

Titre: Analyse du transfert de charge de joints boulonnés à simple recouvrement
Title: [Simple bolted joint load transfer analysis](#)

Auteur: Marion Lafait
Author: [Marion Lafait](#)

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lafait, M. (2015). Analyse du transfert de charge de joints boulonnés à simple recouvrement [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal].
Citation: [PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1818/>](https://publications.polymtl.ca/1818/)

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1818/>
PolyPublie URL: <https://publications.polymtl.ca/1818/>

Directeurs de recherche: Rachid Boukhili, & Aurelian Vadean
Advisors: [Rachid Boukhili](#), [Aurelian Vadean](#)

Programme: Génie mécanique
Program: [Mechanical Engineering](#)

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE DU TRANSFERT DE CHARGE DE JOINTS BOULONNÉS À SIMPLE
RECOUVREMENT

MARION LAFAIT

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

AOÛT 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ANALYSE DU TRANSFERT DE CHARGE DE JOINTS BOULONNÉS À SIMPLE
RECOUVREMENT

présenté par : LAFAIT Marion

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. THERRIAULT Daniel, Ph. D., président

M. BOUKHILI Rachid, Doctorat, membre et directeur de recherche

M. VADEAN Aurelian, Doctorat, membre et codirecteur de recherche

M. LABERGE-LEBEL Louis, Ph. D., membre

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à ma grand-mère

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord mes deux directeurs de recherche, Aurelian Vadean et Rachid Boukhili, pour leur aide, leur soutien et leurs conseils avisés sur mes travaux.

J'adresse mes sincères remerciements à M. Therriault et M. Laberge-Lebel d'avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation de ce mémoire.

Je remercie tous les partenaires du projet COMP506 : les étudiants et professeurs de l'université de McGill et de Carlton ainsi que les partenaires industriels de Bombardier Aerospace, L-3 Communications et Delastek Aeronautique Inc.

Je souhaiterais remercier également mes collègues qui ont répondu à mes questions ainsi que tous ceux présents dans mon bureau. Mes remerciements s'adressent également aux étudiants du laboratoire de génie biomédical avec qui j'ai passé mes pauses déjeuners et en particulier Amélie Morzadec.

Finalement, je ne pourrais achever cette page sans remercier mes parents pour leurs encouragements et leur soutien dans mes études. Je remercie particulièrement Corentin Friedrich pour sa patience et sa présence à mes côtés.

RÉSUMÉ

Dans le domaine de l'aéronautique, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés. Ils répondent à la problématique des avionneurs grâce à leur faible poids et leurs propriétés intéressantes. L'assemblage de deux panneaux composites se fait principalement par boulonnage : facile à mettre en œuvre, démontable, cette technique est celle utilisée dans l'industrie. Cependant, le boulonnage introduit une concentration de contrainte par la création de trous qui sont particulièrement néfastes pour les matériaux composites. Le collage est une autre technique connue pour l'assemblage. Présentant une résistance et une rigidité plus élevée que le boulonnage et n'ajoutant pas de poids à l'assemblage, cette technique semble être bénéfique pour le domaine de l'aéronautique mais n'est cependant pas certifiée pour les structures primaires. Un assemblage hybride, boulonné et collé, constitue un compromis et pourrait améliorer les caractéristiques des jonctions en tirant profit des avantages des deux techniques. Si les méthodes de collage et de boulonnage ont été amplement étudiées de manière séparée, ce n'est pas le cas de l'assemblage hybride. C'est pourquoi le projet COMP506 du CRIAQ porte sur le design et analyse de ces joints pour les structures aéronautiques. Au cours des recherches sur la modélisation par éléments finis d'un joint hybride, nous nous sommes aperçus qu'il fallait bien maîtriser le transfert de charge dans le joint boulonné avant de s'intéresser à un assemblage mixte. Ainsi, l'objectif principal de ce mémoire porte sur l'étude et l'analyse de la répartition du transfert de charge de joints boulonnés. Différentes configurations sont étudiées afin d'en comprendre l'évolution. Le développement et la validation d'un modèle 3D par éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS Workbench est la première étape. Des comparaisons avec différents tests effectués expérimentalement au préalable sont réalisées. La répartition de la charge pour des assemblages à plusieurs boulons est analysée et validée à l'aide d'un modèle analytique. Une fois cette première étape de développement et de validation effectuée, le modèle par éléments finis permet de mener d'autres analyses, difficiles à faire expérimentalement. Ainsi, le transfert de charge peut être analysé en détail : sa distribution entre le transfert par contact pur et par frottement est étudiée en fonction de la force et de la précontrainte. Suivant les conditions, le transfert par adhérence augmente. Il est alors possible d'extrapoler les résultats au joint hybride. Ce travail a fourni un modèle fiable qui pourra être utilisé avec d'autres propriétés de matériaux comme des matériaux composites. Des travaux futurs pourront également s'intéresser à valider les extrapolations d'un joint hybride.

ABSTRACT

In the aerospace industry, composite materials are more and more used: they fulfill the aircraft manufacturers' issues thanks to their light weight and good properties. Two panels made of composite material are generally joined with bolts: it is easy to implement and to dismantle, this technique is used in the industry. However, bolts introduce stress concentration due to holes which are especially critical for composite materials. Bonded joint is another possibility for assembly. With a higher strength and stiffness than bolted joints, bonded joints do not add weight to the structure. This technique seems to be beneficial for the aircraft manufacturers but is not certified for primary structures. A hybrid, bolted and bonded, joint is a trade-off and could improve the properties of assemblies taking advantage of the two techniques. If bonded and bolted joints have been largely studied in a separately manner, hybrid joints have not been studied so much. That is why the COMP506's project of the CRIAQ is about design and analysis of these joints for aerospace structures. After working on a finite element model of a hybrid joint, we found that we must fully understand the load transfer in a bolted joint before studying a hybrid one. Thus, the main goal of this master thesis is about the study and the analysis of the load transfer distribution of bolted joints. Several configurations are studied in order to understand the distribution. The first step is to develop and to validate a 3-D finite element model thanks to ANSYS Workbench software. A comparison with different tests done experimentally is performed. The load distribution for assembly with many bolts is analysed and validated with an analytical model. Once this first step of developing and validating is done, the finite element model allows to conduct other analyses which cannot to be done experimentally. Thus, the load transfer can be analysed in detailed: its distribution between the transfer by pure contact and by friction is studied as a function of load and preload. Depending on the conditions, the transfer by adhesion increases. It is then possible to extrapolate the results to a hybrid joint. This work has led to a reliable model which will be used with other materials such as composite materials. Future works will be able to validate the extrapolations of the hybrid joint.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ANNEXES.....	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
2.1 Les joints	3
2.1.1 Les joints boulonnés.....	3
2.1.2 Les joints collés	5
2.1.3 Les joints hybrides	7
2.1.4 Conclusion.....	8
2.2 Le transfert de charge dans les joints boulonnés.....	9
2.2.1 Caractéristiques d'un joint boulonné.....	9
2.2.2 Analyse expérimentale	10
2.2.3 Analyse numérique.....	10
2.2.4 Analyse analytique	11
2.2.5 Paramètres influents sur le transfert de charge.....	15
2.3 Les contraintes et modes de rupture	18

2.3.1 Forces et contraintes en jeu	18
2.3.2 Modes de rupture.....	19
CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE.....	21
3.1 Objectifs	21
3.2 Méthodologie	21
CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT ET VALIDATION DU MODÈLE	25
4.1 Modèle par éléments finis	25
4.1.1 Matériaux utilisés	25
4.1.2 Dimensions des pièces testées.....	26
4.1.3 Maillage.....	29
4.1.4 Conditions aux limites.....	30
4.2 Études préliminaires	31
4.2.1 Test de traction	31
4.2.2 Tests de traction avec un trou et avec un trou boulonné	33
4.2.3 Test de traction avec une goupille.....	35
4.3 Joint boulonné	37
4.3.1 Un boulon.....	37
4.3.2 Deux et trois boulons.....	40
4.4 Comparaison et analyse des différentes configurations	46
4.5 Considération des substrats en matériaux composites	49
4.5.1 Détermination des propriétés	49
4.5.2 Résultats et analyses.....	51
CHAPITRE 5 ANALYSE DE LA DISTRIBUTION DU TRANSFERT DE CHARGE	56
5.1 Joint à un boulon	56

5.1.1	Influence de la précontrainte	56
5.1.2	Étude de la distribution du transfert de charge.....	57
5.2	Joint à deux et trois boulons	62
5.2.1	Influence de la précontrainte	62
5.2.2	Étude de la distribution du transfert de charge.....	64
5.3	Extrapolation au joint hybride	67
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		71
BIBLIOGRAPHIE		73
ANNEXES		82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Configurations étudiées pour l'analyse de l'augmentation de la précontrainte (d'après MCCARTHY, C. T. et GRAY (2011)).....	17
Tableau 4-1 : Propriétés de l'aluminium Al6065 T6.....	26
Tableau 4-2 : Propriétés de l'acier standard utilisé pour les boulons.....	26
Tableau 4-3 : Correspondance test - norme	27
Tableau 4-4 : Rigidités du test de traction.....	33
Tableau 4-5 : Transfert de charge pour un joint boulonné à deux boulons dans les conditions idéales	44
Tableau 4-6 : Transfert de charge pour un joint boulonné à trois boulons dans les conditions idéales	44
Tableau 4-7 : Rigidité globale obtenue numériquement des différents tests	47
Tableau 4-8 : Rigidité des différents tests obtenue expérimentalement et par éléments finis	49
Tableau 4-9 : Rigidité des différents tests obtenue expérimentalement et par éléments finis pour le verre-époxy quasi-isotrope.....	55

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Configuration de joints boulonnés : (a) Simple recouvrement - (b) Double recouvrement	4
Figure 2-2 : Configuration de joints collés : (a) Simple recouvrement - (b) Double recouvrement - (c) En T - (d) En L - (e) Bord à bord simple - (f) Progressif.....	6
Figure 2-3 : Configurations de joints hybrides : (a) Simple recouvrement - (b) Double recouvrement	7
Figure 2-4 : Courbes charge-déplacement des joints à un boulon, boulonné et hybride (d'après KELLY (2006)).....	8
Figure 2-5 : Notations utilisées	9
Figure 2-6 : Conditions aux limites idéales et indications de maillage d'après MCCARTHY, M. A. et al. (2005)	11
Figure 2-7 : Équivalence du problème d'après GUILLOT (2010)	12
Figure 2-8 : Courbes expérimentales de force-déplacement pour un joint boulonné avec deux jeux trou-boulon différents $C1 = 0$ mm et $C4 = 0,240$ mm (d'après MCCARTHY, C. T. et MCCARTHY (2005))	15
Figure 2-9 : Variation du taux de transfert de charge en fonction (a) de la précontrainte appliquée - (b) de la force appliquée (d'après ANDRIAMAMPIANINA et al. (2012) (KOFFI, 1999))	16
Figure 2-10 : Effet de la précontrainte sur la distribution du transfert de charge d'un joint à trois boulons (d'après MCCARTHY, C. T. et GRAY (2011))	18
Figure 2-11 : Déformation d'un joint boulonné à simple recouvrement soumis à une force de traction : mise en évidence de la flexion secondaire	19
Figure 2-12 : Illustration des modes de défaillance d'un joint boulonné : (a) en tension - (b) en cisaillement - (c) par clivage - (d) par matage (d'après la norme ASTM D5961 (STANDARD, 2013))	20
Figure 3-1 : Machine de test de traction du laboratoire	22

Figure 3-2 : Méthodologie.....	24
Figure 4-1 : Dimensions de la vis, l'écrou et les rondelles	28
Figure 4-2 : Boulon : (a) Configuration réelle - (b) Configuration choisie pour le modèle par éléments finis.....	28
Figure 4-3 : Maillage du joint à un boulon : (a) Joint complet - (b) Boulon - (c) Zone de recouvrement.....	29
Figure 4-4 : Conditions aux limites pour les tests de traction (a) simple - (b) avec trou - (c) avec trou boulonné - (d) avec goupille	30
Figure 4-5 : Conditions aux limites pour un joint à deux boulons sans précontrainte	31
Figure 4-6 : Test de traction	32
Figure 4-7 : Dimensions de la vis (VADEAN, 2012)	34
Figure 4-8 : Test de traction avec trou et trou boulonné	34
Figure 4-9 : Test de traction avec goupille.....	36
Figure 4-10 : Contact entre la goupille et la plaque : Goupille et plaque en acier (a) Pression de contact (b) Déplacement - Goupille en acier, plaque en aluminium (c) Pression de contact (d) Déplacement.....	37
Figure 4-11 : Schéma d'application des forces pour la plaque supérieure	38
Figure 4-12 : Schéma d'application des forces pour le joint complet	39
Figure 4-13 : Test de traction du joint à un boulon : comparaison expérimentale et numérique pour une force de précontrainte de $Q = 7\,000\text{ N}$	40
Figure 4-14 : Conditions aux limites respectant les hypothèses du modèle analytique	41
Figure 4-15 : Convention de numérotation des boulons (a) Joint à deux boulons - (b) Joint à trois boulons	42
Figure 4-16 : Test de traction du joint à deux boulons : comparaison expérimentale et numérique	45

Figure 4-17 : Test de traction du joint à trois boulons : comparaison expérimentale et numérique	45
.....
Figure 4-18 : Comparaison des résultats donnés par la modélisation par éléments finis des différents tests	47
.....
Figure 4-19 : Comparaison des résultats donnés par la modélisation et des résultats adaptés donnés par les expériences des différents tests	48
.....
Figure 4-20 : Disposition des tissus pour le stratifié	50
.....
Figure 4-21 : Test de traction pour le verre-époxy quasi isotrope	51
.....
Figure 4-22 : Test de traction du joint à un boulon : comparaison expérimentale et numérique pour le verre-époxy quasi-isotrope	52
.....
Figure 4-23 : Test de traction du joint à deux boulons : comparaison expérimentale et numérique pour le verre-époxy quasi-isotrope	52
.....
Figure 4-24 : Test de traction du joint à trois boulons : comparaison expérimentale et numérique pour le verre-époxy quasi-isotrope	53
.....
Figure 4-25 : Comparaison des résultats donnés par la modélisation et des résultats adaptés donnés par les expériences des différents tests pour le verre-époxy quasi-isotrope	54
.....
Figure 5-1 : Test de traction du joint à un boulon : comparaison de la rigidité suivant la précontrainte	57
.....
Figure 5-2 : Conditions aux limites dans le cas d'un joint à un boulon avec la flexion secondaire limitée	58
.....
Figure 5-3 : Distribution du transfert de charge pour un joint à un boulon en fonction de la force appliquée - flexion secondaire limitée	59
.....
Figure 5-4 : Pression de contact entre le fût du boulon et le trou (a) $F = 100 \text{ N}$ et $Q = 7 \text{ 000 N}$ - (b) $F = 10 \text{ 000 N}$ et $Q = 7 \text{ 000 N}$	60
.....
Figure 5-5 : Distribution du transfert de charge pour un joint à un boulon en fonction de la force appliquée - flexion secondaire libre	61
.....

Figure 5-6 : Distribution du transfert de charge pour un joint à un boulon en fonction de la précontrainte appliquée - flexion secondaire limitée	62
Figure 5-7 : Test de traction du joint à deux boulons : comparaison de la rigidité suivant la précontrainte.....	63
Figure 5-8 : Test de traction du joint à trois boulons : comparaison de la rigidité suivant la précontrainte.....	63
Figure 5-9 : Distribution du transfert de charge pour un joint à deux boulons en fonction de la force appliquée	64
Figure 5-10 : Distribution du transfert de charge pour un joint à trois boulons en fonction de la force appliquée	65
Figure 5-11 : Distribution du transfert de charge pour un joint à deux boulons en fonction de la précontrainte appliquée	66
Figure 5-12 : Distribution du transfert de charge pour un joint à trois boulons en fonction de la précontrainte appliquée	67
Figure 5-13 : Distribution du transfert de charge pour un joint à un boulon en fonction de la précontrainte appliquée et extrapolation à un joint hybride	69
Figure 5-14 : Distribution du transfert de charge pour un joint à deux boulons en fonction de la précontrainte appliquée et extrapolation à un joint hybride	70
Figure 5-15 : Distribution du transfert de charge pour un joint à trois boulons en fonction de la précontrainte appliquée et extrapolation à un joint hybride	70

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Souplesse des substrats
C_F	Souplesse des fixations
C_s	Couple de serrage
d	Diamètre du boulon
D	Diamètre du trou
d_r	Diamètre extérieur des rondelles
e	Longueur du substrat entre le centre du trou et l'extrémité la plus courte
E	Module d'Young de l'aluminium Al6065
E_{MEF}	Module d'Young trouvé par la méthode des éléments finis
E_{tgt}	Module tangent de l'aluminium Al6065
F	Force de traction appliquée sur les échantillons
FH	Filled hole tensile test – Test de traction trou boulonné
F_z	Force axiale (suivant z)
MEF	Modèle par éléments finis
ν	Coefficient de Poisson de l'aluminium Al6065
ℓ	Longueur du substrat entre les centres de deux trous consécutifs
L	Longueur du substrat
OH	Open hole tensile test – Test de traction trou ouvert
Q	Précontrainte appliquée sur les boulons
σ_{el}	Limite d'écoulement de l'aluminium Al6065
t	Épaisseur du substrat
w	Largeur du substrat

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Dimensions des échantillons testés et modélisés	78
Annexe B – Modélisation par éléments finis	83

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Quel que soit le domaine d'application, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés. Grâce à des propriétés spécifiques très avantageuses, ils permettent une optimisation du poids particulièrement intéressante dans le domaine de l'aéronautique. Comme les matériaux composites sont fabriqués en même temps que leur forme, ils permettent également de réduire le nombre de pièces utilisées. Cependant l'assemblage est toujours présent et constitue la liaison la plus faible de la structure. Il est donc essentiel de se pencher sur cette problématique de jonction. Pour l'assemblage de deux panneaux de matériaux composites, le boulonnage est la technique la plus couramment utilisée en aéronautique. Elle est simple de mise en œuvre et les réparations sont facilitées. Toutefois, en plus d'ajouter du poids à l'assemblage, l'installation de boulons nécessite un perçage du matériau composite : les fibres sont coupées, le matériau peut se délaminer, les trous introduisent des concentrations de contraintes. En ce sens, le collage est la technique d'assemblage la plus optimale. Toutefois, elle ne satisfait pas les normes de sécurité pour les structures primaires en aéronautique. Elle n'est pas assez fiable pour être certifiée puisque sa résistance dépend entièrement de la préparation minutieuse de la surface et de la réalisation du collage. Il est, par ailleurs, difficile d'inspecter un assemblage collé après sa fabrication et durant la vie de l'avion. Ainsi, un assemblage hybride – collé et boulonné – est une combinaison entre un collage non certifié et un boulonnage peu bénéfique pour la structure. Il permettrait donc, en tirant profit des deux techniques, d'obtenir un assemblage optimisé : la résistance obtenue pourrait être améliorée tout en n'utilisant qu'un nombre restreint de boulons. C'est ce que cherche à obtenir le projet COMP506 du CRIAQ (Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec) : design et analyse des joints hybrides (collés et boulonnés) pour les structures aéronautiques.

Les deux techniques d'assemblage prises séparément sont bien connues ; en revanche l'hybridisation introduit des complexités dans le comportement du joint puisque ce qui est attendu n'est pas simplement la superposition mais un travail conjoint des deux méthodes. Ainsi, le transfert de charge dans un joint hybride est le point central à comprendre : pour que l'ajout de boulons à un joint collé soit intéressant d'un point de vue structural, le transfert doit se faire conjointement par l'adhésif et par les boulons. Toutefois, au cours du projet, nous nous sommes rendu compte que, malgré le fait que les joints boulonnés aient déjà été très étudiés, il fallait néanmoins pouvoir bien appréhender le comportement de ce type de joint avant de pouvoir

modéliser et étudier les joints hybrides. C'est pourquoi dans ce mémoire nous nous attacherons à analyser les joints boulonnés en détail et en particulier, à comprendre le transfert de charge à travers les surfaces en contact de l'assemblage. L'étude, dans le cadre de ce projet, se fait uniquement pour une sollicitation statique, essentiellement dans la partie linéaire de la réponse.

Le Chapitre 2 du mémoire constitue une revue de littérature intéressante pour le sujet : en plus de présenter en détail les différents joints existants, on s'attachera à comprendre les modélisations par éléments finis décrites dans la littérature ainsi que quelques modèles analytiques simples.

Le Chapitre 3 présente les objectifs du mémoire ainsi que la méthodologie suivie pour mener à bien le projet de recherche.

Le Chapitre 4 expose toutes les modélisations par éléments finis respectant les tests expérimentaux effectués en amont, au laboratoire. Il s'agit de développer et valider le modèle numérique. Des comparaisons entre les différents résultats (numériques, analytiques et expérimentaux) y sont menées.

Le Chapitre 5 s'attache à analyser le transfert de charge en détail pour les configurations de joints étudiées expérimentalement, avec un, deux et trois boulons. Une extrapolation du comportement pour le joint hybride y est proposée.

La conclusion, qui constitue le Chapitre 6, revient sur les résultats obtenus à travers les différentes analyses avant de présenter des travaux futurs qui pourront être effectués à la suite de ce qui a été établi dans ce mémoire.

CHAPITRE 2 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Les joints boulonnés ont fait l'objet d'études expérimentales, analytiques et numériques depuis de nombreuses années. Dans cette section concernant la revue de littérature, après une rapide présentation des joints de manière générale, l'emphase sera mise sur le traitement et l'analyse du transfert de charge pour les joints boulonnés uniquement, soumis à des efforts transversaux.

2.1 Les joints

Plusieurs sortes de joints existent : les joints collés, les joints boulonnés et les joints hybrides qui sont collés et boulonnés mais aussi les joints soudés. Un survol de ces différentes sortes de joints est présenté dans cette première partie ; les joints boulonnés seront étudiés plus en détail. De nombreux facteurs influencent le choix d'une technique d'assemblage plutôt qu'une autre comme des contraintes structurelles (épaisseur des parties à assembler, charge appliquée, conditions environnementales, ...), de design (poids, désassemblage) ou encore de fabrication (temps d'assemblage, perçage, ...) mais aussi des contraintes liées aux normes existantes dans le domaine d'application de la structure (KELLY, 2004).

2.1.1 Les joints boulonnés

L'assemblage mécanique de deux panneaux est réalisé par l'intermédiaire d'un rivet ou d'un boulon. L'utilisation de boulons apporte des avantages supplémentaires au simple rivet puisque, par exemple, une précontrainte peut être installée sur le boulon afin de produire une force de frottement capable de reprendre les efforts extérieurs. Elle visera également à réduire l'impact des concentrations de contraintes engendrées par la présence du trou. Par la suite, uniquement les joints boulonnés seront discutés.

2.1.1.1 Configurations

Le boulonnage n'offre que deux configurations d'assemblage : les joints à simple recouvrement et les joints à double recouvrement (respectivement (a) et (b) sur la Figure 2-1).

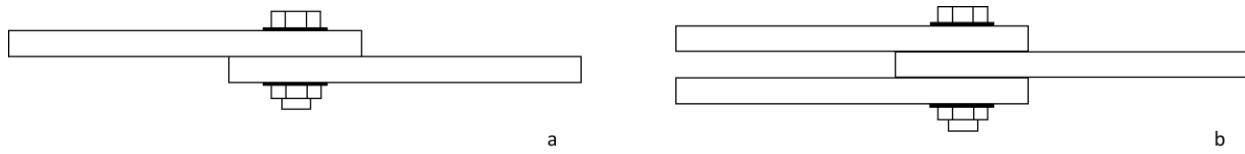


Figure 2-1 : Configuration de joints boulonnés : (a) Simple recouvrement - (b) Double recouvrement

Les joints à simple recouvrement sont utilisés souvent pour l’assemblage de deux panneaux : simple à mettre en œuvre, ils permettent de ne pas trop alourdir la structure (OUELLET, 2013). Les joints à double recouvrement sont généralement utilisés pour les réparations ou l’assemblage de deux plaques bout à bout. Ils sont moins communs dans le domaine de l’aéronautique mais apportent des avantages comme le fait de limiter la flexion secondaire, phénomène parasite détaillé au paragraphe 2.3.1.

Généralement, en aéronautique, les joints présentent plusieurs rangées de boulons (GANJI, 2007). Cependant, les études sont plus couramment menées sur des configurations à un, deux voire trois boulons en colonne, alignés dans la direction de chargement. En effet, même si des configurations à plusieurs colonnes sont envisagées, leur étude est toujours ramenée à une configuration en colonne (GUILLOT, 2010; MCCARTHY, C. T. & GRAY, 2011; STEWART, 1997).

2.1.1.2 Avantages et inconvénients

Les joints boulonnés peuvent être démontés en cas de contrôle ou de nécessité de réparation. En faisant varier l’épaisseur des substrats, ils peuvent reprendre des charges d’intensité différentes : une charge élevée pourra être transmise en utilisant des substrats épais (PAROISSIEN, 2006). En dépit du perçage qui est une étape délicate, en particulier pour les matériaux composites, les joints boulonnés sont simples à mettre en œuvre. Ils ne nécessitent pas de préparation de surface qui peut s’avérer long et difficile.

Cependant, en plus d’apporter du poids à l’assemblage, l’ajout de boulons introduit des concentrations de contrainte par la création du trou. Les concentrations de contraintes à ce niveau sont souvent critiques pour la résistance du joint puisque les fissures sont généralement initiées autour du trou (PAROISSIEN, 2006). Si des matériaux composites sont utilisés pour les substrats, le perçage peut engendrer un délaminage du matériau. Le foret peut délaminer les premiers plis ainsi que les derniers plis. Lorsque l’outil de perçage entre dans le matériau, le mouvement de

rotation entraîne les premiers plis en les tirants. Cela introduit une force de pelage qui sépare ces plis du reste du matériau (ILIESCU, 2008). Lorsque le foret sort du matériau composite, il est susceptible de pousser les derniers plis. Il est possible d'éviter ces problèmes en diminuant l'effort de pénétration qui peut être atteint en adaptant la vitesse de rotation ou d'avance du foret : une diminution de la vitesse d'avance pourra limiter la délamination à l'entrée. La délamination à la sortie peut facilement être éliminée en soutenant la partie arrière du composite. La dégradation de la matrice engendrée par la chaleur dégagée lors du perçage peut être limitée par une vitesse d'avancement réduite. Malgré tout, il est possible qu'un délaminateur interne du matériau apparaisse à cause du passage du foret (ASTROM, 1997). Par ailleurs, un trou apporte une discontinuité dans les fibres des composites : la résistance du matériau est affectée. Finalement, lorsque un matériau composite est utilisé, il est essentiel de choisir avec précaution le matériau du boulon afin d'éviter la corrosion galvanique. Elle se produit lorsqu'un matériau composite contenant des fibres de carbone se trouve en contact avec une fixation en aluminium, par exemple, et que de l'eau s'infiltre dans la fixation (PAROISSIEN, 2006; THOPPUL, FINEGAN, & GIBSON, 2009). Les matériaux se dégradent, la structure s'affaiblit.

2.1.2 Les joints collés

Les joints collés sont des joints très résistants mais ils doivent être minutieusement préparés.

2.1.2.1 Configurations

Les joints collés offrent de nombreuses configurations possibles. En effet, en plus des joints à simple et à double recouvrement (respectivement (a) et (b) de la Figure 2-2), il existe des joints en T ou en L (respectivement (c) et (d) de la Figure 2-2). Dans les configurations classiques permettant de transférer une charge axiale, il est possible de trouver également des joints bord à bord simple ou des joints progressifs (voir Figure 2-2, respectivement (e) et (f)). Ils permettent de minimiser les contraintes de pelage (causée par une force perpendiculaire à la direction de la charge qui tend à séparer les deux plaques) et de cisaillement (causée par les forces parallèles aux substrats) qui sont importantes aux extrémités de la zone de recouvrement.

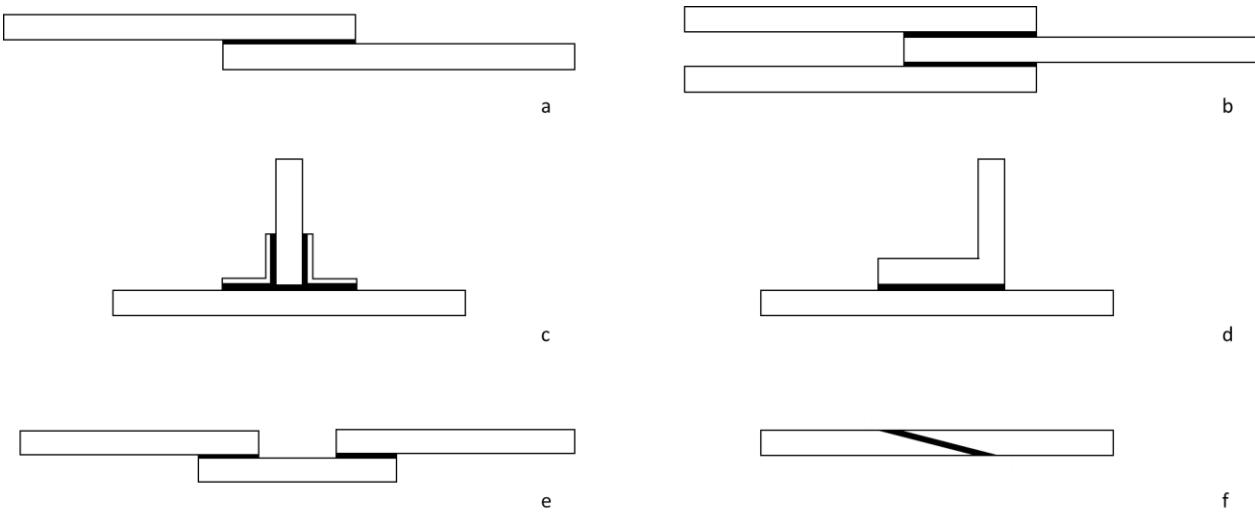


Figure 2-2 : Configuration de joints collés : (a) Simple recouvrement - (b) Double recouvrement - (c) En T - (d) En L - (e) Bord à bord simple - (f) Progressif

2.1.2.2 Avantages et inconvénients

Les joints collés, s'ils sont bien réalisés, sont les joints les plus résistants. Le collage permet de ne pas alourdir les structures assemblées. La charge est transférée de façon continue par l'adhésif, les contraintes en sont mieux réparties (PAROISSIEN, 2006). Par ailleurs, l'adhésif peut jouer un rôle d'étanchéité qui est recherché par les constructeurs aéronautiques : ils ajoutent souvent un mastic sur une jonction boulonnée pour étanchéifier le joint mais il n'a, pour l'instant, aucun rôle dans le transfert de charge (BOIS, WARGNIER, WAHL, & LE GOFF, 2013).

Toutefois, ils ne sont pas démontables. Les joints collés sont très sensibles aux conditions environnementales et leurs propriétés mécaniques se dégradent avec la température ou l'humidité. Par ailleurs, pour que les propriétés de ces joints soient connues, il faut un contrôle extrême de leur fabrication : en industrie, il est difficile de maîtriser parfaitement l'épaisseur du joint de colle. Les substrats doivent rester relativement fins pour ne pas accentuer les contraintes de pelage, particulièrement importantes aux extrémités de la zone de recouvrement et généralement initiatrice de la défaillance de l'assemblage (PAROISSIEN, 2006). Des solutions existent, telles que l'insertion de chanfreins aux extrémités des substrats au niveau de la zone de recouvrement, pour limiter les contraintes de pelage mais sont difficilement réalisables dans l'industrie (OUELLET, 2013). Finalement, cette technique n'est pas certifiée pour l'assemblage des structures primaires en aéronautique. En effet, même si des contrôles non destructifs de qualité permettent de valider le

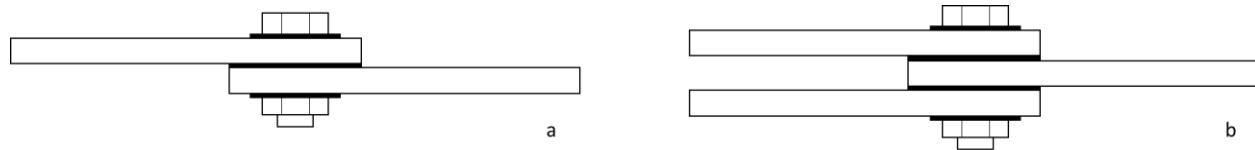
fait que l'assemblage a été parfaitement réalisé, il se peut que sa rigidité soit extrêmement faible : c'est le phénomène du « *kissing bond* » (BROTHERHOOD, DRINKWATER, & DIXON, 2003).

2.1.3 Les joints hybrides

Les joints hybrides, alliant collage et boulonnage, sont proposés afin de bénéficier des avantages des deux techniques tout en minimisant leurs inconvénients. Il ne s'agit pas d'une simple superposition des deux techniques : les deux assemblages doivent travailler en synergie. La colle permet d'améliorer les propriétés mécaniques ainsi le nombre de boulons pourra être diminué. L'optimisation de l'assemblage peut permettre une meilleure répartition du transfert de charge et ainsi une résistance accrue (KELLY, 2004).

2.1.3.1 Configurations

Pour un joint hybride, les configurations sont principalement les mêmes que pour le joint boulonné. Les plus courants sont les joints à simple (KELLY, 2005, 2006; STEWART, 1997) et double recouvrement (BOIS, COLT, WARGNIER, & WAHL, 2011) comme montré à la Figure 2-3.



2.1.3.2 Avantages et inconvénients

Le boulon présent dans le joint hybride fait en sorte d'éviter la séparation des deux substrats ainsi que de limiter la propagation des dommages de l'adhésif lorsqu'il arrive à défaillance.

Pour HART-SMITH (1985) (PAROISSIEN, 2006), les adhésifs utilisés lors de l'hybridisation sont très rigides ; cette technique n'apporte donc pas d'amélioration notable. En revanche, tous les autres auteurs s'accordent à dire que l'ajout d'adhésif permet d'avoir un joint plus résistant qu'un simple joint boulonné (KELLY, 2005; STEWART, 1997). En observant les résultats expérimentaux de KELLY (2006) présentés à la Figure 2-4, il est visible que le joint hybride est plus résistant que le joint boulonné : pour la première configuration, la défaillance du joint intervient à environ 13,2 kN tandis que pour la seconde configuration, la défaillance du joint se situe à environ 7,7 kN. On

observe ainsi une augmentation de plus 40% de la résistance du joint par l'hybridisation de l'assemblage. Par ailleurs, le joint hybride est globalement plus rigide que le joint boulonné, ce qui est surtout visible pour des charges importantes.

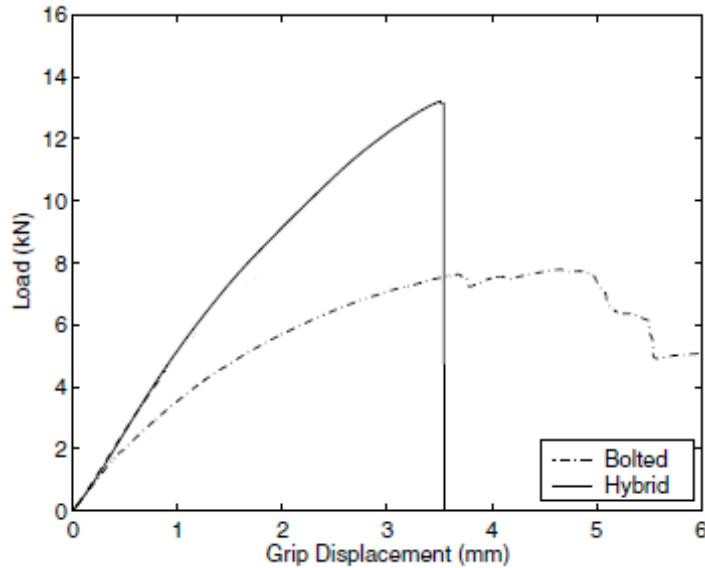


Figure 2-4 : Courbes charge-déplacement des joints à un boulon, boulonné et hybride (d'après KELLY (2006))

Cependant, les joints hybrides resteront toujours moins résistants que les joints collés uniquement. En effet, la création d'un trou dans un matériau composite implique la création de concentration de contraintes ainsi que une discontinuité dans les fibres. Le matériau perd donc en résistance et en rigidité. Par ailleurs, la surface collée est diminuée puisque percer un matériau consiste à en enlever une partie.

2.1.4 Conclusion

Tous les joints, qu'ils soient collés, boulonnés ou hybrides, présentent des avantages et des inconvénients majeurs. Dans le cadre de ce mémoire, uniquement les joints à simple recouvrement seront étudiés. Cette configuration est, en effet, le centre du projet COMP506 du CRIAQ. Cependant, les investigations ne seront menées que sur les joints boulonnés afin de comprendre en détails le transfert de charge qui s'établi à travers le boulon, suivant différentes conditions. Le joint hybride, sujet du projet COMP506, est la synergie des deux assemblages, collés et boulonnés. Il s'agit alors de bien maîtriser chacun des assemblages pour analyser correctement un joint hybride.

2.2 Le transfert de charge dans les joints boulonnés

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

- À l'échelle macroscopique par les forces de tension et de cisaillement dans la fixation d'une part et par le contact entre les plaques d'autre part,
- À l'échelle microscopique par les frottements entre les plaques ou entre les extrémités du boulon et les plaques. (ASTROM, 1997; GANJI, 2007)

Afin de mieux comprendre comment s'effectue le transfert de charge, trois méthodes sont utilisées et seront comparées dans les travaux présentés dans ce mémoire : les méthodes expérimentale, numérique et analytique.

2.2.1 Caractéristiques d'un joint boulonné

Plusieurs paramètres rentrent en jeu pour caractériser un joint boulonné. La Figure 2-5 indique toutes les notations utilisées. Ainsi, les paramètres liés au substrat sont l'épaisseur « t », la largeur « w », la longueur « L », la distance du milieu du trou à la fin de la zone de recouvrement « e » et le diamètre du trou « D ». En ce qui concerne le boulon, le diamètre « d » sera utilisé. Cependant, dans la suite du projet, afin de représenter les tests expérimentaux effectués, il n'y aura pas de jeu entre le trou et le fût du boulon, seule la nomenclature « D » sera conservée et pourra représenter, indépendamment, le diamètre du trou ou le diamètre du boulon. Comme nous n'étudions que des boulons utilisés conjointement avec des rondelles, seul le diamètre extérieur des rondelles « d_r » est considéré.

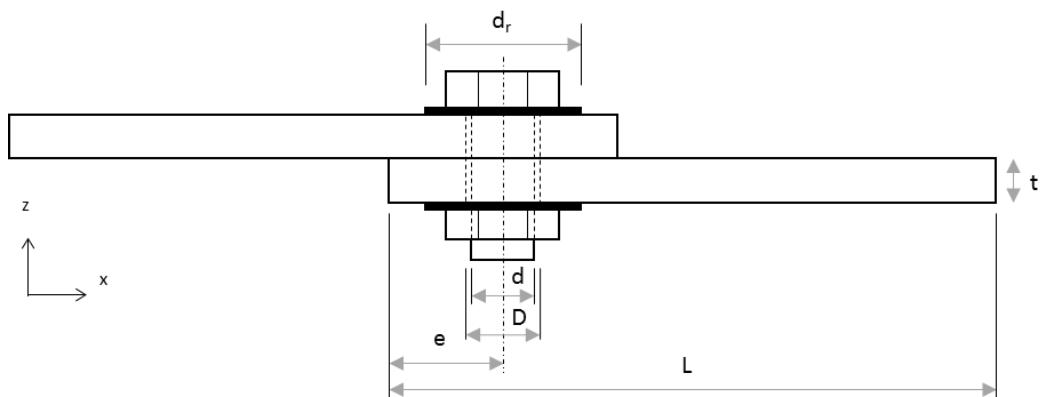


Figure 2-5 : Notations utilisées

2.2.2 Analyse expérimentale

Des boulons instrumentés sont couramment utilisés pour mesurer le transfert de charge mais aussi la précontrainte appliquée. Le mode opératoire est le même quelle que soit la mesure étudiée. Il faut tout d'abord installer des jauge sur le boulon. Ensuite, l'étalonnage est une étape importante : plusieurs valeurs connues sont appliquées et les informations données par les jauge sont enregistrées. Une base de données ou une droite de corrélation est ainsi créée. Elle est utilisée lorsque les données des tests sont acquises. Il est alors possible de connaître en temps réel la précontrainte appliquée au boulon (REDIN MIQUELEIZ, 2013) ou le transfert de charge du boulon (KELLY, 2005; MCCARTHY, M. A., MCCARTHY, LAWLOR, & STANLEY, 2005).

Toutefois, ces systèmes expérimentaux demandent du temps (fabrication minutieuse, étalonnage) et du matériel spécial et peuvent s'avérer très coûteux. Par ailleurs, tous les boulons ne peuvent pas être équipés de jauge. Par exemple, MCCARTHY, M. A. et al. (2005) utilisent un boulon de diamètre 8 mm, ce qui est généralement le cas dans la littérature.

2.2.3 Analyse numérique

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

Un paramètre important en éléments finis est le temps de calcul. Suivant la modélisation, les conditions aux limites et le maillage, les résultats obtenus seront différents. MCCARTHY, M. A. et al. (2005) ont mené une analyse approfondie de la modélisation numérique d'un essai de traction d'un joint à un boulon.

Lors d'un essai, les extrémités de l'assemblage sont bloquées entre les mors de la machine de traction. Si ces extrémités ne sont pas modélisées, la raideur du joint est augmentée. En effet, lors des tests en laboratoire, seules les faces supérieures et inférieures sont bloquées, le matériau du reste de cette partie se déforme sous l'action de la traction. Si elle n'est pas modélisée, elle est considérée comme infiniment rigide (MCCARTHY, M. A. et al., 2005). Souvent les auteurs ne modélisent que la moitié du joint et appliquent des conditions de symétrie : deux fois moins

d'éléments et de nœuds sont à prendre en compte lors de la résolution qui est alors plus rapide (KELLY, 2005; MCCARTHY, M. A. et al., 2005; VANGRIMDE & BOUKHILI, 2002).

Un maillage adapté permet d'obtenir des résultats avec précision tout en n'augmentant pas considérablement le temps de calcul. Les différentes parties des substrats ne doivent pas être maillés avec la même précision : les zones où une option de contact y est définie doivent être plus fines que le reste du substrat. Ainsi, les efforts de maillage seront portés principalement sur la zone de recouvrement. En effet, c'est l'endroit où se situe le trou mais également où les plaques sont en contact. Par ailleurs, le trou est une singularité puisqu'il engendre une concentration de contrainte. Il est également soumis à la non-linéarité qu'est le contact entre les plaques et le fût du boulon. Ainsi, un maillage fin, raffiné de manière radiale autour du trou, permet d'avoir des résultats précis et cohérents. (MCCARTHY, M. A. et al., 2005)

Ainsi les conditions aux limites présentées à la Figure 2-6 permettent de modéliser avec le plus de précision possible les tests de traction effectués expérimentalement et seront reprises par la suite.

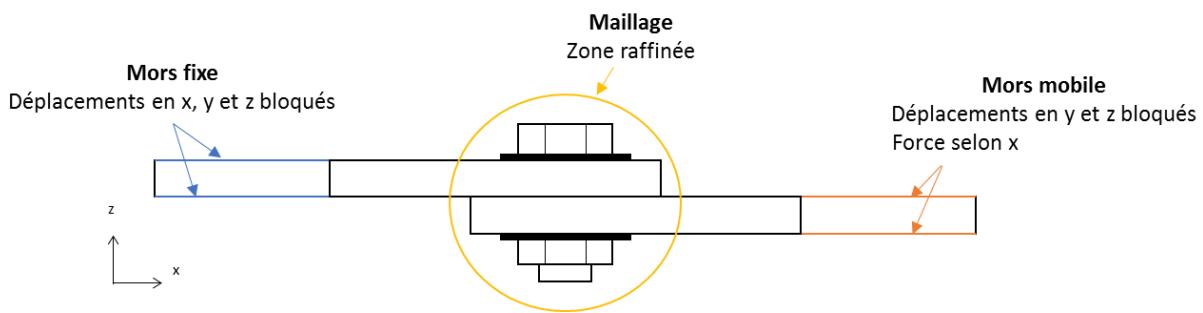


Figure 2-6 : Conditions aux limites idéales et indications de maillage d'après MCCARTHY, M. A. et al. (2005)

2.2.4 Analyse analytique

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

Le modèle présenté dans cette partie est celui de GUILLOT (2010). Pour établir son modèle analytique, l'auteur ne considère qu'une seule colonne de fixation. Chacune des parties de l'assemblage, qui sont les portions de substrats entre les fixations et les fixations elles-mêmes, sont associées à des ressorts (voir Figure 2-7) dont il détermine la souplesse (notée C sur la figure). Chaque fixation établit un lien entre les deux substrats A et B tandis que chaque portion de substrat joint deux fixations adjacentes.

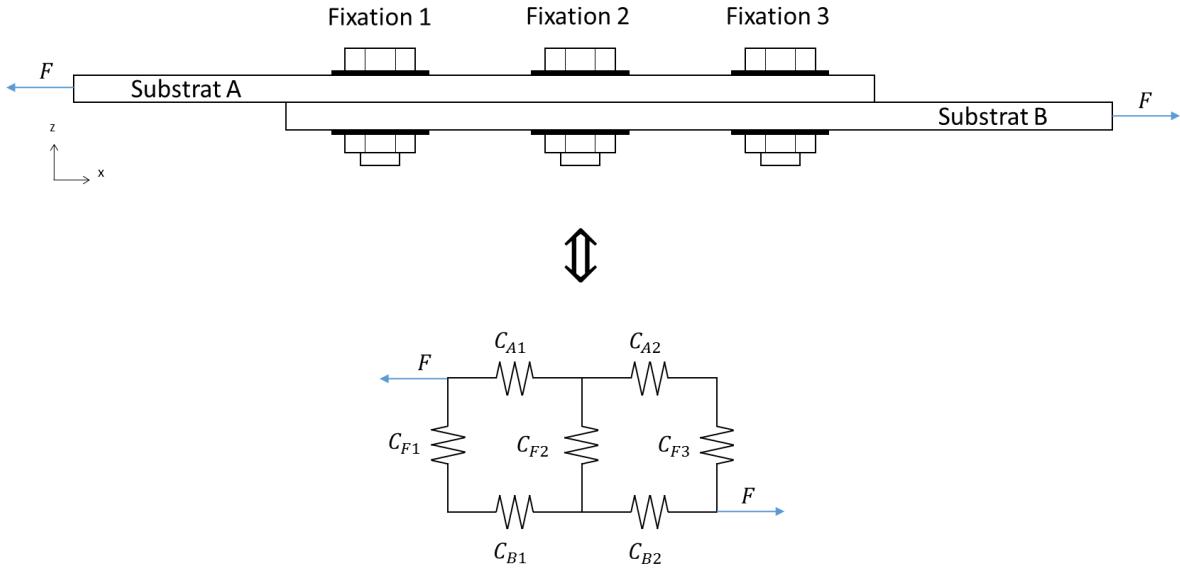


Figure 2-7 : Équivalence du problème d'après GUILLOT (2010)

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

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

Afin de calculer la souplesse des fixations et du substrat, plusieurs méthodes sont applicables, se basant sur des résultats expérimentaux ou uniquement des considérations d'ordre géométrique et

matériel. C'est cette dernière option qui est exposée ici. En effet, HUTH (1986) propose une formule empirique pour calculer cette donnée pour les fixations, C_F :

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

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

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

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

$$C = \frac{\ell}{wtE}$$

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

Pour trouver le transfert de charge dans chaque boulon, l'auteur développe son calcul en écrivant la compatibilité des déplacements associée à l'équilibre des nœuds pour chaque sous-système et en ajoutant la condition que la somme des forces transférées par chaque fixation doit être égale à la force appliquée. Il est également possible de développer cette équation par analogie électrique comme le suggère PAROISSIEN (2006), d'après ROSS (1947), en utilisant les deux lois de Kirchoff dans les différentes mailles du circuit électrique équivalent.

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

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

où $\tau_i = \frac{F_{Ti}}{F}$ est le taux de transfert de charge de la fixation i et C_{Ai} , C_{Bi} et C_{Fi} sont respectivement les souplesses des différentes parties i du substrat A, du substrat B et de la fixation i.

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

- Pour deux boulons
 - $\tau_1 = \frac{C_{A1} + C_{F2}}{C_{F1} + C_{F2} + C_{A1} + C_{B1}}$ et $\tau_2 = \frac{C_{B1} + C_{F1}}{C_{F1} + C_{F2} + C_{A1} + C_{B1}}$ dans le cas général
 - $\tau_1 = \tau_2 = 0,5$ dans le cas de transfert idéal c'est-à-dire lorsque les substrats sont identiques (même épaisseur et même matériau) ainsi que les fixations
- Pour trois boulons
 - $\tau_1 = \tau_3 = \frac{C_F/C + 1}{3C_F/C + 2}$ et $\tau_2 = \frac{C_F/C}{3C_F/C + 2}$ dans le cas idéal

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

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

ALKATAN, ANDRIAMAMPIANINA, STÉPHAN et GUILLOT (2013) ont mené une étude afin de déterminer les paramètres influents lorsque sont ajoutés frottements et précontrainte : ces facteurs sont nombreux et ont diverses influences. Ainsi, la précontrainte tend à diminuer la souplesse, la rigidité apparente devient élevée ; le même comportement est observé avec les frottements ou la largeur de l'échantillon. Lorsque l'épaisseur diminue, la souplesse augmente. Enfin, le module d'Young n'a pas d'influence sur la flexibilité mais sur la répartition des contraintes. Toutes ces observations n'ont pas permis aux auteurs de déterminer un modèle analytique simple pour améliorer le modèle de GUILLOT (2010). Cependant, les souplesses apparentes des différentes parties du joint (substrats et boulons) peuvent être retrouvées par analyse numérique dynamique ou par résultats expérimentaux. Par la suite, MCCARTHY, C. T. et GRAY (2011) puis LIU, ZHANG, ZHAO, XIN et ZHOU (2015) ont développé des modèles analytiques

considérant frottements et précontrainte pour les premiers et améliorant la prise en compte du jeu trou-boulon pour les seconds.

Toutefois, comme le modèle de GUILLOT (2010) a l'avantage d'être à la fois relativement simple et suffisamment précis, il sera exploité dans la suite de ce mémoire.

2.2.5 Paramètres influents sur le transfert de charge

Plusieurs paramètres peuvent affecter le transfert de charge des boulons comme le nombre de boulons, le jeu entre le trou de passage et le fût du boulon, la précontrainte appliquée ou encore la distance entre le boulons.

MCCARTHY, C. T. et MCCARTHY (2005), sur la Figure 2-8, observent expérimentalement un retard dans le transfert de charge lorsqu'un jeu entre le trou et le fût du boulon intervient (courbe C4). En effet, il faut d'abord que les substrats se déplacent pour combler le jeu et venir en contact du fût avant que le boulon puisse transférer la charge. En revanche, s'il n'y a pas de jeu, la force appliquée est immédiatement reprise par le boulon (courbe C1). Par la suite, nous nous placerons dans une configuration sans jeu pour éliminer le retard dans le transfert de charge des boulons.

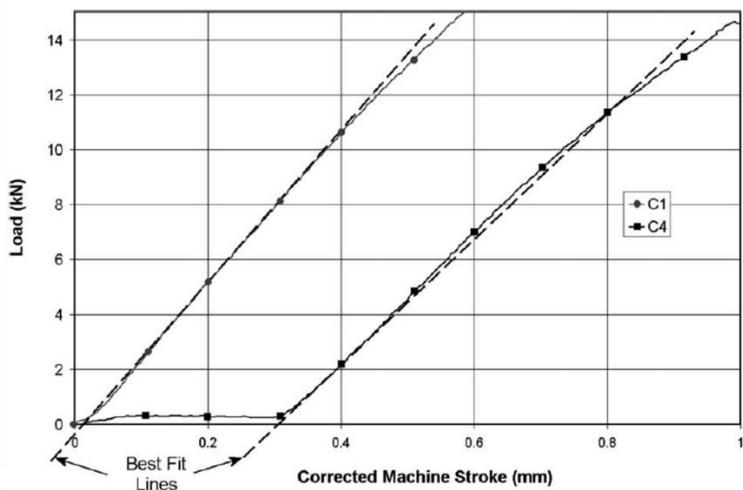


Figure 2-8 : Courbes expérimentales de force-déplacement pour un joint boulonné avec deux jeux trou-boulon différents C1 = 0 mm et C4 = 0,240 mm (d'après MCCARTHY, C. T. et MCCARTHY (2005))

En considérant un joint à quatre boulons, KOFFI (1999) (ANDRIAMAMPIANINA, ALKATAN, STÉPHAN, & GUILLOT, 2012) analyse la répartition du transfert de charge suivant la

précontrainte (Figure 2-9 (a)) et la force (Figure 2-9 (b)). Il est tout d'abord possible d'observer sur la Figure 2-9 que les boulons 1 et 4 sont les plus chargés, comme le modèle analytique développé par GUILLOT (2010) le prévoyait. En se plaçant à force constante, il est possible d'analyser l'effet de la précontrainte (cf. Figure 2-9 (a)). Lorsque la précontrainte augmente, les boulons extrêmes ont tendance à se charger encore plus ; par conséquent les boulons du milieu se décharge. En augmentant la précontrainte de 10 N.m à 50 N.m, le taux de charge transféré par les boulons 1 et 4 passe de 0,29 à 0,37 soit une augmentation de 20% environ. En se plaçant à une précontrainte constante, l'augmentation de la force aura pour effet de rendre plus homogène le transfert de charge sur l'ensemble des boulons, comme il est visible sur la Figure 2-9 (b). Ainsi, une augmentation de force de 40 kN à 135 kN entraîne une diminution d'environ 15% de la charge transférée par les boulons les plus chargés, 1 et 4. Cette étude montre clairement l'importance de la précontrainte et de la force appliquée sur le transfert de charge des joints boulonnés et ainsi sur leur comportement. C'est pourquoi par la suite, nous nous attacherons à observer l'influence de ces paramètres dans les cas que nous étudions.

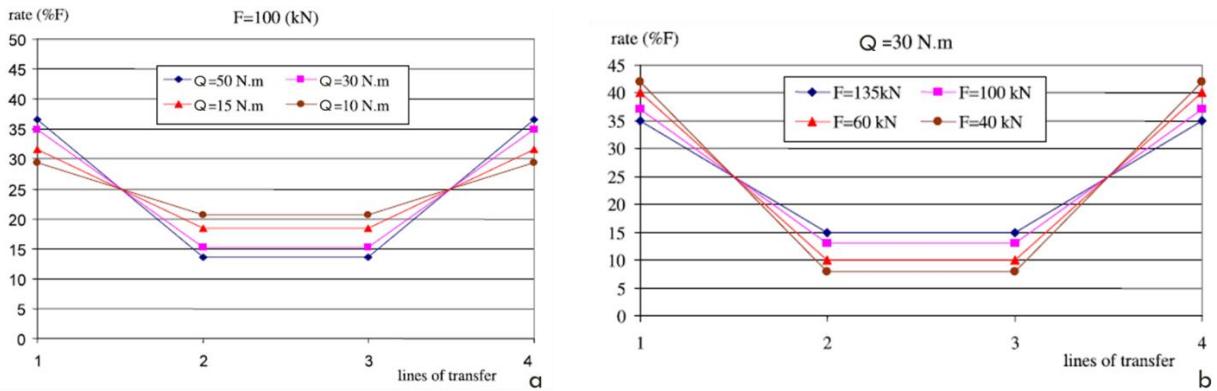


Figure 2-9 : Variation du taux de transfert de charge en fonction (a) de la précontrainte appliquée - (b) de la force appliquée (d'après ANDRIAMAMPIANINA et al. (2012) (KOFFI, 1999))

Comme on a vu au Paragraphe 2.2.4 avec le modèle proposé par GUILLOT (2010) ou précédemment par l'analyse de KOFFI (1999), les boulons extrêmes sont naturellement chargés de manière plus importante que le (ou les) boulon(s) du centre. Afin de diminuer la charge des boulons extrêmes, plusieurs techniques peuvent apporter des améliorations :

- L'augmentation du nombre de boulons jusqu'à concurrence de 4 (au-delà l'efficacité est fortement diminuée) (GUILLOT, 2010),

- L'augmentation de la distance entre les boulons de manière égale,
- L'augmentation du diamètre du boulon du milieu,
- L'augmentation de la largeur de la plaque (w),
- L'augmentation de la précontrainte des boulons extrêmes (MCCARTHY, C. T. & GRAY, 2011).

En reprenant plus en détails la dernière amélioration, analysée par MCCARTHY, C. T. et GRAY (2011), il est possible de mieux comprendre l'effet de la précontrainte sur les boulons d'un joint à simple recouvrement comportant trois boulons. Ainsi, cinq configurations différentes, présentées dans le Tableau 2-1, sont étudiées : la première considère une précontrainte identique sur tous les boulons, tandis que les suivantes imposent une précontrainte de plus en plus importante sur les boulons extrêmes.

Tableau 2-1 : Configurations étudiées pour l'analyse de l'augmentation de la précontrainte
(d'après MCCARTHY, C. T. et GRAY (2011))

Configuration	Q_1 (en MPa)	Q_2 (en MPa)	Q_3 (en MPa)
1	7,2	7,2	7,2
2	79,6	7,2	79,6
3	139,3	7,2	139,3
4	188	7,2	188
5	227	7,2	227

L'augmentation de la précontrainte sur les boulons extrêmes permet de diminuer leur taux de transfert de charge tandis que le boulon du milieu va voir son taux de transfert de charge augmenter (cf. Figure 2-10). La configuration 3 semble être la meilleure pour atteindre une répartition homogène du transfert de charge. L'augmentation excessive de la précontrainte sur les boulons 1 et 3 inverse la tendance naturelle : le boulon du milieu devient plus chargé que les autres.

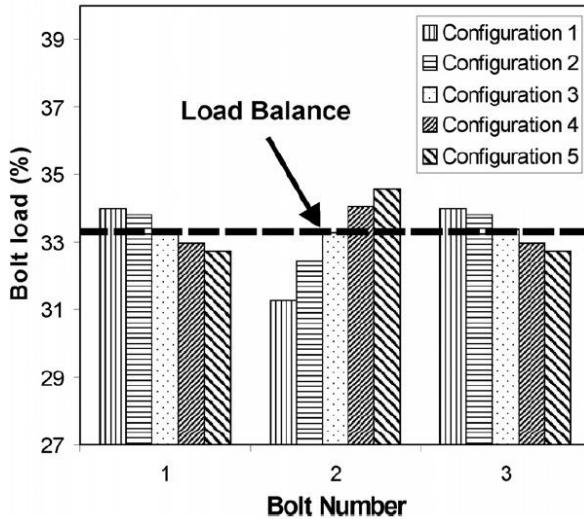


Figure 2-10 : Effet de la précontrainte sur la distribution du transfert de charge d'un joint à trois boulons (d'après MCCARTHY, C. T. et GRAY (2011))

Les quatre premières modifications listées précédemment imposent une modification de la géométrie, ce qui n'est pas toujours réalisable suivant les contraintes de conception. En ce sens, c'est la dernière qui semble la plus simple à mettre en œuvre. Cependant, une répartition inégale de la précontrainte sur les boulons peut pénaliser la durée de vie en fatigue de l'assemblage.

Pour arriver à ces conclusions, GUILLOT (2010) tout comme MCCARTHY, C. T. et GRAY (2011) ont uniquement comparé la force totale transmise par chacun des boulons. La principale contribution de ce travail de recherche est d'estimer la part du frottement et du contact pur dans le mécanisme de transfert de charge.

2.3 Les contraintes et modes de rupture

2.3.1 Forces et contraintes en jeu

L'assemblage est globalement en tension puisqu'une charge axiale est appliquée sur le joint. Cependant, un phénomène parasite apparaît : la flexion secondaire. En effet, comme la transmission de charge ne se fait pas sur le même plan, les fibres externes des deux substrats vont avoir tendance à s'aligner lors de l'application de la charge, comme il est visible sur la Figure 2-11 (OUELLET, 2013).

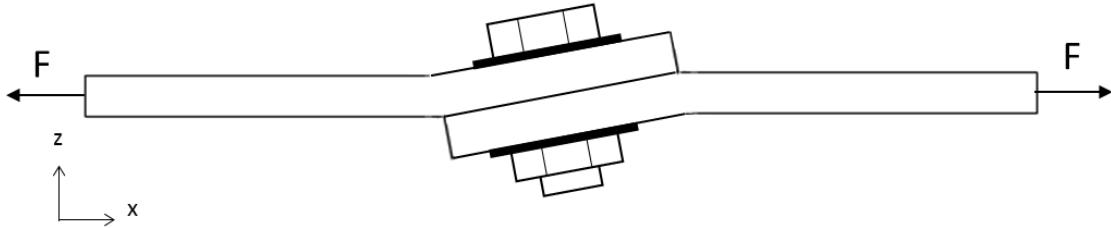


Figure 2-11 : Déformation d'un joint boulonné à simple recouvrement soumis à une force de traction : mise en évidence de la flexion secondaire

Comme les plaques sont en flexion à cause de la flexion secondaire, elles sont en tension d'un côté et en compression de l'autre dans la zone de recouvrement (MCCARTHY, M. A. et al., 2005). Toutefois, les propriétés en compression de nos matériaux ne seront pas prises en compte : la compression des substrats reste faible, ce facteur a peu d'influence sur le résultat. Enfin, le boulon subit des efforts de cisaillement par l'intermédiaire du déplacement des deux substrats. Dû à la flexion secondaire, il bascule avec l'application du chargement.

2.3.2 Modes de rupture

Lorsque les substrats sont en métal, une déformation plastique apparaît autour du trou ce qui permet une redistribution des contraintes. Si ceux-ci sont en composite, la déformation ne sera qu'élastique jusqu'à rupture, la résistance est donc diminuée (ASTROM, 1997).

Plusieurs paramètres influencent la résistance comme la séquence d'empilement du matériau composite, l'épaisseur des substrats, le jeu entre le trou et le fût du boulon (OUELLET, 2013). L'espacement entre les boulons pour un assemblage avec plusieurs lignes ou colonnes de fixations peut également modifier le mode de rupture de l'assemblage. En effet, dans ces configurations, la charge est transférée par le boulon (matage) mais aussi par contournement. La répartition de ces deux forces influence la charge à laquelle il y a défaillance de l'assemblage (ROSALES-IRIARTE, FELLOWS, & DURODOLA, 2012).

La concentration de contrainte introduite par le trou est généralement le point critique de l'assemblage (MALLICK, 2008; PAROISSIEN, 2006).

Lorsque la rupture s'amorce au bord du trou, là où la concentration de contrainte est maximale, puis se propage perpendiculairement à la direction d'application de la charge, la rupture est dite en tension (cf. (a) de la Figure 2-12). La rupture en cisaillement ou par clivage (cf. respectivement (b)

et (c) de la Figure 2-12) est provoquée par le matage (cf. (d) de la Figure 2-12) (PAROISSIEN, 2006). La rupture peut également avoir lieu si la tête de la fixation passe à travers un des substrats.

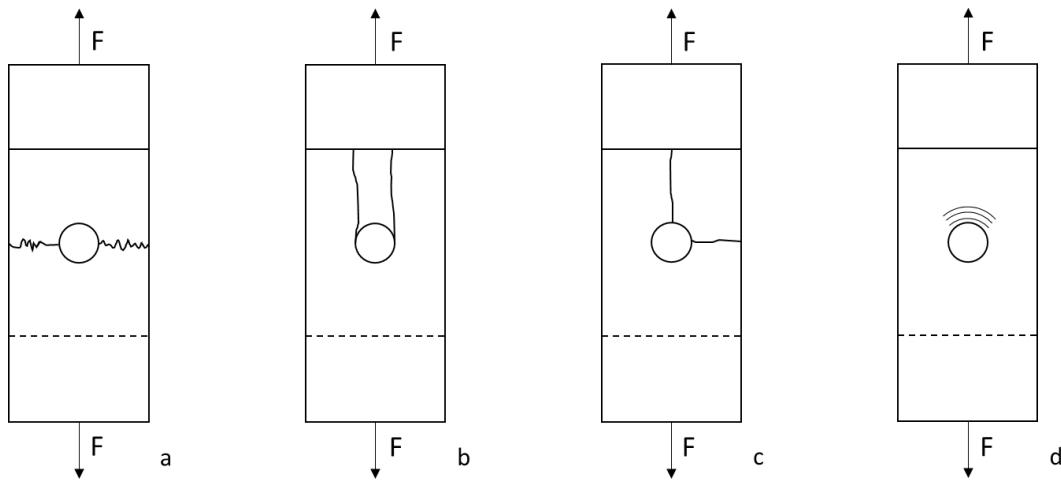


Figure 2-12 : Illustration des modes de défaillance d'un joint boulonné : (a) en tension - (b) en cisaillement - (c) par clivage - (d) par matage (d'après la norme ASTM D5961 (STANDARD, 2013))

Les défaillances en clivage, tension ou cisaillement sont des défaillances liées à une structure faible. C'est pourquoi une défaillance en matage sera privilégiée en conception : elle est plus sécuritaire pour le design et est liée à une structure forte. En effet, une défaillance en matage arrive progressivement tandis que les autres défaillances surviennent de manière brutale (SEN, PAKDIL, SAYMAN, & BENLI, 2008). Ainsi, McCarthy (2005) choisit les dimensions de son joint boulonné telles que $\frac{w}{d} = 6$, $\frac{e}{d} = 3$ et $\frac{d}{t} = 1,6$ pour favoriser une rupture par matage.

CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre a pour but de présenter les objectifs ainsi que la méthodologie suivie pour parvenir à un modèle par éléments finis fiable afin de mener à bien les travaux de recherche.

3.1 Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est de comprendre et d'analyser le transfert de charge d'assemblages boulonnés joignant deux plaques minces et soumises à une force transversale à l'axe du boulon (cas typique d'éclissage). En effet, pour passer d'une plaque à une autre, la force appliquée est transmise à travers le boulon et par frottement entre les différentes parties en jeu.

Plus spécifiquement, il s'agit, dans un premier temps, de développer et valider une modélisation par éléments finis puis, dans un second temps, d'étudier le transfert de charge.

3.2 Méthodologie

Des essais effectués en amont au laboratoire de tests mécaniques de l'école par l'équipe de recherche permettent d'obtenir une base de données sur lesquels s'appuieront toutes les modélisations effectuées à l'aide du logiciel ANSYS Workbench V15. La machine utilisée pour les tests est une machine de test universelle visible à la Figure 3-1. Une cellule de charge de 100 kN est utilisée.



Figure 3-1 : Machine de test de traction du laboratoire

Le premier test effectué qui est le **test de traction** permet d'avoir précisément les propriétés du matériau utilisé. Dans un premier temps, le matériau sera de l'aluminium. En effet, ce matériau isotrope a des propriétés simples tout en développant un comportement élasto-plastique. Les tests expérimentaux utilisent également plusieurs matériaux composites : carbone – époxy et verre – époxy en configuration cross-ply ou quasi-isotropique. Des propriétés homogènes équivalentes sont calculées grâce à la théorie des stratifiées et peuvent être intégrées au modèle numérique.

Les tests suivants qui sont les tests de **traction avec un trou ouvert** (open hole test – OH) **et un boulon** (filled hole test – FH) visent à vérifier le modèle grâce aux comparaisons avec les données expérimentales. Le comportement de ces plaques est légèrement modifié par rapport à celui de la plaque de traction simple. Le modèle par éléments finis doit donc pouvoir faire apparaître ces différences. Par ailleurs, ces deux tests sont effectués afin de mieux appréhender le comportement et la défaillance des matériaux composites en particulier. En effet, le trou créé dans la plaque joue le rôle d'un concentrateur de contrainte, affaiblissant le matériau. La résistance obtenue est alors utilisée pour le design. Lorsqu'une plaque en aluminium est utilisée, les tests avec trou ouvert et trou boulonnés donnent des résultats sensiblement identiques. En revanche, avec une plaque en

matériau composite, l'ajout d'un boulon précontraint peut modifier la défaillance initiale et donc le comportement de manière globale.

Enfin, un dernier test préliminaire est effectué afin d'appréhender la prise en compte du contact dans le modèle numérique tout en validant le transfert de charge entre la goupille et la plaque. Cet essai simple de **traction d'une plaque tiré par une goupille** permet de trouver efficacement les paramètres de contact optimaux qui permettront une précision des résultats et un temps de calcul raisonnable.

Ainsi le test de traction, le test de traction avec trou ouvert et avec un boulon tout comme le test de traction avec une goupille constituent les trois premières des cinq étapes de la modélisation par éléments finis présentées à la Figure 3-2. Ils sont relatifs à une seule plaque et permettent de vérifier et valider le modèle créé avec l'aide des résultats des tests expérimentaux.

Les analyses sur les **joints** (assemblage de deux plaques) se font ensuite. Ces études sont effectuées en sollicitation statique, dans la partie linéaire du matériau uniquement. En plus de comparer les résultats numériques et expérimentaux, il est possible d'analyser en détail le transfert de charge d'une plaque à une autre. La répartition entre les différentes forces qui entrent en jeu, la répartition entre les boulons ou encore l'évolution de la distribution suivant la force et la précontrainte appliquées sont autant de caractéristiques qui seront observées. Un modèle analytique sera développé et permettra de venir compléter les résultats numériques. Ainsi, après avoir validé le modèle numérique grâce aux résultats expérimentaux, une analyse détaillée pourra être effectuée rapidement et sans coût supplémentaire lié à l'expérimental.

Plusieurs itérations peuvent être effectuées sur le même principe avec les propriétés d'autres matériaux comme les matériaux composites.

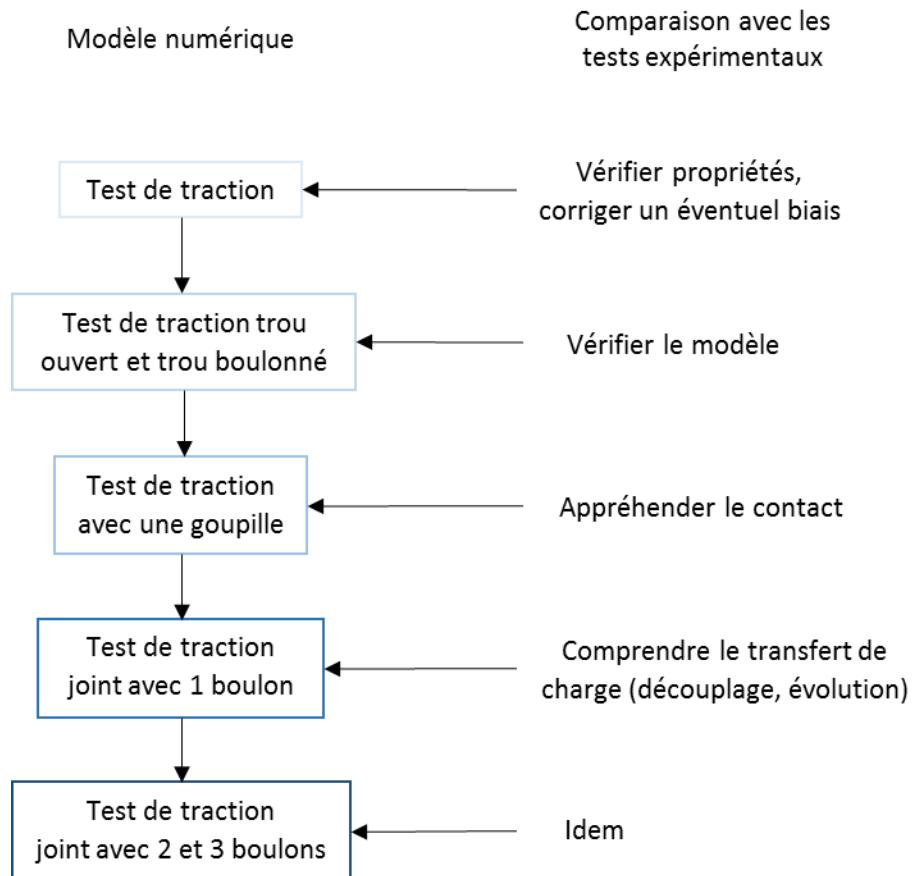


Figure 3-2 : Méthodologie

CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT ET VALIDATION DU MODÈLE

Pour mieux comprendre le comportement d'un joint boulonné et en particulier la répartition du transfert de charge, un modèle 3D par éléments finis a été développé. Une méthodologie progressive a été mise en place de manière à prendre confiance dans ce modèle. Il s'agit de valider le modèle en reproduisant les tests pratiqués expérimentalement avant d'effectuer d'autres analyses. Le modèle par éléments finis prend son sens ainsi : il permet d'obtenir plus d'informations dont celles qui sont difficilement accessibles expérimentalement mais il permet également d'envisager d'autres configurations rapidement et sans coût supplémentaire de matériaux. Ainsi, différents modèles seront présentés, du simple test de traction au joint boulonné à trois boulons, plus complexe. L'aluminium est le matériau utilisé pour les substrats. Il permet d'obtenir le comportement le plus simple, soit un comportement isotropique. Les propriétés d'autres matériaux pourront être incluses par la suite dans le modèle par éléments finis.

Dans ce chapitre, on s'intéressera dans un premier temps à décrire le modèle par éléments finis. Ensuite une comparaison entre les résultats numériques et ceux obtenus expérimentalement sera faite et validera le modèle par éléments finis. Enfin, une étude un peu plus approfondie menée sur les joints boulonnés sera exposée : comparaison avec les résultats expérimentaux mais aussi avec un modèle analytique.

4.1 Modèle par éléments finis

Cette partie présente les détails de la modélisation par éléments finis. Elle s'attache à décrire les différents choix effectués pour établir ce modèle.

4.1.1 Matériaux utilisés

Dans un premier temps, l'aluminium est choisi comme matériau pour les plaques puisque ses propriétés isotropiques offrent un comportement simple. Celles de l'aluminium Al6065 T6, utilisé lors des tests expérimentaux, sont rappelées dans le Tableau 4-1. En plus du module d'Young et du coefficient de Poisson, la limite d'écoulement du matériau ainsi que le module d'Young tangent, utilisé pour définir la rigidité après la plastification du matériau, sont définis. Lorsqu'uniquement les propriétés linéaires de ce matériau sont utilisées, cela sera mentionné dans le texte.

Tableau 4-1 : Propriétés de l'aluminium Al6065 T6

	E (en MPa)	ν	σ_y (en MPa)	E_{tgt} (en MPa)
Al6065 T6	69 000	0,33	300	500

Par la suite, les matériaux composites sont utilisés et leurs propriétés sont introduites : c'est l'objet du paragraphe 4.4.

Les vis utilisées expérimentalement sont des vis spécialement conçues pour l'aéronautique, particulièrement résistantes au cisaillement. Pour la modélisation par éléments finis, les propriétés seront assimilées à celles d'un acier standard. Les propriétés sont rappelées dans le Tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Propriétés de l'acier standard utilisé pour les boulons

	E (en MPa)	ν	σ_y (en MPa)
Acier standard	200 000	0,30	250

4.1.2 Dimensions des pièces testées

Les différents essais sont toujours effectués conformément aux normes ASTM ; ainsi les dimensions des échantillons testés et simulés respectent celles préconisées par les normes. Les dimensions sont détaillées à l'Annexe A. L'épaisseur des substrats est constante, égale à 2,56 mm. Les normes utilisées sont présentées dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Correspondance test - norme

Modèle	Norme
Test de traction	ASTM D3039
Test de traction trou ouvert Open hole tension (OH)	ASTM D5766
Test de traction trou boulonné Filled hole tension (FH)	ASTM D6742
Test de traction avec une goupille Pin loaded	ASTM D5961
Test de traction joint avec un boulon	ASTM D5961
Test de traction joint avec deux boulons	ASTM D5961
Test de traction joint avec trois boulons	Adaptation de la norme ASTM D5961

Elles sont relatives aux matériaux composites. En effet, les tests expérimentaux se concentrent principalement sur des joints réalisés en carbone ou verre-époxy. Cependant, à titre de comparaison, des tests ont également été effectués avec de l'aluminium en utilisant les mêmes dimensions afin de s'assurer que la variabilité de fabrication des plaques en matériau composite soit éliminée et que les modes de défaillance spécifiques à ces matériaux n'influencent pas ces résultats préliminaires.

Les dimensions des plaques pour les tests de traction avec trou ouvert et trou boulonné sont les mêmes. Par ailleurs, la plaque utilisée pour le test avec goupille est identique à celles utilisées dans

le joint à un boulon. Finalement, les dimensions du joint à trois boulons ont été adaptées de la norme concernant les dimensions des joints boulonnés à un ou deux boulons en respectant les mêmes écarts entre les différents éléments de l'assemblage.

Toutes les dimensions sont présentées à la Figure 4-1.



Figure 4-1 : Dimensions de la vis, l'écrou et les rondelles

Une rondelle est placée sous la tête et deux avant l'écrou comme sur la Figure 4-2 (a). Cependant pour la modélisation, la vis, l'écrou ainsi que les rondelles seront assimilés à une seule et même pièce comme il est montré sur la Figure 4-2 (b). Cette configuration est choisie par souci de simplification du modèle par éléments finis puisque l'influence des rondelles ne sera pas étudiée dans ce mémoire. La dimension du diamètre extérieur est celle des rondelles. La hauteur de la « tête » correspond à la somme des épaisseurs de la tête et d'une rondelle soit 4,9 mm et celle de l'« écrou » à la somme de l'écrou et de deux rondelles d'autre part soit 8,3 mm.

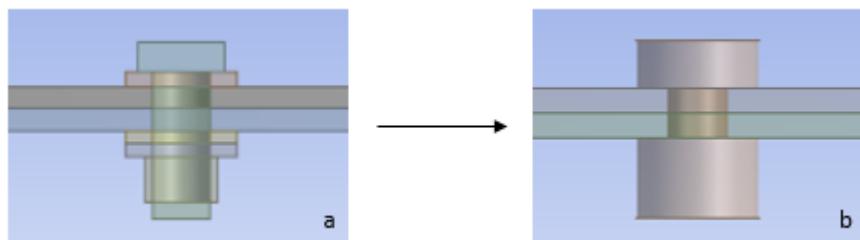


Figure 4-2 : Boulon : (a) Configuration réelle - (b) Configuration choisie pour le modèle par éléments finis

4.1.3 Maillage

Afin d'obtenir des résultats précis avec un temps de calcul raisonnable, les substrats sont maillés fins où se porte notre intérêt comme les zones de contact et plus grossièrement ailleurs. Dans ce but, le modèle a été découpé en plusieurs sous parties.

Le détail du maillage du joint boulonné à un boulon est présenté à la Figure 4-3. La zone autour du trou est maillée finement afin d'obtenir des résultats précis au niveau du contact. Le boulon est maillé de manière coïncidente avec le trou toujours pour améliorer la précision du contact. Le reste du substrat est maillé de manière plus grossière.

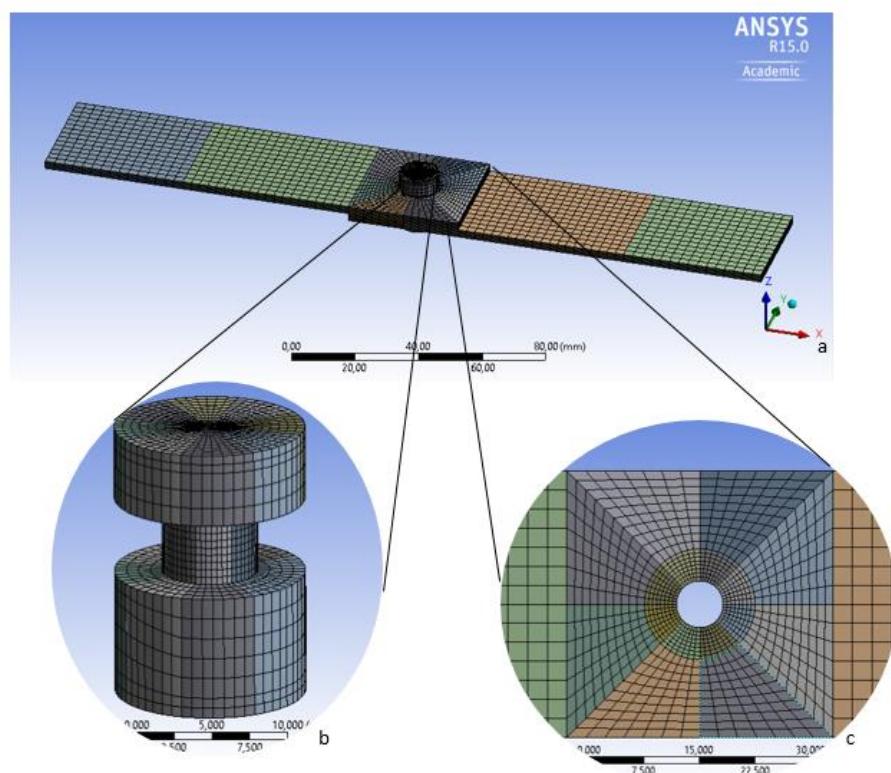


Figure 4-3 : Maillage du joint à un boulon : (a) Joint complet - (b) Boulon - (c) Zone de recouvrement

Les joints à deux et trois boulons sont maillés de manière similaire. Plus de détails sont donnés à l'Annexe B.

4.1.4 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont appliquées de manière à reproduire les expériences réalisées au laboratoire avec la machine de traction.

Pour les tests de traction simple, avec trou et avec trou boulonné les conditions aux limites (Figure 4-4 (a), (b) et (c)) sont semblables. D'un côté, le mors fixe est modélisé par un support fixe (partie bleu sur la figure). De l'autre, le mors mobile est représenté par un déplacement est imposé dans la direction x (partie jaune) tandis que les déplacements dans les deux autres directions sont bloqués. Une précontrainte est appliquée sur le boulon du test de traction avec trou boulonné (Figure 4-4 (c)). En ce qui concerne le test de traction avec goupille (Figure 4-4 (d)), ce sont les deux faces aux extrémités de la goupille qui sont fixes (partie bleue) tandis qu'un déplacement similaire à celui des autres cas est appliqué sur l'autre extrémité de la plaque (partie jaune).

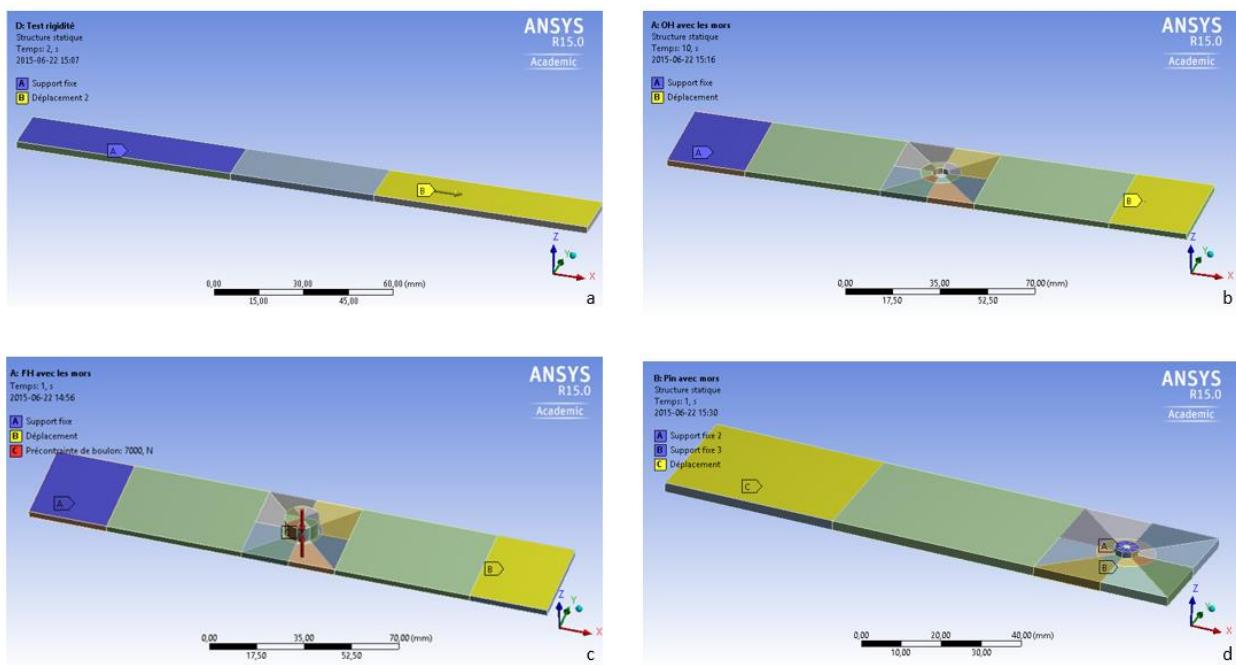


Figure 4-4 : Conditions aux limites pour les tests de traction (a) simple - (b) avec trou - (c) avec trou boulonné - (d) avec goupille

Pour les configurations de joint boulonné, un support fixe est utilisé sur les faces d'une extrémité du joint tandis que sur l'autre extrémité, une force est appliquée selon l'axe x. Les déplacements selon les axes y et z sont bloqués (voir Figure 4-5). Une précontrainte peut être installée sur les boulons. La méthode à suivre est détaillée à l'Annexe B.

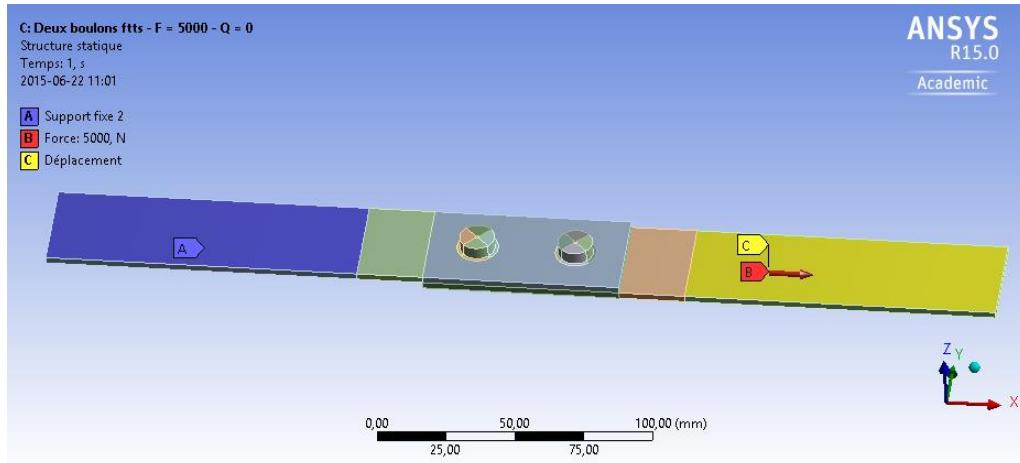


Figure 4-5 : Conditions aux limites pour un joint à deux boulons sans précontrainte

Pour que l'ensemble du modèle soit cohérent, il faut définir le contact entre les différents corps du modèle soit entre la tête du boulon et le substrat supérieur, entre l'écrou et le substrat inférieur, entre le fût du boulon et le trou et finalement entre les deux substrats. Les options choisies sont indiquées à l'Annexe B.

Finalement, il n'y a ni jeu ni interférence entre le fût du boulon et le trou de passage. Cette condition permet de se placer dans les conditions expérimentales des tests effectués.

4.2 Études préliminaires

Les études préliminaires sont les premières étapes de la modélisation par éléments finis. Trois tests sont effectués : traction simple, traction avec trou et traction avec trou boulonné. Ils permettent de calibrer le modèle numérique par rapport aux résultats expérimentaux et de s'assurer que les phénomènes physiques observés soient cohérents pour ensuite pouvoir mener d'autres études.

4.2.1 Test de traction

Le premier test à modéliser est le test de traction. En effet, il permet de vérifier et d'ajuster éventuellement les propriétés du matériau utilisé. Comme c'est le seul test à avoir été effectué avec un extensomètre, il sera intéressant de noter les différences entre les résultats obtenus par cet appareil qui mesure précisément les déplacements du matériau et la machine de traction elle-même. Puisque les résultats donnés par l'extensomètre étaient satisfaisant, un seul test a été effectué.

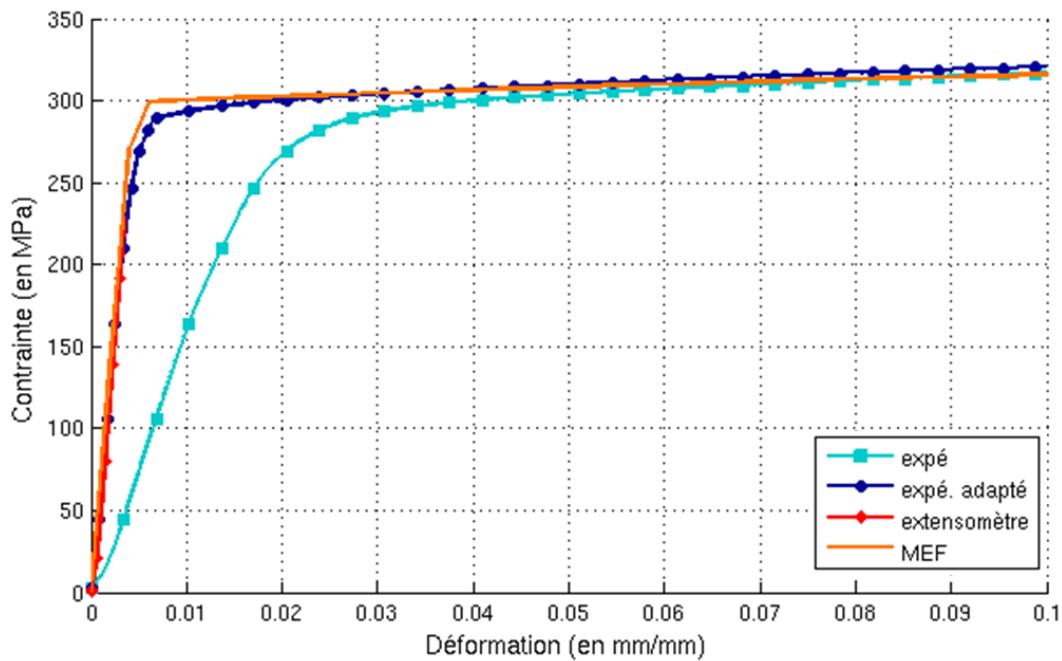


Figure 4-6 : Test de traction

La Figure 4-6 présente les résultats normalisés en contrainte – déformation des différents tests de traction. Il est tout d’abord possible de remarquer que les résultats donnés par l’extensomètre ne sont pas concordants avec ceux donnés par la machine de traction. En effet, l’extensomètre fournit des résultats directement liés au matériau tandis que les résultats de la machine subissent en plus les imprécisions dues aux déformations de la machine ainsi qu’au montage, comme un mauvais alignement des mors par exemple. Les résultats de la modélisation par éléments finis coïncident avec ceux de l’extensomètre : seules les déformations liées au matériau sont prises en compte dans les deux cas. Le Tableau 4-4 confirme le fait que ces deux résultats sont cohérents entre eux ainsi qu’avec le matériau utilisé : les rigidités obtenues s’approchent de celle de l’aluminium Al6065 qui est de 69 000 MPa théoriquement.

Tableau 4-4 : Rigidités du test de traction

Résultats	E (en MPa)
Extensomètre	68 550
MEF	67 760
Machine de test	17 140
MEF adaptés	16 940

Afin d'ajuster le comportement obtenu par la machine de test par rapport à celui obtenu par l'extensomètre et donc par la méthode par éléments finis, les résultats expérimentaux sont adaptés (voir le courbe Test – adapté sur la Figure 4-6) : on constate que les déformations données par la machine sont divisées par un facteur 4 dans la partie élastique uniquement ; la partie correspondant à la déformation plastique reste identique pour les résultats donnés par la machine ainsi que pour ceux obtenus numériquement. Ainsi la machine de traction introduit un biais qui sera corrigé par la suite pour pouvoir comparer les données numériques et expérimentales.

4.2.2 Tests de traction avec un trou et avec un trou boulonné

Les résultats des tests de traction avec un trou (OH) et celui avec un trou boulonné (FH) sont présentés conjointement à la Figure 4-8. En effet, la seule différence entre les deux essais vient du boulon qui est ajouté pour le second test. Le boulon est alors précontraint avec un couple de 11 Nm. La précontrainte est définie par une force pour le logiciel ANSYS Workbench. En utilisant la formule suivante, il est possible de calculer la force Q correspondante au couple de serrage C_s :

$$C_s = \left(\frac{p}{2\pi} + 0,583d_r\mu_f + \frac{d}{2}\mu_t \right) Q$$

Où p est le pas entre les filets, d_r le diamètre de pied, d diamètre nominal et μ_f et μ_t sont, respectivement, les coefficients de frottement entre les filets de l'écrou et ceux de la vis et entre la rondelle et l'écrou (cf. Figure 4-7).

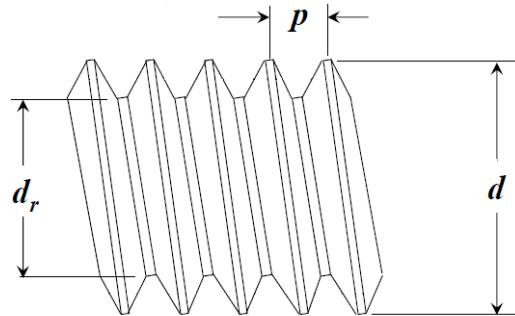


Figure 4-7 : Dimensions de la vis (VADEAN, 2012)

Pour les vis utilisées, $p = 1,2 \text{ mm}$, $d_r = 6,2 \text{ mm}$, $d = 6,35 \text{ mm}$ et $\mu_f = \mu_t = 0,2$.

Ainsi, une précontrainte de 7 kN est utilisée pour le modèle par éléments finis.

Dans les deux cas, deux tests ont été effectués. Donnant des résultats quasiment similaires, une seule courbe expérimentale est présentée.

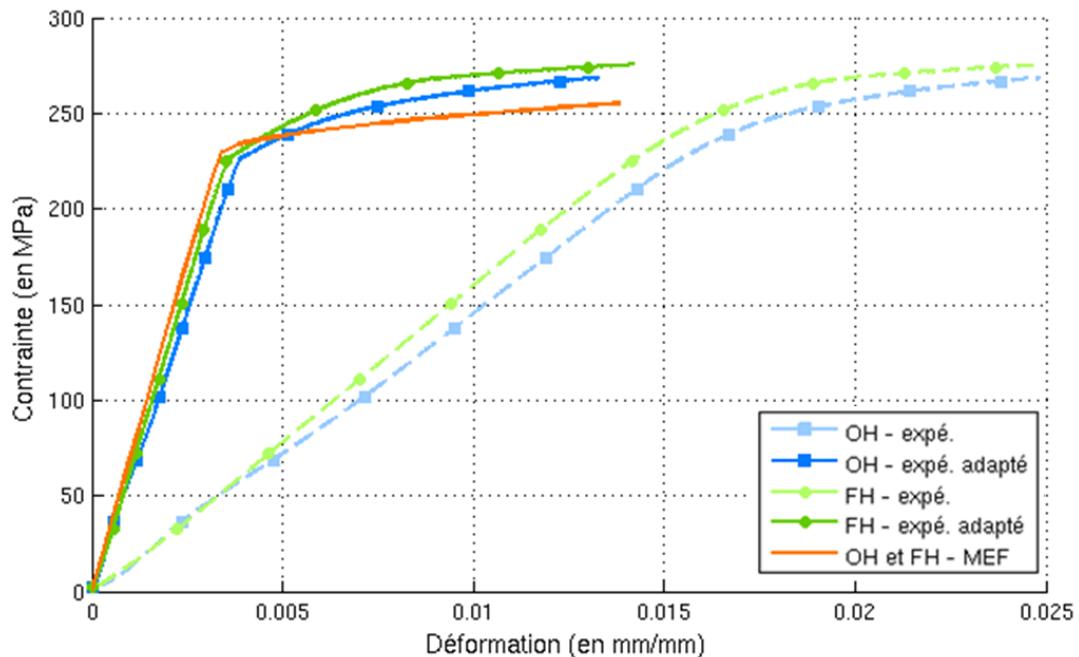


Figure 4-8 : Test de traction avec trou et trou boulonné

Les tests de traction avec trou boulonné présentent une rigidité légèrement supérieure à celle des tests de traction avec un trou ouvert. Cette différence n'est pas visible par les résultats des modélisations par éléments finis.

Les résultats expérimentaux disponibles ici ne sont que ceux donnés par la machine. Le biais introduit est à nouveau visible : les résultats des éléments finis sont différents de ceux expérimentaux dans la partie élastique. Les courbes en teintes plus sombres (orange et bleu foncé) visibles à la Figure 4-8 présentent les résultats de la machine corrigés avec le facteur 4, trouvé avec le test de traction simple. Les résultats sont alors en adéquation.

4.2.3 Test de traction avec une goupille

Lors du test de traction d'une plaque par une goupille, toute la force est transmise par contact entre la surface cylindrique de la goupille et le trou dans la plaque. Conformément aux tests expérimentaux, il n'y a pas de jeu entre le trou et la goupille. Il est possible d'analyser la force de contact ainsi que sa répartition.

4.2.3.1 Comparaison avec les données expérimentales

Comme les résultats des tests expérimentaux sont très similaires d'un test à l'autre, une seule courbe de test de traction avec une goupille est représentée à la Figure 4-9 sur les deux tests qui ont été effectués. Dans ce cas également il est possible de constater que les résultats donnés par les éléments finis ne coïncident avec ceux obtenus expérimentalement que s'ils sont adaptés en les corrigeant d'un facteur 4.

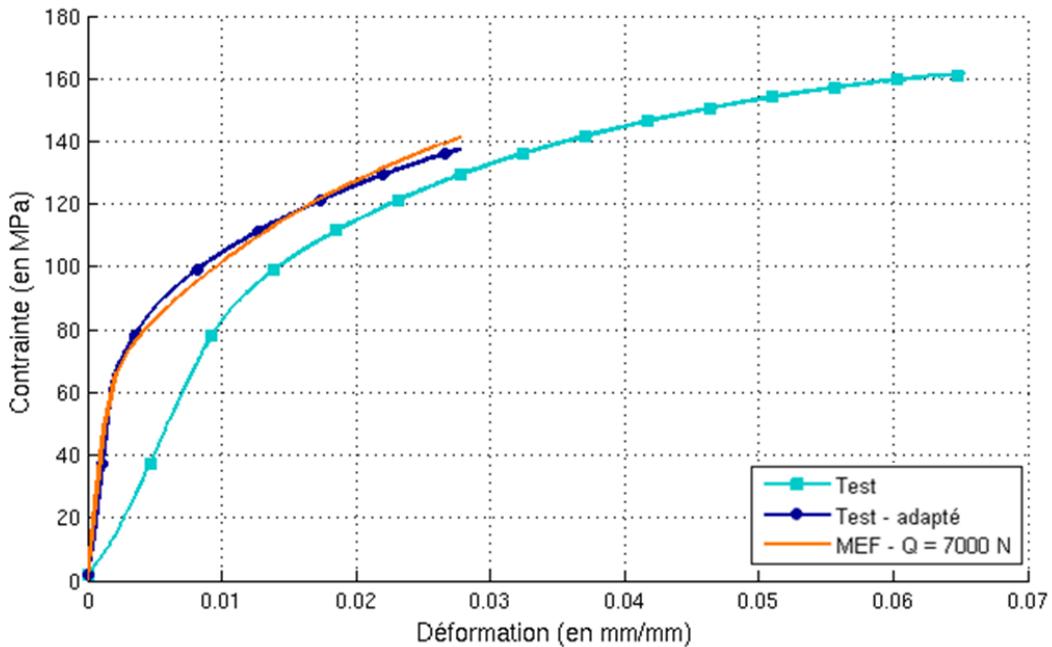


Figure 4-9 : Test de traction avec goupille

4.2.3.2 Analyse du contact

L'étude numérique a également permis de montrer un comportement différent dans la répartition de la pression de contact suivant les matériaux utilisés pour la goupille et la plaque. L'échelle des résultats présentés à la Figure 4-10 est volontairement exagérée dans le but de mieux comprendre les déformations qui se produisent. Si les deux matériaux ont des rigidités équivalentes (module d'Young), comme le cas (a) et (b) de la Figure 4-10, la goupille se déforme lors de la traction et la pression maximale est atteinte sur les bords du contact avec la plaque. En revanche, si la rigidité de la plaque est inférieure à celle de la goupille, comme dans le cas (c) et (d) de la Figure 4-10 avec la plaque en aluminium et le goupille en acier, la plaque se déforme puisqu'elle est plus souple. Dans ce cas, la zone de pression maximale correspond au centre de la zone de contact entre les deux corps. Ainsi, suivant les rigidités relatives des deux éléments, la déformation et la répartition de pression de contact ne sera pas la même.

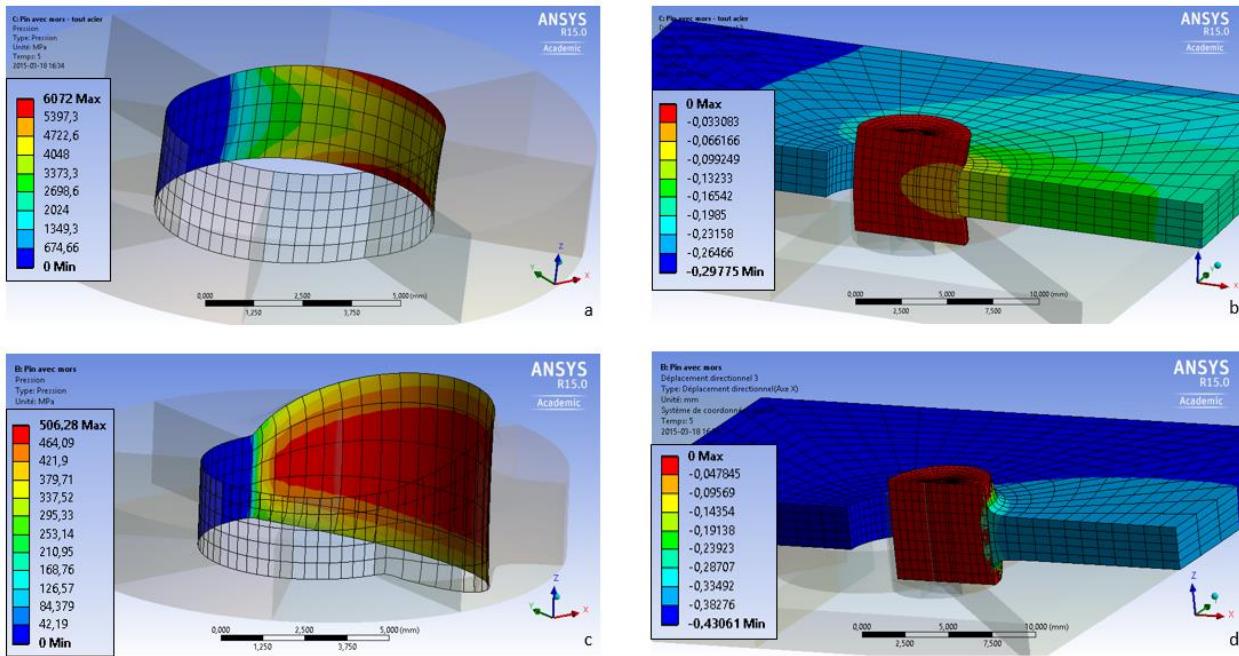


Figure 4-10 : Contact entre la goupille et la plaque : Goupille et plaque en acier (a) Pression de contact (b) Déplacement - Goupille en acier, plaque en aluminium (c) Pression de contact (d) Déplacement

4.3 Joint boulonné

Dans le cas du joint boulonné, quel que soit le nombre de boulons utilisés, les propriétés linéaires de l'aluminium Al6065 sont utilisées pour les substrats.

Il s'agit, dans cette partie, de valider le modèle numérique des différents joints boulonnés en les comparants à des résultats expérimentaux et analytiques.

4.3.1 Un boulon

Les tests expérimentaux sont reproduits par un modèle par éléments finis : la précontrainte et les frottements entre les différents contacts sont introduits, la flexion secondaire est laissée libre.

La précontrainte est une force axiale appliquée sur le boulon qui correspond à la réalité de la rotation de l'écrou avec une clé (vissage). Elle met en tension la tige du boulon et comprime ainsi les substrats situés entre la tête et l'écrou. La zone affectée dans le cas de plaques minces est souvent décrite comme un cône partant du diamètre des rondelles et s'élargissant vers le plan de

joint (OUELLET, 2013). La rigidité axiale (dans le sens longitudinal du boulon) est généralement augmentée dans cette zone.

Le frottement est un des mécanismes de transfert de charge très important à considérer dans le cas d'un éclissage. La précontrainte appropriée introduira la quantité de frottements permettant la reprise de la totalité des efforts transversaux dans le joint et éliminant le cisaillement du boulon par contact avec le trou de passage. Ceci constitue le scénario idéal du fonctionnement d'un assemblage boulonné.

La Figure 4-11 présente un bilan des forces pour la plaque supérieure uniquement.

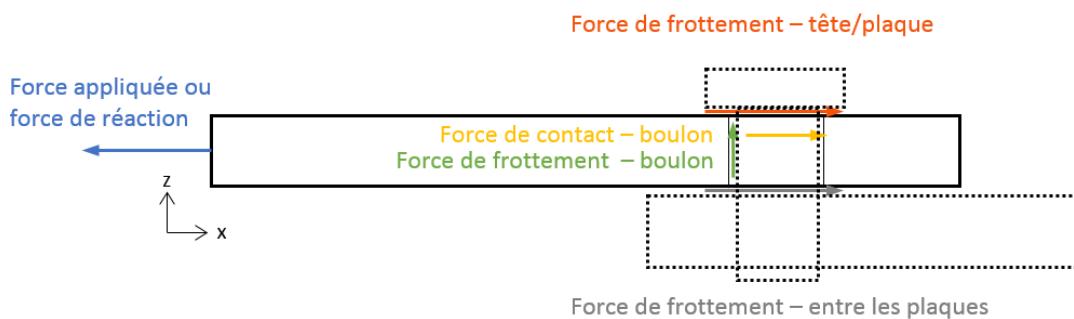


Figure 4-11 : Schéma d'application des forces pour la plaque supérieure

À chaque contact, les frottements interviennent et une partie de la force appliquée peut être transmise par frottements. Une seule exception est à noter : la force de frottement entre le fût du boulon et le trou n'a pas d'influence sur le transfert de charge puisqu'elle intervient selon l'axe z (cf. Figure 4-11). Ainsi, seules les forces selon l'axe x sont à considérer dans le phénomène de transfert de charge : dans le cas de la plaque supérieure, la force de frottement entre la tête et la plaque ainsi que celle entre les plaques et la force de contact entre le fût du boulon et le trou sont à prendre en compte. On obtient ainsi le schéma des forces présenté à la Figure 4-12.

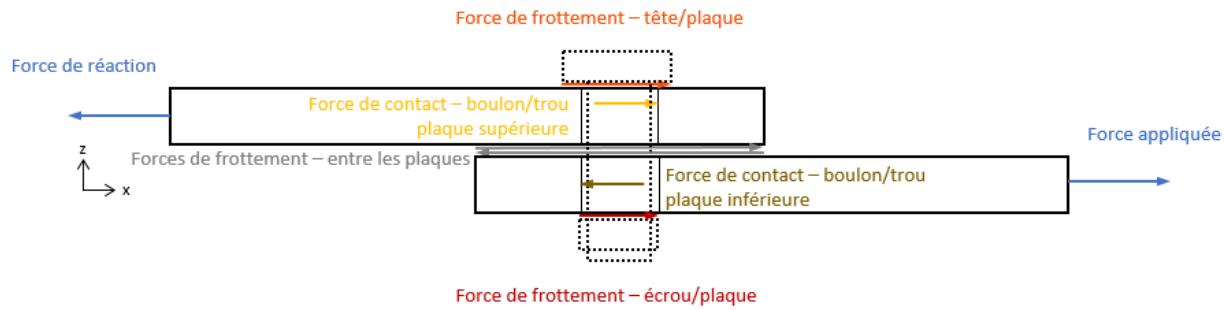


Figure 4-12 : Schéma d'application des forces pour le joint complet

Pour valider le modèle par éléments finis du joint à un boulon, une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux est effectuée.

Sur la Figure 4-13, une courbe moyenne, avec l'écart-type, des résultats expérimentaux est présentée sur les cinq tests effectués. Seule la partie linéaire de la courbe contrainte – déformation est prise en compte puisque l'aluminium utilisé pour la modélisation est supposé linéaire. Dans un premier temps les résultats numériques ne coïncident pas avec ceux expérimentaux. Toutefois, en corrigeant les résultats donnés par la machine par un facteur 4 appliqué sur les déformations (calibration faite lors des essais simples – sous-chapitre 4.2), les deux séries de résultats concordent de manière satisfaisante. Les faibles écarts entre les deux courbes peuvent être expliqués par la dispersion des résultats expérimentaux ou par le fait que le modèle numérique ne prend pas en compte les effets liés à la plastification locale du matériau.

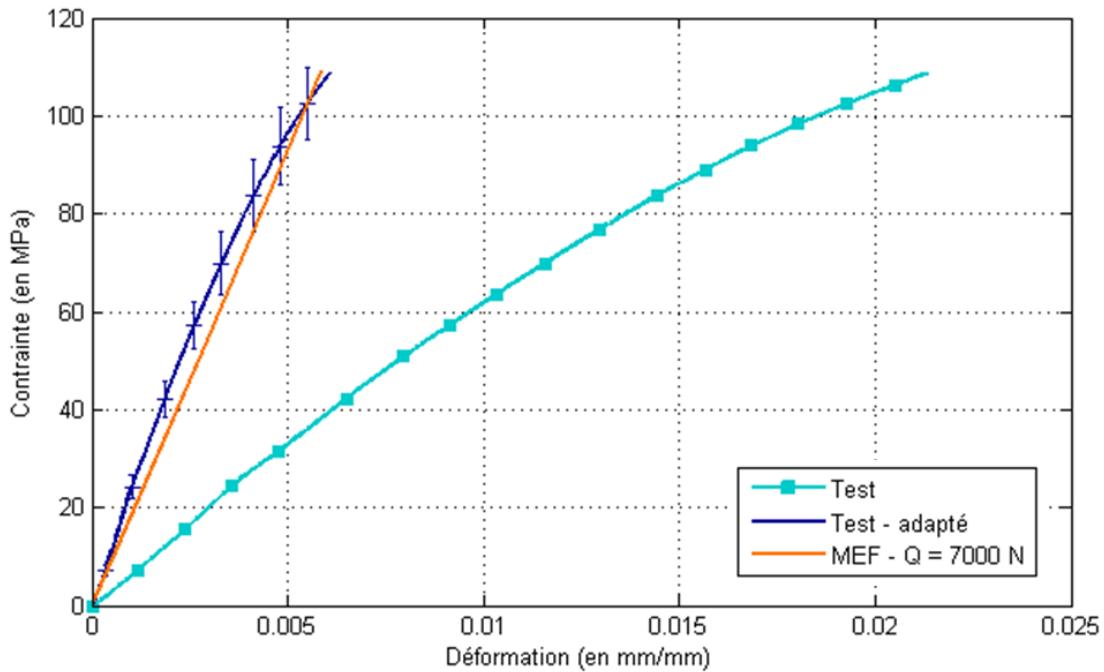


Figure 4-13 : Test de traction du joint à un boulon : comparaison expérimentale et numérique pour une force de précontrainte de $Q = 7\ 000\ N$

4.3.2 Deux et trois boulons

Le travail est poursuivi avec plus de boulons pour assembler le joint. Il est intéressant de voir comment s'effectue le partage du transfert de charge entre les boulons. Des calculs analytiques basés sur un modèle proposé par GUILLOT (2010) viennent compléter cette partie de modélisation numérique.

Dans chaque cas (joint à deux et trois boulons), deux études distinctes sont menées : la première se place dans un cas idéal avec de nombreuses hypothèses restrictives qui permettent de comparer les résultats analytiques et numériques ; la seconde représente les tests effectués en laboratoire et permet de comparer les résultats d'une part aux tests expérimentaux et d'autre part aux résultats obtenus pour le joint à un boulon.

4.3.2.1 Modèle idéalisé

4.3.2.1.1 Hypothèses

Afin de pouvoir comparer le modèle analytique de GUILLOT (2010) et le modèle numérique, les mêmes conditions sont utilisées pour le joint à deux et trois boulons (cf. Figure 4-14) :

- le chargement est dans l'axe du joint ;
- pour que les déformations restent dans le domaine élastique, les propriétés linéaires de l'aluminium sont utilisées ;
- il n'y a pas de jeu entre le trou et la tige du boulon ;
- aucun frottement ni précontrainte n'est introduit ;
- la flexion secondaire est limitée en bloquant les déplacements dans la direction perpendiculaire à l'assemblage (axe z).

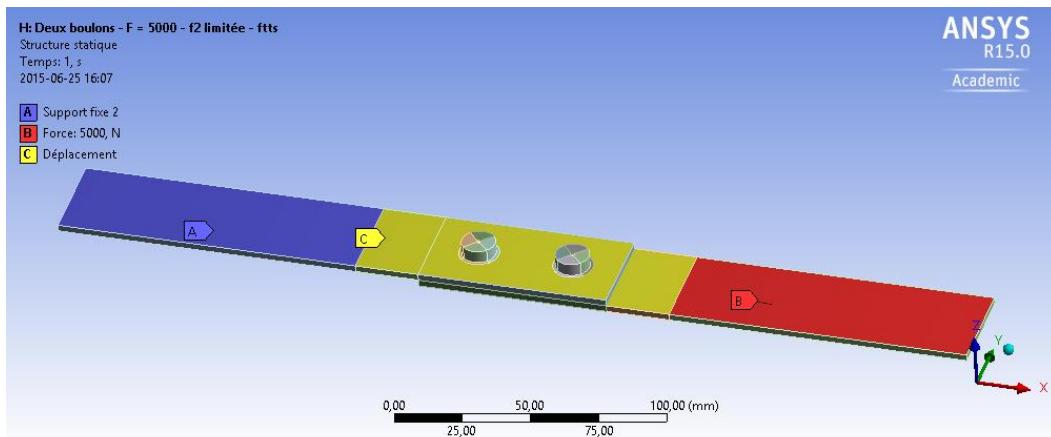


Figure 4-14 : Conditions aux limites respectant les hypothèses du modèle analytique

La convention de numérotation des boulons visible à la Figure 4-15 est adoptée, (a) dans le cas de deux boulons, (b) dans le cas de trois.

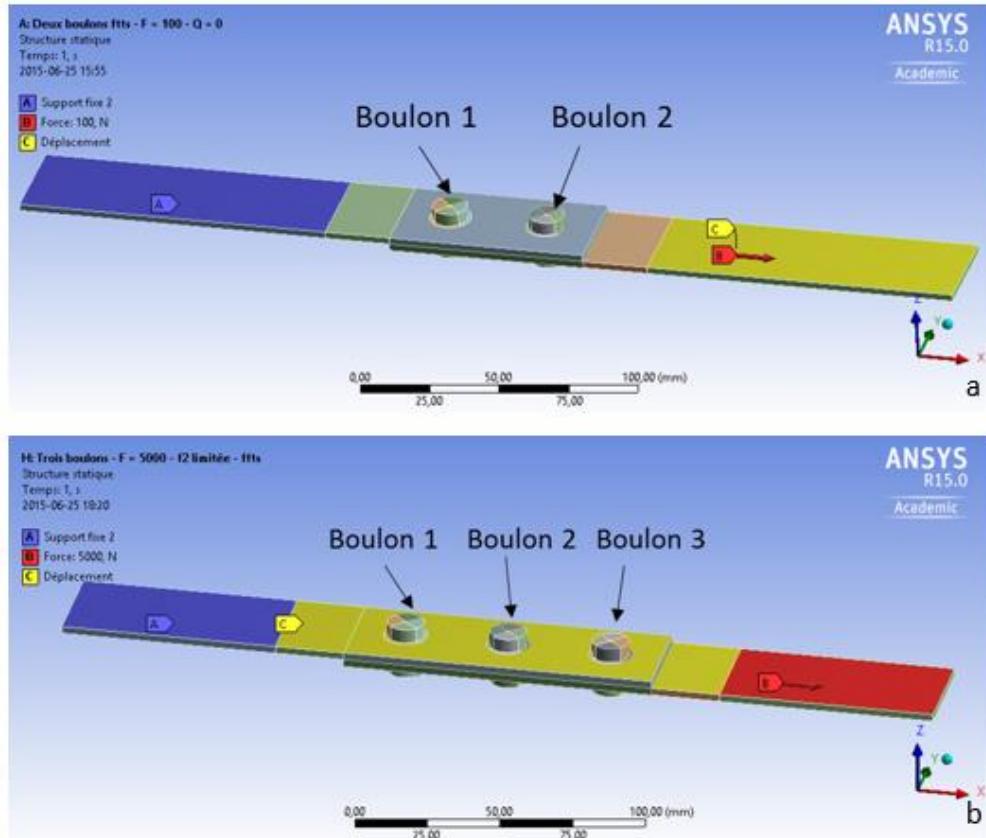


Figure 4-15 : Convention de numérotation des boulons (a) Joint à deux boulons - (b) Joint à trois boulons

4.3.2.1.2 Calculs et résultats

En reprenant la formule empirique de HUTH (1986) présentée dans la revue de littérature (cf. paragraphe 2.2.4) et puisque le joint étudié est à simple recouvrement avec des boulons pour les fixations, la souplesse de la fixation, C_F , se calcule de la manière suivante:

$$C_F = 3 \left(\frac{t}{d} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{2}{tE} + \frac{1}{tE_F} \right)$$

$$C_F = 2,17 \times 10^{-5} \text{ mm.N}^{-1}$$

Où t est l'épaisseur de la plaque, d le diamètre du boulon, E le module d'Young du substrat et E_F celui de la fixation.

Le calcul de la souplesse des plaques, C , donne :

$$C = \frac{L}{wtE}$$

$$C = 5,66 \times 10^{-6} \text{ mm. N}^{-1}$$

Où L est la longueur du substrat entre deux fixations, w la largeur du substrat, t son épaisseur et E son module d'Young.

En reprenant les équations du transfert de charge développées au paragraphe 2.2.4, on obtient :

- Pour un joint à deux boulons

$$\tau_1 = \tau_2 = 0,5$$

- Pour un joint à trois boulons

$$\tau_1 = \tau_3 = \frac{C_F/C + 1}{3C_F/C + 2}$$

$$\tau_2 = \frac{C_F/C}{3C_F/C + 2}$$

Où τ_i est le taux de transfert de charge du boulon i.

Les essais numériques ont été effectués avec quatre valeurs de force différentes : 100, 1000, 5000, et 10000 N. Les résultats ont été identiques quelle que soit la force appliquée puisque les propriétés du matériau sont linéaires. Une comparaison des résultats obtenus par les modèles analytique et numérique est présentée dans le Tableau 4-5 et Tableau 4-6, pour le joint à deux et trois boulons respectivement.

On remarque que les résultats sont très similaires quel que soit le nombre de boulons. Cependant, il est possible d'observer une très légère différence entre les résultats des deux modèles dans le cas du joint à trois boulons. Dans le cas du design d'un assemblage boulonné, les lignes extrêmes sont toujours les plus critiques parce que ce sont les plus chargées (GUILLOT, 2010), ce qui est confirmé ici également. Ainsi les valeurs données par le modèle en éléments finis sont légèrement plus conservatives que celles calculées analytiquement. Le modèle analytique simple reste néanmoins suffisant pour prévoir la répartition du transfert de charge entre deux boulons dans un

cas particulier. Toutefois GUILLOT (2010) met en garde par rapport à son modèle : il permet d'obtenir une vision globale du fonctionnement d'un assemblage mais n'est pas assez précis pour effectuer des calculs de structure plus complexes.

Tableau 4-5 : Transfert de charge pour un joint boulonné à deux boulons dans les conditions idéales

Transfert de charge	Boulon 1	Boulon 2
Modèle analytique	0,500	0,500
Modèle numérique	0,501	0,499

Tableau 4-6 : Transfert de charge pour un joint boulonné à trois boulons dans les conditions idéales

Transfert de charge	Boulon 1	Boulon 2	Boulon 3
Modèle analytique	0,358	0,284	0,358
Modèle numérique	0,368	0,265	0,368

4.3.2.2 Modèle réel

Lors des tests en laboratoire, un couple de serrage de 11 Nm est appliqué sur les boulons. Cette valeur a été choisie en fonction de la capacité de résistance des vis en tension ainsi que de la plage d'utilisation de la clé dynamométrique à l'aide de laquelle la précontrainte est installée. C'est une valeur médiane qui est suffisamment basse pour ne pas détériorer les filets des boulons mais aussi suffisamment élevée pour que la valeur indiquée par la clé soit fiable. Ainsi, en utilisant la formule définie à la page 33, une précontrainte équivalente de 7 kN est appliquée sur tous les boulons du modèle par éléments finis pour comparer les résultats expérimentaux et numériques.

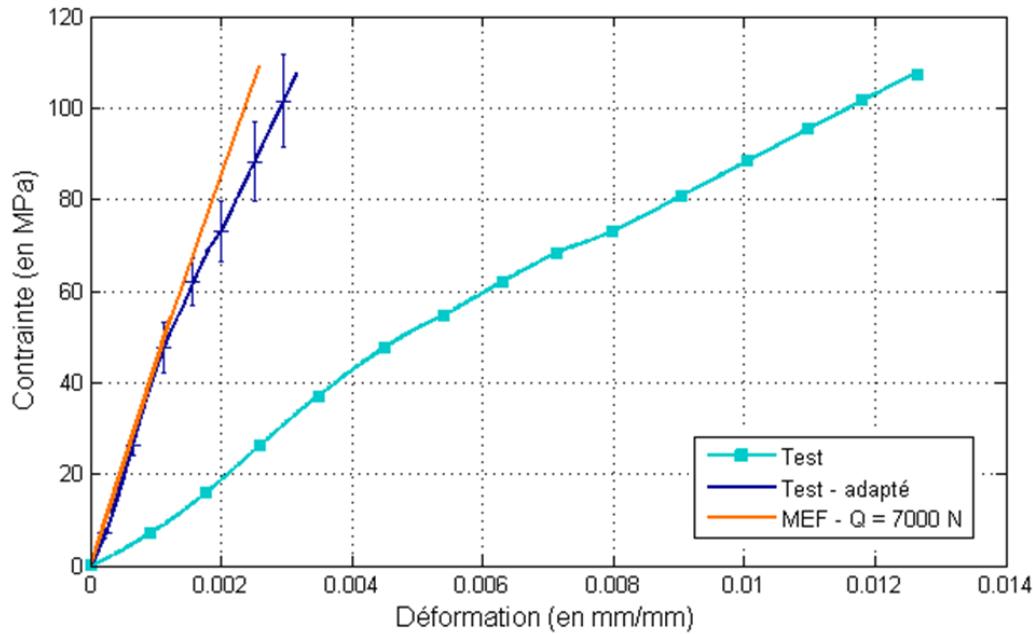


Figure 4-16 : Test de traction du joint à deux boulons : comparaison expérimentale et numérique

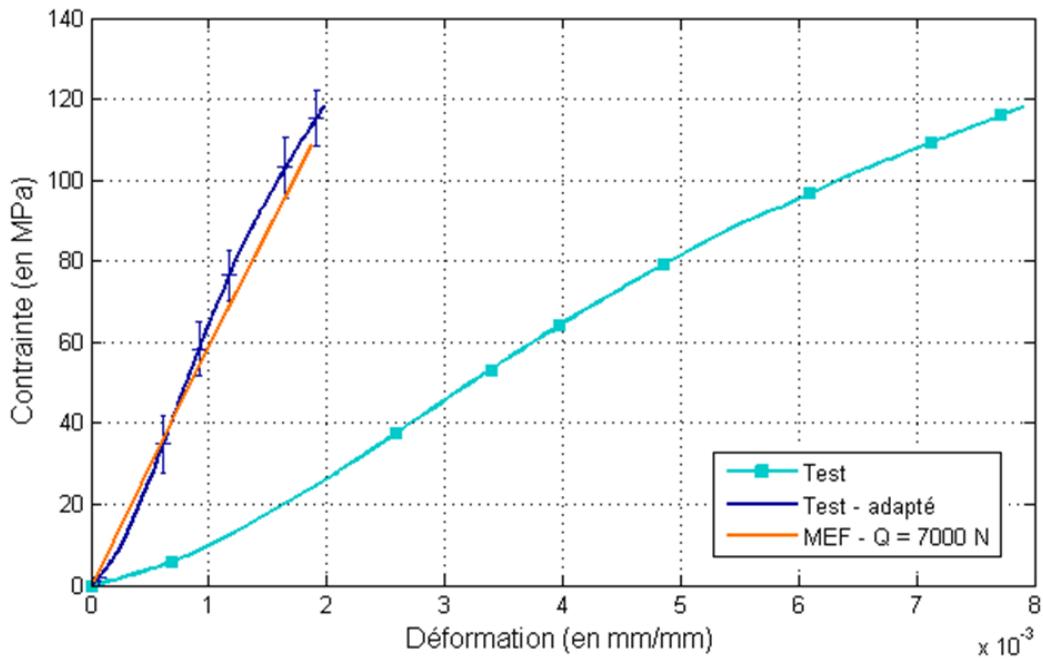


Figure 4-17 : Test de traction du joint à trois boulons : comparaison expérimentale et numérique

Pour plus de lisibilité, seule une courbe moyenne, avec les écarts-types, pour les tests est présentée sur la Figure 4-16 et la Figure 4-17 sur les cinq tests effectués dans les deux cas. La partie linéaire est étudiée puisque des propriétés linéaires de l'aluminium sont utilisées pour cette modélisation.

Les résultats des éléments finis sont en décalage par rapport aux résultats obtenus expérimentalement. En revanche, une fois adaptés (diminution des déformations d'un facteur 4), les résultats donnés par la machine pour la partie linéaire sont plutôt cohérents avec les données numériques. Les écarts entre les courbes numériques et les courbes expérimentales-adaptées peuvent s'expliquer par des incertitudes provenant de la variabilité dans la fabrication, installation et mise en place de la précontrainte. En effet, les trous sont percés manuellement. Ils le sont de manière à être tous alignés, avec la plus grande précision possible mais ils peuvent être légèrement désaxés : ils ne reprennent pas tous la charge en même temps et la rigidité globale augmente au fur et à mesure. De plus, lors de l'application de la précontrainte, les pertes de précontrainte liées aux frottements entre les filets de la vis et de l'écrou sont limitées grâce à la lubrification de la vis mais existent toujours. La valeur réelle de la précontrainte peut être inférieure à celle calculée. Par ailleurs, le coefficient de frottement utilisé pour le modèle par éléments finis est choisi constant quel que soit le contact considéré : la réalité des tests peut ne pas être reflétée précisément par ce choix.

4.4 Comparaison et analyse des différentes configurations

Tous les tests effectués précédemment sont repris. Pour que les résultats soient comparables, ils sont présentés à la Figure 4-18 sous forme contrainte - déformation. La valeur de la précontrainte choisie pour analyser ces résultats est la même que celle appliquée pour les tests expérimentaux, soit 7 kN. Toutes les valeurs de rigidité sont données dans le Tableau 4-7.

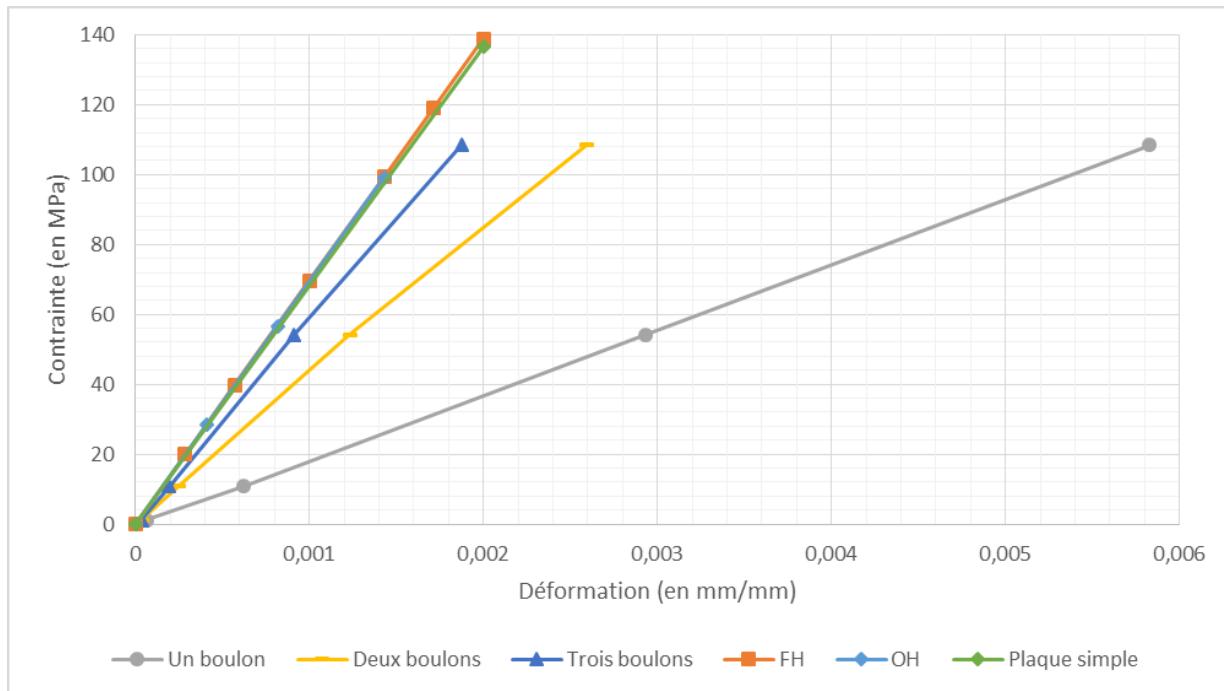


Figure 4-18 : Comparaison des résultats donnés par la modélisation par éléments finis des différents tests

Tableau 4-7 : Rigidité globale obtenue numériquement des différents tests

Configuration	Rigidité (en MPa)
Plaque simple	68 280
Plaque avec trou ouvert (OH)	67 560
Plaque avec trou boulonné (FH)	67 920
Un boulon	18 690
Deux boulons	42 000
Trois boulons	58 480

La modélisation par éléments finis de l'essai de traction donne une valeur de rigidité légèrement inférieure à celle attendue qui est de 69 000 MPa. Cette différence peut être considérée comme négligeable. Toutes les autres configurations donnent des valeurs de rigidité inférieures à celle de

la plaque simple avec dans l'ordre les tests de traction avec trou boulonné, trou ouvert, joint à trois boulons puis à deux et enfin à un. La configuration de joint à un boulon est la moins rigide : la rigidité de l'aluminium est divisée par 3,6 lorsqu'il est utilisé dans un joint à un boulon. Il est possible de remarquer que plus le nombre de boulons augmente, plus la rigidité du joint se rapproche de celle d'une seule plaque avec trou ouvert qui semble être la valeur asymptotique.

Les mêmes résultats sont obtenus expérimentalement. Une comparaison de quelques courbes est d'ailleurs effectuée à la Figure 4-19. Les résultats expérimentaux sont adaptés avec le facteur 4 sur les déformations. Les rigidités données par la modélisation par éléments finis sont du même ordre de grandeur que celles données par les tests expérimentaux. Afin d'avoir un meilleur ordre de grandeur, les valeurs des rigidités obtenues expérimentalement présentées dans le Tableau 4-8 sont adaptées pour être représentatives du matériau utilisé. Après avoir obtenus grâce aux courbes les rigidités de la partie linéaire, elles sont multipliées par le facteur 4 ; elles peuvent ainsi être comparées à celle obtenues numériquement.

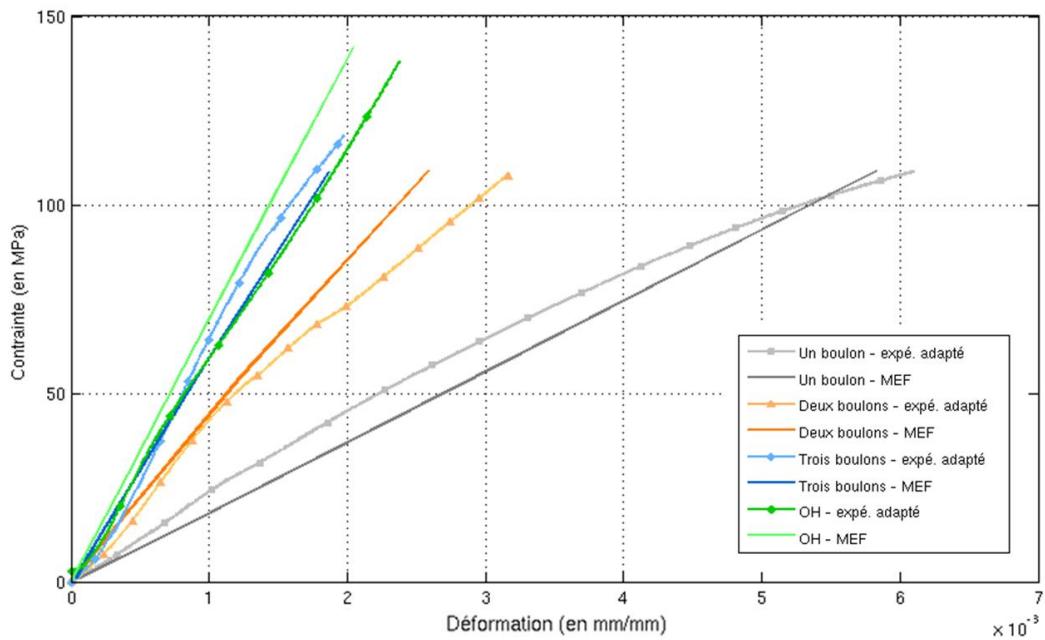


Figure 4-19 : Comparaison des résultats donnés par la modélisation et des résultats adaptés donnés par les expériences des différents tests

Tableau 4-8 : Rigidité des différents tests obtenue expérimentalement et par éléments finis

Configuration	Rigidité expérimentale adaptée (en MPa)	Rigidité MEF (en MPa)	Pourcentage écart (en %)
Plaque simple	66 600	68 280	2
Plaque avec trou ouvert (OH)	57 160	67 560	18
Plaque avec trou boulonné (FH)	64 500	67 920	5
Un boulon	$17\ 220 \pm 1\ 920$	18 690	8
Deux boulons	$32\ 190 \pm 5\ 130$	42 000	30
Trois boulons	$63\ 630 \pm 6\ 330$	58 480	3

Le test le plus simple, soit celui de traction avec une plaque simple est le cas où les résultats numériques et expérimentaux sont le plus proche. En revanche, les plus grandes erreurs interviennent pour le joint à deux boulons. On peut remarquer que pour cette configuration l'écart-type des résultats expérimentaux est également plus élevé, soit de 16%.

4.5 Considération des substrats en matériaux composites

Le modèle par éléments finis mis en place est prêt à être utilisé avec d'autres propriétés de matériaux. La même démarche pourra être appliquée puisque les résultats des différents essais en laboratoire sont disponibles pour les matériaux composites en carbone-époxy et en verre-époxy en quasi-isotrope ou en cross-ply.

4.5.1 Détermination des propriétés

Comme les tests de traction donnant le module d'Young du matériau sont disponibles pour le composite en verre-époxy quasi-isotrope, ce composite est étudié dans cette partie.

Le stratifié utilisé est un verre-époxy quasi-isotrope composé de 12 plis de tissu de verre comme indiqué sur la Figure 4-20 : les tissus orientés (0/90) et (± 45) sont alternés.

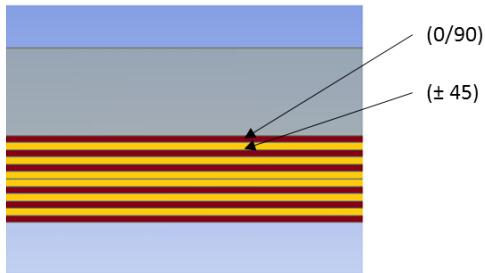


Figure 4-20 : Disposition des tissus pour le stratifié

La Figure 4-21 présente les résultats de l'extensomètre mais aussi de la machine d'un test de traction d'un échantillon de matériau composite suivant la norme ASTM D3039 (STANDARD, 2014). Les résultats donnés par la machine de traction et l'extensomètre ne sont pas coïncidant. En effet, le module d'Young trouvé avec les résultats de la machine vaut environ 7 900 MPa tandis que celui trouvé grâce aux résultats de l'extensomètre est d'environ 16 930 MPa. Un facteur 2 est introduit ici entre les différents résultats. L'écart entre les résultats donnés par la machine et ceux de l'extensomètre est plus faible dans ce cas puisque le matériau composite est moins rigide que l'aluminium. Ainsi, le module d'Young utilisé pour la modélisation par éléments finis sera celui obtenu par l'extensomètre puisqu'il ne prend en compte que les déformations liées au matériau. Par ailleurs, seule la rigidité dans le sens de traction (axe x) sera prise en compte puisque le matériau est considéré comme étant isotrope. Finalement, le coefficient de Poisson sera pris égal à 0,3.

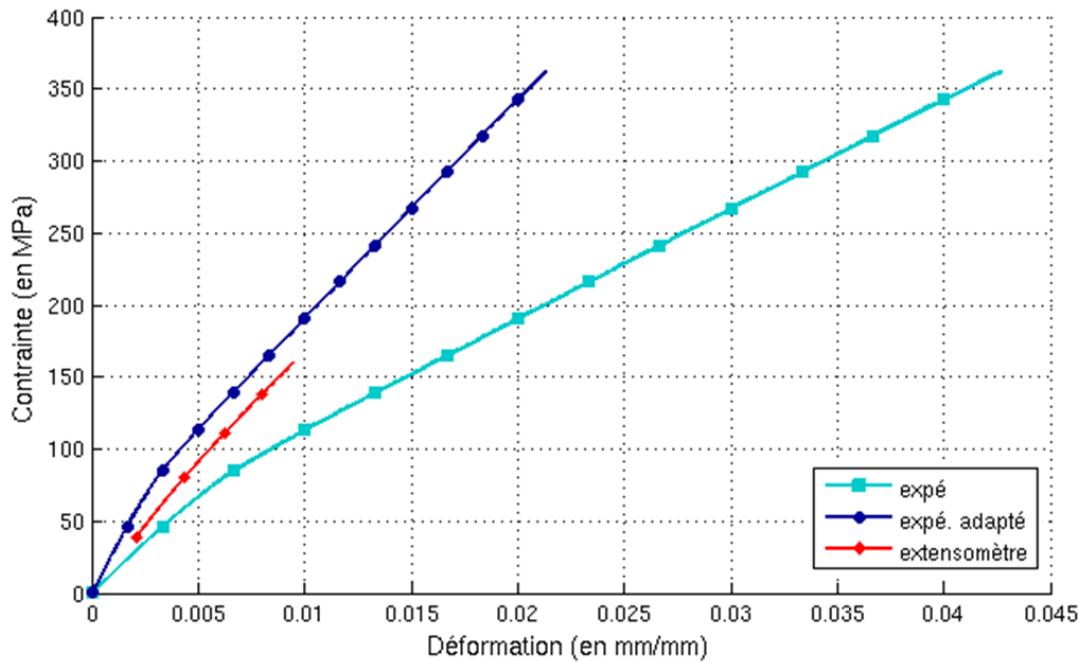


Figure 4-21 : Test de traction pour le verre-époxy quasi isotope

4.5.2 Résultats et analyses

Une comparaison entre les résultats expérimentaux et numérique est effectuée pour chacune des configurations de joint, de un à trois boulons sur les Figure 4-22, Figure 4-23, Figure 4-24 respectivement. Dans chacun des cas, quatre tests sont effectués. Les résultats expérimentaux, donnés par la machine, ne sont pas en accord avec les résultats du modèle par éléments finis. Après ajustement avec le facteur 2 trouvé précédemment, les résultats sont relativement bien concordant. Les écarts observés peuvent provenir de la variabilité des expériences.

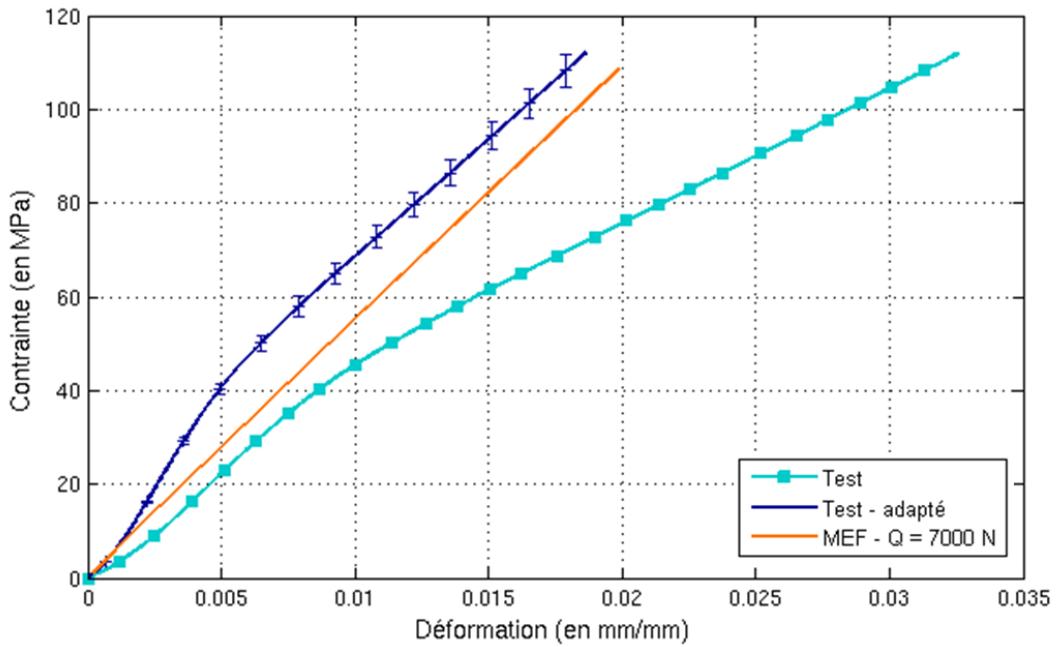


Figure 4-22 : Test de traction du joint à un boulon : comparaison expérimentale et numérique pour le verre-époxy quasi-isotrope

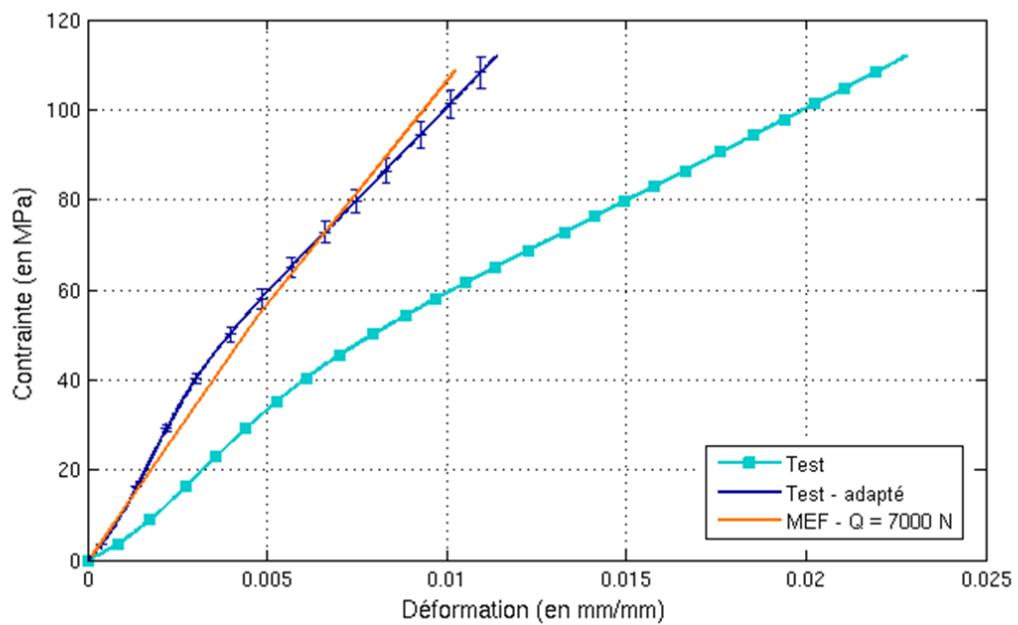


Figure 4-23 : Test de traction du joint à deux boulons : comparaison expérimentale et numérique pour le verre-époxy quasi-isotrope

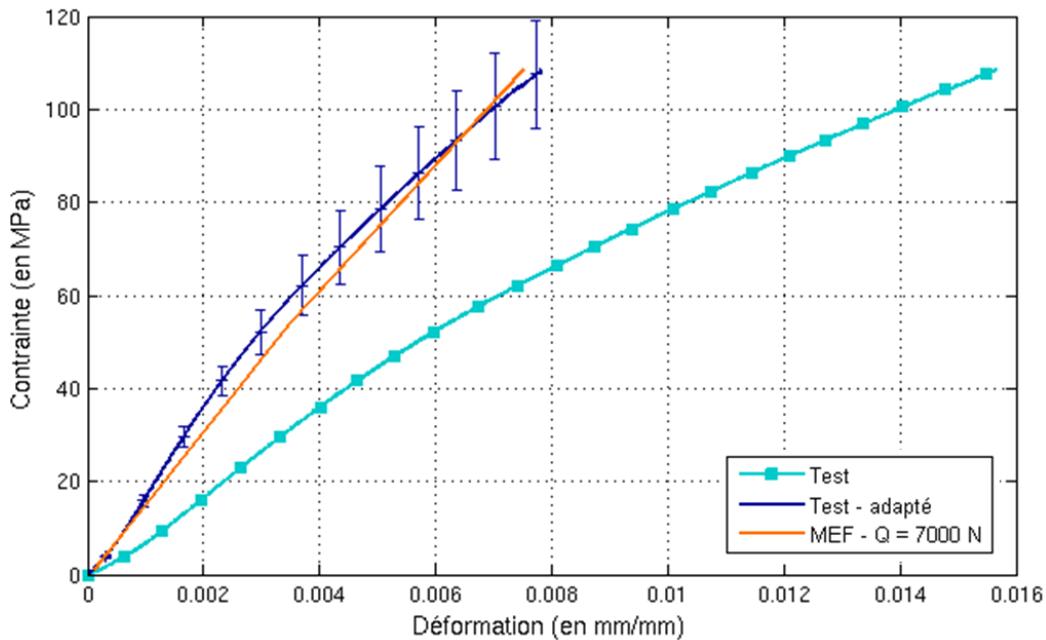


Figure 4-24 : Test de traction du joint à trois boulons : comparaison expérimentale et numérique pour le verre-époxy quasi-isotrope

Il est possible de comparer les rigidités des différentes configurations de joints boulonnés, comme il est visible à la Figure 4-25. La rigidité augmente de la configuration à un boulon à celle à trois boulons. Le test de la plaque avec trou ouvert (OH) semble correspondre à une rigidité asymptotique pour les joints boulonnés. Elle sera atteinte avec plus de boulons.

Les différentes rigidités obtenues sont rappelées dans le Tableau 4-9. Les écarts observés entre les valeurs expérimentales adaptées et numériques restent faibles. La configuration à deux boulons est la moins précise, comme dans le cas de l'aluminium.

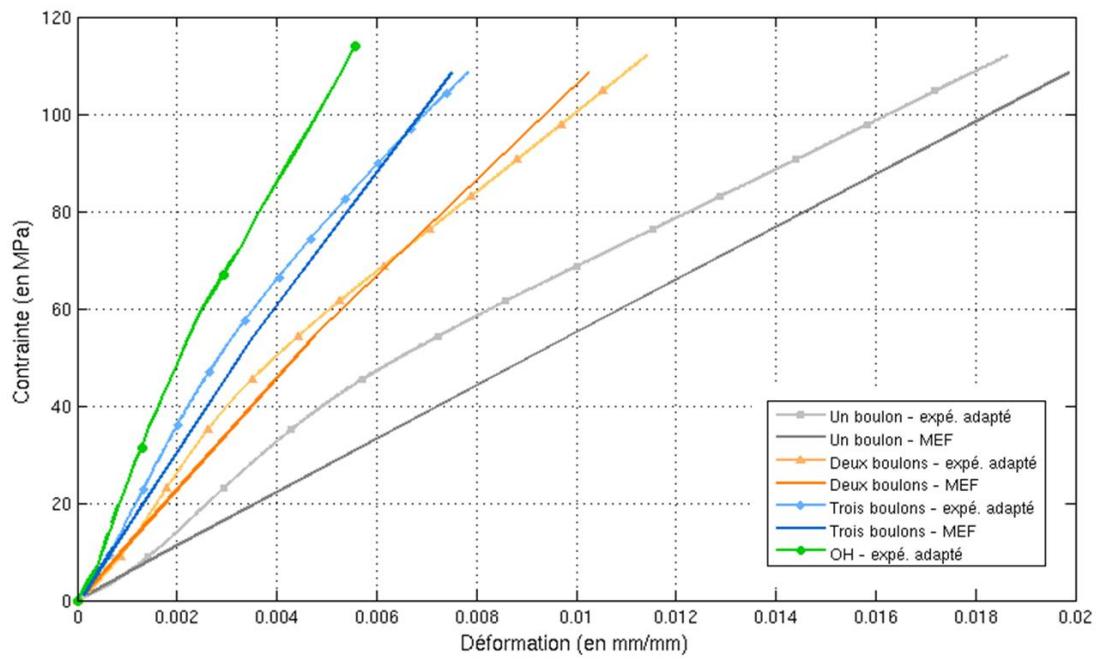


Figure 4-25 : Comparaison des résultats donnés par la modélisation et des résultats adaptés donnés par les expériences des différents tests pour le verre-époxy quasi-isotrope

Tableau 4-9 : Rigidité des différents tests obtenue expérimentalement et par éléments finis pour le verre-époxy quasi-isotrope

Configuration	Rigidité expérimentale adaptée (en MPa)	Rigidité MEF (en MPa)	Pourcentage écart (en %)
Un boulon	$5\ 140 \pm 250$	5 460	5
Deux boulons	$9\ 470 \pm 410$	10 630	12
Trois boulons	$13\ 620 \pm 2\ 140$	14 570	7
Trou ouvert (OH)	18 400	-	-

CHAPITRE 5 ANALYSE DE LA DISTRIBUTION DU TRANSFERT DE CHARGE

Après avoir développé et validé le modèle numérique pour différentes configurations, nous nous attachons à effectuer une analyse complète du transfert de charge dans les joints boulonnés. Le but de la modélisation du joint boulonné est la compréhension du mécanisme de transfert de charge au niveau du boulon et de son changement de comportement avec le chargement ou l'application d'une précontrainte. La prédiction du transfert de charge permettra une meilleure prédiction du comportement du joint dans sa globalité.

Dans ce chapitre, nous détaillerons dans un premier temps les analyses effectuées sur le joint à un boulon suivant différentes conditions. Nous ferons ensuite un travail similaire pour les joints à deux et trois boulons. Pour les trois configurations, notre attention se portera également sur l'influence de la précontrainte sur le comportement des joints. Enfin, nous essayerons d'extrapoler les résultats obtenus pour les joints boulonnés à des joints hybrides.

5.1 Joint à un boulon

La modélisation par éléments finis permet ici d'observer l'influence de la précontrainte ainsi que d'analyser la distribution du transfert de charge.

5.1.1 Influence de la précontrainte

D'après la Figure 5-1, l'augmentation de la précontrainte apporte légèrement plus de rigidité à l'ensemble du joint : la rigidité globale du joint passe de 25 450 MPa lorsqu'il n'y a pas de précontrainte à 28 700 MPa avec une précontrainte de 14 000 N, soit une augmentation de 13%. On peut voir que pour des valeurs de précontrainte installées lors des essais, soit entre 0 et 7 000 N, ce paramètre n'a que peu d'influence dans la direction de chargement puisqu'elle lui est orthogonale : les déplacements sont diminués de 4% au maximum pour cet intervalle de précontraintes.

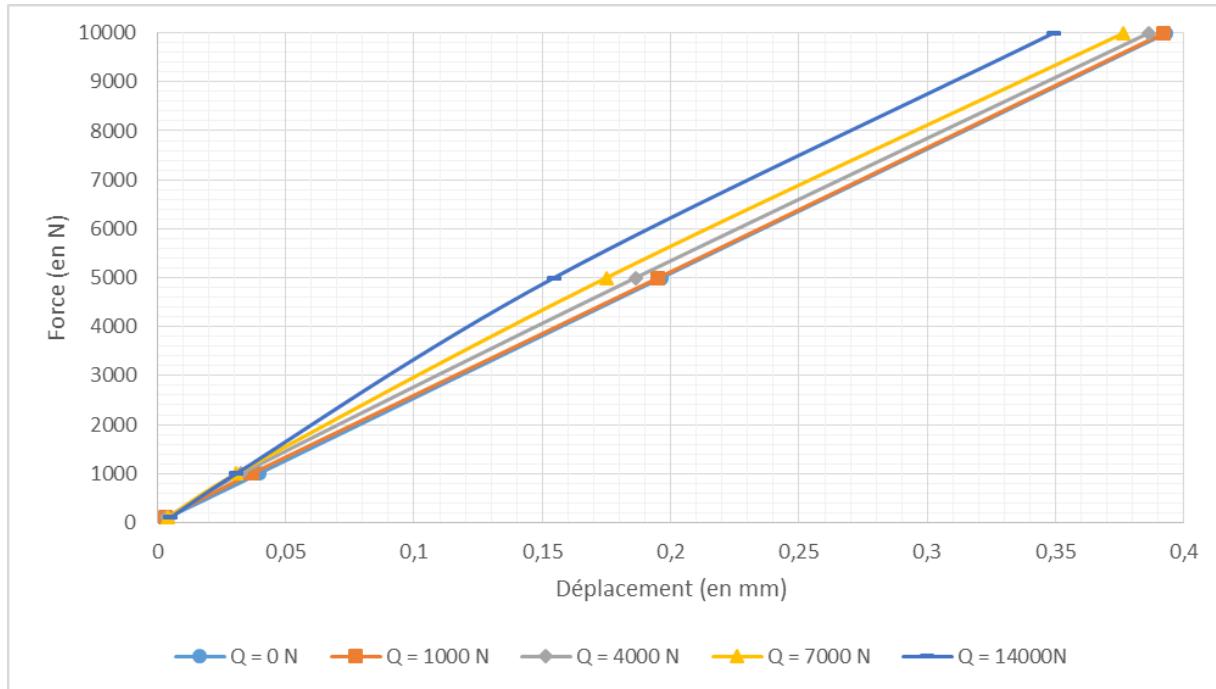


Figure 5-1 : Test de traction du joint à un boulon : comparaison de la rigidité suivant la précontrainte

5.1.2 Étude de la distribution du transfert de charge

La distribution du transfert de charge est étudiée suivant différentes forces et précontraintes afin de pouvoir analyser son évolution. Trois forces selon l'axe x (l'axe de la dimension la plus importante des pièces) sont regardées : la force de contact entre le fût et le trou et les deux forces de frottement, celle entre la tête et la plaque et celle entre les plaques. Leur somme doit correspondre à la force appliquée ou à la force de réaction par rapport au support fixe qui sont toujours égales (condition d'équilibre).

Deux cas sont étudiés, selon que la flexion secondaire, déformation naturelle de l'assemblage, soit laissée libre ou limitée afin d'isoler certains mécanismes de transfert de charge ou d'identifier l'influence de certains paramètres. En effet, la flexion secondaire est un paramètre important à prendre en compte et à étudier dans le cas d'un assemblage de deux plaques à simple recouvrement. Elle peut influencer la répartition du transfert de charge. Elle peut également rendre les résultats moins précis puisque c'est un phénomène non contrôlé. Dans le modèle éléments finis, la flexion secondaire est négligée en bloquant les déplacements verticaux des substrats entre la modélisation des mors, comme il est visible sur la Figure 5-2. Les déplacements des substrats sous les extrémités

du boulon sont laissés libres afin de laisser la possibilité d'appliquer une précontrainte avec les effets de compression des substrats.

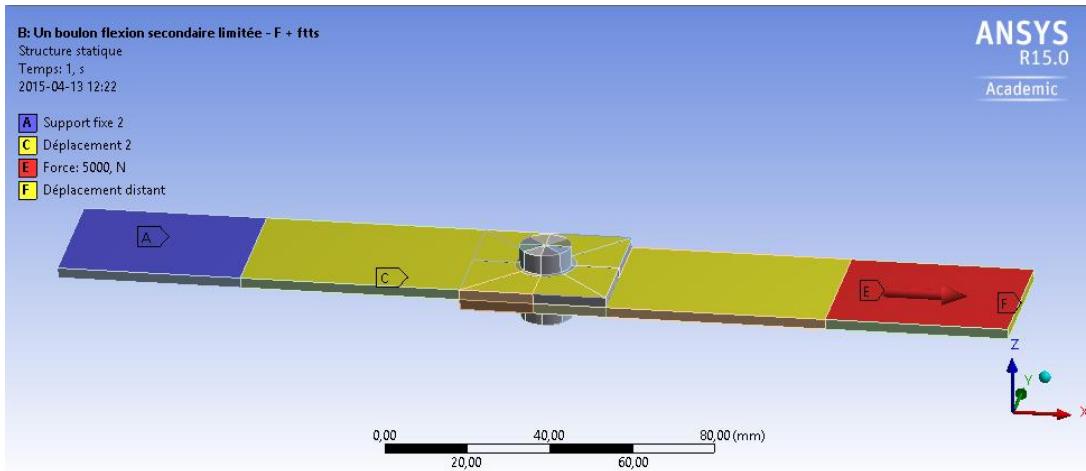


Figure 5-2 : Conditions aux limites dans le cas d'un joint à un boulon avec la flexion secondaire limitée

La répartition du transfert de charge en fonction de la force appliquée obtenue lorsque que la flexion secondaire est limitée est donnée à la Figure 5-3. Toutes les études suivantes se rapportent uniquement à un bilan des forces effectué sur la plaque supérieure. La force transmise est normalisée par rapport à la force appliquée pour que tous les résultats puissent être comparés. Il est particulièrement visible que, pour une force donnée, la charge transférée par frottement (entre la tête et la plaque et entre les plaques – appelés, respectivement, « Dessus » et « Plaques » sur la Figure 5-3) augmente avec la précontrainte au détriment de celle transférée par contact pur (contact entre le fût du boulon et le trou – appelé « Fût » sur la Figure 5-3) : plus la précontrainte est importante plus les frottements ont une influence sur la distribution du transfert de charge. Cette augmentation est particulièrement importante lorsqu'une faible force est appliquée. En effet, lorsque la précontrainte augmente, les forces de frottements augmentent également autour du boulon. Le déplacement relatif des substrats est moindre et le fût du boulon entre moins en contact avec le trou que lorsque la précontrainte est faible. Il est intéressant de rappeler ici qu'il n'y a pas de jeu entre le fût du boulon et le trou de passage puisque le phénomène de transfert de charge est fortement influencé par cette condition. Il est retardé par l'augmentation du jeu ou plus rapidement présent s'il y a interférence entre le fût et le trou. Des études spécifiques ont été dédiées à l'influence du trou de passage sur le transfert de charge (cf. Paragraphe 2.2.3).

La Figure 5-4 illustre bien ce phénomène. En utilisant la loi de Coulomb, la précontrainte de 7 000 N dans les deux cas introduit une force de frottements de 1 400 N. L'image de gauche (a) présente le cas où la force de frottement introduite par la précontrainte est 14 fois plus importante que la force appliquée : la force appliquée ne parvient pas à vaincre la force de frottement, le déplacement des substrats est presque nul (0,005 mm), le contact ne se développe pas entre le fût du boulon et le trou. La figure de droite (b) illustre le cas contraire : la force de frottement introduite par la précontrainte est plus faible de 86% par rapport à la force appliquée. La force appliquée permet de vaincre cette force de frottement et ainsi d'avoir un réel déplacement des substrats (0,489 mm) ; le contact est possible entre le boulon et le trou.

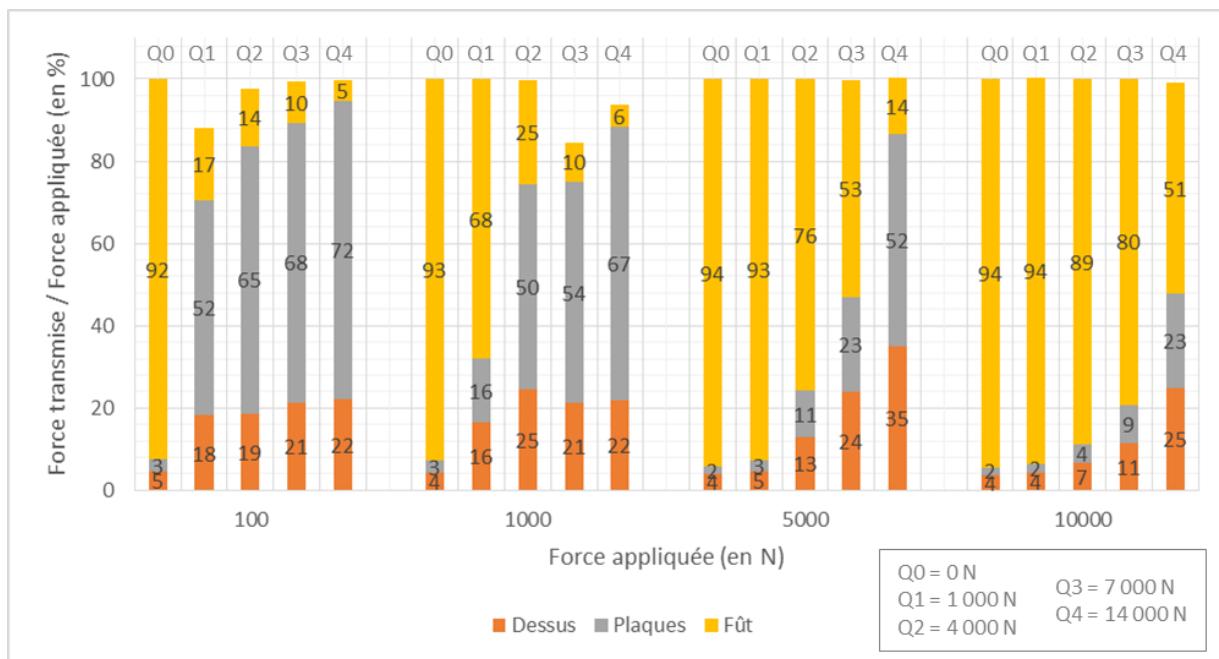


Figure 5-3 : Distribution du transfert de charge pour un joint à un boulon en fonction de la force appliquée - flexion secondaire limitée

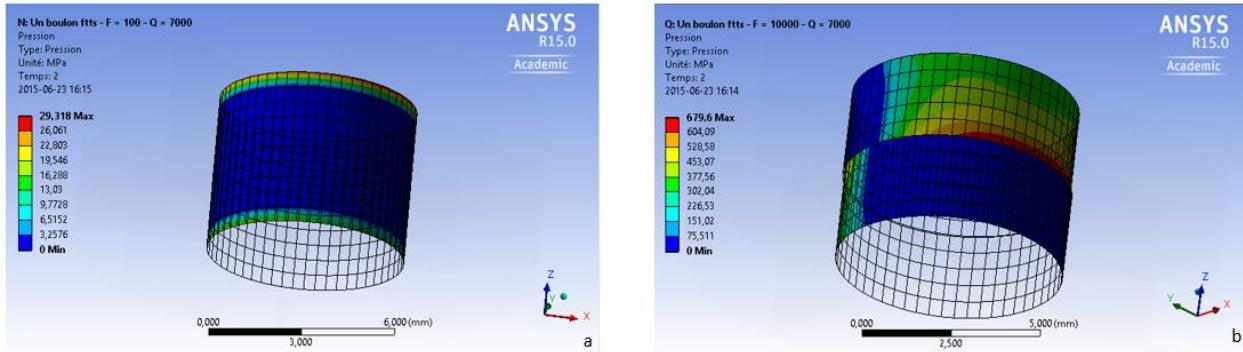


Figure 5-4 : Pression de contact entre le fût du boulon et le trou (a) $F = 100 \text{ N}$ et $Q = 7 \text{ 000 N}$ - (b) $F = 10 \text{ 000 N}$ et $Q = 7 \text{ 000 N}$

Dans certains cas, la force transmise n'est pas égale à la force appliquée. Une explication peut venir du fait que des conditions opposées en terme de force et de précontrainte sont appliquées : les erreurs se retrouvent principalement lorsque l'assemblage est chargé avec la force la plus faible tandis que le boulon est soumis à une précontrainte relativement importante.

Lorsque la flexion secondaire est libre, des résultats très similaires sont obtenus à la Figure 5-5. On peut remarquer une moins bonne précision dans ce cas. En effet, dans le cas d'une forte précontrainte et d'une faible force ($F = 100 \text{ N}$ et $Q = 4 \text{ 000 N}$ et plus), la somme des trois forces impliquées dans le transfert de charge n'est pas égale à la force F . Cette erreur, qui peut atteindre 40%, est vraisemblablement due aux conditions opposées qui sont appliquées (forte précontrainte et faible force). Par ailleurs, elle intervient lorsqu'une faible force est appliquée : des erreurs provenant des perturbations liées à la mise en place du transfert de charge peuvent apparaître.

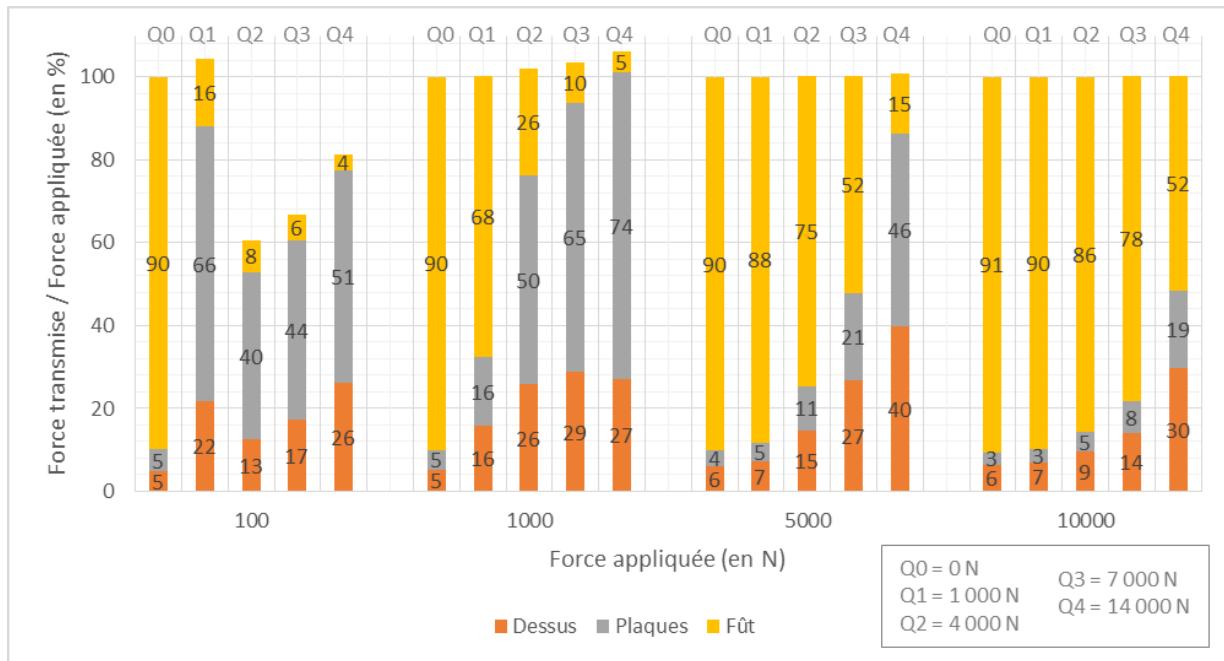


Figure 5-5 : Distribution du transfert de charge pour un joint à un boulon en fonction de la force appliquée - flexion secondaire libre

Les mêmes résultats sont présentés sur la Figure 5-6, en fonction de la précontrainte appliquée cette fois-ci. Lorsqu'il n'y a pas de précontrainte, le transfert de charge se fait majoritairement par contact entre le fût et le trou. Sa distribution est, par ailleurs, indépendante de la force appliquée. En effet, les frottements n'ont pas une grande influence lorsqu'il n'y a pas de précontrainte. La conclusion est logique si on se rappelle que la précontrainte crée les forces d'appui normal générant le frottement. Dès lors qu'une précontrainte est appliquée, si on considère une précontrainte donnée, plus la force extérieure augmente, plus le transfert de charge s'effectue par le contact entre fût et le trou. Puisque la force augmente, le déplacement des substrats augmente également ; le transfert par contact entre le fût et le trou devient prépondérant. Visuellement, on remarque facilement sur la Figure 5-6 que les barres jaunes (transfert par contact fût-trou) occupent une étendue de moins en moins importante en allant de gauche à droite, soit d'une précontrainte nulle vers une précontrainte élevée.

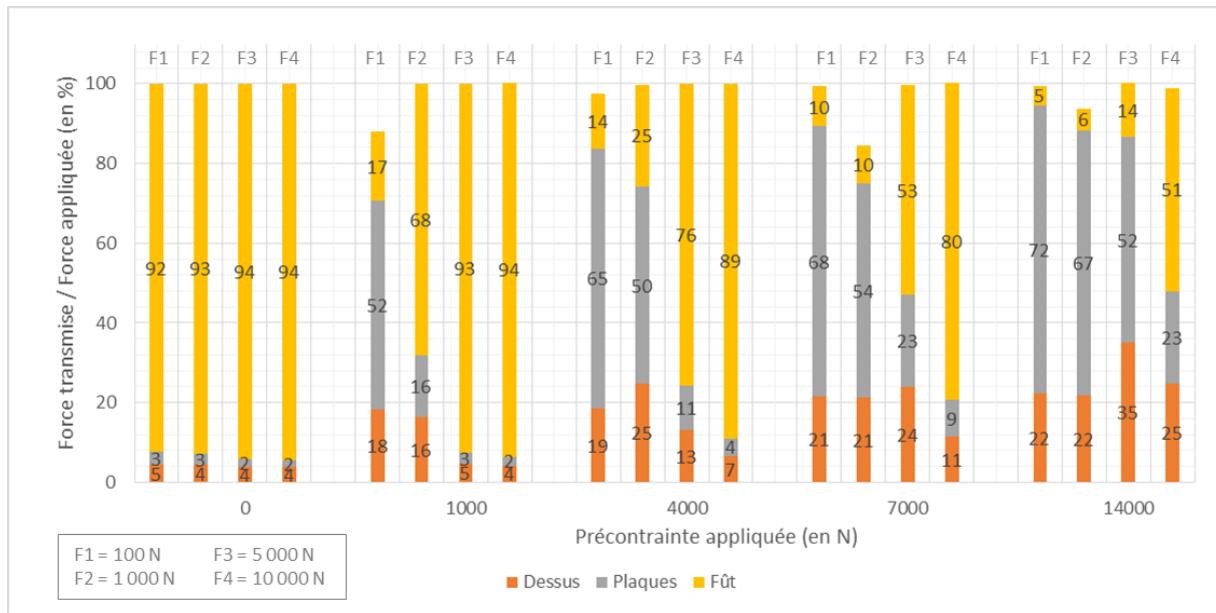


Figure 5-6 : Distribution du transfert de charge pour un joint à un boulon en fonction de la précontrainte appliquée - flexion secondaire limitée

5.2 Joint à deux et trois boulons

5.2.1 Influence de la précontrainte

En regardant les courbes force – déplacement de la Figure 5-7 ainsi que de la Figure 5-8, on remarque que la précontrainte augmente la rigidité de l’assemblage : entre 0 et 14 000 N, la rigidité du joint augmente approximativement de 17 % quel que soit le nombre de boulons.

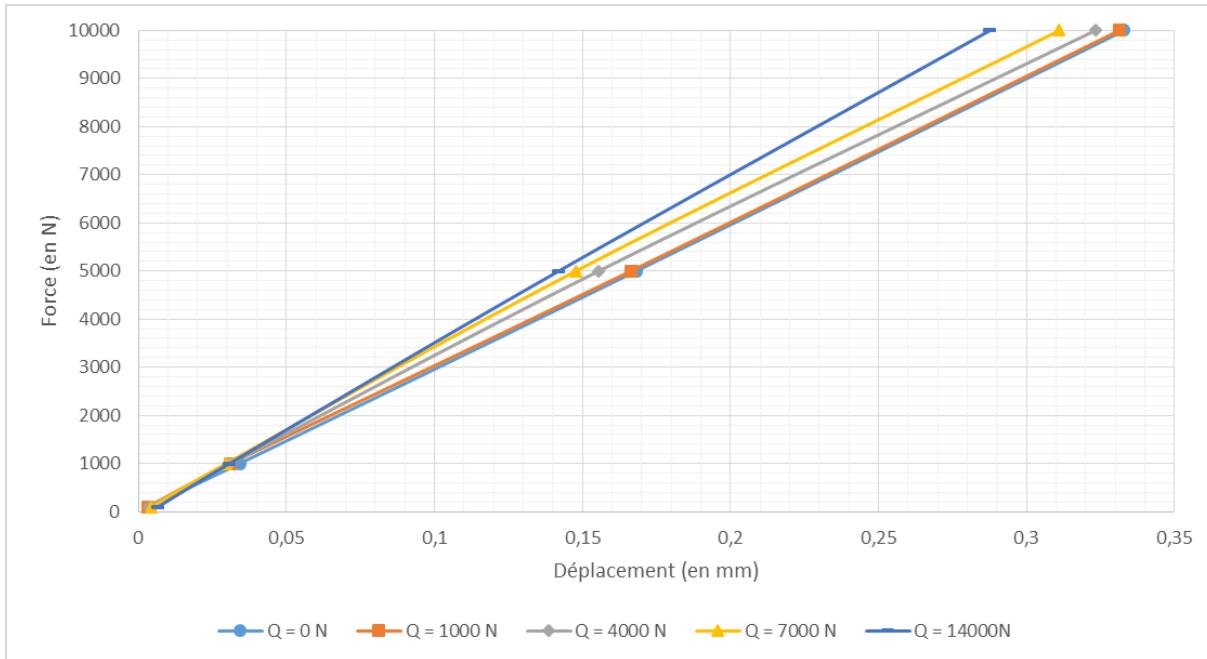


Figure 5-7 : Test de traction du joint à deux boulons : comparaison de la rigidité suivant la précontrainte

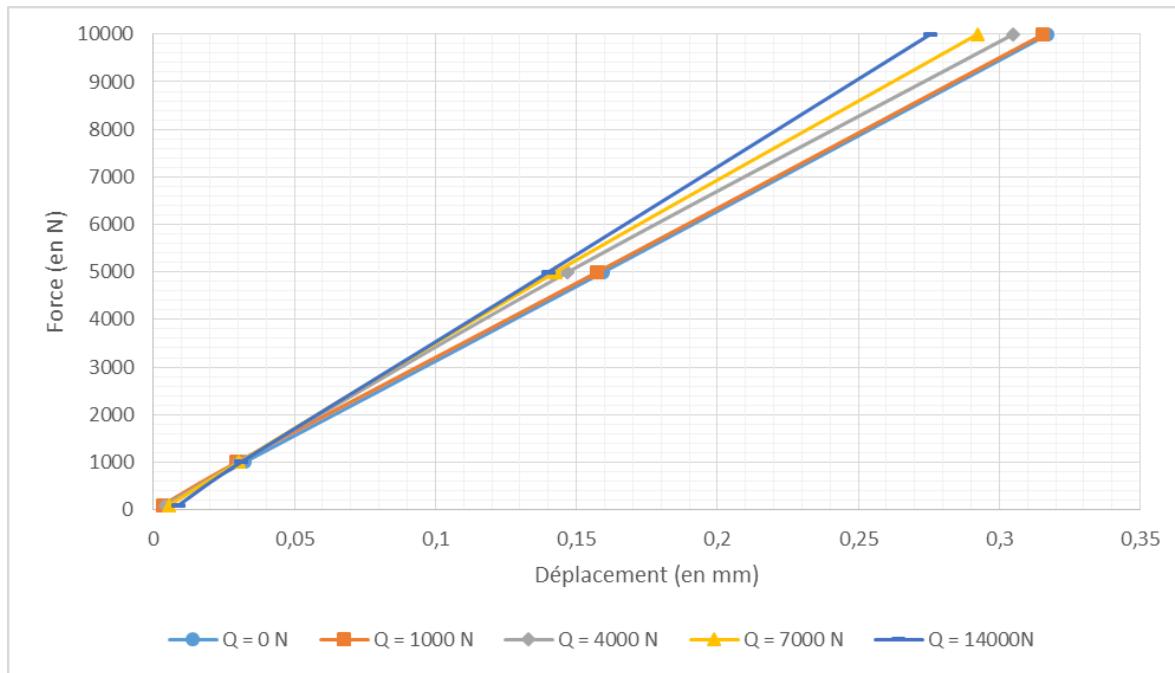


Figure 5-8 : Test de traction du joint à trois boulons : comparaison de la rigidité suivant la précontrainte

5.2.2 Étude de la distribution du transfert de charge

Une étude similaire à celle effectuée pour le joint à un boulon est menée ici : avec la flexion secondaire libre, on s'intéresse à analyser l'évolution de la répartition du transfert de charge entre les parties considérées (les trois zones de transfert de charge et les deux boulons) suivant différentes forces et précontraintes appliquées.

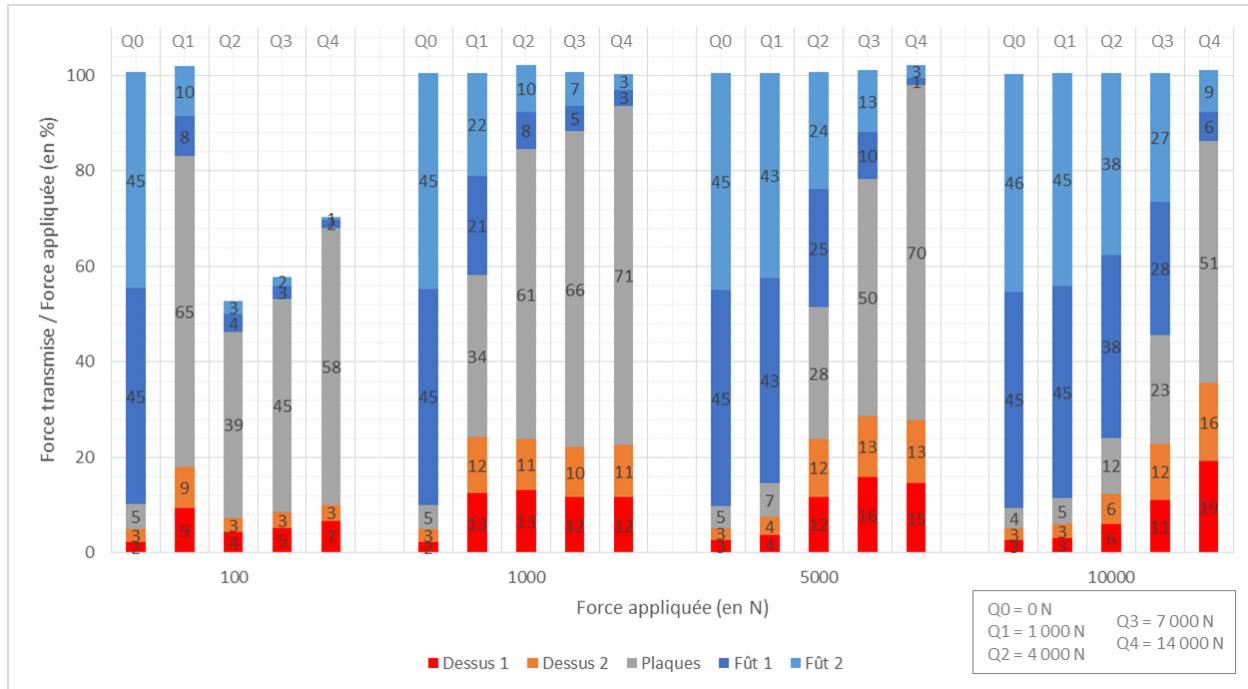


Figure 5-9 : Distribution du transfert de charge pour un joint à deux boulons en fonction de la force appliquée

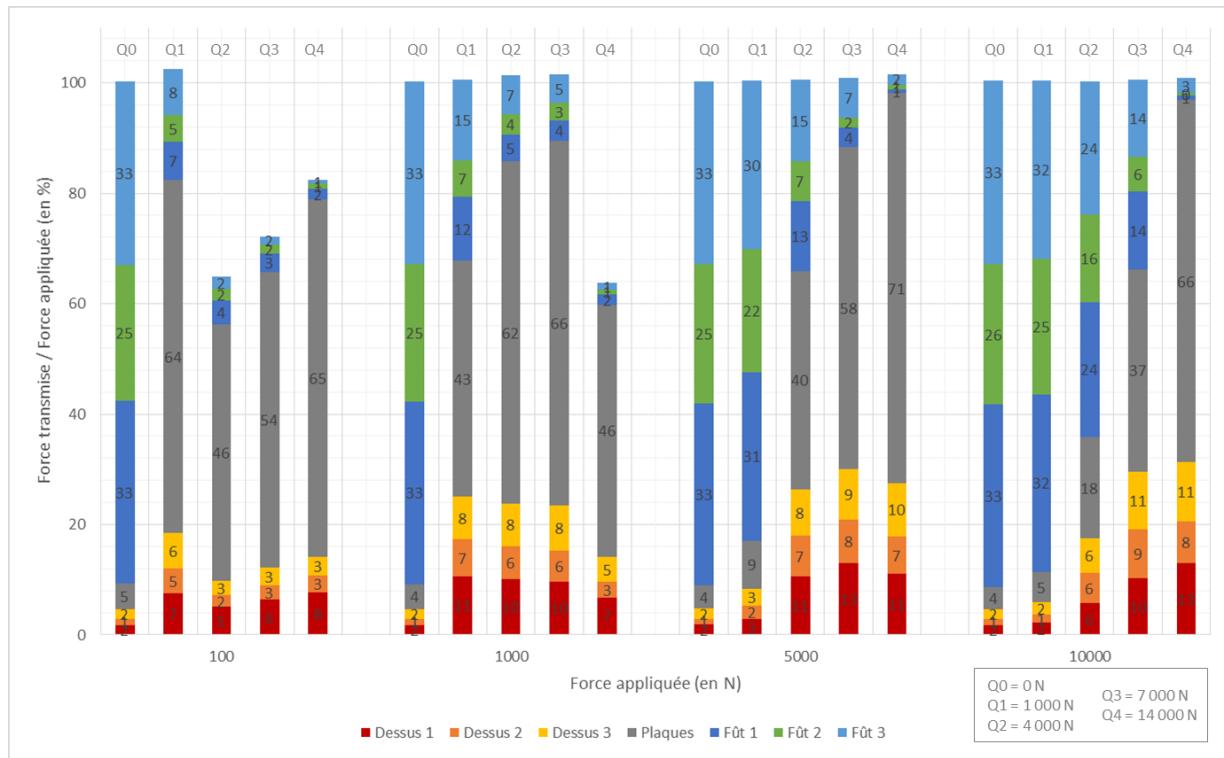


Figure 5-10 : Distribution du transfert de charge pour un joint à trois boulons en fonction de la force appliquée

Tout d'abord, il est possible de remarquer que les résultats pour le joint à deux et trois boulons sont similaires (Figure 5-9 et Figure 5-10 respectivement). À une force donnée, l'augmentation de la précontrainte rend l'influence des frottements et donc de l'adhésion entre les différentes parties plus important : l'étendue des zones colorées en nuances de rouge et gris augmente au détriment des zones en nuances de bleu. Ainsi le transfert entre les plaques et entre la tête et la plaque devient important tandis que le transfert de charge par contact entre le fût et le trou diminue. L'augmentation de la charge transférée par frottement est plus importante entre les plaques, là où la surface de contact est plus importante.

Par ailleurs, quelle que soit la configuration, la charge transférée par contact entre le fût et le trou est toujours répartie comme le modèle analytique l'indique. Pour le joint à deux boulons (Figure 5-9), il y a toujours une répartition équivalente de la charge entre les boulons. En ce qui concerne le joint à trois boulons (Figure 5-10), les deux boulons extrêmes transfèrent à peu près la même charge tandis que le boulon du milieu en transfert un peu moins. En ne prenant en compte que la force de contact entre les trous et les fûts, la distribution reste à peu près la même : 36 % pour les

boulons 1 et 3, 28% pour le boulon 2. Lorsque la précontrainte augmente, les boulons extrêmes tendent à être légèrement plus chargés (environ 44 % du transfert par contact) tandis que le boulon du milieu se décharge (environ 13 %).

La Figure 5-11 et la Figure 5-12 présentent les mêmes résultats mais en fonction de la précontrainte et non plus de la force appliquée.

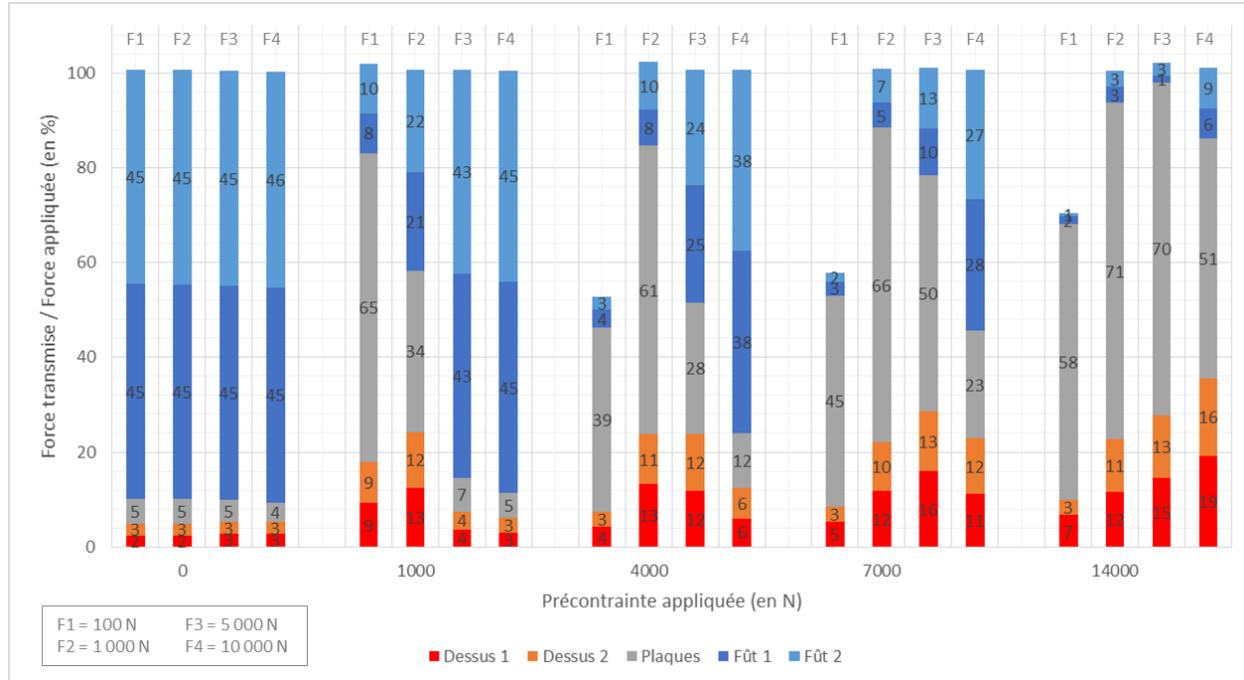


Figure 5-11 : Distribution du transfert de charge pour un joint à deux boulons en fonction de la précontrainte appliquée

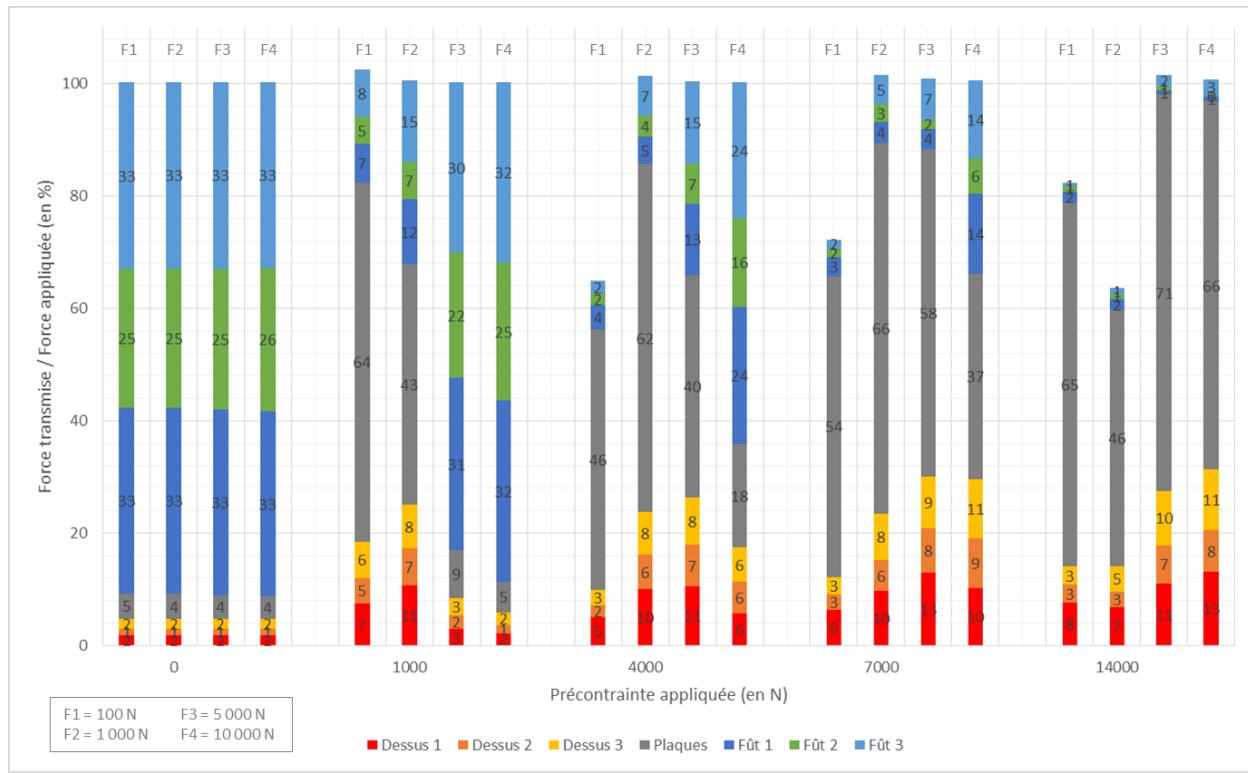


Figure 5-12 : Distribution du transfert de charge pour un joint à trois boulons en fonction de la précontrainte appliquée

En l'absence de précontrainte, les frottements n'ont que peu d'influence et la répartition du transfert de charge n'est pas modifiée par l'augmentation de la force appliquée quel que soit le nombre de boulons de l'assemblage. En revanche, dès lors qu'une précontrainte est appliquée, plus la force augmente, plus le transfert de charge se fera par contact entre le fût et le trou ; le transfert par frottement en est diminué. Toutefois, lorsque $Q = 14\ 000\ N$, la précontrainte appliquée est tellement importante par rapport au chargement que le transfert continue de s'effectuer principalement par frottement malgré l'augmentation de la force.

5.3 Extrapolation au joint hybride

Avec l'étude menée pour un joint avec un boulon au paragraphe 5.2.2 (Étude de la distribution du transfert de charge), si on considère que le collage est assimilé à un frottement infini (adhérence totale entre les plaques), il est possible d'extrapoler les résultats du joint boulonné à un joint hybride présentant un film d'adhésif entre les deux substrats. En effet, lorsque la précontrainte augmente,

la part de la force transférée par frottement et donc par adhérence (dessus et plaques sur la Figure 5-13) augmente. C'est surtout le cas pour la force de frottement développée entre les plaques. En extrapolant l'augmentation de la force de frottement entre les plaques à de l'adhésif, on obtient la répartition du transfert de charge pour un joint hybride, soit la sixième configuration sur la Figure 5-13. La force transmise par le fût reste faible par l'utilisation d'un adhésif fin et rigide. La force de frottement sous les extrémités du boulon est équivalente à celle dans le cas où il n'y a pas de précontrainte appliquée. En effet, comme l'adhésif est rigide, il n'y a que peu de déplacement relatif des substrats et donc les extrémités du boulon glissent peu. La force transmise par frottement à cet endroit est donc très faible. La majeure partie de la force serait donc transmise par l'adhésif. Il y aurait peu de partage de charge entre la colle et le boulon. En modifiant numériquement les propriétés du contact entre les substrats, nous pouvons, sans ajouter d'adhésif, valider l'extrapolation : le contact lie totalement les plaques. Toutefois, une souplesse artificielle est introduite grâce aux paramètres présents dans la définition du contact. Un seul cas de chargement est étudié, celui avec une force appliquée et une précontrainte égales à 1 000 N. On observe ainsi la dernière configuration présente sur la Figure 5-13 : le transfert de charge se fait effectivement quasiment intégralement par le collage.

Dans un scénario de chargement jusqu'à la rupture, on peut s'imaginer facilement que vraisemblablement les deux modes d'assemblages travailleraient successivement : le transfert de charge par assemblage boulonné (contact fût-trou) suivrait celui par collage après que l'adhésif ait failli. Certaines études (BODJONA & LESSARD, 2015) ont montré qu'un partage avantageux de la charge dans les joints hybrides peut être obtenu par un choix adéquat du type de colle (souplesse accrue) et/ou de son épaisseur. Une interférence au niveau du fût-trou avancerait également le moment de partage de charge entre les deux mécanismes de transfert.

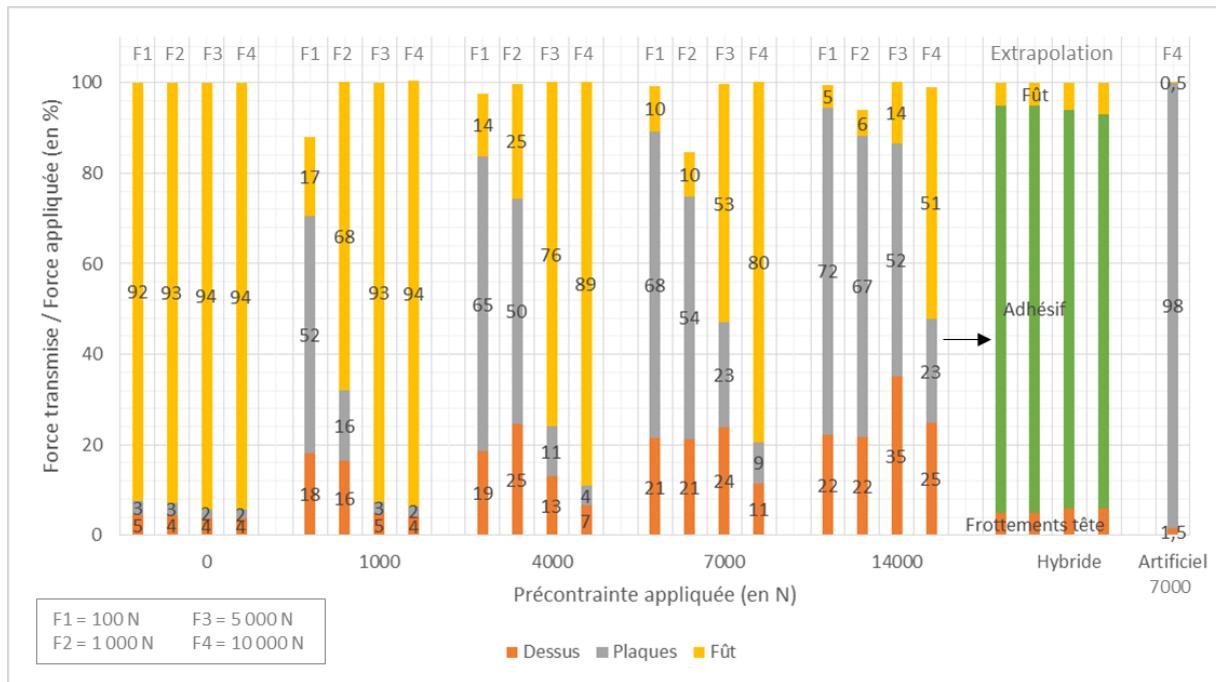


Figure 5-13 : Distribution du transfert de charge pour un joint à un boulon en fonction de la précontrainte appliquée et extrapolation à un joint hybride

La même extrapolation est faite pour les joints à deux et trois boulons, visible sur la Figure 5-14 et la Figure 5-15, respectivement. Pour le joint à deux boulons, la charge transférée par contact entre le fût et le trou est identique pour les deux boulons, conformément à ce qui a été vu dans la littérature avec le modèle analytique de GUILLOT (2010). Dans le cas du joint à trois boulons, les boulons des lignes extrêmes (boulons 1 et 3) sont légèrement plus chargés que le boulon du milieu (boulon 2).

Des travaux futurs, dans le cadre plus large du projet, vont s'attacher à vérifier ces extrapolations en ajoutant un adhésif entre les deux plaques, considérer les comportements élasto-plastiques et vérifier le scénario de chargement jusqu'à rupture.

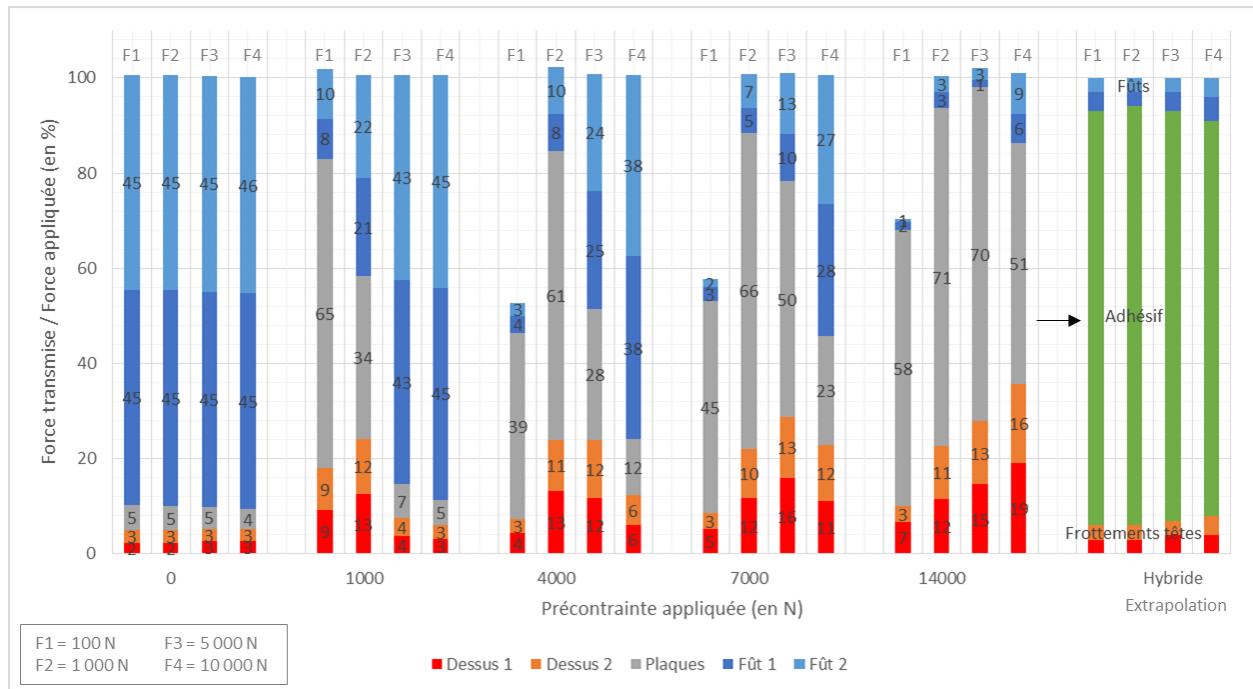


Figure 5-14 : Distribution du transfert de charge pour un joint à deux boulons en fonction de la précontrainte appliquée et extrapolation à un joint hybride

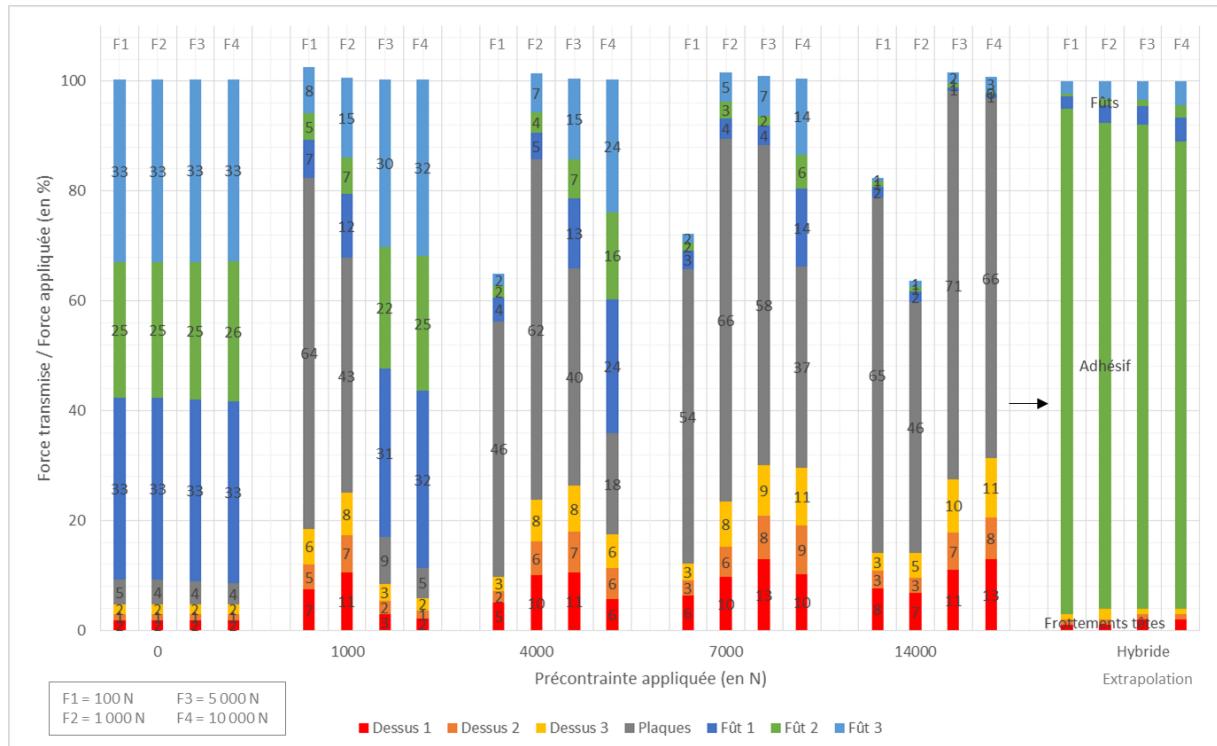


Figure 5-15 : Distribution du transfert de charge pour un joint à trois boulons en fonction de la précontrainte appliquée et extrapolation à un joint hybride

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Un modèle par éléments finis des joints boulonnés a été développé en adéquation avec les tests expérimentaux effectués dans les laboratoires du département de génie mécanique de l'école : dimensions des plaques et des boulons, jeu entre le fût et le trou de passage, précontrainte appliquée sur les boulons, conditions au limites ont été reproduits afin de représenter au mieux les expérimentations. À l'aide de différents tests simples (traction, traction avec trou ouvert et trou boulonné et traction avec une goupille), le modèle numérique a été validé et permet de reproduire le comportement observé expérimentalement.

L'analyse de la distribution du transfert de charge a permis de mieux comprendre le comportement de joints boulonnés ainsi que de déterminer les valeurs relatives de transfert de chaque mécanisme par contact entre têtes de boulon et plaques, contact entre les plaques et contact entre trou et fût du boulon. En effet, suivant la force et la précontrainte appliquée, le transfert se fera plus par frottements soit de manière adhérente ou par contact : à une force donnée, l'augmentation de la précontrainte appliquée aura pour effet d'augmenter le transfert de charge par adhérence puisque le déplacement relatif des substrats est moins important ; en se plaçant à une précontrainte donnée, l'augmentation de la force engendrera un déplacement relatif des substrats plus importants et ainsi le transfert par contact entre le fût du boulon et le trou de passage prendra une part plus importante dans la distribution du transfert de charge.

Lorsque les rigidités des différentes configurations sont comparées, on observe que, pour les joints, elle augmente avec le nombre de boulons tendant à atteindre celle de la plaque avec trou (OH), rigidité de référence pour les joints boulonnés. À partir de trois boulons, le gain en rigidité sera plus faible : les rigidités du joint à trois boulons et de la plaque avec trou sont proches.

Finalement une extrapolation de ce comportement au joint hybride a été effectuée. En effet, lorsque la précontrainte devient importante, la charge transmise par adhérence augmente. Les adhésifs généralement utilisés sont fins et rigide : ils se déforment peu et le déplacement relatif des substrats reste très faible. La rigidité du joint hybride sera plus élevée que celle d'un joint boulonné. Le contact entre le fût du boulon et le trou ainsi que les forces de frottements entre les extrémités du boulon et les plaques ne se développent que très peu. Ainsi, en extrapolant les frottements entre les plaques à de l'adhésif, il est possible d'imaginer que le transfert de charge se fera principalement de manière adhésive. Un assemblage hybride dans ces conditions présentera, lors d'un chargement

jusqu'à la rupture, une défaillance successive des deux modes d'assemblage : le collage en premier sera suivi par le boulonnage.

Après l'étude du transfert de charge pour un joint boulonné uniquement, la suite serait d'effectuer la même étude pour un joint hybride. L'adhésif permet de transmettre une partie ou la totalité de la charge extérieure. Par ailleurs, les travaux présentés dans ce mémoire sont effectués uniquement sous charge statique avec l'aluminium comme matériau utilisé pour les substrats. Au laboratoire, les différents tests de tractions présentés ici ont également été effectués avec quatre configurations de matériaux composites différentes. Il serait intéressant de les reproduire numériquement afin d'étudier les différences et d'investiguer la distribution du transfert de charge pour ces matériaux.

BIBLIOGRAPHIE

- ALKATAN, F., ANDRIAMAMPIANINA, J., STÉPHAN, P., & GUILLOT, J. (2013). Flexibility of hybrid load transfer assemblies: Influence of tightening pre-stress. *Aerospace Science and Technology*, 25(1), 84-92. doi: 10.1016/j.ast.2011.12.010
- ANDRIAMAMPIANINA, J., ALKATAN, F., STÉPHAN, P., & GUILLOT, J. (2012). Determining load distribution between the different rows of fasteners of a hybrid load transfer bolted joint assembly. *Aerospace Science and Technology*, 23(1), 312-320. doi: 10.1016/j.ast.2011.08.008
- ASTROM, B. T. (1997). *Manufacturing of polymer composites*: CRC Press.
- BENHADDOU, T., CHIROL, C., DAIDIE, A., GUILLOT, J., STEPHAN, P., & TUERY, J.-B. (2014). Pre-tensioning effect on fatigue life of bolted shear joints. *Aerospace Science and Technology*, 36 36-43. doi: 10.1016/j.ast.2014.03.003
- BODJONA, K., & LESSARD, L. (2015). Load sharing in single-lap bonded/bolted composite joints. Part II: Global sensitivity analysis. *Composite Structures*, 129 276-283. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.03.069
- BODJONA, K., RAJU, K., LIM, G.-H., & LESSARD, L. (2015). Load sharing in single-lap bonded/bolted composite joints. Part I: Model development and validation. *Composite Structures*, 129 268-275. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.04.040
- BOIS, C., COLT, M., WARGNIER, H., & WAHL, J.-C. (2011). Etude du transfert de charge dans les assemblages composites hybrides boulonnés et collés. *Compte rendu des JNC* 17 12.
- BOIS, C., WARGNIER, H., WAHL, J.-C., & LE GOFF, E. (2013). An analytical model for the strength prediction of hybrid (bolted/bonded) composite joints. *Composite Structures*, 97 252-260. doi: 10.1016/j.compstruct.2012.10.022
- BROTHERHOOD, C., DRINKWATER, B., & DIXON, S. (2003). The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques. *Ultrasonics*, 41(7), 521-529.
- DA SILVA, L. F. M., & BANEA, M. D. (2009). Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 223(1), 1-18. doi: 10.1243/14644207jmda219

- EGAN, B., MCCARTHY, C. T., MCCARTHY, M. A., GRAY, P. J., & O'HIGGINS, R. M. (2013). Static and high-rate loading of single and multi-bolt carbon–epoxy aircraft fuselage joints. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 53 97-108. doi: 10.1016/j.compositesa.2013.05.006
- EKH, J., & SCHÖN, J. (2008). Finite element modeling and optimization of load transfer in multi-fastener joints using structural elements. *Composite Structures*, 82(2), 245-256. doi: 10.1016/j.compstruct.2007.01.005
- EKH, J., SCHÖN, J., & ZENKERT, D. (2013). Simple and efficient prediction of bearing failure in single shear, composite lap joints. *Composite Structures*, 105 35-44. doi: 10.1016/j.compstruct.2013.04.038
- GANJI, N. (2007). *Parametric study of load transfer in two-bolted single lap hybrid (bonded/bolted) shear joints*. (Wichita State University).
- GAUL, L., & NITSCHE, R. (2001). The role of friction in mechanical joints. *American society of mechanical engineers*, 54(2), 14.
- GUILLOT, J. (2010). Calcul des assemblages vissés - Assemblage de pièces planes de faible épaisseur. Partie 1. *Techniques de l'ingénieur*.
- GUILLOT, J. (2011). Calcul des assemblages vissés - Assemblages de pièces planes de faible épaisseur. Partie 2. *Techniques de l'ingénieur*.
- HART-SMITH, L. J. (1985). Bonded-bolted composite joints. *Journal of Aircraft*, 22(11), 993-1000.
- HART-SMITH, L. J. (2004). Bolted joint analyses for composite structures—current empirical methods and future scientific prospects. *ASTM special technical publication* 127-160.
- HUTH, H. (1986). Influence of fastener flexibility on the prediction of load transfer and fatigue life for multiple-row joints. *Fatigue in mechanically fastened composite and metallic joints, ASTM STP*, 927 221-250.
- ILIESCU, D. (2008). *Approches expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbone/époxy*. (Arts et Métiers ParisTech).

- KELLY, G. (2004). *Joining of carbon fibre reinforced plastics for automotive applications*. (Royal Institute of Technology, Stockholm).
- KELLY, G. (2005). Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. *Composite Structures*, 69(1), 35-43. doi: 10.1016/j.compstruct.2004.04.016
- KELLY, G. (2006). Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. *Composite Structures*, 72(1), 119-129. doi: 10.1016/j.compstruct.2004.11.002
- KOFFI, K. (1999). *Étude numérique et expérimentale des éclissages de structures aéronautiques soumis à des chargements de traction et de flexion*. (INSA de Toulouse). (524)
- LANOUE, F., VADEAN, A., & SANSCHAGRIN, B. (2009). Finite element analysis and contact modelling considerations of interference fits for fretting fatigue strength calculations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(10), 1587-1602. doi: 10.1016/j.simpat.2009.06.017
- LIU, F., ZHANG, J., ZHAO, L., XIN, A., & ZHOU, L. (2015). An analytical joint stiffness model for load transfer analysis in highly torqued multi-bolt composite joints with clearances. *Composite Structures*, 131 625-636. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.06.003
- MALLICK, P. K. (2008). *Fiber-reinforced composite : materials, manufacturing and design*: CRC Press.
- MANDAL, B., & CHAKRABARTI, A. (2015). A simple homogenization scheme for 3D finite element analysis of composite bolted joints. *Composite Structures*, 120 1-9. doi: 10.1016/j.compstruct.2014.09.061
- MCCARTHY, C. T. (2005). Experiences with modeling friction in composite bolted joints. *Journal of Composite Materials*, 39(21), 1881-1908. doi: 10.1177/0021998305051805
- MCCARTHY, C. T., & GRAY, P. J. (2011). An analytical model for the prediction of load distribution in highly torqued multi-bolt composite joints. *Composite Structures*, 93(2), 287-298. doi: 10.1016/j.compstruct.2010.09.017

- MCCARTHY, C. T., & MCCARTHY, M. A. (2005). Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: Part II—effects of bolt-hole clearance. *Composite Structures*, 71(2), 159-175. doi: 10.1016/j.compstruct.2004.09.023
- MCCARTHY, M. A., MCCARTHY, C. T., LAWLOR, V. P., & STANLEY, W. F. (2005). Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: Part I—model development and validation. *Composite Structures*, 71(2), 140-158. doi: 10.1016/j.compstruct.2004.09.024
- OLMEDO, A., SANTIUSTE, C., & BARBERO, E. (2014). An analytical model for the secondary bending prediction in single-lap composite bolted-joints. *Composite Structures*, 111 354-361. doi: 10.1016/j.compstruct.2014.01.015
- OUELLET, M. (2013). *Conception axiomatique des joints hybrides à recouvrement simple en matériaux composites*. (École Polytechnique de Montréal).
- PAROISSIEN, E. (2006). *Contribution aux assemblages hybrides (boulonnées / collés) - Application aux jonctions aéronautiques*. (Université de Toulouse III - Paul Sabatier).
- REDIN MIQUELEIZ, J. (2013). *Brevet*.: E. P. Office.
- ROSALES-IRIARTE, F., FELLOWS, N., & DURODOLA, J. (2012). Failure prediction in carbon composites subjected to bearing versus bypass loading. *Journal of Composite Materials*, 46(15), 1859-1878. doi: 10.1177/0021998311427766
- ROSS, R. D. (1947). An electrical computer for the solution of shear-lag and bolted joint problems. *NACA, TN N°1281*.
- SEN, F., PAKDIL, M., SAYMAN, O., & BENLI, S. (2008). Experimental failure analysis of mechanically fastened joints with clearance in composite laminates under preload. *Materials & Design*, 29(6), 1159-1169. doi: 10.1016/j.matdes.2007.05.009
- STANDARD, A. (2011). *Standard test method for open-hole tensile strength of polymer matrix composite laminates D5766/D5766M*. ASTM International. doi: 10.1520/D5766_D5766M-11

- STANDARD, A. (2012). *Standard practice for filled-hole tension and compression testing of polymer matrix composite laminates D6742/D6742M*. ASTM International. doi: 10.1520/d6742_d6742m-12
- STANDARD, A. (2013). *Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates D5961/D5961M*. ASTM International. doi: 10.1520/d5961_d5961m-13
- STANDARD, A. (2014). *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. ASTM International. doi: 10.1520/d3039_d3039m-14
- STEWART, M. (1997). An experimental investigation of composite bonded and/or bolted repairs using single lap joint designs. doi: 10.2514/6.1997-1339
- THOPPUL, S. D., FINEGAN, J., & GIBSON, R. F. (2009). Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – A review. *Composites Science and Technology*, 69(3-4), 301-329. doi: 10.1016/j.compscitech.2008.09.037
- TURGEON, F. (2008). *Nouveau modèle adimensionnel pour l'étude des assemblages boulonnés précontraints soumis à un chargement externe*. (École Polytechnique de Montréal).
- VADEAN, A. (2012). *Vis, boulons, joints boulonnés*. Éléments de machine. Cours MEC 2310. École Polytechnique de Montréal.
- VANGRIMDE, B., & BOUKHILI, R. (2002). Bearing stiffness of glass fibre-reinforced polyester: influence of coupon geometry and laminate properties. *Composite Structures*, 58 57-73. doi: S0263-8223(02)00039-9

ANNEXE A – DIMENSIONS DES ÉCHANTILLONS TESTÉS ET MODÉLISÉS

Plaque avec trou et joint boulonné

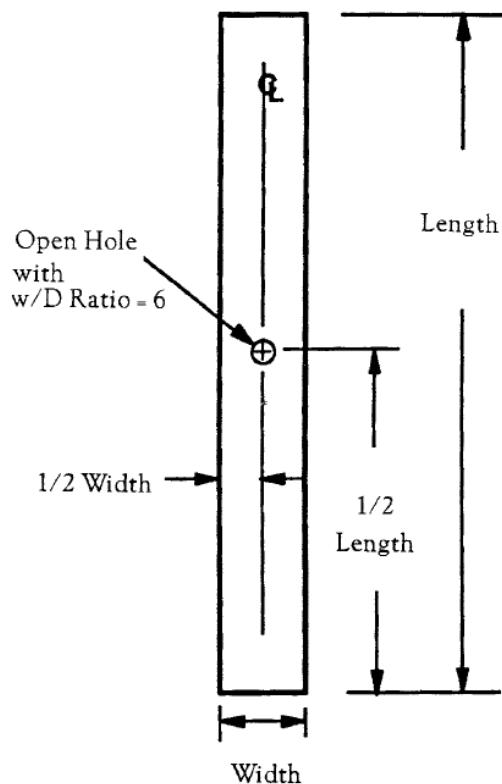


Tableau A-1 : Dimensions des plaques avec trou et trou boulonné (STANDARD, 2011, 2012)

Paramètre	Dimension (en mm)
L	200
w	36
D	6,35

Figure A-1 : Schéma des plaques avec trou et trou boulonné (STANDARD, 2011, 2012)

Plaque avec goupille

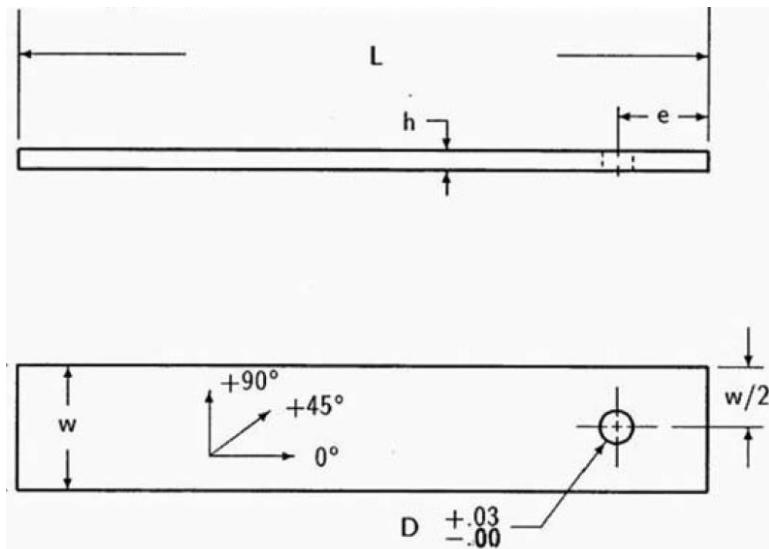


Figure A-2 : Schéma de la plaque pour le test de traction avec goupille (STANDARD, 2013)

Tableau A-2 : Dimensions de la plaque pour le test de traction avec goupille (STANDARD, 2013)

Paramètre	Dimension (en mm)
L	135
w	36
e	18
D	6,35
h	2,56

Joint à un boulon

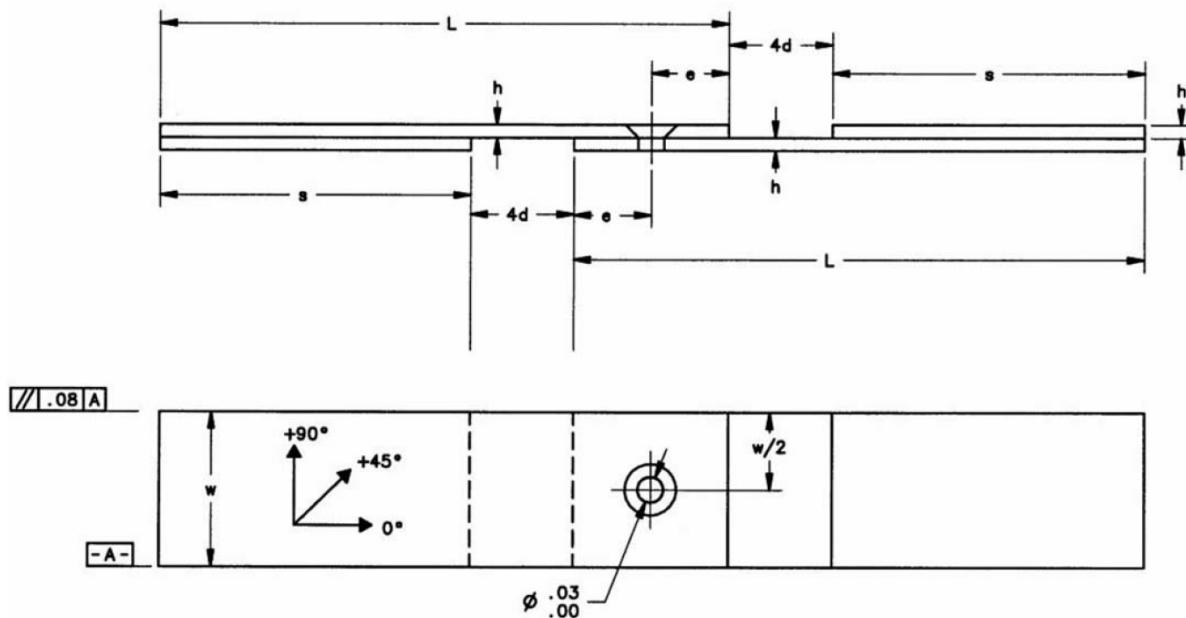


Figure A-3 : Schéma de la plaque pour le joint à un boulon (STANDARD, 2013)

Tableau A-3 : Dimensions de la plaque pour le joint à un boulon (STANDARD, 2013)

Paramètre	Dimension (en mm)
L	135
w	36
e	18
4d	24
s	75
Ø	6,35
h	2,56

Joint à deux boulons

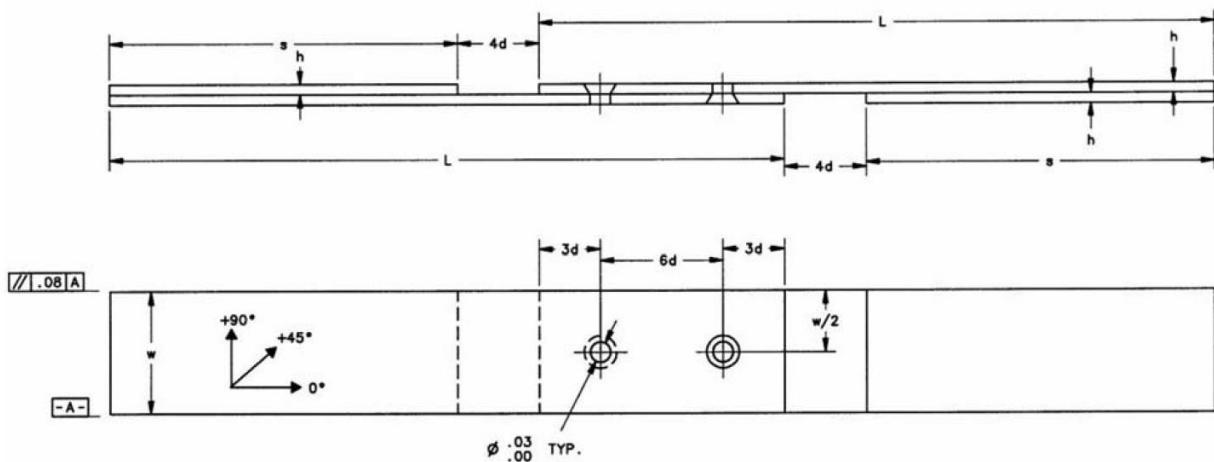


Figure A-4 : Schéma de la plaque pour le joint à deux boulons (STANDARD, 2013)

Tableau A-4 : Dimensions de la plaque pour le joint à deux boulons (STANDARD, 2013)

Paramètre	Dimension (en mm)
L	210
w	36
3d	18
4d	24
6d	36
s	114
Ø	6,35
h	2,56

Joint à trois boulons

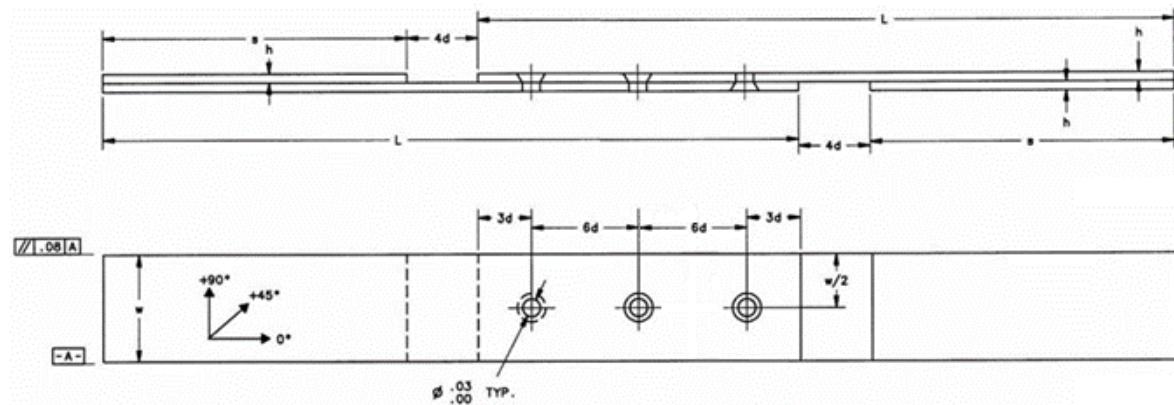


Figure A-5 : Schéma de la plaque pour le joint à deux boulons (adapté de STANDARD (2013))

Tableau A-6 : Dimensions de la plaque pour le joint à deux boulons (adapté de (STANDARD (2013)))

Paramètre	Dimension (en mm)
L	207
w	36
3d	18
4d	24
6d	36
s	75
\emptyset	6,35
h	2,56

ANNEXE B – MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

Maillage

Pour obtenir un maillage efficace, raffiné dans les zones de contact où se porte notre intérêt et plus grossier ailleurs, les pièces des assemblages sont découpées en volumes comme à la Figure B-1.

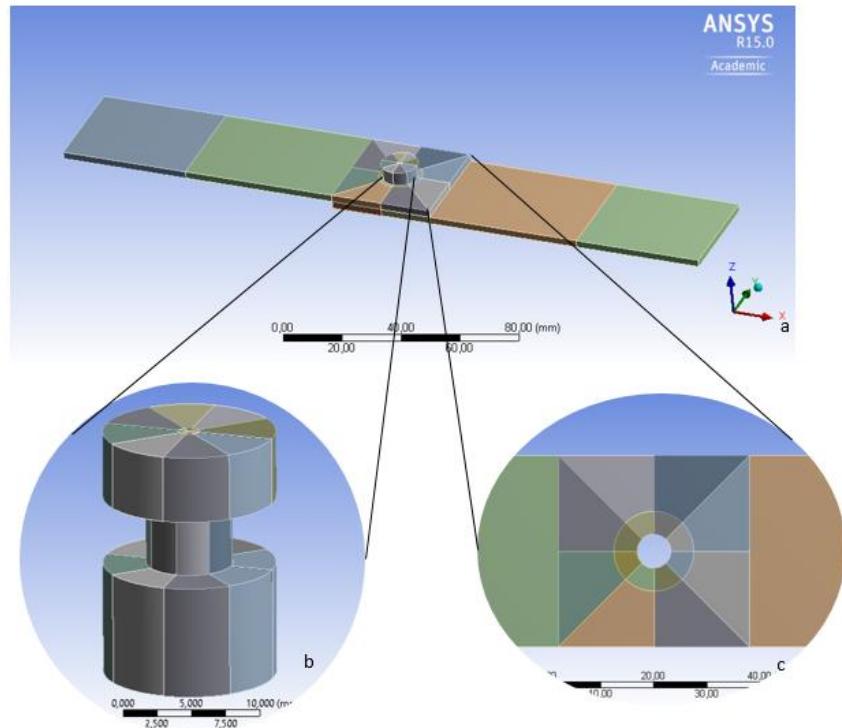


Figure B-1 : Géométrie du joint à un boulon modélisé et séparation pour le maillage : (a) Joint complet - (b) Boulon - (c) Zone de recouvrement

La zone de recouvrement pour les joints à deux et trois boulons est moins détaillée comme il est visible sur la Figure B-2 que celle présentée au Chapitre 4 pour le joint à un boulon.

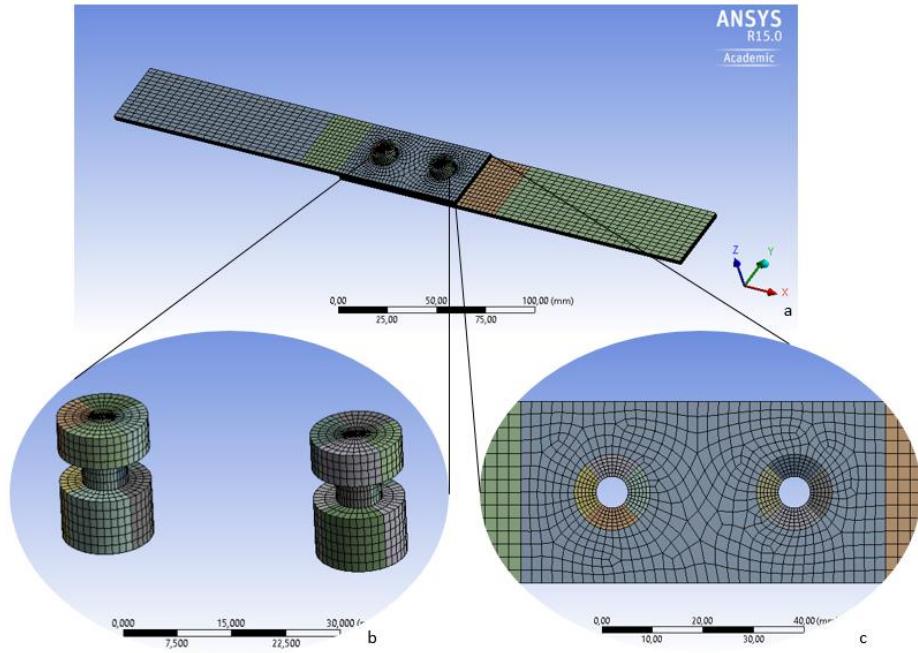


Figure B-2 : Maillage du joint à deux boulons : (a) Joint complet - (b) Boulon - (c) Zone de recouvrement

La même méthode est employée pour les modélisations des échantillons des tests de traction simple, avec trou ouvert (OH), trou boulonné (FH) et avec goupille (cf. Figure B-3).

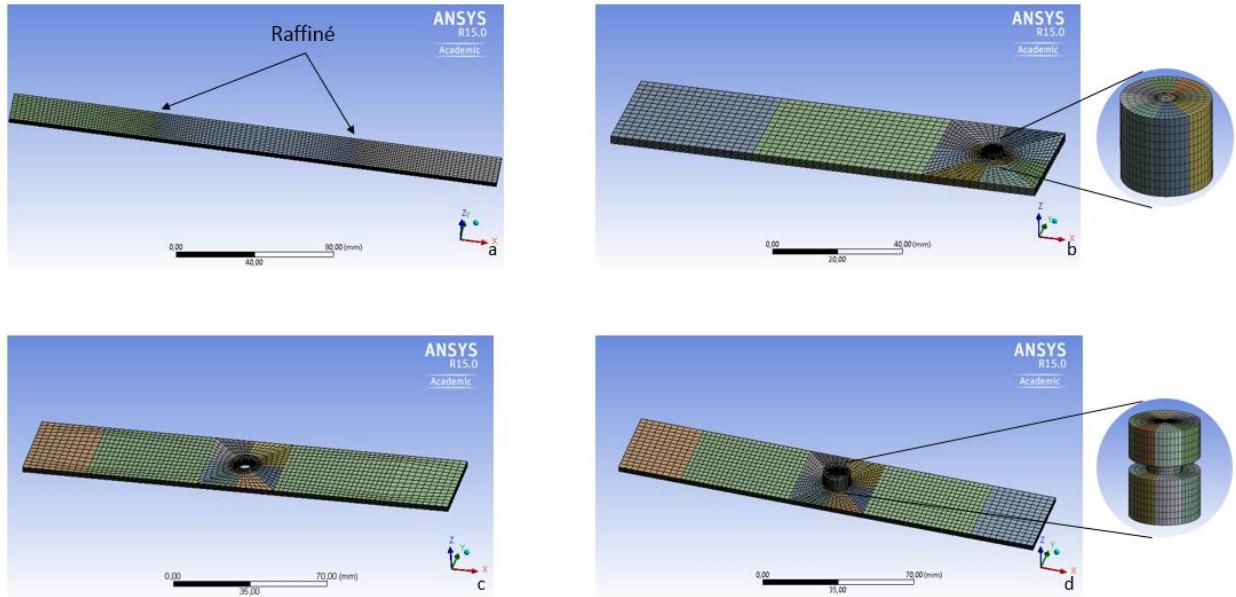


Figure B-3 : Maillage des différents échantillons : (a) Plaque simple - (b) Plaque avec goupille - (c) Plaque avec trou ouvert - (d) Plaque avec trou boulonné

Application de la précontrainte

Lorsque la précontrainte intervient dans le modèle, deux temps de calcul sont utilisés : un premier pour l'application de la précontrainte où aucune autre force ou déplacement n'entre en jeu (voir Figure B-4) ; un second temps pour l'application de la force en verrouillant la précontrainte installée.

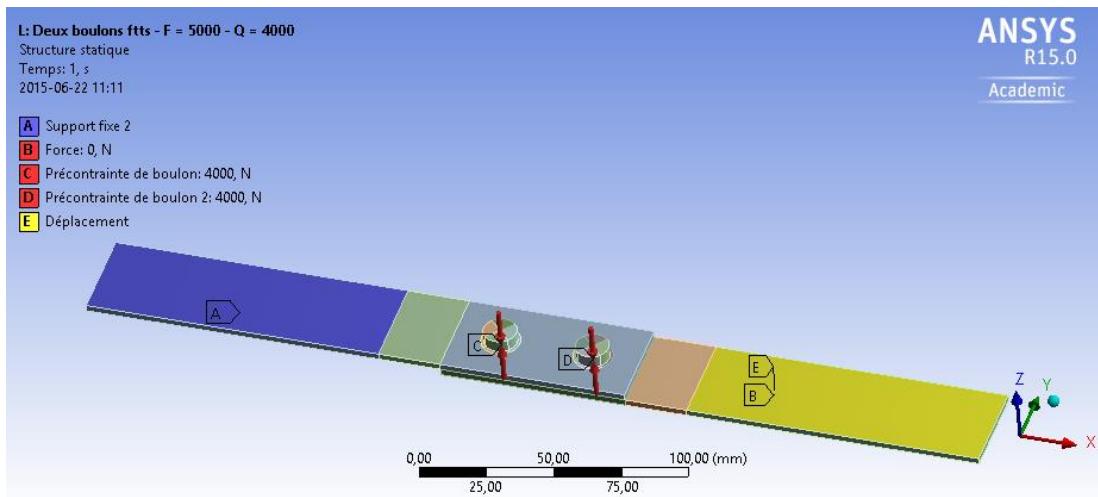


Figure B-4 : Conditions aux limites pour un joint à deux boulons avec précontrainte (temps 1)

Comme le boulon est séparé en plusieurs volumes afin de faciliter le maillage, l'application de la précontrainte doit se faire sur les volumes du centre qui représentent le fût du boulon. Pour cela, il est nécessaire de créer un repère local lié au boulon comme illustré à la Figure B-5.

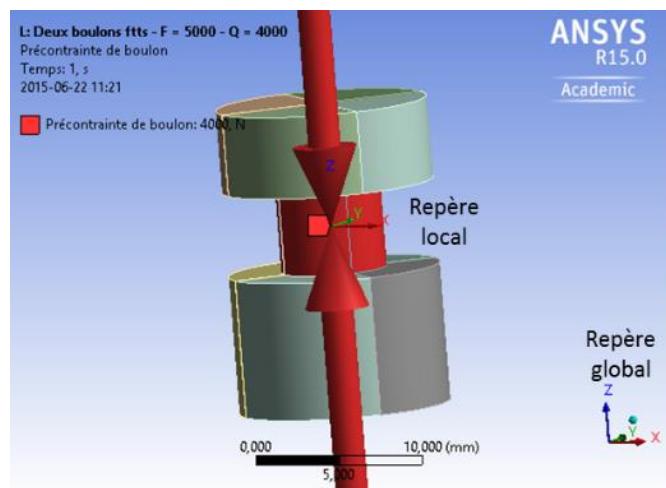


Figure B-5 : Application de la précontrainte sur un boulon dans son repère local

Options de contact

Pour que l'ensemble du modèle soit cohérent, il faut définir le contact entre les différents corps du modèle. L'algorithme de contact utilise un corps cible et un corps de contact. L'aide d'ANSYS préconise de définir la pièce la plus rigide comme corps cible et le corps maillé le plus finement comme corps de contact. Dans le cas de nos modèles, le maillage étant équivalent pour le fût du boulon et la zone autour du trou pour les plaques, le corps cible sera le boulon puisque c'est le plus rigide (acier vs. aluminium) ; il en sera de même pour le contact entre les extrémités du boulon et les plaques. En ce qui concerne le contact entre les deux plaques, la plaque supérieure a arbitrairement été choisie comme corps de contact. Dans le but d'avoir des résultats précis, l'algorithme de contact choisi est celui du Lagrangien augmenté. En revanche, pour ne pas allonger le temps de calcul, le comportement est réglé sur asymétrique : cette option permet de ne calculer les contacts que sur un corps, celui de contact.

La zone de contact entre le fût et le trou est séparée en deux parties afin de pouvoir facilement lire les forces de contact qui s'exercent à cet endroit grâce à des sondes : le premier contact concerne la plaque supérieure (Figure B-6 (a) et (b)) tandis que le second concerne la plaque inférieure (Figure B-6 (c) et (d)). Même si la surface du fût étant en contact avec les plaques n'est pas séparée en deux, le temps de calcul n'est pas augmenté de manière importante puisqu'une tolérance d'ajustement relativement faible ($1 \times 10^{-2} \text{ mm}$) est ajoutée. En effet, lorsque les corps cible et contact sont à une distance supérieure à la tolérance d'ajustement, le contact n'est plus pris en compte dans le calcul.

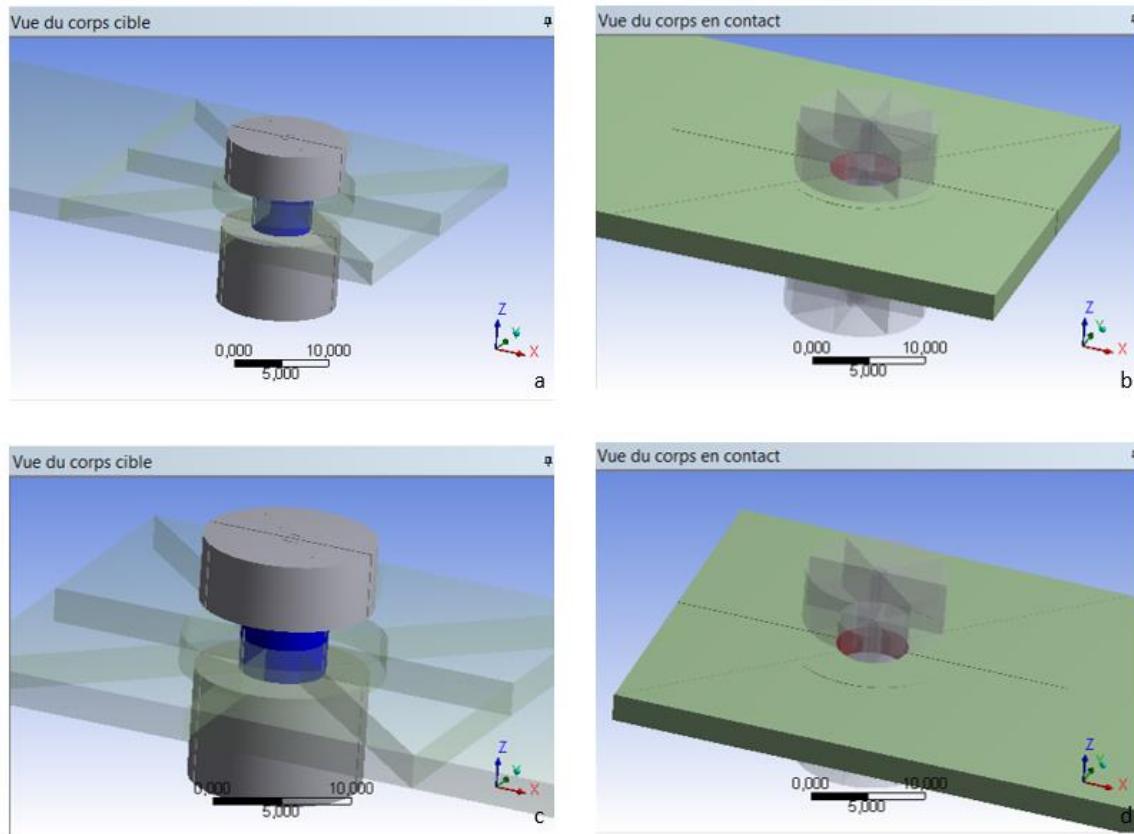


Figure B-6 : Détail du contact : Contact de la plaque supérieure (a) Corps cible (b) Corps de contact
- Contact de la plaque inférieure (c) Corps cible (d) Corps de contact