquelle les contraintes dans la colle et le rivet sont satisfaisantes (en maintenant un facteur de sécurité par rapport à la limite élastique de la

colle) tout en s'assurant de réduire le nombre de rivets. Nous obtenons ainsi la nouvelle largeur de la pièce se traduisant en fait par une réduction du nombre de rivets par unité de largeur des plaques.

5.4.3 Résultats pour une colle rigide

Une fois établie la façon d'utiliser les modèles éléments finis pour simuler une plaque, nous pouvons évaluer l'influence des rivets pour voir s'il est possible d'en éliminer tout en gardant la plaque sécuritaire. Nous commençons ici par faire l'analyse en reprenant les propriétés de la colle utilisées lors des essais expérimentaux. Comparativement à d'autres colles et aux colles utilisées dans la littérature, la colle des essais expérimentaux est considérée rigide puisque sa rigidité se trouve parmi les plus élevées parmi celles étudiées dans la revue de littérature. En appliquant sur le joint une contrainte constante par la limite de 3560 N du joint collé, le **Tableau 17** montre l'évolution des contraintes de cisaillement dans la colle et le rivet en fonction de la largeur du joint et la **Figure 80** montre le résultat sous forme de tendance logarithmique. On observe que la présence des rivets dans le joint hybride réduit la contrainte de cisaillement aux points critique de la colle comparativement au joint collé. Cette diminution s'accompagne d'une faible augmentation de la contrainte dans le rivet, laquelle est cependant très en-dessous de la limite élastique du rivet de 112.29 MPa. On observe également que peu importe la largeur du joint, les contraintes du joint hybride demeurent à peu près constantes dans la colle et dans le rivet. La colle étant rigide, elle se déforme très peu de sorte qu'elle reprend une forte proportion de la charge appliquée et le rivet demeure très peu sollicité. À la **Figure 80**, les résultats sont exprimés sous forme de pourcentage des contraintes de rupture respectives de la colle et du rivet atteints dans la colle et dans le rivet pour le cas hybride. Les carrés rouges correspondent donc à 100% et sont valables pour les deux cas. On remarque que, peu importe la largeur du joint, la présence du rivet fait en sorte que la contrainte de cisaillement dans la colle atteint environ 85.7% de sa contrainte ultime alors que pour le rivet, le pourcentage est très faible et se situe à 0,17% (constante de l'équation du rivet de la **Figure 80a**).

Tableau 17 : Contraintes de cisaillement dans la colle et dans le rivet pour différentes largeurs (adhésif rigide).

Largeur, mm	Contrainte de cisaillement dans la colle du modèle hybride, MPa	Contrainte de cisaillement (à la rupture) dans la colle du modèle collé, MPa
25,4	19,38	22,62
38,1	19,40	22,62
50,8	19,38	22,62
76,2	19,37	22,62
101,6	19,39	22,62
Largeur, mm	**Contrainte de cisaillement dans le rivet du modèle hybride, MPa**	**Contrainte de cisaillement (à la rupture) dans le rivet du modèle riveté, MPa**
25,4	0,13	112,29
38,1	0,13	112,29
50,8	0,08	112,29
76,2	0,10	112,29
101,6	0,10	112,29

Malgré la faible contribution du rivet, la présence de lui-ci entraîne tout de même une diminution instantanée et à peu près constante de la contrainte de cisaillement dans la colle de 14,3% par rapport à la contrainte du modèle collé seul. Comme il a été expliqué dans la section 5.4.2 et tel que montré aux **Tableau 17** et **Figure 80**, l'échantillon fut élargit jusqu'à l'obtention d'une des trois contraintes limites. Dans l'éventualité où on sait que la rupture peut se produire dans le composite (rivet plus solide ou composite beaucoup plus mince), il faut aussi noter les contraintes σ_x, σ_y et τ_{xy} de l'endroit le plus sollicité près du trou.

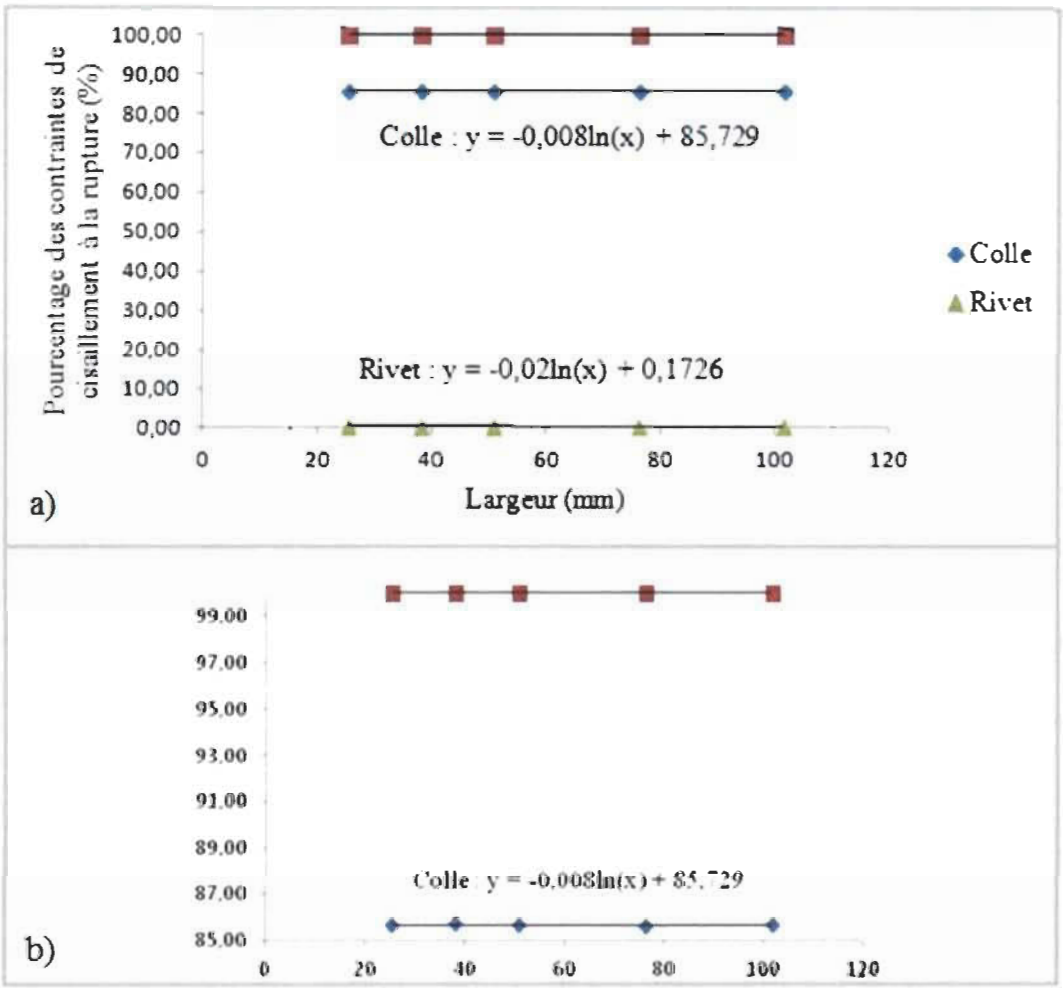


Figure 80 : Graphique du pourcentage des contraintes atteint par rapport à la limite élastique du rivet et la résistance de la colle (adhésif rigide). a) échelle 0-100% et b) échelle 85-100%.

On constate qu'avec cet adhésif, il est impossible de réduire le nombre de rivets. Celui-ci étant très rigide, la colle se déforme très peu de sorte qu'elle reprend toujours la presque totalité de la charge appliquée (peu importe la largeur de l'assemblage) et le rivet intervient seulement après la rupture de la colle. C'est d'ailleurs ce qu'ont aussi montrés les essais expérimentaux en regard des **Figures 74** et **75** où le rivet intervient seulement après la rupture de la colle. Cela est exprimé par le terme logarithmique qui est presque nul dans les équations de la **Figure 80**. Les deux droites sont pratiquement horizontales. Une colle rigide ne permet donc pas l'application de la méthode développée dans la section précédente car le rivet intervient toujours de façon négligeable.

5.4.4 Résultat pour une colle flexible

Tel que mentionné au chapitre 2, l'utilisation d'une colle plus flexible permettrait de faire travailler conjointement la colle et le rivet, contrairement au cas d'une colle rigide pour laquelle le rivet intervient très peu. À titre d'exemple, les modèles collé et hybride ont été sélectionnés en utilisant un adhésif PU possédant un module d'Young de 52 MPa, un coefficient de Poisson de 0,233 et un module de cisaillement de 21 MPa [55]. Une force de 3560 N fut appliquée sur le joint hybride ayant une largeur de 25,4 mm. À cette force et selon la fiche technique de cette colle, la contrainte générée surpasse la limite élastique de la colle. Nous avons tout de même maintenue cette force pour faciliter la comparaison des contraintes dans la colle et dans le rivet en supposant que pour cette nouvelle colle (dont le module est plus faible), la résistance est la même que celle de la colle rigide du cas précédent. En gardant l'hypothèse que nous sommes dans le domaine linéaire-élastique de la colle, cela permet de comparer le comportement du joint lorsque deux types de colle sont utilisés, une rigide et une flexible. Le **Tableau 18** montre les résultats obtenus en fonction de la largeur et la **Figure 81** montre la tendance logarithmique du comportement du joint, toujours en termes de pourcentage de la limite élastique du rivet et de résistance de la colle. Globalement, les contraintes atteintes dans la colle du modèle collé seul sont plus faibles en bout de joint que pour le cas précédent (colle rigide). Cela s'explique probablement par le fait que pour une colle flexible, la contrainte de cisaillement est répartie sur une surface plus grande comparativement au joint à colle rigide où les extrémités du joint sont plus sollicitées (**Figure 10**). De plus, la contrainte reprise par la colle du joint hybride est toujours plus faible avec la présence du rivet (tout comme le cas de la **Figure 80** pour une colle rigide), ce qui signifie que pour une même contrainte appliquée au bout de la plaque, le joint hybride est plus résistant (**Tableau 18**), ce qui a aussi été observé expérimentalement. Aussi, et en comparant les **Tableaux 17** et **18**, on remarque que la contribution du rivet a fortement augmentée puisque le pourcentage repris par celui-ci tourne maintenant autour de 92%. Finalement, la **Figure 81** montre deux courbes dans la même zone du graphique (une pour la colle et l'autre pour le rivet). Puisque maintenant le rivet travail conjointement avec la colle, lorsqu'on augmente la largeur du joint, les valeurs des contraintes de cisaillement dans la colle et dans le rivet augmentent de façon

logarithmique. Selon ces courbes, il serait donc possible d'augmenter la largeur du joint jusqu'à ce qu'on obtienne une valeur des contraintes s'approchant des limites respectives de la colle et du rivet. En supposant qu'à environ 92% le facteur de sécurité soit suffisant, c'est donc dire que le patron élémentaire pourrait être élargi à 44,45 mm (tel que le suggère la **Figure 81**) ce qui permettrait d'enlever 3 ou 4 rivets pour une plaque de 254 mm de large.

Tableau 18 : Contraintes de cisaillement dans la colle et dans le rivet pour différentes largeurs (adhésif flexible).

Largeur, mm	**Contrainte de cisaillement dans la colle du modèle hybride, MPa**	**Contrainte de cisaillement (à la rupture) dans la colle du modèle collé, MPa**
25,4	4,52	5,07
38,1	4,63	5,07
50,8	4,68	5,07
76,2	4,73	5,07
101,6	4,75	5,07
Largeur, mm	**Contrainte de cisaillement dans le rivet du modèle hybride, MPa**	**Contrainte de cisaillement (à la rupture) dans le rivet du modèle riveté, MPa**
25,4	101,56	112,29
38,1	102,39	112,29
50,8	106,59	112,29
76,2	104,45	112,29
101,6	107,42	112,29

RapportGratuit.com

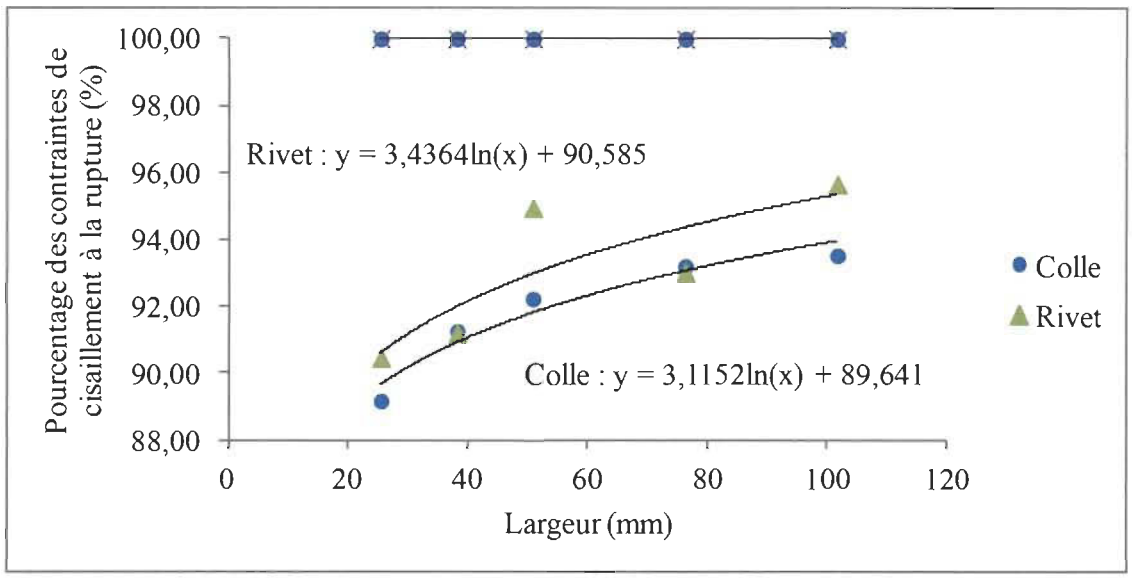


Figure 81 : Graphique des contraintes en fonction de la largeur exprimées par rapport à leur limite à la rupture (adhésif flexible).

On remarque un écart entre les pourcentages pour la colle dans les **Figures 80** et **81**. La colle rigide est sollicitée à 85,7% alors que la colle flexible est sollicitée à 89,6% lorsqu'on compare les valeurs pour une largeur de 25,4 mm. Avec une colle rigide, les contraintes de pelage sont importantes, alors que pour l'adhésif flexible, on observe surtout du cisaillement (et la contrainte de cisaillement augmente en importance par rapport au pelage). Pour l'adhésif rigide, la déformation étant faible, la contrainte hors-plan affecte fortement la rupture (contrainte en y). Pour l'adhésif flexible, les déformations étant plus grandes, ce sont les efforts en cisaillement qui sont plus importants (contrainte τ_{xy}). Le maillage peut avoir affecté ces résultats. Cependant, les comparaisons sont toutes basées sur des maillages totalement identiques.

Initialement, on s'attendait à obtenir une hausse de la contrainte dans la colle lorsqu'on augmente la largeur et une diminution de la contrainte dans le rivet puisqu'en diminuant le nombre de rivets, la proportion de la charge reprise par la colle augmente. Cependant, lorsqu'on observe les contraintes à l'élément le plus sollicité, on remarque aussi une hausse de la contrainte en cisaillement dans le rivet. Cela s'explique par le fait qu'en augmentant la déformation en cisaillement dans la colle (avec la colle flexible), la

portion centrale de la tige du rivet se trouve plus sollicitée de par le déplacement des plaques au niveau du trou.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Conclusion

Dans ce travail, une analyse expérimentale et numérique (éléments finis) du comportement de joints composites collés, rivetés et hybrides (collé et riveté) a été réalisée.

En se basant sur la revue de la littérature, les concentrations de contraintes doivent se trouver aux extrémités du joint de colle, sur la paroi du trou riveté et à la jonction entre la tige et la tête du rivet. Dans cette étude, le rivet est en aluminium (comparativement à un rivet en acier dans la littérature) et, selon les essais expérimentaux réalisés, le rivet rompt en cisaillement au centre. Les écarts entre les essais expérimentaux et les modèles éléments finis s'expliquent en partie par les résultats tirés de la revue de littérature, soit l'importance de contrôler les débordements de colle et l'épaisseur de la colle ainsi que l'effet du frottement entre les adhérents pour le joint riveté.

Tout le travail réalisé au cours de cette maîtrise aura permis de mieux comprendre le comportement des joints à recouvrement simple avec adhérent en composite. La colle et le rivet se comportent différemment dépendant des paramètres géométriques, des propriétés mécaniques et du choix des matériaux des adhérents. Une fois ces aspects maîtrisés, il a été possible de combiner les deux types d'assemblage (collé et riveté) afin d'évaluer la possibilité de réduire le nombre de rivets et d'améliorer la résistance à la rupture en cisaillement du joint. Le processus complet passe par la création de modèles d'éléments finis (E.F.), la comparaison de ceux-ci avec les essais expérimentaux et l'application des connaissances pour un cas simple (joint à recouvrement simple).

Les principales conclusions sont les suivantes :

- Dans le modèle collé E.F., les éléments les plus sollicités sont aux extrémités de l'adhésif. Ce résultat concorde avec la littérature et les essais expérimentaux où il fut constaté que la fissure s'initie toujours à l'extrémité du joint de colle.
- Dans le modèle riveté E.F., les éléments les plus sollicités sont au centre du rivet ainsi que sur la paroi intérieure du trou.
- De nombreux facteurs influencent les résultats d'un essai mécanique d'un joint collé (épaisseur de la colle, débordement de colle, qualité du collage…).
- Malgré l'absence de jeu entre le trou et le rivet, il est probable que le frottement entre les adhérents ait pour effet d'augmenter la pente de la partie linéaire de la courbe de traction, puisque à force égale, augmenter le frottement contribue à diminuer la déformation axiale de l'éprouvette.
- Les modèles E.F. arrivent à reproduire assez fidèlement la partie linéaire des courbes provenant des essais expérimentaux des joints, notamment le joint hybride.
- Un adhésif flexible répartit mieux la charge entre la colle et le rivet contrairement à un adhésif rigide où la colle prend presque la totalité de la charge. En ce sens, pour réduire le nombre de rivets, il faut choisir un adhésif flexible (dont le niveau de flexibilité demeure à être optimisé) possédant la résistance la plus élevée possible. Puisque le décalage des plaques au niveau du trou influence la contrainte maximale induite dans le rivet, les propriétés du rivet (rigidité et résistance) viendront aussi influencer le comportement d'ensemble du joint. Des analyses plus poussées seront nécessaires pour combiner les effets combinés de la rigidité de la colle et des rivets (et non seulement celle de la colle).

Tel que suggéré dans le présent travail, pour réduire le nombre de rivets, il faut exécuter les modèles éléments finis individuels (joint collé et joint riveté) pour noter les contraintes maximales dans la colle, dans le rivet et dans le composite pour une force donnée. On exécute ensuite le modèle hybride pour la même largeur d'échantillon et la

même force pour évaluer s'il y a diminution des contraintes aux points critiques. Dans l'affirmative, il devient possible ensuite d'augmenter la largeur du joint dans le modèle hybride (ce qui revient à augmenter la distance entre les rivets) et d'observer la hausse des contraintes aux points critiques. Lorsque les contraintes atteignent des valeurs telles que le facteur de sécurité est considéré adéquat, la largeur obtenue est maintenue et le nombre de rivets par unité de largeur peut être calculé.

Cette étude a permis de montrer, dans le domaine linéaire-élastique de comportement des joints étudiés, la contribution respective de la colle et du rivet lorsque le joint est soumis à une charge de cisaillement simple. La géométrie du joint et la simplicité du chargement ne permettent pas de généraliser les conclusions à des cas de pièces plus complexes et des analyses détaillées demeurent nécessaires pour chaque cas particulier. L'étude a cependant permis de faire ressortir les contributions respectives de la colle et des rivets pour un joint à recouvrement simple, analyse utile pouvant aider à la prise de décision lors de la conception de joints réels.

Travaux futurs

Ces résultats ont été transférés à Delastek. Ils pourront s'en servir en appui aux essais expérimentaux (notamment pour planifier ceux-ci et réduire le nombre d'essais requis) visant à réduire le nombre de rivets dans des plaques assemblées. Leur colle actuelle est très rigide et le comportement fragile du joint ne permet pas la diminution du nombre de rivet (la colle rompt de façon catastrophique alors que le rivet n'a que très peu contribué avant la rupture de celle-ci). Si la compagnie désire réduire le nombre de rivets, ils devront trouver une autre colle qui satisfait les normes aéronautique tout en permettant aux deux composantes (colle et rivet) de travailler conjointement sous l'application des charges. La suite du travail consisterait à vérifier sur différentes pièces si la réduction du nombre de rivet est efficace pour une situation donnée et jusqu'où les modèles générés ont permis de prévoir un nombre de rivets acceptable. Il faut aussi voir plus en détails l'impact d'une colle flexible par rapport à une colle rigide sur l'état de contrainte en bout de joint, de même que l'effet de la rigidité du rivet sur les contraintes dans le rivet et celles autour du trou. Des modèles d'éléments finis modélisant le comportement non-linéaire des joints (non-linéarité causée par le frottement entre les adhérents de même que celle probable associée à l'utilisation d'une colle plus flexible) seraient aussi nécessaire pour mieux comprendre le comportement jusqu'à la rupture des différents types de joint.

Bibliographie

1. Kelly, G., *Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints.* Composite Structures, 2005. **69**(1): p. 35-43.
2. Asgari Mehrabadi, F., *Experimental and numerical failure analysis of adhesive composite joints.* International Journal of Aerospace Engineering, 2012.
3. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten.* Luftfahrtforschung, 1938. **15**(1/2): p. 41-47.
4. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints.* Journal of applied mechanics, 1944. **11**(1): p. A17-A27.
5. Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded single-lap joints.* 1973: Langley Research Center Hampton, VA.
6. Hart-Smith, L., *Analysis and design of advanced composite bonded joints.* 1974: National Aeronautics and Space Administration.
7. Crocombe, A. and D. Bigwood, *Development of a full elasto-plastic adhesive joint design analysis.* The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1992. **27**(4): p. 211-218.
8. Oplinger, D., *Effects of adherend deflections in single lap joints.* International Journal of Solids and Structures, 1994. **31**(18): p. 2565-2587.
9. Tsai, M. and J. Morton, *An experimental investigation of nonlinear deformations in single-lap joints.* Mechanics of materials, 1995. **20**(3): p. 183-194.
10. Li, G., P. Lee-Sullivan, and R.W. Thring, *Nonlinear finite element analysis of stress and strain distributions across the adhesive thickness in composite single-lap joints.* Composite Structures, 1999. **46**(4): p. 395-403.
11. Dean, G. and L. Crocker, *The use of finite element methods for design with adhesives.* NPL Measurement Good Practice Guide, 2001(48).
12. Díaz, J., et al., *Benchmarking of three-dimensional finite element models of CFRP single-lap bonded joints.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(3): p. 178-189.
13. Stoumbos, T., et al. *Adhesively bonded joint modeling using finite element method for failure mode prediction.* in *55th AIAA/ASMe/ASCE/AHS/SC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 2014.
14. Langella, A., et al., *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, 2012. **46**(1): p. 3-17.
15. Ekh, J. and J. Schön, *Finite element modeling and optimization of load transfer in multi-fastener joints using structural elements.* Composite Structures, 2008. **82**(2): p. 245-256.
16. Xiao, Y. and T. Ishikawa, *Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part II: modeling and simulation).* Composites science and technology, 2005. **65**(7): p. 1032-1043.
17. Dano, M.-L., G. Gendron, and A. Picard, *Stress and failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates.* Composite Structures, 2000. **50**(3): p. 287-296.

18. Ireman, T., *Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints.* Composite structures, 1998. **43**(3): p. 195-216.
19. Tserpes, K., P. Papanikos, and T. Kermanidis, *A three-dimensional progressive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading.* Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2001. **24**(10): p. 663-675.
20. Olmedo, Á. and C. Santiuste, *On the prediction of bolted single-lap composite joints.* Composite Structures, 2012. **94**(6): p. 2110-2117.
21. Stocchi, C., P. Robinson, and S.T. Pinho, *A detailed finite element investigation of composite bolted joints with countersunk fasteners.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013. **52**(0): p. 143-150.
22. McCarthy, C. and M. McCarthy, *Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: Part II—effects of bolt-hole clearance.* Composite structures, 2005. **71**(2): p. 159-175.
23. McCarthy, M., C. McCarthy, and G. Padhi, *A simple method for determining the effects of bolt–hole clearance on load distribution in single-column multi-bolt composite joints.* Composite Structures, 2006. **73**(1): p. 78-87.
24. McCarthy, M. and C. McCarthy, *Finite element analysis of effects of clearance on single shear composite bolted joints.* Plastics, Rubber and Composites, 2003. **32**(2): p. 65-70.
25. McCarthy, C., M. McCarthy, and V. Lawlor, *Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt–hole clearances.* Composites Part B: Engineering, 2005. **36**(4): p. 290-305.
26. Sun, C., et al., *Development of Improved Hybrid Joints for Composite Structures.* Composite Structures, 2005. **35**: p. 1-20.
27. Kweon, J.-H., et al., *Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding.* Composite Structures, 2006. **75**(1–4): p. 192-198.
28. Kolks, G. and K.I. Tserpes, *Efficient progressive damage modeling of hybrid composite/titanium bolted joints.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014. **56**: p. 51-63.
29. Kelly, G., *Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints.* Composite Structures, 2006. **72**(1): p. 119-129.
30. Aldaş, K. and F. Sen, *Stress analysis of hybrid joints of metal and composite plates via 3D-FEM.* Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 2013. **20**(2): p. 92-100.
31. Park, J.H., et al. *A study on failure strength evaluation of hybrid composite joint.* in *ICCM International Conferences on Composite Materials*. 2011.
32. Hoang-Ngoc, C.-T. and E. Paroissien, *Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(3): p. 117-129.
33. Campbell, F.C., *Structural composite materials*. 2010: ASM international.
34. Hashim, S.A. and E.M. Knox, *Aspects of joint design and evaluation in thick-adherend applications.* Journal of Adhesion, 2004. **80**(7): p. 569-583.
35. Campilho, R., et al., *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.

36. Seong, M.-S., et al., *A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum.* Composite Structures, 2008. **86**(1–3): p. 135-145.
37. Rudawska, A., *Adhesive joint strength of hybrid assemblies: Titanium sheet-composites and aluminium sheet-compositesExperimental and numerical verification.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(7): p. 574-582.
38. Mokhtari, M., et al., *Effects of composite adherend properties on stresses in double lap bonded joints.* Materials and Design, 2013. **44**: p. 633-639.
39. Gray, P. and C. McCarthy, *A global bolted joint model for finite element analysis of load distributions in multi-bolt composite joints.* Composites Part B: Engineering, 2010. **41**(4): p. 317-325.
40. Ekh, J. and J. Schön, *Load transfer in multirow, single shear, composite-to-aluminium lap joints.* Composites Science and Technology, 2006. **66**(7): p. 875-885.
41. Kapidžić, Z., L. Nilsson, and H. Ansell, *Finite element modeling of mechanically fastened composite-aluminum joints in aircraft structures.* Composite Structures, 2014. **109**(1): p. 198-210.
42. Sadowski, T., M. Kneć, and P. Golewski, *Experimental investigations and numerical modelling of steel adhesive joints reinforced by rivets.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 338-346.
43. McCarthy, M.A., et al., *Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: Part I - Model development and validation.* Composite Structures, 2005. **71**(2): p. 140-158.
44. Riccio, A., *Effects of geometrical and material features on damage onset and propagation in single-lap bolted composite joints under tensile load: Part II– Numerical studies.* Journal of composite materials, 2005. **39**(23): p. 2091-2112.
45. Kim, J., J.-C. Yoon, and B.-S. Kang, *Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints.* Applied Mathematical Modelling, 2007. **31**(5): p. 895-911.
46. Drouin, G., *Éléments de machines.* 1986: Presses inter Polytechnique.
47. Xiao, Y. and T. Ishikawa, *Bearing failure in bolted composite joints: Analytical tools development.* Advanced Composite Materials: The Official Journal of the Japan Society of Composite Materials, 2003. **11**(4): p. 375-391.
48. Fu, M. and P.K. Mallick, *Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2001. **21**(2): p. 145-149.
49. Bois, C., et al., *An analytical model for the strength prediction of hybrid (bolted/bonded) composite joints.* Composite Structures, 2013. **97**: p. 252-260.
50. Park, Y.-B., et al., *Strength of carbon/epoxy composite single-lap bonded joints in various environmental conditions.* Composite Structures, 2010. **92**(9): p. 2173-2180.
51. Mubashar, A., et al., *Moisture absorption–desorption effects in adhesive joints.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(8): p. 751-760.
52. Shishesaz, M., A. Reza, and M. Daniali, *Stress distribution in single lap joints with a cracked composite adherend - Part i: Single lamina adherends.* Journal of Adhesion, 2014. **90**(11): p. 912-931.

53. Love, A.E.H., *A treatise on the mathematical theory of elasticity*. Vol. 1. 2013: Cambridge University Press.
54. Daniel, I.M., et al., *Engineering mechanics of composite materials*. Vol. 3. 1994: Oxford university press New York.
55. Duncan, B., et al., *Failure of flexible adhesive joints*. NPL Report MATC (A), 2001. **34**.

Rapport-Gratuit.com

ANNEXE I

Stratégie pour la conception de joints collé et riveté parfaits.

Tableau 19 : Guidelines for mechanical fastened joints.

#	Guidelines	Remarks
1	Design the joint first and fill in the gaps afterwards; optimizing the basic structure first compromises the joint design and results in low overall structural efficiency.	
2	The Best bolted joint design can barely exceed half of the strength of unnotched laminated.	
3	Laminated percentages for efficient load transfer : 0° = 30-50%; 45°/135° = 40-60%; 90° = minimum of 10%.	>50% 0° results in in-plane shear failure and no load redistribution.
4	Maximize ply dispersion throughout the laminate. Keep the laminate as symmetric and balance as possible.	Ply concentration of the same angle do not allow load shearing between plies.
5	Composite joints should be designed to fail in either bearing or tension.	Shear-out failures result in low joint strengths.
6	Minimum fastener edge (E/D) should be 2,6D.	E/D less than 2.6 can result in a shear failure (eliminates load redistribution.
7	Minimum fastener pitch (W/D) should be 4.	
8	Many bolted composite joint contain too few bolts spaced too far apart and the diameters are too small to permit maximizing the strength of the laminate.	Use d/t = 1 d = bolt diameter t = laminate thickness
9	Rated shear strength of selected fastener should be conservative.	Allows redistribution of loading without concern that fastener will fall in shear.
10	Peak hoop tension stress around bolt holes is roughly equal to the average bearing stress.	
11	Bolt-bearing is sensitive to through-the-thickness clamp-up of laminates.	Higher clamp-up results in higher bearing strength.
12	Bolt bending is much more significant for composites than for metals, because composite members are thicker (for a given load).	d/t ~ 1 generally provides sufficient bolt bending strength.
13	Countersink depth should not exceed two-thirds of the total sheet thickness	Leaves one-third of total sheet thickness to carry most of the bearing load.
14	The preferred fastener material for use with carbon composites is titanium	Best coefficient of thermal expansion match and minimum corrosion problem.
15	Do not use interference fit-type fasteners that require driving the fasteners into the hole.	May cause hold damage, which will degrade bearing strength.
16	Use a CRES washer on all bolt/nut system.	Minimize corrosion problem.
17	Do not buck rivets in composite structure.	Shank expansion will damage hole.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

18	Squeeze rivets can be used if a washer is provided on the tail side.	Washer will spread out the bearing stress from installation.
19	Do not overtorque flush countersunk fastener.	May cause bearing failure under the head of the fastener.
20	Avoid the use of 3/16 in. diameter fasterners for through-the-thickness tension loading.	Small-diameter fasteners can be easily overtorqued and fail during installation. Use ¼ in. minimum.
21	Consider fastener fatigue effects of end fasteners in a multirow joint since they have the highest load.	
22	There are no fastener threads in bearing.	Threads could initiate a delamination and reduce fatigue life.
23	Use only titanium or A286, PH13-8MO, or PH17-4 stainless steel fasteners with carbon/epoxy.	To prevent corrosion of fasteners. Titanium is preferred; steel is acceptable only in a low-corrosion environment.
24	Do not use aluminum, cadmium-plated steel, or aluminium-coated fasteners with graphite/epoxy.	These materials are very susceptible to corrosion.
25	Steel fasteners in contact with carbon should be permanent and installed with sealant.	To prevent corrosion of fasteners.
26	Use a layer of fibreglass of Kevlar (0.005 in. minimum) on faying surfaces of graphite/epoxy panels adjacent to aluminium.	To prevent corrosion.
27	Use tension head fasteners for all applications. Shear head fasteners may be used in special applications with stress approval only.	Potentially high bearing stress under fasteners head; may cause laminate bearing failure.
28	For blind attachments to composite substructure, use big-foot-type titanium blind fasteners or equivalent recommended.	To prevent damage to composite substructure.
29	Use close tolerance fit.	Improved load distribution in a multifastener joint.

Tableau 20 : Guidelines for adhesive joints.

#	Guidelines	Remarks
1	Never design for an adhesive bond to be the weak link in a structure. The bonds should always be stronger than the members being joined.	Bonded joints must always be designed to be stronger than the adjacent structure; otherwise, the bond can act as a weak-link fuse and unzip catastrophically from a local defect.
2	Use secondary adhesive bonding extensively for thin, lightly loaded composite structure, restricting the use of mechanical fastening mainly to thicker, more heavily loaded structures.	Thick bonded joints can fail prematurely in peel. Bonding works best for thin structures.
3	Proper joint design should be used, avoiding tension, peel, or cleavage loading whenever possible. If peel forces cannot be avoided, a lower modulus (nonbrittle) adhesive having a high peel strength should be used.	Adhesives work best in shear and are poor in peel. Composites are even weaker in interlaminar tension.
4	Ensure that the bonded joint configuration is 100% inspectable.	...
5	Proper surface preparation is critical. Beware of cleaning solvents and peel plies. Mechanical abrasion is more reliable.	Surface gloss must be removed. Some peel plies use silicone.
6	Bonded joint strength is usually less in cold environment, where adhesive is brittle.	...
7	Balanced adherend stiffness improve joint strength.	...
8	Minimize joint eccentricities.	Eccentricities cause bending and peel stresses in adhesives.
9	Use adherends with similar coefficients of thermal expansion.	...
10	Use ductile adhesives rather than brittle ones.	Ductile adhesives are far more forgiving than brittle adhesives.
11	Use film adhesives rather than pastes.	Film adhesives have higher strength and controlled bondline thickness.
12	Adhesives are well characterized by a thick-adherend test coupon, generating a complete nonlinear stress-strain curve in shear.	...
13	Be aware of the need to dry laminates before doing bonded repairs.	Desorbing moisture during cure can blow out adhesive.
14	Care is needed to taper the ends of bonded overlaps (down to 0,020 in. thick with a 1-in-10 slope) to minimize induced peel stresses that would cause premature failures.	...

15	Design of simple, uniformly thick (for nearly quasi-isotropic carbon/epoxy) bonded splices is very simple ; about 30t overlap in double shear, 80t overlap for single-lap joints, and a 1-in-30 slope for scarf joint.	...
16	For highly loaded bonded joints, cocured, multiple-step, double-sided lap joints are preferred.	...
17	Thick bonded structures need complex stepped-lap joints to develop adequate efficiency.	...
18	Design of stepped-lap joints for thick, structure needs a nonlinear analysis program.	...
19	Thick bonded structures are very difficult to repair; so, except for one-shot and throwaway structures, original designs should be bolted together to permit bolted repairs.	...
20	The fillet or spew at the end of the exposed joint should not be removed.	Fillet improves static and fatigue properties.
21	Selection tests for structural adhesives should include durability testing for heat. Humidity (and/or fluids), and stress simultaneously.	Prevents unexpected long-term durability problems.
Composite-to-metal splice joint		
22	Bonded step joints preferred to scarf joints.	More consistent results.
23	Where possible, 0° plies (primary load direction) should be placed adjacent at the bondline; 45° plies are also acceptable; 90° plies should never be placed adjacent to the bondline unless it is also the primary load direction.	To maximize lap shear.
24	For a stepped joint, the metal thickness at the end step should be 0,020 in. minimum.	To prevent metal failure.
25	If possible, have ±45° plies end on the first and last steps of bonded step joints.	...
26	If possible, do not end more than two 0° plies (not more than 0,014 maximum thickness) on any one step surface.	...
27	Tension and peel stresses should be avoided in adhesive bonded joints.	Good design pratice
Composite-to-metal continuous joints		
28	Bonding composites to titanium (preferred) and steel (acceptable).	Material compatibility and best match of expansion coefficients.
29	Thermal expansion of dissimilar materials must be considered. Due to the large thermal expansion difference between carbon composite and aluminium, adhesively bonded joints between these two materials have been known to fail during cool-down from elevated-temperature cures as a result of the thermal stresses induced by their differential expansion coefficients.	To minimize interlaminar shear stress due to the large difference in the coefficient of thermal expansion between carbon composites and aluminum.

ANNEXE II

Codes de COSMOS/M pour générer les modèles.

Modèle collé pour comparer avec les essais expérimentaux

```
PTTOL,5e-005;
CTTOL,0.0001;
PARASSIGN,w,REAL,25.4
PARASSIGN,l,REAL,12.7
PARASSIGN,ta,REAL,0.254
PARASSIGN,t,REAL,3.20736
PARASSIGN,ltot,REAL,101.6
PARASSIGN,F,REAL,3560
PT,1,-ltot+l/2,-ta/2,w/2
PT,2,-ltot+l/2,-ta/2,-w/2
PT,3,-ltot+l/2,-ta/2-t,w/2
PT,4,-ltot+l/2,-ta/2-t,-w/2
PT,5,l/2,-ta/2-t,w/2
PT,6,l/2,-ta/2-t,-w/2
PT,7,l/2,-ta/2,w/2
PT,8,l/2,-ta/2,-w/2
PT,9,-l/2,-ta/2,w/2
PT,10,-l/2,-ta/2,-w/2
PT,11,-l/2-2.54,-ta/2-t,w/2
PT,12,-l/2-2.54,-ta/2-t,-w/2
PT,13,-l/2,ta/2,w/2
PT,14,-l/2,ta/2,-w/2
PT,15,l/2,ta/2,w/2
PT,16,l/2,ta/2,-w/2
PT,17,-l/2,ta/2+t,w/2
PT,18,-l/2,ta/2+t,-w/2
PT,19,l/2+2.54,ta/2+t,w/2
PT,20,l/2+2.54,ta/2+t,-w/2
PT,21,ltot-l/2,ta/2+t,w/2
PT,22,ltot-l/2,ta/2+t,-w/2
PT,23,ltot-l/2,ta/2,w/2
PT,24,ltot-l/2,ta/2,-w/2
PT,25,-ltot+l/2,ta/2,w/2
PT,26,-ltot+l/2,ta/2,-w/2
PT,27,-l/2-2.54,ta/2,w/2
PT,28,-l/2-2.54,ta/2,-w/2
PT,29,-l/2-2.54,-ta/2,w/2
PT,30,-l/2-2.54,-ta/2,-w/2
PT,31,-ltot+l/2,ta/2+t,w/2
PT,32,-ltot+l/2,ta/2+t,-w/2
PT,33,-l/2-2.54,ta/2+t,w/2
PT,34,-l/2-2.54,ta/2+t,-w/2
PT,35,l/2+2.54,ta/2,w/2
PT,36,l/2+2.54,ta/2,-w/2
```

```
PT,37,ltot-l/2,-ta/2,w/2
PT,38,ltot-l/2,-ta/2,-w/2
PT,39,l/2+2.54,-ta/2,w/2
PT,40,l/2+2.54,-ta/2,-w/2
PT,41,ltot-l/2,-ta/2-t,w/2
PT,42,ltot-l/2,-ta/2-t,-w/2
PT,43,l/2+2.54,-ta/2-t,w/2
PT,44,l/2+2.54,-ta/2-t,-w/2
VL8PT,1,8,1,2,3,4,29,30,11,12
VL8PT,2,8,29,30,7,8,11,12,5,6
VL8PT,3,8,7,8,15,16,9,10,13,14
VL8PT,4,8,13,14,35,36,17,18,19,20
VL8PT,5,8,35,36,23,24,19,20,21,22
VL8PT,6,8,1,2,29,30,25,26,27,28
VL8PT,7,8,25,26,27,28,31,32,33,34
VL8PT,8,8,23,24,35,36,37,38,39,40
VL8PT,9,8,37,38,39,40,41,42,43,44
PARASSIGN,mz,REAL,(w/25.4)/0.1
PARASSIGN,mx1,REAL,((Ltot-l/2-2.54)/25.4)/0.1
PARASSIGN,mx2,REAL,((l+2.54)/25.4)/0.05
PARASSIGN,mx3,REAL,(l/25.4)/0.05
CSYS,3,0,1,11,31
EGROUP,1,SOLID,0,1,0,0,0,0,0,0
EGROUP,2,SOLIDL,1,2,0,0,0,0,0,0
MPROP,1,EX,61183
MPROP,1,EY,19843
MPROP,1,EZ,61183
MPROP,1,NUXY,0.33
MPROP,1,NUYZ,0.37
MPROP,1,NUXZ,0.047
MPROP,1,GXY,5099
MPROP,1,GYZ,4065
MPROP,1,GXZ,6477
MPROP,2,EX,2232
MPROP,2,EY,2232
MPROP,2,EZ,2232
MPROP,2,NUXY,0.42
MPROP,2,NUYZ,0.42
MPROP,2,NUXZ,0.42
MPROP,2,GXY,854
MPROP,2,GYZ,854
MPROP,2,GXZ,854
MPROP,3,EX,73000
MPROP,3,EY,73000
MPROP,3,EZ,73000
MPROP,3,NUXY,0.33
MPROP,3,NUYZ,0.33
```

```
MPROP,3,NUXZ,0.33
MPROP,3,GXY,28000
MPROP,3,GYZ,28000
MPROP,3,GXZ,28000
RCONST,1,1,1,6,0,0,0,1,0,0
RCONST,1,1,7,3,0,1,0
RCONST,2,2,1,6,0,1,1,0,t/8,t/8
RCONST,2,2,7,6,t/8,t/8,1,0.785398,t/8,t/8
RCONST,2,2,13,2,t/8,t/8
RCONST,2,3,1,6,0,1,1,0.785398,t/8,t/8
RCONST,2,3,7,6,t/8,t/8,1,0,t/8,t/8
RCONST,2,3,13,2,t/8,t/8
M_VL,3,3,1,8,mz,3,mx3,1,1,1
PARASSIGN,el1,REAL,ELMAX
M_VL,6,6,1,8,mz,mx1,2,1,1,1
M_VL,8,8,1,8,mz,mx1,2,1,1,1
EPROPCHANGE,1,elmax,1,EG,1,12
EPROPCHANGE,1,elmax,1,RC,1,12
EPROPCHANGE,1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,1,elmax,1,MP,2,12
PARASSIGN,el2,REAL,ELMAX
M_VL,7,7,1,8,mz,mx1,4,1,1,1
M_VL,2,2,1,8,mz,mx2,4,1,1,1
M_VL,1,1,1,8,mz,4,mx1,1,1,1
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,EG,2,4
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,RC,2,4
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,MP,1,4
PARASSIGN,el3,REAL,ELMAX
M_VL,9,9,1,8,mz,mx1,4,1,1,1
M_VL,4,4,1,8,mz,mx2,4,1,1,1
PARASSIGN,el4,REAL,ELMAX
M_VL,5,5,1,8,mz,mx1,4,1,1,1
EPROPCHANGE,el4+1,elmax,1,EG,2,4
EPROPCHANGE,el4+1,elmax,1,RC,2,4
EPROPCHANGE,el4+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el4+1,elmax,1,MP,1,4
PARASSIGN,el5,REAL,ELMAX
NMERGE,1,NDMAX,1,0.0001,0,0,0
NCOMPRESS,1,NDMAX
DSF,1,AL,0,1,1, ;
DSF,31,AL,0,31,1, ;
DSF,37,AL,0,37,1, ;
DSF,27,UY,0,27,1, ;
DSF,43,UY,0,43,1, ;
DSF,49,UY,0,49,1, ;
DSF,27,UZ,0,27,1, ;
```

```
DSF,43,UZ,0,43,1, ;
DSF,49,UZ,0,49,1, ;
DSF,27,AR,0,27,1, ;
DSF,43,AR,0,43,1, ;
DSF,49,AR,0,49,1, ;
CPDOFST,1,UX,NDMAX,27,27,1
CPDOFST,17,UX,NDMAX,43,43,1
CPDOFST,25,UX,NDMAX,49,49,1
DSF,4,SZ,0,4,1, ;
DSF,38,SZ,0,38,1, ;
DSF,32,SZ,0,32,1, ;
DSF,6,SZ,0,6,1, ;
DSF,34,SZ,0,34,1, ;
DSF,40,SZ,0,40,1, ;
DSF,9,SZ,0,9,1, ;
DSF,15,SZ,0,15,1, ;
DSF,21,SZ,0,21,1, ;
DSF,11,SZ,0,11,1, ;
DSF,17,SZ,0,17,1, ;
DSF,23,SZ,0,23,1, ;
DSF,4,SZ,0,4,1, ;
DSF,50,SZ,0,50,1, ;
DSF,44,SZ,0,44,1, ;
DSF,26,SZ,0,26,1, ;
DSF,52,SZ,0,52,1, ;
DSF,46,SZ,0,46,1, ;
DSF,28,SZ,0,28,1, ;
TOFFSET,0
TREF,0
ACTSET,LC,1
PSF,27,F/(w*t),27,1,F/(w*t),F/(w*t),1
R_STATIC;
LISTLOG,1,von-mises.txt,1,0
STRLIST,1,2,0,1,0,2,1,mz*mx3*3,1,0
```

Uniquement lorsqu'on applique les conditions de symétrie

Rapport-Gratuit.com

Modèle riveté pour comparer aux essais expérimentaux

```
PTTOL,5e-005;
CTTOL,0.0001;
PARASSIGN,w,REAL,25.4
PARASSIGN,l,REAL,38.1
PARASSIGN,t,REAL,3.16992
PARASSIGN,ltot,REAL,101.6
PARASSIGN,dtige,REAL,3.175
PARASSIGN,dtete,REAL,2*dtige
PARASSIGN,ddef,REAL,3*dtige/2
PARASSIGN,dwasher,REAL,9.525
PARASSIGN,hwasher,REAL,0.79248
PARASSIGN,htete,REAL,1.0668
PARASSIGN,hdef,REAL,2.54
PARASSIGN,F,REAL,1335
PT,1,-ltot+l/2,0,w/2
PT,2,-ltot+l/2,0,-w/2
PT,3,-ltot+l/2,-t,w/2
PT,4,-ltot+l/2,-t,-w/2
PT,5,-l/2-2.54,-t,w/2
PT,6,-l/2-2.54,-t,-w/2
PT,7,-l/2,0,w/2
PT,8,-l/2,0,-w/2
PT,9,-l/2-2.54,0,w/2
PT,10,-l/2-2.54,0,-w/2
PT,11,-ltot+l/2,t,w/2
PT,12,-ltot+l/2,t,-w/2
PT,13,-l/2-2.54,t,w/2
PT,14,-l/2-2.54,t,-w/2
PT,15,0,-t,0
PT,16,-6.35,-t,-6.35
PT,17,6.35,-t,-6.35
VL8PT,1,8,1,2,3,4,9,10,5,6
CRLINE,13,16,17
PLANE,Y,0,1
CRPCIRCLE,14,15,17,dwasher/2,90,1
SF2CR,7,13,14,0
VLEXTR,7,7,1,Y,t
VLGEN,3,2,2,1,1,0,90,0
CRPCIRCLE,45,15,17,dtige/2,90,1
SF2CR,27,14,45,0
VLEXTR,27,27,1,Y,t
VLGEN,3,6,6,1,1,0,90,0
PT,40,-6.35,-t,w/2
PT,41,-6.35,-t,-w/2
```

```
PT,42,-6.35,0,w/2
PT,43,-6.35,0,-w/2
PT,44,6.35,-t,w/2
PT,45,6.35,-t,-w/2
PT,46,6.35,0,w/2
PT,47,6.35,0,-w/2
PT,48,l/2,-t,w/2
PT,49,l/2,-t,-w/2
PT,50,l/2,0,w/2
PT,51,l/2,0,-w/2
VL8PT,10,8,9,10,5,6,42,43,40,41
VL8PT,11,8,46,47,44,45,50,51,48,49
VL8PT,12,8,42,28,40,24,46,30,44,26
VL8PT,13,8,20,43,16,41,22,47,17,45
PT,52,-l/2,t,w/2
PT,53,-l/2,t,-w/2
PT,54,-6.35,t,w/2
PT,55,-6.35,t,-w/2
PT,56,0,t,0
PT,57,-6.35,t,-6.35
PT,58,6.35,t,-6.35
VL8PT,14,8,52,53,7,8,54,55,42,43
CRLINE,116,57,58
CRPCIRCLE,117,56,58,dwasher/2,90,1
SF2CR,73,117,116,0
VLEXTR,73,73,1,Y,-t
VLGEN,3,15,15,1,1,0,90,0
CRPCIRCLE,147,56,58,dtige/2,90,1
SF2CR,93,147,117,0
VLEXTR,93,93,1,Y,-t
VLGEN,3,19,19,1,1,0,90,0
PT,69,6.35,t,w/2
PT,70,6.35,t,-w/2
PT,71,l/2+2.54,t,w/2
PT,72,l/2+2.54,t,-w/2
PT,73,ltot-l/2,0,w/2
PT,74,ltot-l/2,0,-w/2
PT,75,ltot-l/2,t,w/2
PT,76,ltot-l/2,t,-w/2
PT,77,l/2+2.54,0,w/2
PT,78,l/2+2.54,0,-w/2
PT,79,l/2+2.54,-t,w/2
PT,80,l/2+2.54,-t,-w/2
PT,81,ltot-l/2,-t,w/2
PT,82,ltot-l/2,-t,-w/2
VL8PT,23,8,69,70,46,47,71,72,77,78
VL8PT,24,8,54,62,42,28,69,64,46,30
```

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

```
VL8PT,25,8,57,55,20,43,58,70,22,47
VL8PT,26,8,71,72,77,78,75,76,73,74
TOFFSET,0
TREF,0
PT,83,(dtige/2)*0.707106781,-t,-(dtige/2)*0.707106781
PT,84,(dtige/2)*0.707106781,-t-hwasher,-(dtige/2)*0.707106781
PT,85,(dwasher/2)*0.707106781,-t,-(dwasher/2)*0.707106781
PT,86,(dwasher/2)*0.707106781,-t-hwasher,-(dwasher/2)*0.707106781
SF4PT,137,32,84,18,86,0
VLSWEEP,137,137,1,Y,360,4
PT,97,0.011048543*25.4,t+htete,-0.011048543*25.4
PT,98,(dtete/2)*0.707106781,t+htete,-(dtete/2)*0.707106781
PT,99,(dtete/2)*0.707106781,t,-(dtete/2)*0.707106781
PT,100,0.011048543*25.4,t,-0.011048543*25.4
PT,101,0.011048543*25.4,-t-hwasher,-0.011048543*25.4
PT,102,(ddef/2)*0.707106781,-t-hwasher,-(ddef/2)*0.707106781
PT,103,(ddef/2)*0.707106781,-t-hwasher-hdef,-(ddef/2)*0.707106781
PT,104,0.011048543*25.4,-t-hwasher-hdef,-0.011048543*25.4
SF4PT,157,97,98,99,100,0
SF4PT,158,100,65,84,101,0
SF4PT,159,101,102,103,104,0
VLSWEEP,157,157,1,Y,360,4
VLSWEEP,158,158,1,Y,360,4
VLSWEEL,159,159,1,Y,360,4
VL8PT,43,8,11,12,1,2,13,14,9,10
VL8PT,44,8,77,78,79,80,73,74,81,82
CSYS,3,0,3,5,1
EGROUP,1,SOLID,0,1,0,0,0,0,0,0
EGROUP,2,SOLIDL,1,4,0,0,0,0,0,0
MPROP,1,EX,61183
MPROP,1,EY,19843
MPROP,1,EZ,61183
MPROP,1,NUXY,0.33
MPROP,1,NUYZ,0.37
MPROP,1,NUXZ,0.047
MPROP,1,GXY,5099
MPROP,1,GYZ,4065
MPROP,1,GXZ,6477
RCONST,1,1,1,6,0,0,0,1,0,0
RCONST,1,1,7,3,0,1,0
RCONST,2,2,1,6,0,1,1,0,t/8,t/8
RCONST,2,2,7,6,t/8,t/8,1,0.785398,t/8,t/8
RCONST,2,2,13,6,t/8,t/8,1,0,t/8,t/8
RCONST,2,2,19,6,t/8,t/8,1,0.785398,t/8,t/8
RCONST,2,2,25,2,t/8,t/8
MPROP,2,EX,73000
MPROP,2,EY,73000
```

```
MPROP,2,EZ,73000
MPROP,2,NUXY,0.33
MPROP,2,NUYZ,0.33
MPROP,2,NUXZ,0.33
MPROP,2,GXY,28000
MPROP,2,GYZ,28000
MPROP,2,GXZ,28000
MPROP,3,EX,73000
MPROP,3,EY,73000
MPROP,3,EZ,73000
MPROP,3,NUXY,0.33
MPROP,3,NUYZ,0.33
MPROP,3,NUXZ,0.33
MPROP,3,GXY,28000
MPROP,3,GYZ,28000
MPROP,3,GXZ,28000
M_VL,27,30,1,8,1,8,10,1,1,1
EPROPCHANGE,1,elmax,1,EG,1,12
EPROPCHANGE,1,elmax,1,RC,1,12
EPROPCHANGE,1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,1,elmax,1,MP,2,12
NMERGE,1,NDMAX,1,0.001,0,1,0
NCOMPRESS,1,NDMAX
PARASSIGN,nd1,REAL,NDMAX
PARASSIGN,el1,REAL,ELMAX
M_VL,31,34,1,8,(((dtete/2)/25.4)/0.015625)-1,2,10,1,1,1
M_VL,35,38,1,8,(((dtige/2)/25.4)/0.015625)-1,9,10,1,1,1
M_VL,39,42,1,8,(((ddef/2)/25.4)/0.015625)-1,3,10,1,1,1
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,EG,1,12
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,RC,1,12
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,MP,2,12
NMERGE,nd1+1,NDMAX,1,0.001,1,1,0
NCOMPRESS,nd1+1,NDMAX
PARASSIGN,nd2,REAL,NDMAX
PARASSIGN,el2,REAL,ELMAX
M_VL,1,1,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
M_VL,2,5,1,8,10,5,4,1,1,1
M_VL,6,9,1,8,10,((((dwasher-dtige)/2)/25.4)/0.015625),4,1,1,1
M_VL,10,10,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2+2.54-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,11,11,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,12,12,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
M_VL,13,13,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
M_VL,43,43,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,EG,2,4
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,RC,2,4
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,EC,3
```

```
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,MP,1,4
NMERGE,nd2+1,NDMAX,1,0.001,1,1,0
NCOMPRESS,nd2+1,NDMAX
PARASSIGN,nd3,REAL,NDMAX
PARASSIGN,el3,REAL,ELMAX
M_VL,14,14,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,15,18,1,8,10,5,4,1,1,1
M_VL,19,22,1,8,10,((((dwasher-dtige)/2)/25.4)/0.015625),4,1,1,1
M_VL,23,23,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2+2.54-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,24,24,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
M_VL,25,25,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
M_VL,44,44,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
M_VL,26,26,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,EG,2,4
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,RC,2,4
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,MP,1,4
NMERGE,nd3+1,NDMAX,1,0.001,1,1,0
NCOMPRESS,nd3+1,NDMAX
PARASSIGN,nd4,REAL,NDMAX
PARASSIGN,el4,REAL,ELMAX
EGROUP,3,GAP,1,1,0,2,4,1,0,0
RCONST,3,3,1,2,0,0
ACTSET,EG,3
ACTSET,RC,3
NL_GSAUTO,1,45,1,71,71,1,1
NL_GSAUTO,1,63,1,129,129,1,1
NL_GSAUTO,1,51,1,117,117,1,1
NL_GSAUTO,1,57,1,123,123,1,1
NL_GSAUTO,1,16,1,82,82,1,1
NL_GSAUTO,1,8,1,74,74,1,1
NL_GSAUTO,1,18,1,84,84,1,1
NL_GSAUTO,1,17,1,83,83,1,1
NL_GSAUTO,1,35,1,102,102,1,1
NL_GSAUTO,1,28,1,94,94,1,1
NL_GSAUTO,1,37,1,104,104,1,1
NL_GSAUTO,1,36,1,103,103,1,1
NL_GSAUTO,1,143,1,32,32,1,1
NL_GSAUTO,1,142,1,27,27,1,1
NL_GSAUTO,1,145,1,34,34,1,1
NL_GSAUTO,1,144,1,33,33,1,1
NL_GSAUTO,1,99,1,169,169,1,1
NL_GSAUTO,1,93,1,168,168,1,1
NL_GSAUTO,1,101,1,171,171,1,1
NL_GSAUTO,1,100,1,170,170,1,1
NL_GSAUTO,1,151,1,199,199,1,1
NL_GSAUTO,1,150,1,198,198,1,1
```

```
NL_GSAUTO,1,153,1,201,201,1,1
NL_GSAUTO,1,152,1,200,200,1,1
NL_GSAUTO,1,105,1,192,192,1,1
NL_GSAUTO,1,95,1,191,191,1,1
NL_GSAUTO,1,111,1,194,194,1,1
NL_GSAUTO,1,108,1,193,193,1,1
NL_GSAUTO,1,39,1,192,192,1,1
NL_GSAUTO,1,30,1,191,191,1,1
NL_GSAUTO,1,42,1,194,194,1,1
NL_GSAUTO,1,41,1,193,193,1,1
NL_GSAUTO,1,139,1,192,192,1,1
NL_GSAUTO,1,138,1,191,191,1,1
NL_GSAUTO,1,141,1,194,194,1,1
NL_GSAUTO,1,140,1,193,193,1,1
DSF,1,AL,0,1,1,;
DSF,217,AL,0,217,1,;
DSF,132,UY,0,132,1, ;
DSF,132,UZ,0,132,1, ;
DSF,132,AR,0,132,1, ;
DSF,224,UY,0,224,1, ;
DSF,224,UZ,0,224,1, ;
DSF,224,AR,0,224,1, ;
ACTSET,LC,1
PSF,132,F/(w*t),132,1,F/(w*t),F/(w*t),1
CPDOFSF,1,UX,NDMAX-((((w/25.4)/0.05)+1)*5)+((w/25.4)/0.05)+1,132,132,1
CPDOFSF,30,UX,NDMAX-((((w/25.4)/0.05)+1)*5)+((w/25.4)/0.05)+1,224,224,1
DSF,4,SZ,0,4,1, ;
DSF,6,SZ,0,6,1, ;
DSF,46,SZ,0,46,1, ;
DSF,70,SZ,0,70,1, ;
DSF,48,SZ,0,48,1, ;
DSF,72,SZ,0,72,1, ;
DSF,58,SZ,0,58,1, ;
DSF,122,SZ,0,122,1, ;
DSF,66,SZ,0,66,1, ;
DSF,130,SZ,0,130,1, ;
DSF,52,SZ,0,52,1, ;
DSF,116,SZ,0,116,1, ;
DSF,54,SZ,0,54,1, ;
DSF,118,SZ,0,118,1, ;
DSF,134,SZ,0,134,1, ;
DSF,136,SZ,0,136,1, ;
DSF,220,SZ,0,220,1, ;
DSF,222,SZ,0,222,1, ;
DSF,226,SZ,0,226,1, ;
DSF,228,SZ,0,228,1, ;
R_STATIC;
```

Uniquement lorsqu'on applique les conditions de symétrie

```
LISTLOG,1,von-mises-rivet.txt,1,0
STRLIST,1,2,0,1,0,2,el1+1,el2,1,0
LISTLOG,1,von-mises-composite.txt,1,0
STRLIST,1,2,0,1,0,2,el2+1,el4,1,0
```

Modèle hybride pour comparer avec les essais expérimentaux

```
PTTOL,5e-005;
CTTOL,0.0001;
PARASSIGN,w,REAL,25.4
PARASSIGN,l,REAL,38.1
PARASSIGN,ta,REAL,0.254
PARASSIGN,t,REAL,3.16992
PARASSIGN,ltot,REAL,101.6
PARASSIGN,dtige,REAL,3.175
PARASSIGN,dtete,REAL,2*dtige
PARASSIGN,ddef,REAL,3*dtige/2
PARASSIGN,dwasher,REAL,9.525
PARASSIGN,hwasher,REAL,0.79248
PARASSIGN,htete,REAL,1.0668
PARASSIGN,hdef,REAL,2.54
PARASSIGN,F,REAL,2670
PT,1,-ltot+l/2,-ta/2,w/2
PT,2,-ltot+l/2,-ta/2,-w/2
PT,3,-ltot+l/2,-ta/2-t,w/2
PT,4,-ltot+l/2,-ta/2-t,-w/2
PT,5,-l/2-2.54,-ta/2-t,w/2
PT,6,-l/2-2.54,-ta/2-t,-w/2
PT,7,-l/2-2.54,-ta/2,w/2
PT,8,-l/2-2.54,-ta/2,-w/2
PT,9,-6.35,-ta/2,w/2
PT,10,-6.35,-ta/2,-w/2
PT,11,-6.35,-ta/2-t,w/2
PT,12,-6.35,-ta/2-t,-w/2
PT,13,6.35,-ta/2-t,w/2
PT,14,6.35,-ta/2-t,-w/2
PT,15,6.35,-ta/2,w/2
PT,16,6.35,-ta/2,-w/2
PT,17,l/2,-ta/2,w/2
PT,18,l/2,-ta/2,-w/2
PT,19,l/2,-ta/2-t,w/2
PT,20,l/2,-ta/2-t,-w/2
PT,21,0,-ta/2-t,0
PT,22,-6.35,-ta/2-t,-6.35
PT,23,6.35,-ta/2-t,-6.35
VL8PT,1,8,1,2,3,4,7,8,5,6
VL8PT,2,8,7,8,5,6,9,10,11,12
VL8PT,3,8,15,16,13,14,17,18,19,20
CRLINE,34,22,23
PLANE,Y,0,1
CRPCIRCLE,35,21,23,dwasher/2,90,1
```

```
SF2CR,19,34,35,0
VLEXTR,19,19,1,Y,t
VLGEN,3,4,4,1,1,0,90,0
CRPCIRCLE,66,21,23,dtige/2,90,1
SF2CR,39,35,66,0
VLEXTR,39,39,1,Y,t
VLGEN,3,8,8,1,1,0,90,0
VL8PT,12,8,26,10,22,12,28,16,23,14
VL8PT,13,8,9,34,11,30,15,36,13,32
PT,46,-l/2,-ta/2,w/2
PT,47,-l/2,-ta/2,-w/2
PT,48,-l/2,ta/2,w/2
PT,49,-l/2,ta/2,-w/2
PT,50,l/2,ta/2,w/2
PT,51,l/2,ta/2,-w/2
PT,52,-6.35,ta/2,w/2
PT,53,-6.35,ta/2,-w/2
PT,54,6.35,ta/2,w/2
PT,55,6.35,ta/2,-w/2
PT,56,0,ta/2,0
PT,57,-6.35,ta/2,-6.35
PT,58,6.35,ta/2,-6.35
VL8PT,14,8,48,49,46,47,52,53,9,10
VL8PT,15,8,54,55,15,16,50,51,17,18
CRLINE,126,57,58
PLANE,Y,0,1
CRPCIRCLE,127,56,58,dwasher/2,90,1
SF2CR,79,126,127,0
VLEXTR,79,79,1,Y,-ta
VLGEN,3,16,16,1,1,0,90,0
CRPCIRCLE,146,56,58,dtige/2,90,1
SF2CR,95,127,146,0
VLEXTR,95,95,1,Y,-ta
VLGEN,3,20,20,1,1,0,90,0
VL8PT,24,8,57,53,26,10,58,55,28,16
VL8PT,25,8,52,61,9,34,54,63,15,36
PT,69,-l/2,ta/2+t,w/2
PT,70,-l/2,ta/2+t,-w/2
PT,71,-6.35,ta/2+t,w/2
PT,72,-6.35,ta/2+t,-w/2
PT,73,6.35,ta/2+t,w/2
PT,74,6.35,ta/2+t,-w/2
PT,75,l/2+2.54,ta/2+t,w/2
PT,76,l/2+2.54,ta/2+t,-w/2
PT,77,l/2+2.54,ta/2,w/2
PT,78,l/2+2.54,ta/2,-w/2
PT,79,ltot-l/2,ta/2+t,w/2
```

```
PT,80,ltot-l/2,ta/2+t,-w/2
PT,81,ltot-l/2,ta/2,w/2
PT,82,ltot-l/2,ta/2,-w/2
PT,83,0,ta/2+t,0
PT,84,-6.35,ta/2+t,-6.35
PT,85,6.35,ta/2+t,-6.35
VL8PT,26,8,69,70,48,49,71,72,52,53
VL8PT,27,8,73,74,54,55,75,76,77,78
VL8PT,28,8,75,76,77,78,79,80,81,82
CRLINE,200,84,85
PLANE,Y,0,1
CRPCIRCLE,201,83,85,dwasher/2,90,1
SF2CR,137,200,201,0
VLEXTR,137,137,1,Y,-t
VLGEN,3,29,29,1,1,0,90,0
CRPCIRCLE,220,83,85,dtige/2,90,1
SF2CR,153,201,220,0
VLEXTR,153,153,1,Y,-t
VLGEN,3,33,33,1,1,0,90,0
VL8PT,37,8,84,72,57,53,85,74,58,55
VL8PT,38,8,71,88,52,61,73,90,54,63
PT,96,(dtige/2)*0.707106781,-ta/2-t,-(dtige/2)*0.707106781
PT,97,(dtige/2)*0.707106781,-ta/2-t-hwasher,-(dtige/2)*0.707106781
PT,98,(dwasher/2)*0.707106781,-ta/2-t,-(dwasher/2)*0.707106781
PT,99,(dwasher/2)*0.707106781,-ta/2-t-hwasher,-(dwasher/2)*0.707106781
SF4PT,177,38,97,24,99,0
VLSWEEP,177,177,1,Y,360,4
PT,107,0.011048543*25.4,ta/2+t+htete,-0.011048543*25.4
PT,108,(dtete/2)*0.707106781,ta/2+t+htete,-(dtete/2)*0.707106781
PT,109,(dtete/2)*0.707106781,ta/2+t,-(dtete/2)*0.707106781
PT,110,0.011048543*25.4,ta/2+t,-0.011048543*25.4
PT,111,0.011048543*25.4,-ta/2-t-hwasher,-0.011048543*25.4
PT,112,(ddef/2)*0.707106781,-0.-ta/2-t-hwasher,-(ddef/2)*0.707106781
PT,113,(ddef/2)*0.707106781,-0.-ta/2-t-hwasher-hdef,-(ddef/2)*0.707106781
PT,114,0.011048543*25.4,-ta/2-t-hwasher-hdef,-0.011048543*25.4
PT,115,0.011048543*25.4,ta/2,-0.011048543*25.4
PT,116,0.011048543*25.4,-ta/2,-0.011048543*25.4
SF4PT,197,107,108,109,110,0
SF4PT,198,110,92,65,115,0
SF4PT,199,115,65,41,116,0
SF4PT,200,116,41,97,111,0
SF4PT,201,111,112,113,114,0
VLSWEEP,197,197,1,Y,360,4
VLSWEEP,198,198,1,Y,360,4
VLSWEEL,199,199,1,Y,360,4
VLSWEEL,200,200,1,Y,360,4
VLSWEEL,201,201,1,Y,360,4
```

Rapport-Gratuit.com

```
PT,150,-ltot+l/2,ta/2,w/2
PT,151,-ltot+l/2,ta/2,-w/2
PT,152,-l/2-2.54,ta/2,w/2
PT,153,-l/2-2.54,ta/2,-w/2
PT,154,-ltot+l/2,ta/2+t,w/2
PT,155,-ltot+l/2,ta/2+t,-w/2
PT,156,-l/2-2.54,ta/2+t,w/2
PT,157,-l/2-2.54,ta/2+t,-w/2
VL8PT,63,8,150,151,1,2,152,153,7,8
VL8PT,64,8,154,155,150,151,156,157,152,153
PT,158,l/2+2.54,-ta/2,w/2
PT,159,l/2+2.54,-ta/2,-w/2
PT,160,ltot-l/2,-ta/2,w/2
PT,161,ltot-l/2,-ta/2,-w/2
PT,162,l/2+2.54,-ta/2-t,w/2
PT,163,l/2+2.54,-ta/2-t,-w/2
PT,164,ltot-l/2,-ta/2-t,w/2
PT,165,ltot-l/2,-ta/2-t,-w/2
VL8PT,65,8,77,78,158,159,81,82,160,161
VL8PT,66,8,158,159,162,163,160,161,164,165
CSYS,3,0,3,5,1
EGROUP,1,SOLID,0,1,0,0,0,0,0,0
EGROUP,2,SOLIDL,1,4,0,0,0,0,0,0
MPROP,1,EX,61183
MPROP,1,EY,19843
MPROP,1,EZ,61183
MPROP,1,NUXY,0.33
MPROP,1,NUYZ,0.37
MPROP,1,NUXZ,0.047
MPROP,1,GXY,5099
MPROP,1,GYZ,4065
MPROP,1,GXZ,6477
MPROP,2,EX,73000
MPROP,2,EY,73000
MPROP,2,EZ,73000
MPROP,2,NUXY,0.33
MPROP,2,NUYZ,0.33
MPROP,2,NUXZ,0.33
MPROP,2,GXY,28000
MPROP,2,GYZ,28000
MPROP,2,GXZ,28000
MPROP,3,EX,73000
MPROP,3,EY,73000
MPROP,3,EZ,73000
MPROP,3,NUXY,0.33
MPROP,3,NUYZ,0.33
MPROP,3,NUXZ,0.33
```

```
MPROP,3,GXY,28000
MPROP,3,GYZ,28000
MPROP,3,GXZ,28000
MPROP,4,EX,2232
MPROP,4,EY,2232
MPROP,4,EZ,2232
MPROP,4,NUXY,0.42
MPROP,4,NUYZ,0.42
MPROP,4,NUXZ,0.42
MPROP,4,GXY,854
MPROP,4,GYZ,854
MPROP,4,GXZ,854
RCONST,1,1,1,6,0,0,0,1,0,0
RCONST,1,1,7,3,0,1,0
RCONST,2,2,1,6,0,1,1,0,t/8,t/8
RCONST,2,2,7,6,t/8,t/8,1,0.785398,t/8,t/8
RCONST,2,2,13,6,t/8,t/8,1,0,t/8,t/8
RCONST,2,2,19,6,t/8,t/8,1,0.785398,t/8,t/8
RCONST,2,2,25,2,t/8,t/8
M_VL,39,42,1,8,1,8,10,1,1,1
EPROPCHANGE,1,elmax,1,EG,1,2
EPROPCHANGE,1,elmax,1,RC,1,2
EPROPCHANGE,1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,1,elmax,1,MP,2,2
NMERGE,1,NDMAX,1,0.001,0,1,0
NCOMPRESS,1,NDMAX
PARASSIGN,nd1,REAL,NDMAX
PARASSIGN,el1,REAL,ELMAX
M_VL,43,46,1,8,(((dtete/2)/25.4)/0.015625)-1,2,10,1,1,1
M_VL,47,50,1,8,(((dtige/2)/25.4)/0.015625)-1,4,10,1,1,1
M_VL,51,54,1,8,(((dtige/2)/25.4)/0.015625)-1,3,10,1,1,1
M_VL,55,58,1,8,(((dtige/2)/25.4)/0.015625)-1,5,10,1,1,1
M_VL,59,62,1,8,(((ddef/2)/25.4)/0.015625)-1,3,10,1,1,1
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,EG,1,2
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,RC,1,2
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,MP,2,2
NMERGE,nd1+1,NDMAX,1,0.001,1,1,0
NCOMPRESS,nd1+1,NDMAX
PARASSIGN,nd2,REAL,NDMAX
PARASSIGN,el2,REAL,ELMAX
M_VL,1,1,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
M_VL,2,2,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2+2.54-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,3,3,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,4,7,1,8,10,5,4,1,1,1
M_VL,8,11,1,8,10,((((dwasher-dtige)/2)/25.4)/0.015625),4,1,1,1
M_VL,12,12,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
```

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

```
M_VL,13,13,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
M_VL,64,64,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,EG,2,4
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,RC,2,4
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,MP,1,4
PARASSIGN,el3,REAL,ELMAX
M_VL,14,14,1,8,(w/25.4)/0.05,3,((l/2-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,15,15,1,8,(w/25.4)/0.05,3,((l/2-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,16,19,1,8,10,5,3,1,1,1
M_VL,20,23,1,8,10,((((dwasher-dtige)/2)/25.4)/0.015625),3,1,1,1
M_VL,24,24,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,3,10,1,1,1
M_VL,25,25,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,3,10,1,1,1
PARASSIGN,el4,REAL,ELMAX
M_VL,63,63,1,8,(w/25.4)/0.05,2,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
M_VL,65,65,1,8,(w/25.4)/0.05,2,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,EG,1,12
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,RC,1,12
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,MP,4,12
PARASSIGN,el5,REAL,ELMAX
M_VL,26,26,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,27,27,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2+2.54-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,29,32,1,8,10,5,4,1,1,1
M_VL,33,36,1,8,10,((((dwasher-dtige)/2)/25.4)/0.015625),4,1,1,1
M_VL,37,37,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
M_VL,38,38,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
M_VL,66,66,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
M_VL,28,28,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
EPROPCHANGE,el5+1,elmax,1,EG,2,4
EPROPCHANGE,el5+1,elmax,1,RC,2,4
EPROPCHANGE,el5+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el5+1,elmax,1,MP,1,4
NMERGE,nd2+1,NDMAX,1,0.001,1,1,0
NCOMPRESS,nd2+1,NDMAX
PARASSIGN,nd3,REAL,NDMAX
PARASSIGN,el6,REAL,ELMAX
EGROUP,3,GAP,1,2,0,2,4,0,0,0
RCONST,3,3,1,2,0,0
ACTSET,EG,3
ACTSET,RC,3
NL_GSAUTO,1,157,1,211,211,1,1
NL_GSAUTO,1,153,1,210,210,1,1
NL_GSAUTO,1,159,1,213,213,1,1
NL_GSAUTO,1,158,1,212,212,1,1
NL_GSAUTO,1,183,1,44,44,1,1
NL_GSAUTO,1,182,1,39,39,1,1
```

```
NL_GSAUTO,1,185,1,46,46,1,1
NL_GSAUTO,1,184,1,45,45,1,1
NL_GSAUTO,1,191,1,279,279,1,1
NL_GSAUTO,1,190,1,278,278,1,1
NL_GSAUTO,1,193,1,281,281,1,1
NL_GSAUTO,1,192,1,280,280,1,1
NL_GSAUTO,1,234,1,161,161,1,1
NL_GSAUTO,1,233,1,155,155,1,1
NL_GSAUTO,1,236,1,164,164,1,1
NL_GSAUTO,1,235,1,163,163,1,1
NL_GSAUTO,1,253,1,103,103,1,1
NL_GSAUTO,1,252,1,97,97,1,1
NL_GSAUTO,1,255,1,106,106,1,1
NL_GSAUTO,1,254,1,105,105,1,1
NL_GSAUTO,1,272,1,51,51,1,1
NL_GSAUTO,1,271,1,42,42,1,1
NL_GSAUTO,1,274,1,54,54,1,1
NL_GSAUTO,1,273,1,53,53,1,1
NL_GSAUTO,1,272,1,179,179,1,1
NL_GSAUTO,1,271,1,178,178,1,1
NL_GSAUTO,1,274,1,181,181,1,1
NL_GSAUTO,1,273,1,180,180,1,1
DSF,1,AL,0,1,1, ;
DSF,297,AL,0,297,1, ;
DSF,303,AL,0,303,1, ;
DSF,132,UY,0,132,1, ;
DSF,132,UZ,0,132,1, ;
DSF,132,AR,0,132,1, ;
DSF,310,UY,0,310,1, ;
DSF,310,UZ,0,310,1, ;
DSF,310,AR,0,310,1, ;
DSF,316,UY,0,316,1, ;
DSF,316,UZ,0,316,1, ;
DSF,316,AR,0,316,1, ;
CPDOFSF,1,UX,ND3-((((w/25.4)/0.05)+1)*5)+((w/25.4)/0.05)+1,132,132,1
CPDOFSF,34,UX,ND3-((((w/25.4)/0.05)+1)*5)+((w/25.4)/0.05)+1,310,310,1
CPDOFSF,50,UX,ND3-((((w/25.4)/0.05)+1)*5)+((w/25.4)/0.05)+1,316,316,1
ACTSET,LC,1
PSF,132,F/(w*t),132,1,F/(w*t),F/(w*t),1
R_STATIC;
LISTLOG,1,von-mises-rivet.txt,1,0
STRLIST,1,2,0,1,0,2,el1+1,el2,1,0
LISTLOG,1,von-mises-composite.txt,1,0
STRLIST,1,2,0,1,0,2,el2+1,el3,1,0
STRLIST,1,2,0,1,0,2,el5+1,el6,1,0
LISTLOG,1,von-mises-colle.txt,1,0
STRLIST,1,2,0,1,0,2,el3+1,el4,1,0
```

Modèle hybride où on augmente la largeur du patron élémentaire

```
PTTOL,5e-005;
CTTOL,0.0001;
ARRDEF,largeur[5],REAL
ARRDEF,recouv[5],REAL
ARRDEF,epaicol[5],REAL
ARRDEF,epaicomp[5],REAL
ARRDEF,longtot[5],REAL
ARRDEF,diatige[5],REAL
ARRDEF,diawasher[5],REAL
ARRDEF,htwasher[5],REAL
ARRDEF,httete[5],REAL
ARRDEF,htdef[5],REAL
ARRDEF,force[5],REAL
ARRASSIGN,largeur[1],25.4
ARRASSIGN,largeur[2],38.1
ARRASSIGN,largeur[3],50.8
ARRASSIGN,largeur[4],76.2
ARRASSIGN,largeur[5],101.6
ARRASSIGN,recouv[1],38.1
ARRASSIGN,recouv[2],38.1
ARRASSIGN,recouv[3],38.1
ARRASSIGN,recouv[4],38.1
ARRASSIGN,recouv[5],38.1
ARRASSIGN,epaicol[1],0.254
ARRASSIGN,epaicol[2],0.254
ARRASSIGN,epaicol[3],0.254
ARRASSIGN,epaicol[4],0.254
ARRASSIGN,epaicol[5],0.254
ARRASSIGN,epaicomp[1],3.16992
ARRASSIGN,epaicomp[2],3.16992
ARRASSIGN,epaicomp[3],3.16992
ARRASSIGN,epaicomp[4],3.16992
ARRASSIGN,epaicomp[5],3.16992
ARRASSIGN,longtot[1],101.6
ARRASSIGN,longtot[2],101.6
ARRASSIGN,longtot[3],101.6
ARRASSIGN,longtot[4],101.6
ARRASSIGN,longtot[5],101.6
ARRASSIGN,diatige[1],3.175
ARRASSIGN,diatige[2],3.175
ARRASSIGN,diatige[3],3.175
ARRASSIGN,diatige[4],3.175
ARRASSIGN,diatige[5],3.175
ARRASSIGN,diawasher[1],9.525
```

```
ARRASSIGN,diawasher[2],9.525
ARRASSIGN,diawasher[3],9.525
ARRASSIGN,diawasher[4],9.525
ARRASSIGN,diawasher[5],9.525
ARRASSIGN,htwasher[1],0.79248
ARRASSIGN,htwasher[2],0.79248
ARRASSIGN,htwasher[3],0.79248
ARRASSIGN,htwasher[4],0.79248
ARRASSIGN,htwasher[5],0.79248
ARRASSIGN,httete[1],1.0668
ARRASSIGN,httete[2],1.0668
ARRASSIGN,httete[3],1.0668
ARRASSIGN,httete[4],1.0668
ARRASSIGN,httete[5],1.0668
ARRASSIGN,htdef[1],2.54
ARRASSIGN,htdef[2],2.54
ARRASSIGN,htdef[3],2.54
ARRASSIGN,htdef[4],2.54
ARRASSIGN,htdef[5],2.54
ARRASSIGN,force[1],3560
ARRASSIGN,force[2],5340
ARRASSIGN,force[3],7120
ARRASSIGN,force[4],10680
ARRASSIGN,force[5],14240
PARASSIGN,i,INT,1
#LOOP LABEL1 5
PARASSIGN,w,REAL,largeur[i]
PARASSIGN,l,REAL,recouv[i]
PARASSIGN,ta,REAL,epaicol[i]
PARASSIGN,t,REAL,epaicomp[i]
PARASSIGN,ltot,REAL,longtot[i]
PARASSIGN,dtige,REAL,diatige[i]
PARASSIGN,dtete,REAL,2*diatige[i]
PARASSIGN,ddef,REAL,3*diatige[i]/2
PARASSIGN,dwasher,REAL,diawasher[i]
PARASSIGN,hwasher,REAL,htwasher[i]
PARASSIGN,htete,REAL,httete[i]
PARASSIGN,hdef,REAL,htdef[i]
PARASSIGN,f,REAL,force[i]
PT,1,-ltot+l/2,-ta/2,w/2
PT,2,-ltot+l/2,-ta/2,-w/2
PT,3,-ltot+l/2,-ta/2-t,w/2
PT,4,-ltot+l/2,-ta/2-t,-w/2
PT,5,-l/2-2.54,-ta/2-t,w/2
PT,6,-l/2-2.54,-ta/2-t,-w/2
PT,7,-l/2-2.54,-ta/2,w/2
PT,8,-l/2-2.54,-ta/2,-w/2
```

```
PT,9,-6.35,-ta/2,w/2
PT,10,-6.35,-ta/2,-w/2
PT,11,-6.35,-ta/2-t,w/2
PT,12,-6.35,-ta/2-t,-w/2
PT,13,6.35,-ta/2-t,w/2
PT,14,6.35,-ta/2-t,-w/2
PT,15,6.35,-ta/2,w/2
PT,16,6.35,-ta/2,-w/2
PT,17,l/2,-ta/2,w/2
PT,18,l/2,-ta/2,-w/2
PT,19,l/2,-ta/2-t,w/2
PT,20,l/2,-ta/2-t,-w/2
PT,21,0,-ta/2-t,0
PT,22,-6.35,-ta/2-t,-6.35
PT,23,6.35,-ta/2-t,-6.35
VL8PT,1,8,1,2,3,4,7,8,5,6
VL8PT,2,8,7,8,5,6,9,10,11,12
VL8PT,3,8,15,16,13,14,17,18,19,20
CRLINE,34,22,23
PLANE,Y,0,1
CRPCIRCLE,35,21,23,dwasher/2,90,1
SF2CR,19,34,35,0
VLEXTR,19,19,1,Y,t
VLGEN,3,4,4,1,1,0,90,0
CRPCIRCLE,66,21,23,dtige/2,90,1
SF2CR,39,35,66,0
VLEXTR,39,39,1,Y,t
VLGEN,3,8,8,1,1,0,90,0
VL8PT,12,8,26,10,22,12,28,16,23,14
VL8PT,13,8,9,34,11,30,15,36,13,32
PT,46,-l/2,-ta/2,w/2
PT,47,-l/2,-ta/2,-w/2
PT,48,-l/2,ta/2,w/2
PT,49,-l/2,ta/2,-w/2
PT,50,l/2,ta/2,w/2
PT,51,l/2,ta/2,-w/2
PT,52,-6.35,ta/2,w/2
PT,53,-6.35,ta/2,-w/2
PT,54,6.35,ta/2,w/2
PT,55,6.35,ta/2,-w/2
PT,56,0,ta/2,0
PT,57,-6.35,ta/2,-6.35
PT,58,6.35,ta/2,-6.35
VL8PT,14,8,48,49,46,47,52,53,9,10
VL8PT,15,8,54,55,15,16,50,51,17,18
CRLINE,126,57,58
PLANE,Y,0,1
```

```
CRPCIRCLE,127,56,58,dwasher/2,90,1
SF2CR,79,126,127,0
VLEXTR,79,79,1,Y,-ta
VLGEN,3,16,16,1,1,0,90,0
CRPCIRCLE,146,56,58,dtige/2,90,1
SF2CR,95,127,146,0
VLEXTR,95,95,1,Y,-ta
VLGEN,3,20,20,1,1,0,90,0
VL8PT,24,8,57,53,26,10,58,55,28,16
VL8PT,25,8,52,61,9,34,54,63,15,36
PT,69,-l/2,ta/2+t,w/2
PT,70,-l/2,ta/2+t,-w/2
PT,71,-6.35,ta/2+t,w/2
PT,72,-6.35,ta/2+t,-w/2
PT,73,6.35,ta/2+t,w/2
PT,74,6.35,ta/2+t,-w/2
PT,75,l/2+2.54,ta/2+t,w/2
PT,76,l/2+2.54,ta/2+t,-w/2
PT,77,l/2+2.54,ta/2,w/2
PT,78,l/2+2.54,ta/2,-w/2
PT,79,ltot-l/2,ta/2+t,w/2
PT,80,ltot-l/2,ta/2+t,-w/2
PT,81,ltot-l/2,ta/2,w/2
PT,82,ltot-l/2,ta/2,-w/2
PT,83,0,ta/2+t,0
PT,84,-6.35,ta/2+t,-6.35
PT,85,6.35,ta/2+t,-6.35
VL8PT,26,8,69,70,48,49,71,72,52,53
VL8PT,27,8,73,74,54,55,75,76,77,78
VL8PT,28,8,75,76,77,78,79,80,81,82
CRLINE,200,84,85
PLANE,Y,0,1
CRPCIRCLE,201,83,85,dwasher/2,90,1
SF2CR,137,200,201,0
VLEXTR,137,137,1,Y,-t
VLGEN,3,29,29,1,1,0,90,0
CRPCIRCLE,220,83,85,dtige/2,90,1
SF2CR,153,201,220,0
VLEXTR,153,153,1,Y,-t
VLGEN,3,33,33,1,1,0,90,0
VL8PT,37,8,84,72,57,53,85,74,58,55
VL8PT,38,8,71,88,52,61,73,90,54,63
PT,96,(dtige/2)*0.707106781,-ta/2-t,-(dtige/2)*0.707106781
PT,97,(dtige/2)*0.707106781,-ta/2-t-hwasher,-(dtige/2)*0.707106781
PT,98,(dwasher/2)*0.707106781,-ta/2-t,-(dwasher/2)*0.707106781
PT,99,(dwasher/2)*0.707106781,-ta/2-t-hwasher,-(dwasher/2)*0.707106781
SF4PT,177,38,97,24,99,0
```

```
VLSWEEP,177,177,1,Y,360,4
PT,107,0.011048543*25.4,ta/2+t+htete,-0.011048543*25.4
PT,108,(dtete/2)*0.707106781,ta/2+t+htete,-(dtete/2)*0.707106781
PT,109,(dtete/2)*0.707106781,ta/2+t,-(dtete/2)*0.707106781
PT,110,0.011048543*25.4,ta/2+t,-0.011048543*25.4
PT,111,0.011048543*25.4,-ta/2-t-hwasher,-0.011048543*25.4
PT,112,(ddef/2)*0.707106781,-0.-ta/2-t-hwasher,-(ddef/2)*0.707106781
PT,113,(ddef/2)*0.707106781,-0.-ta/2-t-hwasher-hdef,-(ddef/2)*0.707106781
PT,114,0.011048543*25.4,-ta/2-t-hwasher-hdef,-0.011048543*25.4
PT,115,0.011048543*25.4,ta/2,-0.011048543*25.4
PT,116,0.011048543*25.4,-ta/2,-0.011048543*25.4
SF4PT,197,107,108,109,110,0
SF4PT,198,110,92,65,115,0
SF4PT,199,115,65,41,116,0
SF4PT,200,116,41,97,111,0
SF4PT,201,111,112,113,114,0
VLSWEEP,197,197,1,Y,360,4
VLSWEEP,198,198,1,Y,360,4
VLSWEEL,199,199,1,Y,360,4
VLSWEEL,200,200,1,Y,360,4
VLSWEEL,201,201,1,Y,360,4
PT,150,-ltot+l/2,ta/2,w/2
PT,151,-ltot+l/2,ta/2,-w/2
PT,152,-l/2-2.54,ta/2,w/2
PT,153,-l/2-2.54,ta/2,-w/2
PT,154,-ltot+l/2,ta/2+t,w/2
PT,155,-ltot+l/2,ta/2+t,-w/2
PT,156,-l/2-2.54,ta/2+t,w/2
PT,157,-l/2-2.54,ta/2+t,-w/2
VL8PT,63,8,150,151,1,2,152,153,7,8
VL8PT,64,8,154,155,150,151,156,157,152,153
PT,158,l/2+2.54,-ta/2,w/2
PT,159,l/2+2.54,-ta/2,-w/2
PT,160,ltot-l/2,-ta/2,w/2
PT,161,ltot-l/2,-ta/2,-w/2
PT,162,l/2+2.54,-ta/2-t,w/2
PT,163,l/2+2.54,-ta/2-t,-w/2
PT,164,ltot-l/2,-ta/2-t,w/2
PT,165,ltot-l/2,-ta/2-t,-w/2
VL8PT,65,8,77,78,158,159,81,82,160,161
VL8PT,66,8,158,159,162,163,160,161,164,165
CSYS,3,0,3,5,1
EGROUP,1,SOLID,0,1,0,0,0,0,0,0
EGROUP,2,SOLIDL,1,4,0,0,0,0,0,0
MPROP,1,EX,61183
MPROP,1,EY,19843
MPROP,1,EZ,61183
```

```
MPROP,1,NUXY,0.33
MPROP,1,NUYZ,0.37
MPROP,1,NUXZ,0.047
MPROP,1,GXY,5099
MPROP,1,GYZ,4065
MPROP,1,GXZ,6477
MPROP,2,EX,73000
MPROP,2,EY,73000
MPROP,2,EZ,73000
MPROP,2,NUXY,0.33
MPROP,2,NUYZ,0.33
MPROP,2,NUXZ,0.33
MPROP,2,GXY,28000
MPROP,2,GYZ,28000
MPROP,2,GXZ,28000
MPROP,3,EX,73000
MPROP,3,EY,73000
MPROP,3,EZ,73000
MPROP,3,NUXY,0.33
MPROP,3,NUYZ,0.33
MPROP,3,NUXZ,0.33
MPROP,3,GXY,28000
MPROP,3,GYZ,28000
MPROP,3,GXZ,28000
MPROP,4,EX,2232
MPROP,4,EY,2232
MPROP,4,EZ,2232
MPROP,4,NUXY,0.42
MPROP,4,NUYZ,0.42
MPROP,4,NUXZ,0.42
MPROP,4,GXY,854
MPROP,4,GYZ,854
MPROP,4,GXZ,854
RCONST,1,1,1,6,0,0,0,1,0,0
RCONST,1,1,7,3,0,1,0
RCONST,2,2,1,6,0,1,1,0,t/8,t/8
RCONST,2,2,7,6,t/8,t/8,1,0.785398,t/8,t/8
RCONST,2,2,13,6,t/8,t/8,1,0,t/8,t/8
RCONST,2,2,19,6,t/8,t/8,1,0.785398,t/8,t/8
RCONST,2,2,25,2,t/8,t/8
M_VL,39,42,1,8,1,8,10,1,1,1
EPROPCHANGE,1,elmax,1,EG,1,2
EPROPCHANGE,1,elmax,1,RC,1,2
EPROPCHANGE,1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,1,elmax,1,MP,2,2
NMERGE,1,NDMAX,1,0.001,0,1,0
NCOMPRESS,1,NDMAX
```

Report-Gratuit.com

```
PARASSIGN,nd1,REAL,NDMAX
PARASSIGN,el1,REAL,ELMAX
M_VL,43,46,1,8,(((dtete/2)/25.4)/0.015625)-1,2,10,1,1,1
M_VL,47,50,1,8,(((dtige/2)/25.4)/0.015625)-1,4,10,1,1,1
M_VL,51,54,1,8,(((dtige/2)/25.4)/0.015625)-1,3,10,1,1,1
M_VL,55,58,1,8,(((dtige/2)/25.4)/0.015625)-1,5,10,1,1,1
M_VL,59,62,1,8,(((ddef/2)/25.4)/0.015625)-1,3,10,1,1,1
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,EG,1,2
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,RC,1,2
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el1+1,elmax,1,MP,2,2
NMERGE,nd1+1,NDMAX,1,0.001,1,1,0
NCOMPRESS,nd1+1,NDMAX
PARASSIGN,nd2,REAL,NDMAX
PARASSIGN,el2,REAL,ELMAX
M_VL,1,1,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
M_VL,2,2,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2+2.54-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,3,3,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,4,7,1,8,10,5,4,1,1,1
M_VL,8,11,1,8,10,((((dwasher-dtige)/2)/25.4)/0.015625),4,1,1,1
M_VL,12,12,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
M_VL,13,13,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
M_VL,64,64,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,EG,2,4
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,RC,2,4
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el2+1,elmax,1,MP,1,4
PARASSIGN,el3,REAL,ELMAX
M_VL,14,14,1,8,(w/25.4)/0.05,3,((l/2-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,15,15,1,8,(w/25.4)/0.05,3,((l/2-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,16,19,1,8,10,5,3,1,1,1
M_VL,20,23,1,8,10,((((dwasher-dtige)/2)/25.4)/0.015625),3,1,1,1
M_VL,24,24,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,3,10,1,1,1
M_VL,25,25,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,3,10,1,1,1
PARASSIGN,el4,REAL,ELMAX
M_VL,63,63,1,8,(w/25.4)/0.05,2,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
M_VL,65,65,1,8,(w/25.4)/0.05,2,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,EG,1,12
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,RC,1,12
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el3+1,elmax,1,MP,4,12
PARASSIGN,el5,REAL,ELMAX
M_VL,26,26,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,27,27,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((l/2+2.54-6.35)/25.4)/0.05,1,1,1
M_VL,29,32,1,8,10,5,4,1,1,1
M_VL,33,36,1,8,10,((((dwasher-dtige)/2)/25.4)/0.015625),4,1,1,1
M_VL,37,37,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
```

```
M_VL,38,38,1,8,(((w-12.7)/2)/25.4)/0.05,4,10,1,1,1
M_VL,66,66,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
M_VL,28,28,1,8,(w/25.4)/0.05,4,((ltot-l-2.54)/25.4)/0.1,1,1,1
EPROPCHANGE,el5+1,elmax,1,EG,2,4
EPROPCHANGE,el5+1,elmax,1,RC,2,4
EPROPCHANGE,el5+1,elmax,1,EC,3
EPROPCHANGE,el5+1,elmax,1,MP,1,4
NMERGE,nd2+1,NDMAX,1,0.001,1,1,0
NCOMPRESS,nd2+1,NDMAX
PARASSIGN,nd3,REAL,NDMAX
PARASSIGN,el6,REAL,ELMAX
EGROUP,3,GAP,1,2,0,2,4,0,0,0
RCONST,3,3,1,2,0,0
actset,eg,3
actset,rc,3
NL_GSAUTO,1,157,1,211,211,1,1
NL_GSAUTO,1,153,1,210,210,1,1
NL_GSAUTO,1,159,1,213,213,1,1
NL_GSAUTO,1,158,1,212,212,1,1
NL_GSAUTO,1,183,1,44,44,1,1
NL_GSAUTO,1,182,1,39,39,1,1
NL_GSAUTO,1,185,1,46,46,1,1
NL_GSAUTO,1,184,1,45,45,1,1
NL_GSAUTO,1,191,1,279,279,1,1
NL_GSAUTO,1,190,1,278,278,1,1
NL_GSAUTO,1,193,1,281,281,1,1
NL_GSAUTO,1,192,1,280,280,1,1
NL_GSAUTO,1,161,1,234,234,1,1
NL_GSAUTO,1,155,1,233,233,1,1
NL_GSAUTO,1,164,1,236,236,1,1
NL_GSAUTO,1,163,1,235,235,1,1
NL_GSAUTO,1,103,1,253,253,1,1
NL_GSAUTO,1,97,1,252,252,1,1
NL_GSAUTO,1,106,1,255,255,1,1
NL_GSAUTO,1,105,1,254,254,1,1
NL_GSAUTO,1,51,1,272,272,1,1
NL_GSAUTO,1,42,1,271,271,1,1
NL_GSAUTO,1,54,1,274,274,1,1
NL_GSAUTO,1,53,1,273,273,1,1
NL_GSAUTO,1,179,1,272,272,1,1
NL_GSAUTO,1,178,1,271,271,1,1
NL_GSAUTO,1,181,1,274,274,1,1
NL_GSAUTO,1,180,1,273,273,1,1
DSF,1,AL,0,1,1, ;
DSF,297,AL,0,297,1, ;
DSF,303,AL,0,303,1, ;
DSF,132,UY,0,132,1, ;
```

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

```
DSF,132,UZ,0,132,1, ;
DSF,132,AR,0,132,1, ;
DSF,310,UY,0,310,1, ;
DSF,310,UZ,0,310,1, ;
DSF,310,AR,0,310,1, ;
DSF,316,UY,0,316,1, ;
DSF,316,UZ,0,316,1, ;
DSF,316,AR,0,316,1, ;
PSF,132,f/(w*t),132,1,f/(w*t),f/(w*t),1
CPDOFSF,1,UX,ND3-((((w/25.4)/0.05)+1)*5)+((w/25.4)/0.05)+1,132,132,1
CPDOFSF,34,UX,ND3-((((w/25.4)/0.05)+1)*5)+((w/25.4)/0.05)+1,310,310,1
CPDOFSF,50,UX,ND3-((((w/25.4)/0.05)+1)*5)+((w/25.4)/0.05)+1,316,316,1
ACTSET,LC,1
DSF,4,SZ,0,4,1, ;
DSF,300,SZ,0,300,1, ;
DSF,306,SZ,0,306,1, ;
DSF,6,SZ,0,6,1, ;
DSF,302,SZ,0,302,1, ;
DSF,308,SZ,0,308,1, ;
DSF,10,SZ,0,10,1, ;
DSF,70,SZ,0,70,1, ;
DSF,122,SZ,0,122,1, ;
DSF,64,SZ,0,64,1, ;
DSF,116,SZ,0,116,1, ;
DSF,174,SZ,0,174,1, ;
DSF,16,SZ,0,16,1, ;
DSF,76,SZ,0,76,1, ;
DSF,128,SZ,0,128,1, ;
DSF,12,SZ,0,12,1, ;
DSF,72,SZ,0,72,1, ;
DSF,124,SZ,0,124,1, ;
DSF,60,SZ,0,60,1, ;
DSF,112,SZ,0,112,1, ;
DSF,170,SZ,0,170,1, ;
DSF,18,SZ,0,18,1, ;
DSF,78,SZ,0,78,1, ;
DSF,130,SZ,0,130,1, ;
DSF,134,SZ,0,134,1, ;
DSF,312,SZ,0,312,1, ;
DSF,317,SZ,0,317,1, ;
DSF,136,SZ,0,136,1, ;
DSF,314,SZ,0,314,1, ;
DSF,319,SZ,0,319,1, ;
R_STATIC;
LISTLOG,1,contraintes-rivet.txt,1,0
STRLIST,1,2,0,1,0,1,el1+1,el2,1,0
LISTLOG,1,contraintes-composite.txt,1,0
```

```
STRLIST,1,2,0,1,0,1,el2+1,el3,1,0
STRLIST,1,2,0,1,0,1,el5+1,el6,1,0
LISTLOG,1,contraintes-colle.txt,1,0
STRLIST,1,2,0,1,0,1,el3+1,el4,1,0
LISTLOG,1,deplacements.txt,1,0
DISLIST,1,1,ND3,ND3,1,0
PARASSIGN,i,INT,i+1
NL_GSDEL,1,4000,1
EDELETE,1,ELMAX,1
VLDEL,1,66,1
PTDEL,1,PTMAX,1
#LABEL LABEL1
```