

RAPPORT DE PROJET

Influence des défauts géométriques sur le comportement des assemblages multi- matériaux

ÁLVARO BAUTISTA GÓMEZ

18/06/2013

ENCADRANTS:

BOIS Christophe, Maître de conférences et
professeur de l'IUT

LECOMTE Julie, Doctorante à l'I2M

PERRY Nicolas, Professeur d'ENSAM

ANNEE : 2013

N° du PJE : BO-C13009

CENTRE DE RATTACHEMENT PE : Arts et Métiers Paris Tech Bordeaux.

AUTEURS : Álvaro Bautista Gómez.

TITRE : Influence des défauts géométriques sur le comportement des assemblages multi-matériaux.

ENCADREMENT DU PE : Christophe Bois, Julie Lecomte ; I2M Bordeaux

ENTREPRISE PARTENAIRE : -

NOMBRE DE PAGES : 74

NOMBRE DE REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES : 11

RESUME : L'objectif de ce projet est d'évaluer l'impact de différents défauts géométriques sur le comportement mécanique des assemblages multi-matériau. Ce travail s'appuie sur des modèles analytiques et numériques qui seront confrontés à des essais sur de assemblages modèles présentant des défauts calibrés. Une étude sur l'influence du jeu dans les assemblages et sur la prise de contact est développé pour améliorer les résultats obtenus pendant la première partie du travail.

MOTS CLES : Assemblage boulonné, assemblage hybride, transfert de charge, composite, matage.

PARTIE A REMPLIR PAR LE PROFESSEUR RESPONSABLE DU PROJET

ACCESIBILITE DE CE RAPPORT (entourer la mention choisie) :

Classe 0 = accès libre

Clase 1 = Confidentiel jusqu'au _____

Classe 2 = Hautement confidentiel

Date :

Nom du signataire : Signature

Remerciements

Mon stage de fin d'études a été réalisé au sein du laboratoire de l'IUT appartenant à l'institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux l'I2M. Tout d'abord je souhaiterais exprimer ma gratitude aux personnes ayant m'aidé pendant les six mois de travail.

Je voulais témoigner toute ma gratitude à :

- Christophe BOIS, Maître de Conférences de l'Université de Bordeaux I : Je remercie l'opportunité qu'il m'a donné de pouvoir travailler et développer mon stage dans ce laboratoire. Merci pour les conseils, les explications, les remarques constructives, les connaissances et la motivation transmise pendant le six mois de stage.
- Julie Lecomte, doctorant à l'IUT : Je remercie pour sa proximité, ses conseils et corrections, pour l'aide prêtée pendant les six mois et sa capacité à motiver. Merci pour transmettre toujours de l'énergie et la bonne humeur, comme tu dis : « Avoir la patate » et « avoir la banane ».

À cause de la barrière de la langue que j'ai trouvée pendant le stage, je voudrais aussi remercier la patience et les efforts de Julie et Christophe à l'heure de m'expliquer les choses, de corriger mes rapports et de me comprendre.

Je remercie également l'ensemble des personnes du laboratoire de l'IUT pour leur gentillesse et les moments d'échange : les stagiaires, les thésards, les techniciens et tout le personnel qui travaille à l'IUT.

Je tiens aussi à remercier ma famille qui m'a supporté de l'Espagne. Ils m'ont offert ses conseils, ses avis, et ils m'ont encouragé en tout moment. Merci papa, maman, Gonzalo et Jaime.

Quisiera dedicar este proyecto a la memoria de mi reciente fallecido abuelo D. Manuel Bautista Romero, Ingeniero Industrial Mecánico, por haber sido un motor interno, un ejemplo a seguir y una motivación constante durante toda mi carrera. Porque durante muchos momentos de flaqueza, falta de fuerza de voluntad o cansancio un pensamiento en él bastaba para sacar esa energía extra de mí. Por ser uno de los que motivó en mí este gusto por la ingeniería, por haber compartido con él innumerables buenos momentos, por sus consejos, por su curiosidad y preocupación constante acerca de mis estudios, por su pasión por la mecánica y porque me hubiera encantado haberlo compartido con él, le dedico mi proyecto de fin de carrera.

SOMMAIRE

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 1- INTRODUCTION | Page 1 |
| 2- LES ASSEMBLAGES | Page 2 |
| 3- LE STAGE | |
| 3.1- INTÉRÊT DE L'ÉTUDE | Page 4 |
| 3.2- CONTEXTE DE L'ÉTUDE | Page 4 |
| 3.3- ÉTAT DE L'ART | Page 5 |
| 3.4- DÉFINITION ET MISSION DU STAGE | Page 8 |
| 4- INFLUENCE DES DÉFAUTS DE POSITIONNEMENT | Page 11 |
| 4.1- LE MODÈLE ANALYTIQUE | Page 12 |
| 4.2- LE MODÈLE NUMÉRIQUE | Page 13 |
| 4.3- LE MODÈLE EXPÉRIMENTAL | Page 20 |
| 4.4- OBTENTION ET TRAITEMENT DES RÉSULTATS | Page 21 |
| 4.5- ANALYSE DES RÉSULTATS | Page 22 |
| 5- ÉTUDE DU JEU : MODÈLE DE RÉPARTITION NON UNIFORME | Page 27 |
| 5.1- INTRODUCTION | Page 27 |
| 5.2- MODÈLE DE RÉPARTITION NON UNIFORME | Page 27 |
| 5.3- DESCRIPTION DES MODÈLES | Page 29 |
| 5.4- RÉSULTATS | Page 30 |
| 5.5- PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS | Page 34 |
| 6- ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES DÉFAUTS GÉOMÉTRIQUES SUR LES ASSEMBLAGES MULTI-MATÉRIAU | |
| 6.1- INTRODUCTION | Page 40 |
| 6.2- TYPES DE DÉFAUTS | Page 40 |
| 6.3- MODÉLISATION | Page 41 |
| 6.4- ANALYSE DES RÉSULTATS | Page 42 |
| 6.5- CONCLUSION | Page 44 |

| | |
|------------------------|---------|
| 7- CONCLUSION DU STAGE | Page 45 |
| 8- ANNEXES | |
| 7.1- ANNEXE 1 | Page 46 |
| 7.2- ANNEXE 2 | Page 48 |
| 9- BIBLIOGRAPHIE | Page 52 |

1- INTRODUCTION

La construction de n'importe quel type de système aéronautique est possible grâce à l'assemblage de différentes parties. Elle représente l'intégration des technologies et des méthodologies les plus avancées et les plus exigeantes. Dans ce contexte, les fixations dans un système aéronautique jouent un rôle très important puisque la certification de tous les composants, des processus et des conceptions dans l'aéronautique impose des exigences techniques très élevées et des tolérances très serrées. Cela représente une élévation des coûts considérable. De plus, la réalisation des liaisons et des assemblages des pièces demeure un problème technologique du point de vue de la mise en œuvre et de la tenue mécanique en service.

Pour avoir quelques ordres de grandeur, dans un avion on peut trouver autour de 3.000.000 de « fixations » comme dans l'A380, dont environ 75% de rivets et 25% de boulons. Cela représente autour de 50% du coût total de conception et de fabrication. De plus, la nécessité imposée par la certification d'atteindre des tolérances et des mesures très précises augmente considérablement les coûts. On peut voir alors, l'importance de l'étude des assemblages dans l'aéronautique.

Etant donné que les fixations multiplient les zones de concentration de contraintes dans la structure, la conception de l'assemblage peut avoir une grande influence sur l'intégrité structurelle et la tenue mécanique. Beaucoup de paramètres influent sur le comportement de l'assemblage et sur la distribution des charges dans la structure. On peut dissocier les paramètres de conception et d'industrialisation. Les paramètres de conception sont les paramètres géométriques et les tolérances qu'on choisit au moment de la conception afin d'obtenir des propriétés particulières de l'assemblage, notamment un certain mode de rupture. On peut définir par exemple les diamètres des alésages, les épaisseurs des substrats ou encore l'espacement entre les trous. Le choix des outillages et de la gamme de montage sont, eux, des exemples de paramètres d'industrialisation. Le bon comportement mécanique, statique et en fatigue des assemblages est fondamental pour la sécurité et pour éviter l'endommagement de la structure.

2- LES ASSEMBLAGES

L'importance des assemblages dans n'importe quel type de système mécanique est indubitable. Dans l'aéronautique et aussi dans d'autres domaines d'activités on peut trouver des assemblages mécaniques et d'autres types d'assemblages.

- Assemblages mécaniques : ces assemblages sont principalement représentés par le rivetage et le boulonnage. On considère un boulon comme l'ensemble d'une vis et d'un écrou. L'utilisation des boulons pour fixer l'assemblage est plus courante quand il y a besoin de désassembler les deux parties ou quand les pièces à assembler sont épaisses. Par contre, le rivetage [7] s'utilise pour des assemblages non démontables puisqu'une fois qu'on pose un rivet, la seule façon de désassembler est de détruire le rivet.



Figure 2.1. Exemple d'assemblage mécanique

Quelques recommandations relatives au rivetage sont de ne pas frapper les rivets à cause de la mauvaise tenue aux chocs des composites, de prendre garde au risque de déboutonnage des têtes de rivets du fait des possibles faibles résistances hors plan des composites, et d'assurer la compatibilité galvanique du rivet avec les stratifiés à assembler.

- Autres assemblages : Tous les autres types d'assemblages qui ne sont pas du boulonnage ou du rivetage sont considérés dans ce groupe. On peut citer quelques exemples tels que le soudage, le collage, le clinchage, le fretage, le brasage, le goupillage ou l'agrafage. On peut trouver certains de ces assemblages dans l'aéronautique, mais ils n'ont pas de fonction structurale. Par contre, l'ajout de colle dans les assemblages mécaniques est utilisé de manière très courante pour augmenter la résistance de l'assemblage. Le collage [7] consiste en une adhésion par attraction moléculaire entre deux parties à coller. Il s'utilise pour renforcer les assemblages avec rivets ou boulons et pour permettre de gagner de l'ordre de 20 à 30% de résistance mécanique. Quelques avantages du collage sont la diminution des concentrations de contraintes, la légèreté de l'assemblage, et les propriétés d'isolation et d'étanchéité. Certaines études récentes (Bois et al. [1]) ont démontré un meilleur comportement des assemblages hybrides boulonnés collés en utilisant la colle comme élément structural. Une efficacité plus élevée a été démontrée.

Les assemblages qui seront étudiés lors de ce stage sont les assemblages mécaniques, qui sont les plus nombreux dans l'industrie aéronautique pour les assemblages structuraux. Les assemblages mécaniques sont utilisés dans plusieurs configurations : simple ou double recouvrement, métal-métal, métal-composite et composite-composite.

- Selon les matériaux impliqués : Dans l'aéronautique il y a une utilisation croissante des matériaux composites pour leurs propriétés mécaniques et leur légèreté. L'utilisation de matériaux métalliques (alliages d'aluminium, d'acier et de titane) demeure également très répandue. Cela rend donc nécessaire le développement de technologies d'assemblage composite-composite, ou composite-métal. Les structures multi-matériaux ou hybrides sont constituées d'assemblages complexes et variés plus difficiles à analyser. Il est nécessaire de préciser le sens du terme « assemblage hybride » puisque dans la littérature ce terme désigne différentes notions. Une par rapport aux matériaux utilisés, c'est-à-dire, le concept d'hybridité comme structures multi-matériaux. En parlant de structures multi-matériaux on veut dire, l'assemblage de deux pièces de matériaux différents, comme l'assemblage d'une pièce métallique et d'une pièce composite. L'autre définition d'assemblage hybride qu'on peut trouver concerne les technologies d'assemblage comme le boulonnage-collage ou le rivetage-collage.
- Simple ou double recouvrement : On peut décrire un assemblage simple comme l'union de deux plaques fixées par un ou plusieurs boulons, rivets ou colle. Par contre, dans un assemblage double recouvrement on trouve deux plaques extérieures qui confinent une troisième et toutes fixées par boulons, rivets ou colle. On verra les différences entre les unes et les autres au moment de les analyser. La configuration la plus courante dans l'aéronautique est le simple recouvrement.

Dans les images ci-dessous on peut voir quelques exemples d'assemblages utilisés dans la fabrication des avions: doubles et simples recouvrement, boulonnés, rivetés, métal-métal, etc.

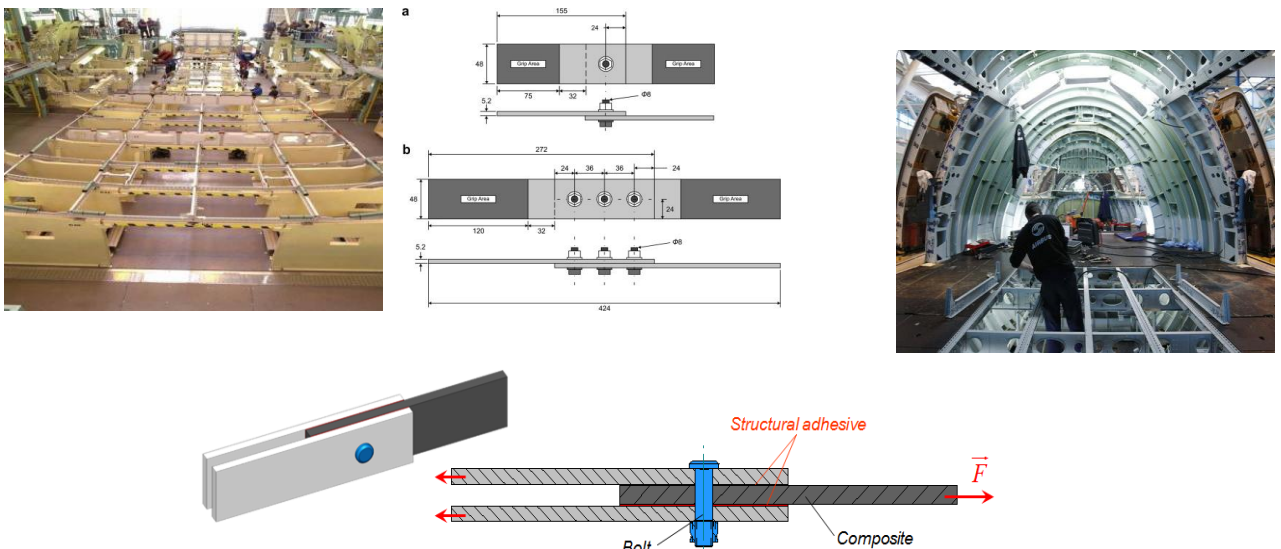


Figure 2.3. Exemples d'assemblages

3- LE STAGE

3.1- INTÉRÊT DE L'ÉTUDE

L'état de l'art des structures aéronautiques montre que les différentes parties sont conçues, fabriquées puis assemblées avec des fixations mécaniques ou du collage. Même si les boulons et rivets peuvent apparaître comme des composants simples, ils ont une grande importance en termes de sécurité et de coût. Etant donné que des millions de rivets et boulons sont utilisés dans l'aéronautique, leur conception demande une attention particulière.

Dans les structures aéronautiques, les assemblages boulonnés et rivetés représentent des zones de concentration de contraintes qui peuvent limiter l'intégrité structurelle et la capacité de l'ensemble à supporter la charge mais également augmenter la masse des ensembles.

Le nombre élevé de fixations présentes dans une structure aéronautique engendre une augmentation de la masse très importante à cause des éléments de fixation et des surépaisseurs pour renforcer les zones d'assemblage et aussi des coûts de développement et de mise en œuvre.

L'objectif de ce stage est d'analyser l'influence des défauts géométriques sur le comportement des assemblages multi-matériaux, c'est-à-dire, l'influence qu'ils ont sur la tenue mécanique. Il est bien connu que la précision, indispensable dans le domaine aéronautique, est très coûteuse. Par conséquent, si on peut permettre des tolérances moins serrées, sans influencer sur le bon comportement de l'assemblage, on engendrera une réduction des coûts.

3.2- CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Une thèse est en cours depuis un an sur la conception et le dimensionnement des assemblages multi-matériaux (« Etude du comportement des assemblages hybrides métal-composite. Application à la conception des structures multi-matériaux. »). L'un des objectifs de cette thèse est de répondre à la question posée dans le dernier point.

Le sujet de mon stage s'inscrit dans cette thèse qui est réalisé à l'institut de recherche I2M en partenariat avec une entreprise du secteur aéronautique, ASTF.

L'I2M « Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux » a été créé par la fusion de quatre laboratoires et deux équipes issues des laboratoires GHYMAC et US2B localisés sur le campus bordelais. Aujourd'hui l'I2M est constitué des six départements. Le stage est réalisé dans le département IMC « Ingénierie, Mécanique et Conception ». Le département IMC se place dans le domaine de la conception robuste des produits mécaniques dans une logique d'ingénierie, avec une valeur ajoutée sur la compréhension et l'intégration des phénomènes physiques mis en jeu. Le département a pour objectif scientifique de proposer des analyses, des modèles, des méthodes et des outils permettant d'optimiser, dans une vision de conception robuste, le processus global d'industrialisation de produits, de l'expression du besoin jusqu'à la fin de vie,

en prenant en compte tous les stades intermédiaires de mise en œuvre des matériaux, d'assemblage, de maintenance, de retour d'expérience, de désassemblage et de recyclage.

ASTF est une entreprise du secteur aéronautique qui travaille également dans d'autres domaines d'activités. ASTF conçoit, développe, industrialise et fabrique des sous-ensembles mécaniques complexes par la mise en forme et l'assemblage de tubes et tôles fines pour les industries aéronautique, spatiale, de la défense, de la sécurité et de l'énergie. Elle a bâti sa réputation autour de la réalisation d'assemblages sophistiqués utilisant l'aluminium, l'acier inoxydable et le titane.

Dans le domaine des assemblages, ASTF veut ouvrir un nouveau champ de travail et de recherche. Avec cette intention l'entreprise investit pour développer ses connaissances sur les assemblages multi-matériaux et plus largement sur les matériaux composites. C'est la raison qui a motivé la mise en place de cette thèse, que Mlle Lecomte est en train de réaliser depuis un an.

Le thème du stage est l'influence des défauts géométriques sur le comportement des assemblages multi-matériaux. On entend par défaut géométrique les défauts de positionnement, d'orientation, de forme ou dimensionnels.

L'étude va se concentrer sur les défauts géométriques dans les assemblages boulonnés double recouvrement métal-composite.

La complexité de ces études est la raison pour laquelle jusqu'à aujourd'hui il n'y a pas beaucoup de bibliographie sur l'influence des défauts dans les assemblages boulonnés de matériaux composites.

3.3- ÉTAT DE L'ART

L'objectif principal d'un assemblage est de fixer deux éléments en apportant la résistance mécanique suffisante de manière à ce qu'elle puisse supporter le chargement statique et cyclique sans se rompre. Les principaux modes de rupture dans les assemblages mécaniques sont : la rupture en nette-section, la rupture en cisaillement, la rupture par arrachement, la rupture en clivage, la dégradation en matage et la rupture de la fixation.

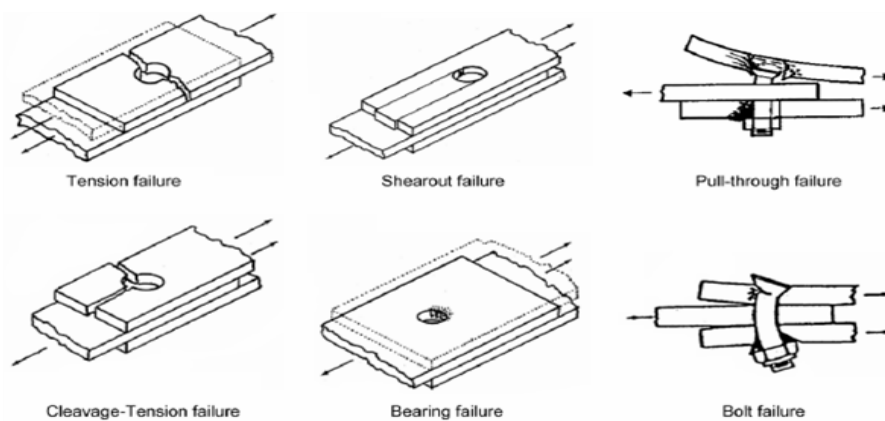


Figure 3.3.1. Modes de rupture des assemblages mécaniques

Le fait d'avoir un défaut géométrique, de positionnement etc., influe sur le comportement de l'assemblage et peut rendre aléatoire la réponse de la structure.

Très peu d'études sont publiées sur la relation entre variabilités géométriques et variabilités du comportement mécanique des structures assemblées. Ceci peut s'expliquer par le fait que ce type d'étude nécessite un grand nombre de compétences tel que la métrologie, la topographie des surfaces et de leurs défauts, le comportement non-linéaire des matériaux et des interfaces et le calcul de structure.

Les principaux auteurs qui ont traité la problématique des défauts géométriques sur les assemblages sont McCarthy et Lawlor [2]–[6]. Ils ont travaillé plus particulièrement sur l'influence du jeu sur le comportement mécanique des assemblages boulonnés simple ou double recouvrement de matériaux composites. Ces travaux sont basés sur des modélisations par éléments finis et des essais mécaniques.

McCarthy [2][3] propose une étude sur le rôle du jeu dans les assemblages simples recouvrement mono boulon. Étant donné que dans ce type d'assemblages les contraintes et déformations varient de manière tridimensionnelle à cause de la flexion et de l'inclinaison du boulon, de la pré-charge et de la flexion de la section de la plaque, il a fait une analyse tridimensionnelle de la fixation. Il a choisi différentes valeurs de jeu, dont certaines en dehors des tolérances préconisées en aéronautiques. Il a comparé les résultats des essais expérimentaux avec les résultats obtenus par des simulations par éléments finis, et après quelques corrections du maillage et de conditions de contact, il est arrivé à des résultats en bon accord. Les principales conclusions qu'il en a tirées sont :

- Il a trouvé une flexion tridimensionnelle des plaques La flexion est provoquée par l'excentricité de la charge par rapport au plan médian de l'assemblage.
- Dans les assemblages simple recouvrement, la distribution des contraintes n'est pas uniforme à travers de l'épaisseur.
- Plus grand est le jeu, plus grande est la rotation du boulon et plus petite est la surface de contact entre le trou et le boulon. Cela produit une diminution de la raideur globale de l'assemblage.
- Il a observé un dommage de la matrice dans l'interface et derrière le trou. La raison est l'existence des tensions radiales de compression dans la partie frontale du trou et tensions de compression tangentielle derrière.

Plus tard, Lawlor [4] a publié une étude sur les effets du jeu dans les assemblages boulonnés mais dans ce cas là, il a considéré un assemblage double recouvrement, avec trois boulons, différents types de combinaisons du jeu et il a aussi étudié le comportement en fatigue. L'avantage des assemblages double recouvrement est la symétrie qui permet d'éliminer l'excentricité de la charge. Ainsi, dans cette configuration les déplacements sont constants au travers de l'épaisseur. Les résultats observés sont :

- La distribution des charges entre les boulons est altérée à cause du jeu.
- Le jeu a un effet plus important sur la charge d'initiation de l'endommagement que sur la charge à rupture. En effet, la charge d'initiation du matage peut être réduite de 25% dans les trous qui présentent du jeu.

- Sous un chargement en fatigue, les assemblages qui ont au moins un trou avec du jeu, ont une durée de vie plus courte que les assemblages qui ne possèdent pas de jeu.
- Sous chargement en fatigue, l'effet du jeu le plus important se trouve dans l'initiation de la défaillance, l'effet sur la défaillance ultime est plus petit.

Des études ultérieures de McCarthy sur les assemblages double recouvrement ont confirmé certaines de ces affirmations et ont permis d'avancer sur ce sujet.

McCarthy et al. [5] ont étudié la distribution de charge sur les différents boulons de l'assemblage et la localisation de la fixation qui est significativement plus chargée. Il a obtenu des résultats sur l'influence du jeu dans la progression du dommage, et ce grâce à un modèle d'endommagement progressif implémenté dans le code éléments finis ABAQUS.

Il a mis en évidence que l'endommagement en matage génère une diminution de la charge dans le boulon qui produit un transfert de charge aux autres boulons. Il a confirmé que le jeu a un effet très important sur la charge à laquelle le premier endommagement significatif apparaît. Il a également étudié l'effet de la stratification du composite. Par exemple, une fois que la dégradation en matage se produit, les différentes dégradations de chaque pli ne permettent pas une mesure précise des déplacements. Les déplacements globaux mesurés ne sont donc pas représentatifs de l'état des déplacements réels.

Par ailleurs, McCarthy et Gray[6] ont publié une étude sur la prédiction de la distribution de charge dans les assemblages multi-boulonnés simple recouvrement en tenant en compte de l'influence du couple de serrage du boulon. Pour simuler ce comportement ils ont créé un modèle uni-axial où les substrats et les boulons sont représentés par des ressorts. Les auteurs ont conclu que les assemblages composites avec un couple de serrage élevé sont plus résistants. La raison est que le matage commence à partir d'un niveau de charge élevé dans les assemblages avec un couple de serrage important, puisqu'un pourcentage élevé de la charge est utilisé pour vaincre les forces de frottement dans le plan de cisaillement. Cela produit une diminution de la charge de matage agissant sur le trou. Dans le cas où le couple est presque nul, les forces de frottement sont négligeables, et le boulon supporte toute la charge appliquée à l'assemblage.

Par ailleurs, dans la bibliographie on peut trouver des études où un adhésif complète la charge transmise par les fixations. C'est le cas de Bois et al. [1], qui propose de faire une étude sur les assemblages hybrides boulonnés-collés. Pour ce type d'assemblage, la charge est transmise à travers la colle et le boulon et cela permet de réduire le nombre de boulons nécessaires et d'améliorer l'efficacité de l'assemblage. La difficulté de cette étude réside dans l'évaluation de la contribution des deux mécanismes parallèles de transfert de charge (le joint de colle et le boulon), et à calculer la sollicitation correspondante à chaque mode de défaillance. Pour cela, Bois et al. introduisent un comportement élasto-plastique pour la colle, et un comportement bilinéaire pour le boulon afin de représenter correctement les comportements non-linéaires. Les modes de défaillances attendus sont : la dégradation par matage, la rupture de la nette section au droit du boulon, la fissuration de l'adhésif. Le modèle analytique proposé par Bois et al. donne des résultats très proches de ceux obtenus par éléments finis (ABAQUS) ou ceux obtenus expérimentalement. Mais par contre, le modèle analytique a l'avantage d'une grande efficacité en termes de temps de calcul.

On a constaté qu'un certain nombre d'études sur les assemblages ont été réalisées : études expérimentales, analytiques, et par éléments finis. Les travaux montrent que la complexité de l'analyse des assemblages composites ou multi-matériaux provient du grand nombre de paramètres qui influent sur les transferts de charges et par conséquent le comportement mécanique et les modes de rupture.

On peut conclure qu'aucune étude scientifique n'a été publiée sur l'influence des défauts de position, d'orientation, de forme des alésages qui reçoivent les fixations. Pourtant, les bureaux d'étude exigent des tolérances assez faibles sur ces défauts ce qui engendre des gammes de fabrication complexes (montage de positionnement complexe, contre perçage, comblage de jeu, reprise d'usinage en cours d'assemblage, appairage ...). Les tolérances exigées ne sont pas issues d'analyses fines mais le plus souvent d'une simple transposition de règles métier issues de l'assemblage des pièces métalliques.

3.4- DÉFINITION ET MISSION DU STAGE

Après avoir défini le contexte du stage et présenté l'état de l'art, je vais expliquer ma mission et mes objectifs pendant les 22 semaines du stage.

Le thème du sujet est l'influence des défauts géométriques sur le comportement des assemblages multi-matériaux. Tout d'abord nous allons détailler les caractéristiques de notre assemblage : type d'assemblage, matériaux, défauts, etc.

- Type d'assemblage : on va étudier un assemblage double recouvrement, c'est-à-dire, une plaque intérieure entourée par deux autres. Même si la configuration la plus utilisée dans l'aéronautique est le simple recouvrement, principalement parce que c'est la plus légère et facile à mettre en œuvre, l'analyse de ce type d'assemblage est le plus difficile parce qu'il y a une excentricité de la force par rapport au plan médian qui produit une rotation et une flexion plus importante du boulon et des déplacements hors plan.

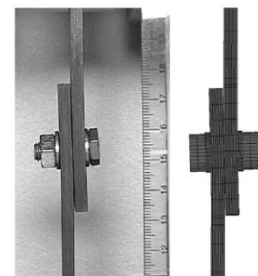


Figure 3.4.1. Assemblage simple recouvrement

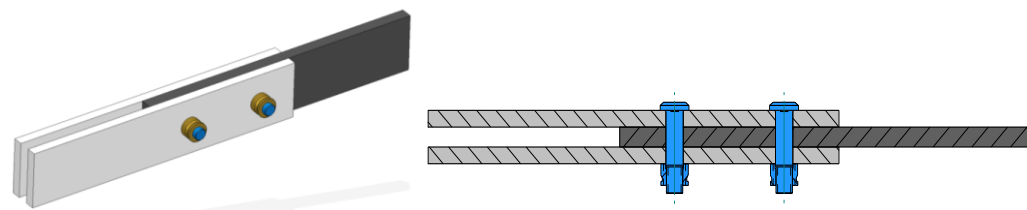


Figure 3.4.2. Assemblage double recouvrement

- Matériaux : On va étudier un assemblage hybride, c'est-à-dire multi-matériaux. Le matériau composite est constitué de fibres de carbone et d'une matrice d'époxyde. Les plaques extérieures sont réalisées en alliage d'aluminium. Ces deux types de matériaux sont très utilisés dans l'aéronautique.
- Éléments de fixation : Les assemblages comporteront un ou deux boulons. On n'utilisera pas de rondelle dans notre cas car les écrous comportent une rondelle intégrée. Les boulons sont en titane.
- Défauts à étudier : Il y a une grande gamme de défaut à étudier dans un assemblage de ce type. Tout d'abord, on étudiera l'influence de deux types de défauts : le jeu entre le boulon et le trou et un décalage entre les trous de la plaque composite et de la plaque métallique (défaut de positionnement). Ensuite, on étudiera les défauts d'orientation (perpendicularité de l'axe de l'alésage par rapport au plan de contact), les défauts de forme (alésage en tonneau, en diabololo, en banane, de section elliptique ...). La plage de défaut dépassera volontairement les tolérances imposées classiquement dans l'aéronautique pour regarder si ce dépassement de tolérance est critique pour l'assemblage.

Une fois que les caractéristiques de l'assemblage ont été définies, je vais détailler les trois parties du stage et les objectifs associés.

- 1- Étude des défauts de position et du jeu : Dans la première partie du stage, l'objectif était de faire une étude du défaut de position et du jeu dans les assemblages boulonnés métal-composite pour les comparer ensuite avec des résultats d'essais et ceux d'un modèle analytique. On peut faire une décomposition en deux tâches à réaliser :
 - L'analyse par éléments finis des défauts de position et du jeu dans l'assemblage. Le logiciel choisi pour faire les calculs est ABAQUS. Les défauts seront toujours introduits dans la plaque composite. L'objectif est d'obtenir des résultats cohérents et d'analyser le comportement de l'assemblage en fonction de ces défauts.
 - La deuxième tâche sera de comparer les résultats obtenus dans la simulation par éléments finis avec ceux d'un modèle analytique (programmé sur Matlab) et ceux des essais expérimentaux. Si les résultats sont cohérents, on pourra valider l'étude. Sinon, des modifications seront nécessaires. L'objectif est de valider le modèle analytique car celui-ci est capable de prédire le comportement des assemblages multi-boulons avec jeu et défaut de position avec un temps de calcul très faible.
- 2- Modèle analytique du contact fixation substrat : À cause de certains écarts trouvés durant l'analyse des résultats entre le modèle éléments finis et le modèle analytique, nous avons ajouté une deuxième partie à l'étude. En effet, la prise en compte du jeu et de la prise de contact dans le modèle analytique s'est avérée incorrecte. Nous avons donc fait une étude spécifique sur ce point. On a développé un modèle pour modéliser analytiquement le jeu et la prise de contact boulon trou que nous avons validé à nouveau grâce à un modèle numérique sur Abaqus. L'objectif est d'obtenir le jeu dit

« effectif » que l'on pourra introduire dans le modèle analytique quel que soit le niveau de jeu sans faire de calcul éléments finis.

- 3- Étude numérique des défauts de forme et d'orientation : Dans la troisième partie du stage, l'objectif est de faire une étude purement numérique des défauts de forme et d'orientation de perçage. Dans les images suivantes on peut voir les différents types de défauts de forme et d'orientation à analyser.

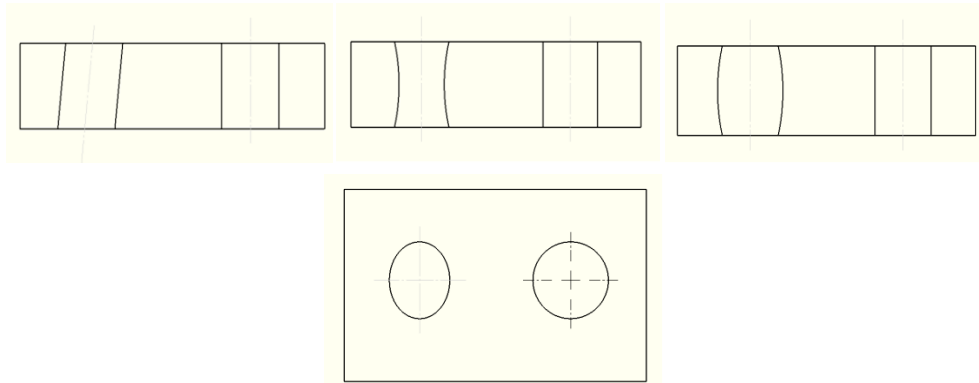


Figure 3.4.3. Défauts géométriques

Démarche suivi pour arriver à atteindre les objectifs :

- 1- Recherche bibliographique de l'état de l'art pour bien comprendre la problématique.
- 2- Familiarisation avec le lieu et l'équipe de travail.
- 3- Familiarisation avec le logiciel ABAQUS : premiers designs, utilisation des outils d'ABAQUS, maillage, analyses simples, extraction et traitement automatisé des résultats, etc.
- 4- Maîtrise du logiciel : introduction de la géométrie, des défauts, des conditions limites et de contact, du chargement, etc.
- 5- Compréhension et interprétation des résultats obtenus : apprendre à interpréter les résultats après l'analyse pour savoir si un maillage plus fin est nécessaire, si une redéfinition de la géométrie est nécessaire ou si au contraire, les résultats peuvent être comparés aux résultats expérimentaux et analytiques.
- 6- Comparaison des résultats : analyser la concordance des résultats entre les deux modèles et valider l'approche.
- 7- Introduction des défauts géométriques : création et vérification du modèle, lancement des calculs avec différents configurations, interprétation et analyse des résultats. Étude du jeu : recherche bibliographique sur l'influence du jeu dans les assemblages, modélisation mathématique du jeu et du comportement du contact trou-boulon, modélisation numérique, lancement des simulations, analyse et traitement des résultats, rédaction des conclusions et perspectives.

4- INFLUENCE DES DÉFAUTS DE POSITIONNEMENT

L'objectif de la première partie du stage est de valider un modèle analytique grâce à la comparaison de résultats des modèles analytique, numérique et expérimental. Ce modèle va prédire le comportement de l'assemblage quand on introduit un défaut de positionnement et un niveau de jeu donné.

Dans le cadre de sa thèse, Julie Lecomte doit créer un modèle numérique sur ABAQUS, un modèle analytique sur MATLAB et un modèle expérimental pour pouvoir étudier le comportement des assemblages multi-matériaux quand un défaut géométrique est présent.

Pour pouvoir étudier les assemblages il est nécessaire de construire une éprouvette qui simule le comportement de la structure. La même configuration (double recouvrement avec 2 boulons) sera utilisée pour les essais expérimentaux, pour la modélisation numérique par éléments finis, et pour la modélisation analytique. La figure 4.1 montre un exemple d'éprouvette utilisée.

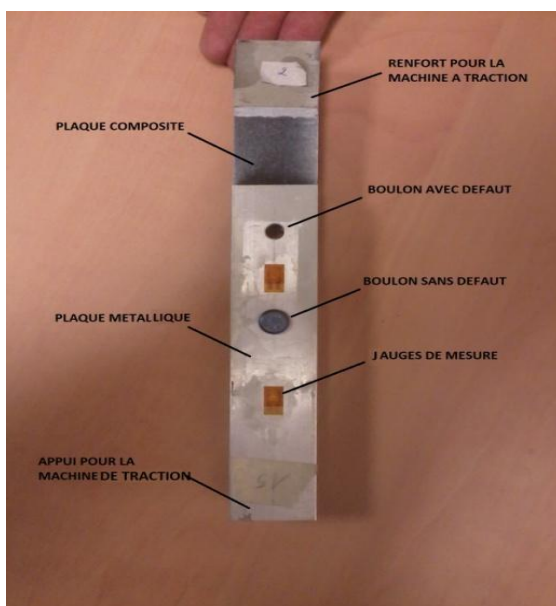


Figure 4.1. Exemple d'éprouvette

Dans l'image à gauche on peut voir les plaques métalliques, la plaque de composite et un des 2 boulons inséré dans les plaques. En haut de l'image on peut voir un talon rajouté à la plaque de composite pour éviter la dégradation que peuvent provoquer les mors pendant l'essai. Il est intéressant de remarquer la présence de deux jauges de déformation qui permettront d'analyser les résultats des essais. Sur la figure 4.2, le second boulon n'est pas encore monté car à cause du défaut il faut tirer sur l'éprouvette avant de l'insérer. on peut voir le défaut de positionnement introduit dans cette éprouvette.



Figure 4.2. Défaut de positionnement

4.1- LE MODÈLE ANALYTIQUE

Le modèle analytique proposé et développé par J. Lecomte [8] est un modèle unidimensionnel qui permet d'obtenir l'évolution de la distribution de charges entre les boulons par rapport à la charge total appliquée ainsi que l'état de precharge qui se produit après montage des boulons en raison du défaut. De plus, ce modèle introduit une loi de comportement qui représente la dégradation du matériau composite par matage.

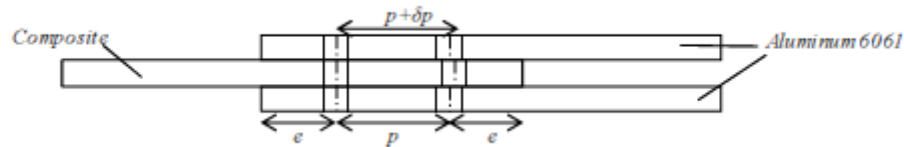


Figure 4.1.1. DimensionS de l'assemblage métal-composite double recouvrement avec défaut

La figure 4.1.1 montre la géométrie de l'assemblage double recouvrement qui est composé d'une plaque composite et de deux plaques d'aluminium. Dans l'image on peut voir le désalignement d'un des trous de la plaque composite à cause de l'introduction du défaut de positionnement δp .

Cette géométrie est modélisée comment un système de ressorts représentant la déformation des substrats et des boulons sous l'effet du montage et de la charge F appliquée. La modélisation ne prend en compte que la moitié de l'ensemble puisque l'on a une symétrie. L'image 4.1.2 présente le système de ressorts ainsi obtenu.

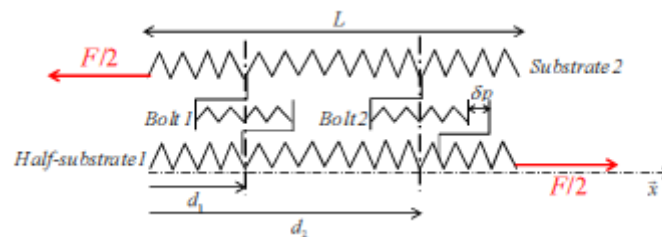


Figure 4.1.2. Schéma de principe du modèle analytique

Le modèle analytique repose sur certaines hypothèses. Les efforts de frottement entre les substrats sont négligés puisque le serrage n'est pas modélisé. Le comportement de chaque boulon est représenté sur la figure 4.1.2.. Le jeu est intégré dans le comportement du boulon mais la prise de contact est instantanée. La dégradation par matage est représentée par une loi bilinéaire identifiée sur un essai en configuration double recouvrement avec un seul boulon.

Les équations qui modélisent le système sont rassemblées dans l'Annexe 1.

4.2- LE MODÈLE NUMÉRIQUE

Étant donné que les logiciels actuels offrent la possibilité de modéliser les différentes pièces de l'assemblage en intégrant les contacts avec frottement, le modèle numérique est en mesure de valider le modèle analytique.

Le modèle créé sur Abaqus est un modèle 3-D qui permet de représenter les contraintes, les déplacements et donc le niveau de charge de chaque boulon. Il y a certaines différences par rapport au modèle analytique. Sur Abaqus, il faut introduire une valeur de serrage minimale pour supprimer des mouvements de corps rigide et pour que le calcul converge correctement. Si le serrage est très élevé, des efforts de frottement non négligeables apparaissent. Une autre différence entre les modèles est que le modèle analytique inclut une loi de dégradation du matériau composite alors qu'aucune dégradation n'est prise en compte pour l'instant dans le modèle Abaqus (loi de comportement élastique).

Pour bien comprendre la modélisation réalisée on va présenter chaque partie et on va expliquer pas à pas les différents paramètres définis. De plus, une explication du maillage réalisé sera donnée.

BOULON :

Dans l'éprouvette de l'étude on va utiliser deux boulons en titane (matériau très utilisé dans l'aéronautique dans les assemblages structuraux).

La géométrie de chaque boulon est présentée dans l'image 4.2.1. On peut voir la forme et les dimensions. La longueur de la tige est un peu plus petite que l'épaisseur totale de l'assemblage. Cela permet d'intégrer le serrage du boulon dans l'étape du calcul. Une explication plus détaillée de ce point sera donnée plus tard. Pour introduire le jeu entre les pièces, le diamètre du boulon est plus petit que le diamètre du trou. Le boulon est modélisé avec un comportement élasto-plastique.

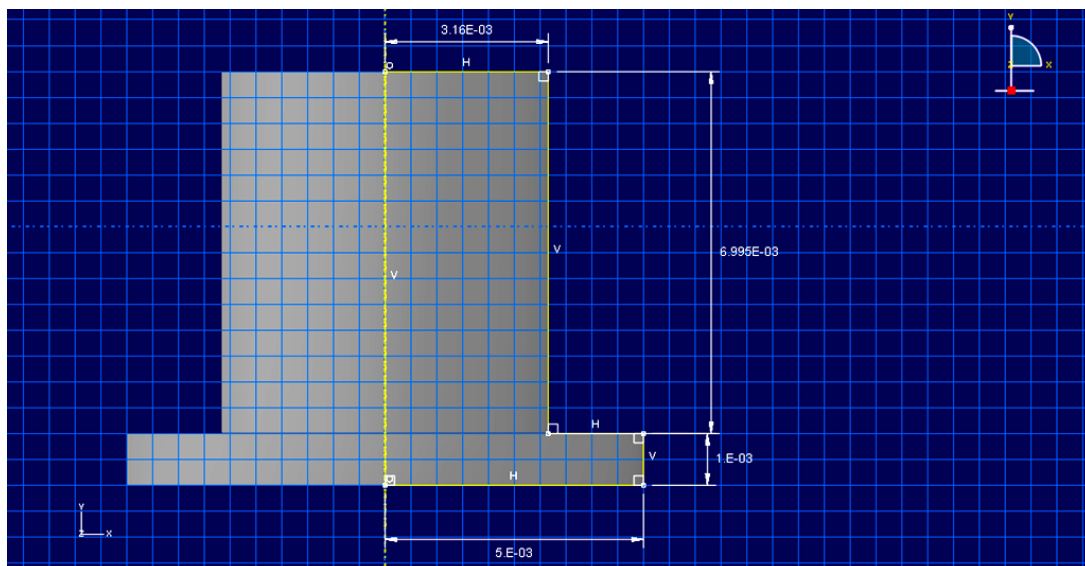


Figure 4.2.1. Esquisse du boulon

Dans le tableau 4.2.1 on peut voir les propriétés mécaniques du titane utilisé pour le boulon.

| | |
|--------------|---------------------|
| Conductivité | 1 |
| Expansion | $8.5 \cdot 10^{-6}$ |

| Elasticité | |
|----------------------|--------------|
| Module de Young (Pa) | 106000000000 |
| Poisson | 0.33 |

| Plasticité | | |
|-------------------|-----------|-----------|
| Yield Stress (Pa) | 830000000 | 900000000 |
| Plastic Strain | 0 | 0.1 |

Tableau 4.2.1.

PLAQUE MÉTALLIQUE

Deux plaques métalliques en aluminium seront utilisées autour de la plaque composite. On utilise deux plaques pour garantir la symétrie de l'assemblage (l'intérêt de la symétrie a été déjà expliqué).

Dans l'image 4.2.2 est affichée la géométrie et les dimensions d'une plaque d'aluminium

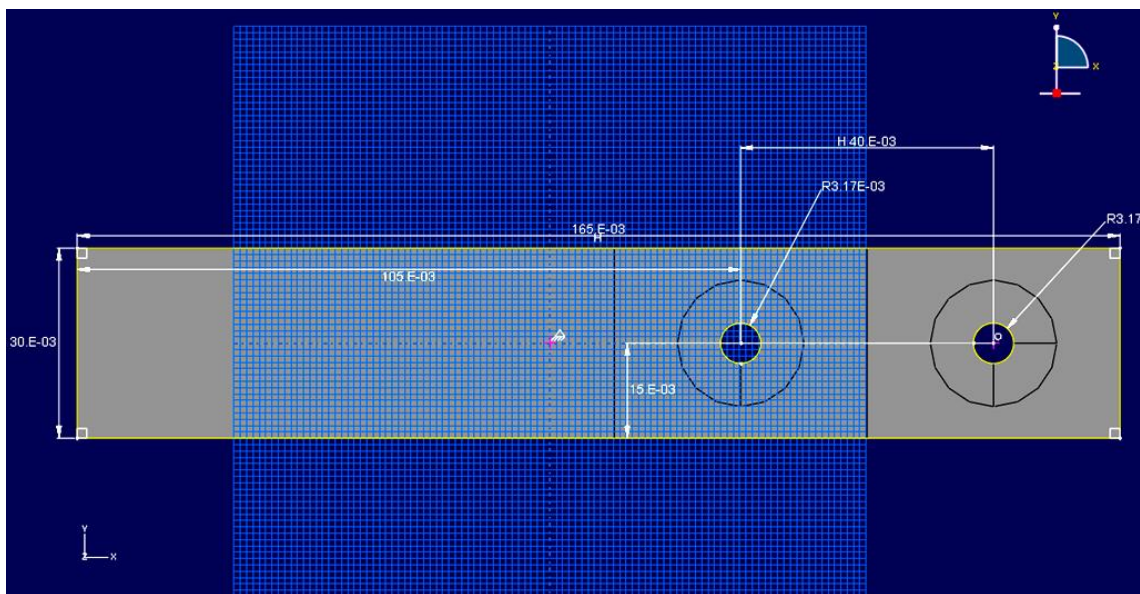


Figure 4.2.2. Esquisse de la plaque d'aluminium

Dans le tableau 4.2.2., on montre les propriétés mécaniques de la plaque d'aluminium.

| Elasticité | |
|----------------------|-------------|
| Module de Young (Pa) | 68000000000 |
| Poisson | 0.33 |

Tableau 4.2.2.

Après avoir défini la géométrie et le matériau on a fait des partitions autour des trous. Les

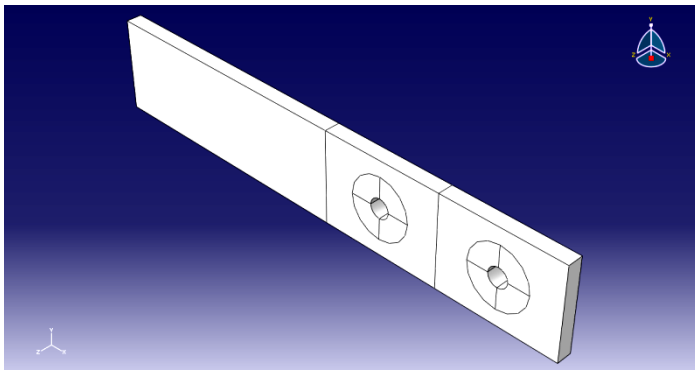


Figure 4.2.3. Plaque d'aluminium 3-D

partitions permettent de définir des zones dans la pièce auxquelles on peut appliquer des paramètres et des matériaux différents. Dans notre cas, les partitions sont intéressantes pour pouvoir définir un maillage plus fin autour des trous où il aura des concentrations de contraintes. L'image 4.2.3 montre les partitions dans la plaque.

PLAQUE COMPOSITE

La dernière partie de l'assemblage est la plaque composite. Cette plaque est fabriquée en matériau composite formé par une matrice époxy et par des fibres de carbone.

Les dimensions et la géométrie sont présentées dans l'image 4.2.4. Toutes les dimensions sont les mêmes que dans la plaque métallique sauf la distance entre les trous. Cette distance sert à introduire le défaut de positionnement. Dans le cas présenté, on peut voir une différence de $50 \mu\text{m}$ entre les deux plaques. Les trous dans la plaque composite sont plus proches que dans la plaque métallique. De plus, on peut remarquer que le diamètre des trous est $20 \mu\text{m}$ plus grand que le diamètre des boulons pour introduire le jeu entre les deux pièces.

Finalement, l'épaisseur de la plaque dessinée est la moitié de l'épaisseur réelle puisque l'on va appliquer une condition de symétrie pour réduire le temps de calcul.

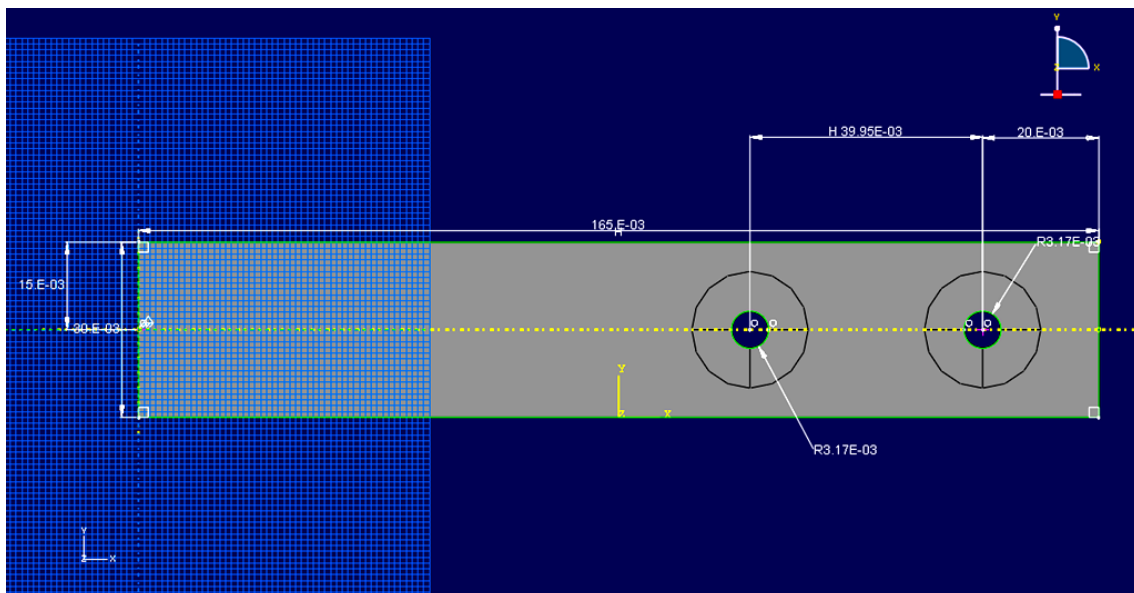


Figure 4.2.4. Esquisse de la plaque composite

Dans le tableau 4.2.3 sont présentées les propriétés mécaniques du matériau composite dans un repère où la direction des fibres est la direction 1.

| | | | |
|----------|--------------|----------|------------|
| E1 (Pa) | 130300000000 | E2 (Pa) | 7600000000 |
| E3 (Pa) | 7600000000 | G12 (Pa) | 4750000000 |
| G13 (Pa) | 4750000000 | G23 (Pa) | 2650000000 |
| NU12 | 0.33 | NU13 | 0.33 |
| NU23 | 0.43 | | - |

Tableau 4.2.3.

De la même manière qu'on a fait les partitions dans la plaque métallique autour des trous pour définir un maillage plus fin, on partitionne la plaque composite.

Pour définir la stratification de la plaque matériau composite sur ABAQUS, on n'utilise pas le module « composites ». On fait 7 partitions longitudinales et perpendiculaires à l'épaisseur pour couper la plaque en 8 « plis UD ». Ensuite, on assigne une orientation (repère) à chaque pli et les propriétés du matériau composite sont associées à chaque nouveau repère. Dans l'image 4.2.5 on peut voir les partitions.

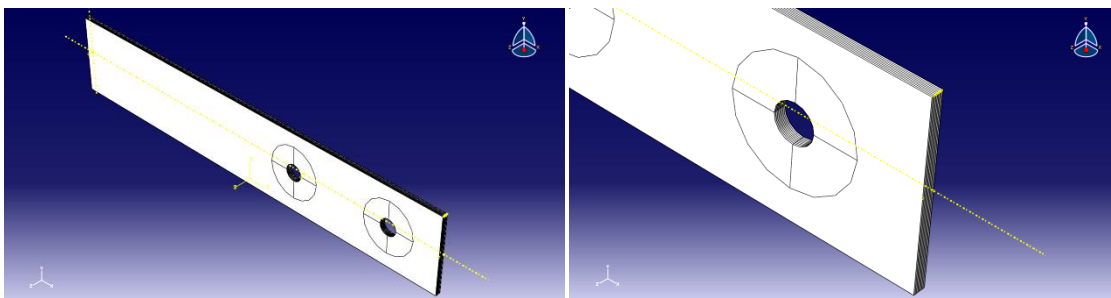


Figure 4.2.5. Plaque composite 3-D

MAILLAGE

La définition du maillage est un des aspects les plus importants pour bien modéliser le comportement de l'assemblage et aussi pour obtenir une bonne convergence. Pour obtenir un maillage optimal il est nécessaire de choisir le type d'éléments et leur répartition. On a utilisé des éléments tridimensionnels-solides dans toutes les parties de l'assemblage. Les éléments 3D sont définis dans l'espace global X, Y, Z. Ils sont utilisés quand la géométrie et/ou la charge appliquée est très complexe. Sur ABAQUS, les éléments solides peuvent être utilisés pour des analyses linéaires ou pour des analyses plus complexes qu'impliquent du contact, de la plasticité et toute autre forme de comportement non-linéaire.

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

Les éléments triangulaires et tétraédriques quadratiques donnent en théorie des résultats précis dans les problèmes où il n'y a pas de contact. Par contre, ces éléments ne sont pas appropriés quand il y a un contact entre des surfaces gérées par une loi sans interpénétration (« hard contact »). Dans ce cas-là, on peut avoir des problèmes de convergence.

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

Dans le tableau 4.2.4, on donne pour chaque partie de l'assemblage, la forme et le type d'élément, et le nom de l'élément Abaqus correspondant.

| PARTIE | FORME | NOM DE L'ÉLÉMENT |
|------------------------|---------------------|------------------|
| Tête du boulon | Prisme triangulaire | C3D15 |
| Tige du boulon | Tétraèdre | C3D10M |
| Trous plaque composite | Hexaèdre | C3D20R |
| Reste plaque composite | Prisme triangulaire | C3D15 |
| Plaque métallique | Prisme triangulaire | C3D15 |

Tableau 4.2.4

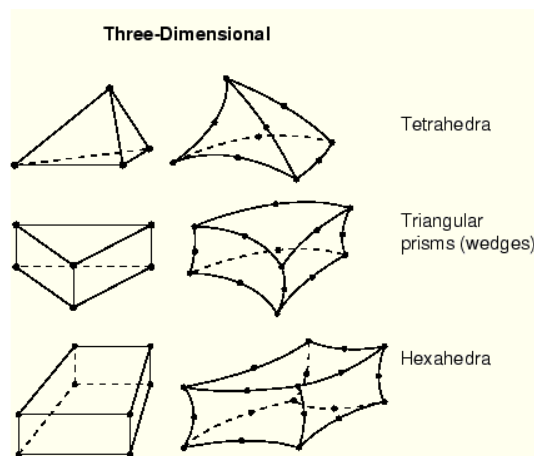


Figure 4.2.6. Éléments 3-D sur Abaqus

LE CALCUL

Avant de lancer le calcul il faut définir certaines propriétés d'interaction entre les parties de l'assemblage, les conditions limites et les différentes étapes du calcul.

Les boulons sont placés par une coaxialité de leur axe avec ceux des alésages aluminium. Dans notre cas, si le jeu est faible, le défaut de position engendre une interférence entre le deuxième boulon et l'alésage composite.

Définition des propriétés d'interaction : dans l'assemblage on va avoir un contact entre la plaque composite et la plaque métallique et également un contact entre les boulons et les deux plaques. Les comportements normal et tangentiel du contact doit être défini.

- Plaque composite et plaque métallique : on va avoir une condition de contact normal à cause du serrage du boulon. Ce contact est introduit avec une loi de contact sans interpénétration (« hard contact »). Le frottement est introduit grâce à un coefficient de frottement de 0.1.
- Boulon-plaques : On va avoir un contact normal et tangentiel. Le contact tangentiel entre le trou et le boulon est modélisé avec un coefficient de frottement de 0.1. Le contact normal est modélisé avec une loi de « hard contact ». Cette loi impose que lorsqu'il existe du jeu, il n'y a pas de contact entre le boulon et les plaques, et que lorsque le jeu est nul, un contact brusque se produit en forme d'échelon. Une autre forme de modéliser le contact normal est d'utiliser des ressorts. Les ressorts, situés entre la surface du boulon et de la plaque, représentent le jeu. À mesure qu'on applique la charge, le jeu diminue et le ressort se comprime jusqu'à annuler le jeu. A cet instant, le contact se produit entre les deux parties. On peut modéliser le comportement du ressort avec des lois linéaires ou exponentielles. L'image 4.2.8 montre les différentes lois de contact.

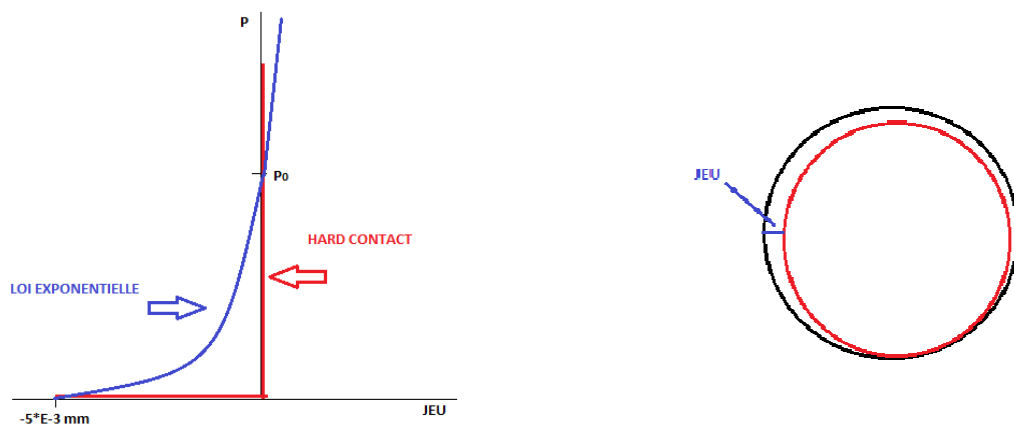


Figure 4.2.8. Loi de contact exponentielle et loi de contact « hard contact »

ETAPES DU CALCUL

- 1- Pré-charge : dans cette étape, ABAQUS introduit le serrage du premier boulon. On a déjà dit que la dimension de la tige du boulon était plus petite que l'épaisseur de la plaque. Dans l'étape de pré-charge, ABAQUS comprime les plaques de sorte que la face d'appui du boulon soit au même niveau que la surface de la plaque. On obtient un

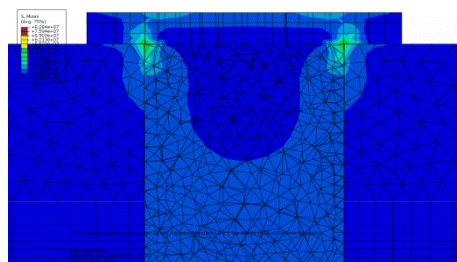


Figure 4.2.9. Précontraintes après l'étape de précharge

déplacement des plaques et aussi des précontraintes de compression sur les plaques autour des trous. Dans la figure 4.2.9 on peut voir la position final du boulon dans cette étape.

Les conditions aux limites imposées sont : la symétrie de l'éprouvette par rapport à Z, la

plaque composite encadrée dans le bord plus éloigné des trous et plaque métallique encadrée dans le bord le plus éloigné des trous.

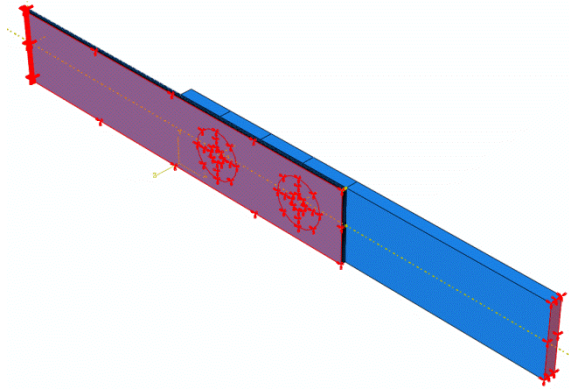


Figure 4.2.10. Conditions aux limites imposées

- 2- Interférence : dans les essais expérimentaux c'est l'étape pendant laquelle on applique la pré-charge en traction au composite pour annuler le défaut de positionnement et introduire le deuxième boulon. Pour simuler cette étape, ABAQUS annule l'interférence qui existe entre la plaque composite et le boulon et applique le serrage du deuxième boulon. À la fin de cette étape, on peut observer l'état de pré-contrainte résultant. Les conditions aux limites imposées sont les mêmes que dans la première étape sauf que dans ce cas, le bord de la plaque composite est laissé libre.

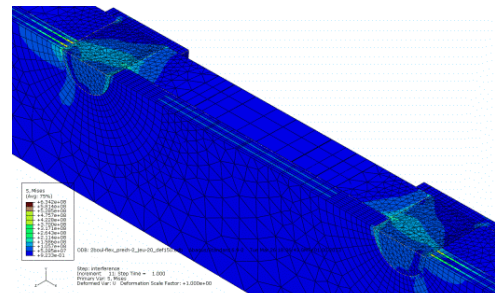


Figure 4.2.11. Précontraintes après l'étape d'interférence

- 3- Application de la charge : on applique la charge de traction sur le composite en fixant la plaque métallique. Au lieu d'appliquer une charge de traction sur le composite, on impose un déplacement à la plaque. On impose un déplacement sur tous les plis car si on applique une force sur la surface, la distribution de la force n'est pas constante à cause des différentes orientations des plis.

Après avoir défini le modèle et défini les étapes, on lance le calcul. Une fois que le modèle converge on peut commencer à analyser les résultats. L'analyse des résultats sera expliquée plus tard.

4.3- MODÈLE EXPERIMENTAL

Finalement, pour valider les modèles numérique et analytique, une comparaison expérimentale est nécessaire. Les essais expérimentaux seront faits avec des éprouvettes comme présenté dans la figure 4.3.1.

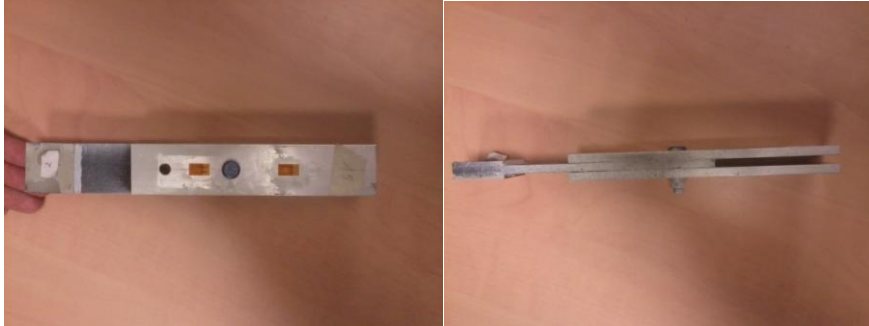


Figure 4.3.1. Epreuve utilisée pendant les essais

La procédure d'un essai est la suivante :

- Fabrication des plaques d'aluminium et de composite.
- Fixation des trois plaques avec un premier boulon.
- A cause des défauts de positionnement, une compression ou une traction (ça dépend de l'orientation du défaut) est nécessaire pour monter le deuxième boulon. Quand les deux boulons sont fixés, on décharge l'éprouvette. Des contraintes et déformations résiduelles sont alors engendrées.
- Finalement, l'éprouvette est soumise à un essai de traction conventionnel jusqu'à rupture avant éventuellement une charge – décharge pour observer la présence d'endommagement.



Figure 4.3.2. Mouchetis sur l'éprouvette

Pour pouvoir analyser finement les résultats des essais il est très important de définir les outils de mesure de charge, de déplacements et de déformations. La charge est mesurée par la machine de traction et les déplacements ou déformations sont mesurées avec deux outils différents pour pouvoir comparer la véracité des mesures : les jauges dont on a déjà parlé, et le mouchetis qui permettra de faire une mesure de champ par corrélation. Dans l'image on peut observer le mouchetis sur la plaque métallique.

4.4- OBTENTION ET TRAITEMENT DES RÉSULTATS

Pour pouvoir comparer et valider les trois modèles il faut adapter les résultats de chaque modèle puisque chacun montre les résultats d'une manière différente.

Le modèle sur ABAQUS est un modèle numérique éléments finis 3-D grâce auquel on peut obtenir les champs de contraintes et déformations sur chaque élément de l'assemblage. Le modèle expérimental permet d'obtenir le niveau de force appliqué et le déplacement appliqué aux deux extrémités de l'éprouvette. Les jauges permettent d'avoir les déformations en certains points et la mesure de champs par corrélation d'image d'obtenir les champs de déplacement et de déformation sur certaines faces. Par contre, le modèle analytique est un modèle 1-D qui donne des efforts et des déplacements moyens dans les substrats. En fait, chaque modèle donne les résultats d'une manière différente. Etant donné que notre objectif est de valider le modèle analytique, nous avons décidé de comparer les efforts transmis par chaque boulon entre le modèle analytique et le modèle numérique. Ensuite, une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques permettra de valider le modèle numérique.

À présent, on va expliquer les différents résultats qu'on va obtenir avec chaque modèle : l'analytique, le numérique et l'expérimental.

Extraction des flux d'effort dans le modèle numérique :

L'obtention des efforts transmis par chaque boulon nécessite le calcul des flux d'effort. Ces flux peuvent être calculés à partir du champ de contraintes sur chaque partie de l'assemblage.

Pour pouvoir obtenir les efforts il faut définir un certain nombre de surfaces à travers lesquelles on veut les flux d'efforts. Pour chaque élément on obtiendra trois forces (FX, FY, FZ) et trois moments (MX, MY, MZ). On a défini ainsi 13 sections. Cinq à travers la plaque aluminium (de la position zéro jusqu'à la fin de la plaque), quatre surfaces pour les trous (une à gauche et les autres à droite pour chaque trou) et quatre dans les plans contact entre la plaque composite et la plaque métallique. Les quatre derniers sont définis pour obtenir la force de frottement et ainsi pouvoir vérifier l'équilibre des forces dans la plaque d'aluminium. La figure 4.4.1 montre les surfaces ainsi définies.

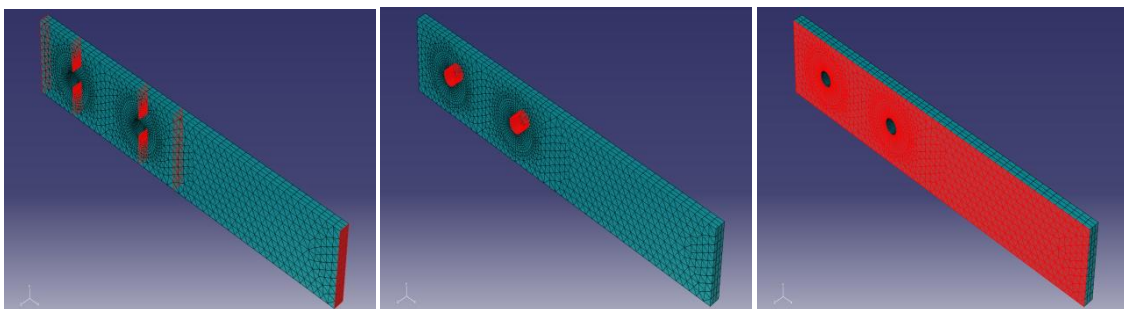


Figure 4.4.1 Surfaces

Une façon de valider les efforts obtenus est de vérifier les équilibres des forces dans chaque partie de la plaque. On peut décomposer la plaque en quatre morceaux pour faire les équilibres. Dans la figure 4.4.2, on montre les parties et les équilibres faits.

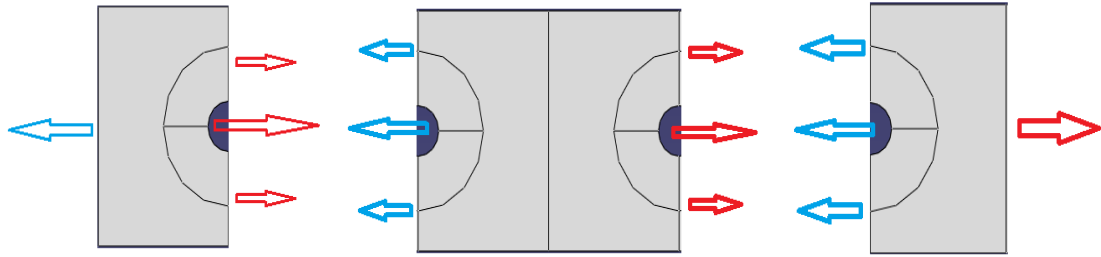


Figure 4.4.2. Equilibres dans la plaque

La plupart des équilibres sont corrects et presque nul. Mais il y en a certains qui s'éloignent de zéro (jusqu'à 200 newtons) quand la charge appliquée est élevée. Parfois, si on prend en compte les surfaces de contact les équilibres sont moins bons. La raison est que sur les bords des surfaces de contact il y a des éléments qui correspondent aussi aux surfaces où la charge est appliquée. Cela implique une augmentation fictive de la valeur des efforts. Pour vérifier ce phénomène on a pris une autre surface de contact éloignée des endroits d'application de charge. Après ces vérifications, on peut affirmer que les équilibres sont corrects.

Les données extraites permettent de calculer le taux de charge d'un boulon défini comme la charge d'un boulon divisée par la somme de la charge totale supportée par les deux boulons.

4.5- ANALYSE DES RÉSULTATS

Après avoir sorti et avoir organisé tous les résultats d'ABAQUS, de MATLAB et des essais expérimentaux, on va les traiter pour pouvoir comparer et valider les trois modèles.

Dans ce point, on va montrer et expliquer les analyses faites pour valider les modèles et finalement on va parler des conclusions obtenues. C'est-à-dire, on va montrer l'influence du jeu et des défauts de positionnement sur l'assemblage.

Avant tout, il faut montrer les différents calculs lancés et utilisés pour notre analyse. Tout d'abord, certains calculs ont été lancés pour vérifier le modèle Abaqus. Après avoir validé le modèle avec différentes configurations de precharge, du jeu et des défauts, on a lancé les calculs qui nous intéressent et qui nous permettront la validation des modèles. On veut analyser le comportement de l'assemblage en dépassant volontairement les tolérances imposées classiquement dans l'aéronautique pour regarder si ce dépassement de tolérance est critique pour l'assemblage. Par conséquent, on a essayé des configurations de jeu faible, de jeu élevé, de défaut faible, de défaut élevé. Le tableau 4.5.1 montre les configurations :

| Jeu | | Défaut | | Configuration |
|--------|--------------------------|--------|--------------------------|-----------------|
| Niveau | Valeur (μm) | Niveau | Valeur (μm) | |
| Faible | 20 | Faible | 150 | Jeu20 - Def150 |
| Faible | 20 | Élevé | 300 | Jeu20 - Def300 |
| Élevé | 150 | Faible | 150 | Jeu150 - Def150 |
| Élevé | 150 | Élevé | 300 | Jeu150 - Def300 |

Tableau 4.5.1. 1

On va éclaircir la nomenclature utilisée dans tous les essais pour faciliter la compréhension des graphiques et des résultats.

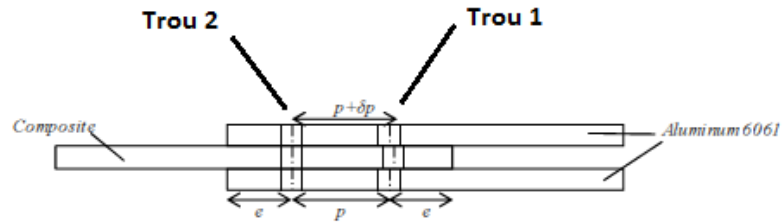


Figure 4.5.1. Nomenclature

ANALYSE ET VALIDATION

L'obtention des graphiques appropriés qui montrent le comportement de l'assemblage est très important à cause de la grande quantité de résultats obtenus. Grâce à ces graphiques on pourra comparer les trois modèles d'une façon simple, lisible et correcte.

Ce qui nous intéresse est d'analyser le comportement de l'assemblage en terme de transfert de charge et de déplacement de chaque boulon, et surtout l'influence du jeu et des défauts. L'évolution du transfert de charge de chaque trou par rapport à la charge totale appliquée ou les déplacements de certains points du recouvrement vont permettre l'identification de ces phénomènes.

Tous les graphiques et figures qui apparaissent dans ce point correspondent à la configuration « jeu 25 et défaut 150 ».

1- Comparaison modèle analytique – modèle numérique :

La figure 4.5.2 montre l'évolution du chargement dans chaque boulon pour le cas où le jeu vaut 25 μm et le défaut 150 μm .

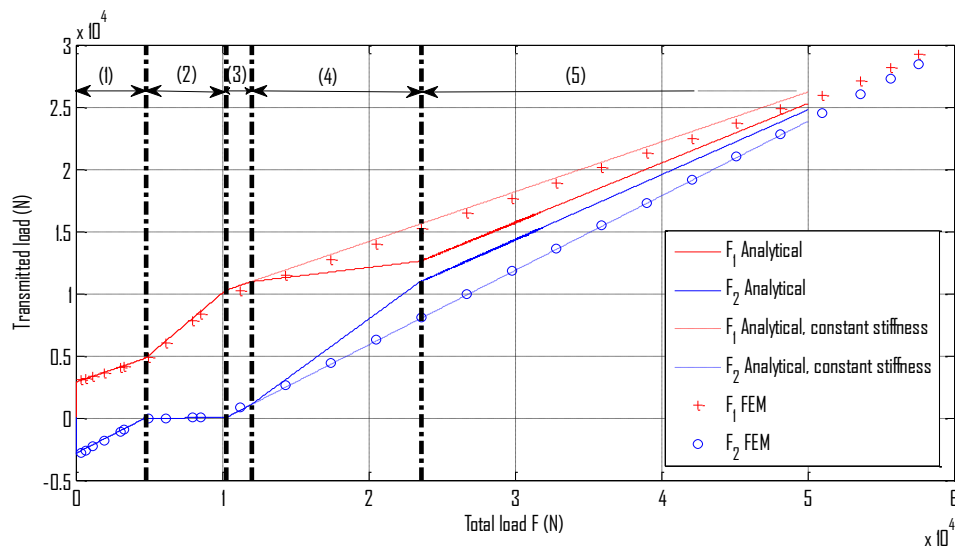


Figure 4.5.2. Efforts F_1 et F_2 transmis par les boulons versus le chargement pour $j = 0.025 \text{ mm}$ et $\delta p = 0.150 \text{ mm}$

Dans cet exemple, le jeu introduit dans le modèle analytique n'est pas égal au jeu géométrique (25 μm), il a été recalé à 40 μm à partir du modèle numérique pour tenir compte de la prise de contact. Une étude spécifique sur ce phénomène sera développée dans la partie suivante de

ce rapport. Grâce à cette représentation on peut voir parfaitement le comportement de l'assemblage. Les différentes étapes sont :

Tout d'abord, sans avoir encore appliqué la charge, on peut voir un niveau de précharge dans chaque boulon généré par l'annulation du défaut de positionnement et l'insertion du deuxième boulon. Les valeurs de précharge sont égales et opposées. C'est-à-dire, le boulon 1 (en rouge) se charge en traction et le boulon 2 (en bleu) en compression.

Lorsqu'on commence à appliquer la charge en traction (étape 1), on observe que le boulon 2, qui est chargé en compression, commence à se décharger. En même temps, le boulon 1 se charge. Cette étape continue jusqu'au moment où le boulon 2 se trouve complètement déchargé. A partir de ce moment-là, le boulon 1 supporte toute la charge.

Ensuite, commence l'étape du rattrapage du jeu (étape 2). Pendant cette période, il n'y a pas de contact entre le boulon 2 et le trou 2. Le boulon 1 prend toute la charge.

Une fois le jeu rattrapé, chaque boulon continuera progressivement d'être chargé (étape 3)

Dans l'étape 4 la dégradation du matériau débute sur le boulon 1. On observe une pente plus grande pour le boulon 2 jusqu'à ce que le boulon 2 arrive à son tour à l'effort de matage.

Finalement, dans l'étape 5 on voit un nouveau changement de pente dans les boulons. La pente du boulon 2 diminue, et par contre celle du boulon 1 augmente.

À partir de l'étape 3, il y a une différence entre les deux modèles puisque le modèle analytique prend en compte la dégradation du matériau composite par matage.

Pour vérifier l'adéquation entre les modèles, on a enlevé l'endommagement du matériau composite sur le modèle analytique. La ligne pointillée sur la figure 4.5.2 montre le résultat obtenu. Les résultats du modèle analytique sans endommagement correspondent à ceux du modèle numérique. On peut alors affirmer que le modèle analytique représente correctement les transferts de charge entre les boulons en présence de jeu et d'un défaut de localisation.

2- Comparaison essais – modèle numérique :

L'objectif est de valider le modèle numérique et par conséquent le modèle analytique.

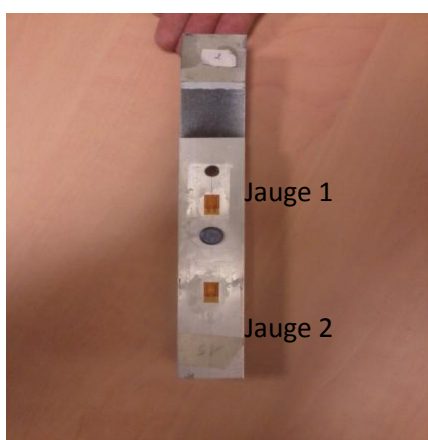


Figure 4.5.3. Positionnement des jauges sur l'éprouvette

Pour vérifier les modèles, on compare les déformations obtenues sur Abaqus avec celles obtenues dans l'essai expérimental. On a deux méthodes pour obtenir les déplacements de l'essai. Les jauges, qui vont donner les déformations dans la plaque d'aluminium et la corrélation des images, grâce à laquelle on va comparer et valider les résultats. Sur la figure 4.5.3 on peut voir la position des 2 jauges et leur numérotation.

Dans l'essai réalisé, on distingue 6 étapes. Pendant l'étape 1 on applique la force nécessaire pour déformer le substrat et pouvoir introduire le deuxième boulon. L'étape 2 correspond à l'insertion du deuxième boulon.

Pendant l'étape 3 on décharge l'éprouvette. Pendant les étapes 4 et 5 on recharge l'éprouvette jusqu'à 20.000 N et ensuite on la décharge à nouveau. L'étape 6 correspond à l'application de la charge à traction jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Tout d'abord on observe qu'après avoir déchargé l'éprouvette (étape 3), on obtient une déformation positive sur la jauge 1. Normalement on devrait obtenir un déplacement négatif puisque le défaut introduit provoque un effort de compression sur cet endroit. La corrélation d'images nous montre une légère flexion des plaques pendant le montage du deuxième boulon. Cette flexion explique la valeur positive de déformation dans l'étape 3. Si on enlève ce phénomène de flexion, on obtient la courbe de la Figure 4.5.4. On observe une différence entre les deux courbes à partir du moment où se produit le matage puisque celui-ci n'est pas pris en compte dans le modèle numérique. L'objectif à terme est d'introduire le matage sur le modèle numérique afin de comparer les résultats jusqu'à rupture.

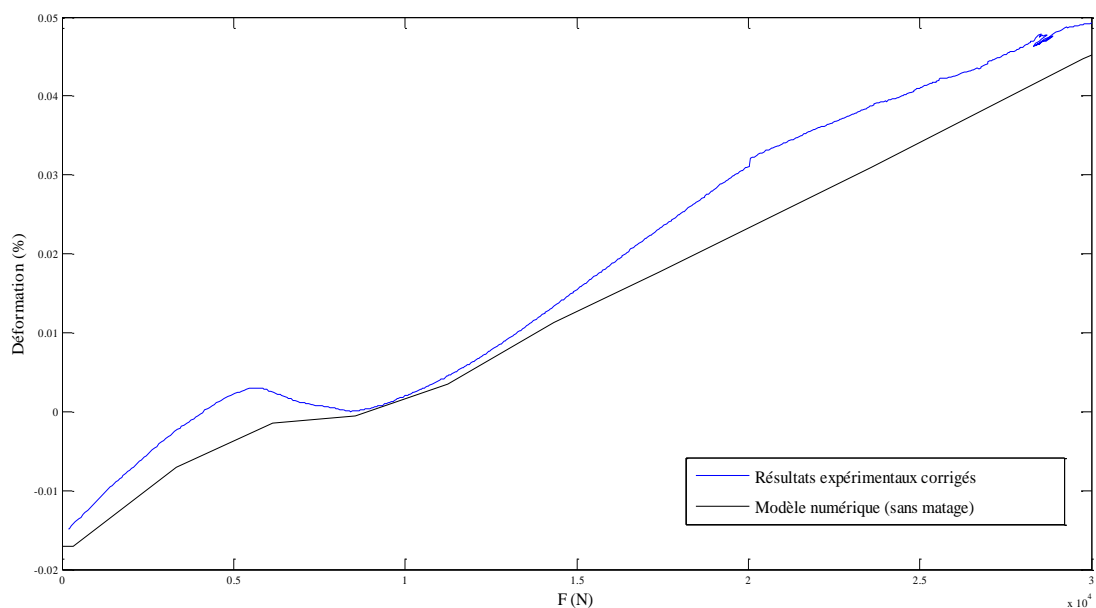


Figure 4.5.4. Comparaison du modèle numérique et de l'essai expérimental

Conclusion :

Grâce à la comparaison des résultats entre les divers modèles on peut affirmer que le modèle analytique représente correctement le comportement physique de l'assemblage en présence de différentes valeurs de jeu et de défaut. Ce modèle permet d'obtenir le comportement de l'assemblage et l'influence des défauts géométriques sur l'assemblage en quelques minutes alors que le modèle numérique nécessiterait des semaines de calcul.

Les figures 4.5.6 et 4.5.7 montrent un exemple de l'utilisation potentielle qu'on peut faire de ce modèle.

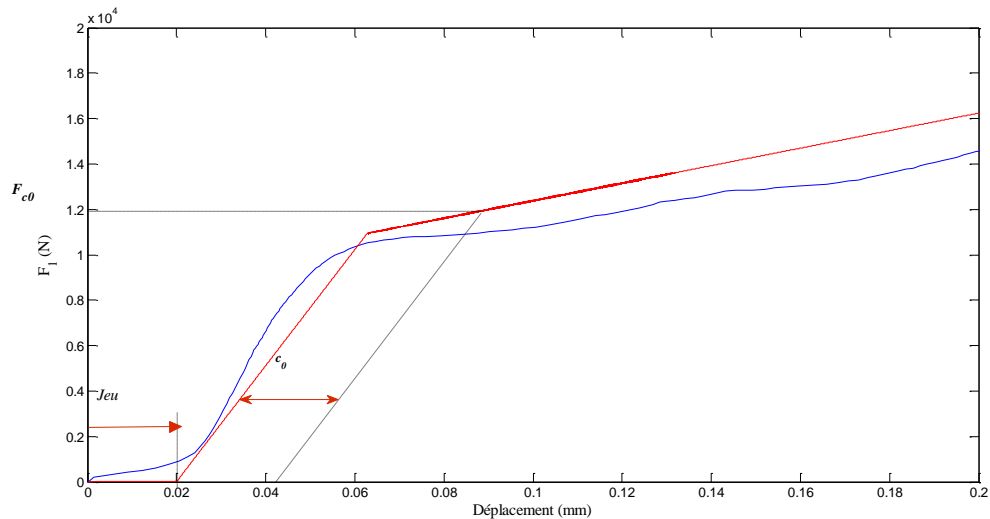


Figure 4.5.6. Définition de la déformation maximal admissible du trou C_0

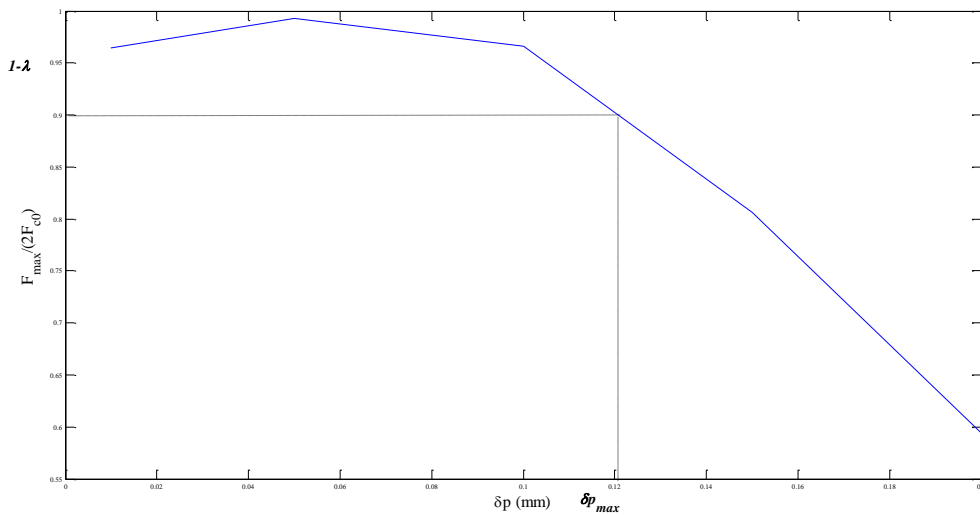


Figure 4.5.7 Evolution de la force maximale admissible en fonction du défaut de positionnement

Dans la figure 4.5.6 on définit un paramètre C_0 qui représente la déformation maximale permanente acceptable du trou. Cette valeur donne la force maximale F_{c0} que peut supporter chaque boulon et qui donne une force appliquée à l'assemblage F_{max} . La figure 4.5.7 représente l'influence du défaut de position en fonction du ratio $F_{max} / 2F_{c0}$. Grâce à ce graphique on peut obtenir la valeur maximale admissible du défaut de positionnement à partir d'un critère de perte de performance acceptable.

Une des difficultés trouvée dans l'utilisation du modèle analytique est l'identification du jeu effectif ; c'est-à-dire du jeu qu'il faut introduire dans le modèle analytique pour tenir compte de la phase de prise de contact. On a vu précédemment que le jeu effectif pouvait être estimé précisément avec le modèle numérique. Cependant, pour obtenir rapidement (sans simulation) ce jeu effectif en fonction du jeu géométrique et des autres paramètres du modèle (diamètre du boulon, épaisseur des substrats ...), nous avons opté pour le développement d'un modèle analytique de prise de contact. Ce développement fait l'objet de la partie suivante.

5- ETUDE DU JEU: MODÈLE DE RÉPARTITION NON UNIFORME

5.1- INTRODUCTION

L'étude précédente a montré que la prise de contact entre le boulon et le trou nécessitait de corriger la valeur du jeu dans le modèle analytique. Par conséquent, on a décidé de développer un modèle analytique représentant cette prise de contact.

L'objectif de l'étude est de trouver la relation existant entre le jeu géométrique qu'on introduit dans notre assemblage et le jeu effectif qui représente à la fois le jeu géométrique mais également le déplacement engendré par la prise de contact. Pour réaliser cette étude on s'est appuyé sur une théorie de modélisation analytique des contacts qui prend en compte une répartition de pression non uniforme.

5.2- MODÈLE DE RÉPARTITION NON UNIFORME

La modélisation analytique des contacts entre surfaces n'est pas évidente. Il y a une grande quantité de paramètres qui influent sur le contact : la forme des surfaces en contact, la rigidité des matériaux, la température, la rugosité, le frottement, etc.

Les différents modèles présentés dans la littérature se distinguent selon que l'on considère un contact étroit ou qu'on considère un contact en grande surface (surface complémentaire). On parle de contact étroit quand les surfaces nominales se touchent en un point ou sur un segment. Ce n'est qu'une fois déformée que la surface de contact, qui reste de petite taille, augmente. On parle de contact en grande surface lorsque la taille de la surface nominale apparente de contact est du même ordre de grandeur que la taille des pièces en contact.

Dans notre cas, on étudie le contact entre un alésage et un boulon qui ont des diamètres identiques au jeu près. On peut assimiler le contact à un **contact en grande surface avec une répartition non uniforme**.

Ce modèle prend en compte la déformabilité des pièces dans la zone de contact et suppose les pièces indéformables loin des surfaces de contact. La pression générée dans l'interface est liée à l'écrasement local provoqué par la déformation des surfaces en contact. Cet écrasement est supposé égale à l'interpénétration des pièces (considérées indéformables) engendrée par leur mouvement relatif (Figure 5.2.1). La relation pression de contact écrasement s'exprime par :

$$P = k\delta^a$$

Où P est la pression, k est la raideur du contact qui s'exprime en Pa/m^3 , δ est l'écrasement et a est un coefficient de non-linéarité élastique. On montre expérimentalement que $a = 1$ pour les matériaux métalliques et $a > 1$ pour les matériaux plastiques.

On applique ce modèle de répartition non uniforme à un contact cylindrique avec jeu soumis à un effort radial. La figure 5.2.1 définit les notations adoptées et le calcul de l'écrasement.

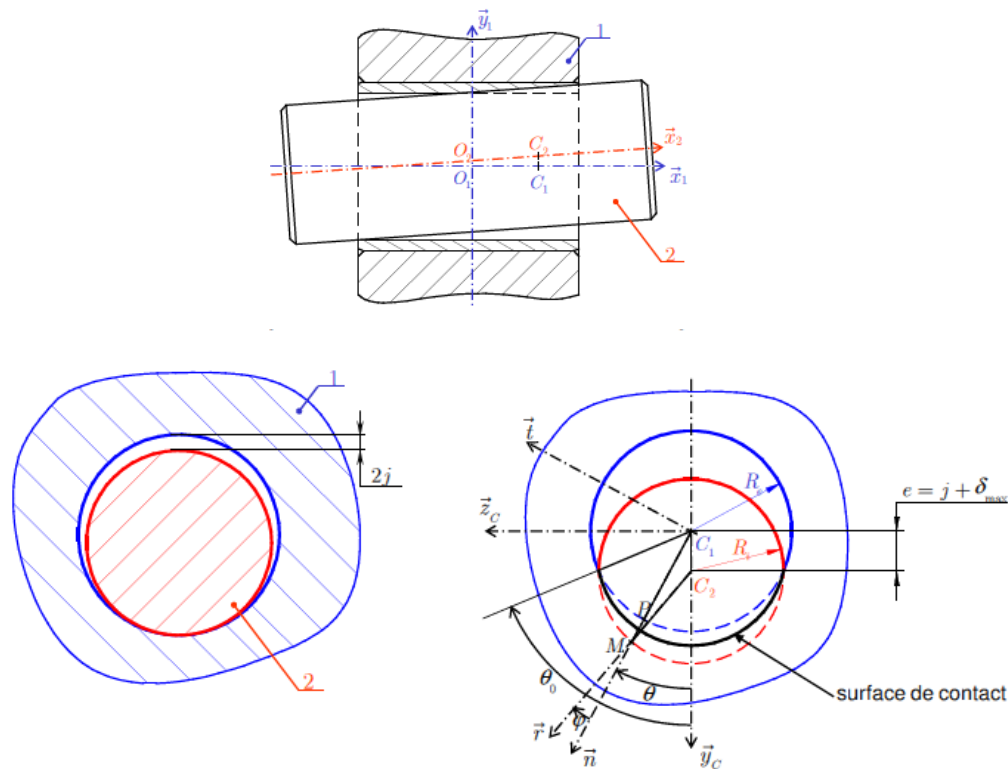


Figure 5.2.1. Schéma du modèle du principe du modèle de répartition non uniforme

Dans la figure 5.2.1 on peut voir le jeu géométrique radial j et l'écrasement de la surface de contact δ . On définit le paramètre e comme la somme du jeu radial et de l'écrasement maximal. On définit également θ_0 l'angle de contact entre les deux surfaces. A partir de ces paramètres, on peut obtenir facilement les efforts et le champ de pression sur la surface de contact en fonction du déplacement appliqué. Le développement des calculs du modèle se trouve dans l'annexe 2. La figure 5.2.2 montre un exemple.

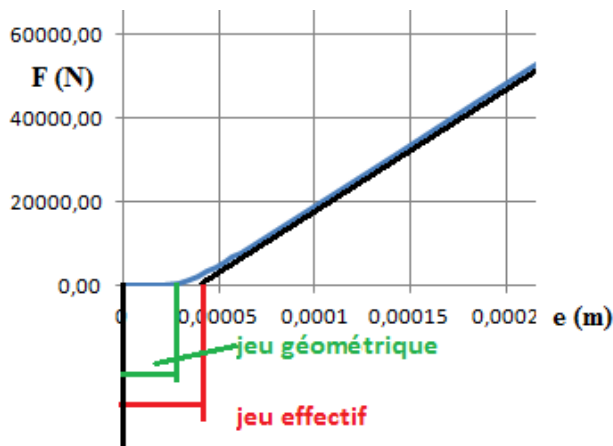


Figure 5.2.2. Différence entre le jeu effectif et le jeu géométrique

Grâce à cette représentation on obtient la différence entre le jeu effectif et le jeu géométrique. La seule donnée manquante dans ce modèle analytique de prise de contact est la raideur du contact k . La mesure expérimentale de k est très délicate car il faut avoir accès à une mesure locale des déplacements relatifs. Nous avons donc opté pour l'utilisation d'un modèle numérique. La raideur du contact k sera identifiée uniquement à partir de la zone linéaire. Le modèle numérique permettra donc

également de valider la réponse du modèle analytique pendant la prise de contact.

La démarche de l'étude suivie est :

- 1- Programmation du modèle analytique sur Matlab.
- 2- Création du modèle numérique sur Abaqus et vérification avec un seul substrat.
- 3- Calculs avec le modèle d'assemblage complet.
- 4- Comparaison des résultats, validation et conclusions.

5.3- DESCRIPTION DES MODÈLES

Modèle numérique :

Le modèle numérique développé sur Abaqus est basé sur le modèle développé pour l'étude précédente sur les assemblages hybrides double recouvrement. Par conséquent, le type des éléments et de maillage, les propriétés de contact, les matériaux et les conditions aux limites sont identiques (voir section 4.2). Par contre, étant donné que l'on ne s'intéresse qu'au contact alésage boulon, on va travailler sur un assemblage avec un seul boulon.

Tout d'abord, pour vérifier le bon fonctionnement du modèle analytique et identifier séparément la raideur du contact k pour chaque couple de matériau, on a fait des essais en prenant séparément la plaque d'aluminium et la plaque composite. On a modélisé une plaque et un boulon monté au milieu de la plaque. La figure 5.3.1 montre cette configuration.

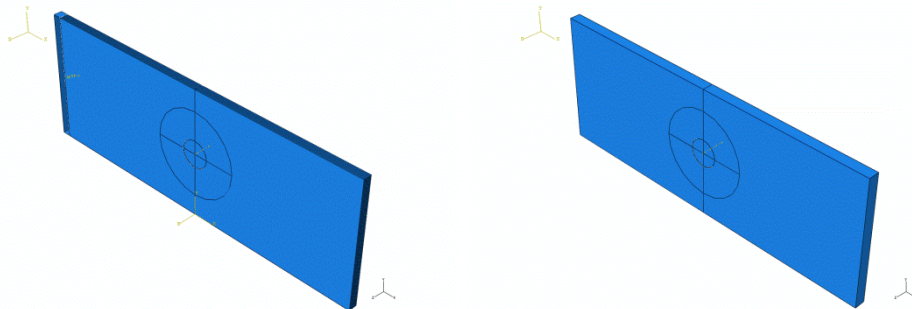


Figure 5.3.1. Plaques utilisées pour la validation du modèle

Les conditions aux limites appliquées dans cette configuration sont représentées sur la figure 5.3.2. On a introduit un plan de symétrie et on a bloqué la moitié de la surface du boulon où il n'y a pas de contact. La longueur du boulon est suffisamment courte pour éviter la flexion mais suffisamment longue pour ne pas interférer avec la surface de contact.

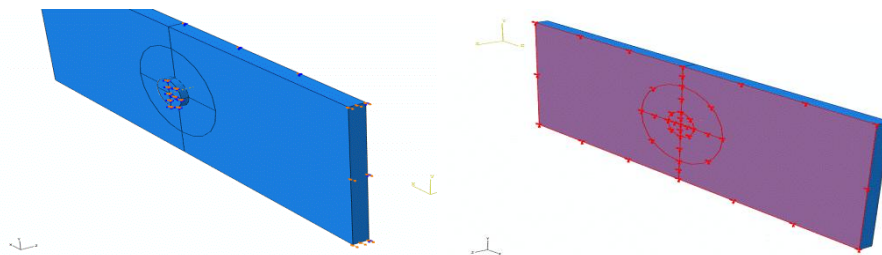


Figure 5.3.2 Conditions aux limites.

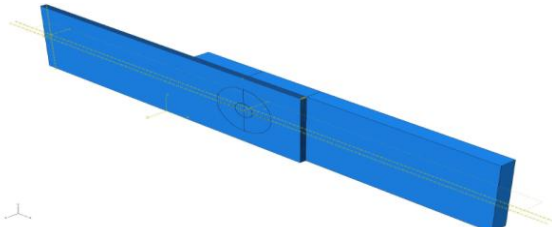


Figure 5.3.3. Epreuve3-D double recouvrement

On obtient une bonne corrélation entre le modèle analytique et le modèle numérique, ce qui a permis de lancer les simulations sur les éprouvettes hybrides double recouvrement mono-boulon comme représenté sur la figure 5.3.3.

Modèle analytique :

A partir des équations développées dans l'annexe 2, on a créé un programme sur Matlab qui calcule le comportement du contact et donne la relation entre la charge appliquée F et le déplacement imposé e .

Les données d'entrée du programme sont : la valeur du jeu géométrique radial j_{geom} , la raideur du contact k , le niveau de charge. On peut trouver le programme Matlab dans l'annexe 2.

5.4- RÉSULTATS

L'identification de k nécessite la mesure de e à partir des simulations éléments finis ce qui n'est pas évident.

Pour cela il faut revenir à la définition du paramètre e . Le paramètre e représente l'écrasement maximal dans la zone de contact plus le jeu géométrique introduit. C'est également la différence entre la position initiale de l'axe du boulon et sa position après chargement. Il faut veiller à ne pas intégrer dans le calcul de e les déplacements loin de la zone de contact.

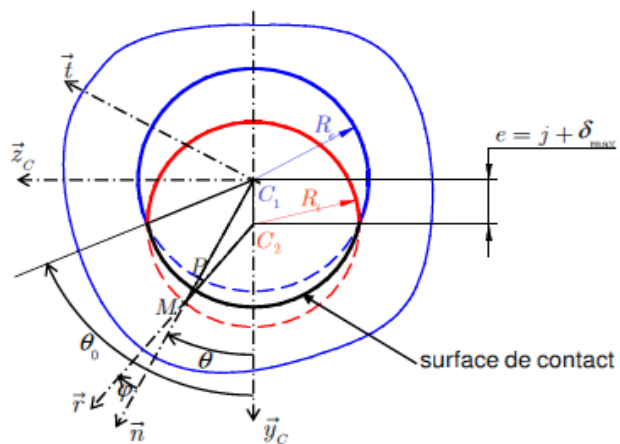


Figure 5.4.1 Schéma du contact et représentation des paramètres influents.

Traçons un chemin constitué de points des 2 plaques et du boulon comme représenté sur la Figure 5.4.2. Grâce au chemin on peut représenter, pour chaque valeur de charge, les valeurs des déplacements U_1 dans la direction de chargement.

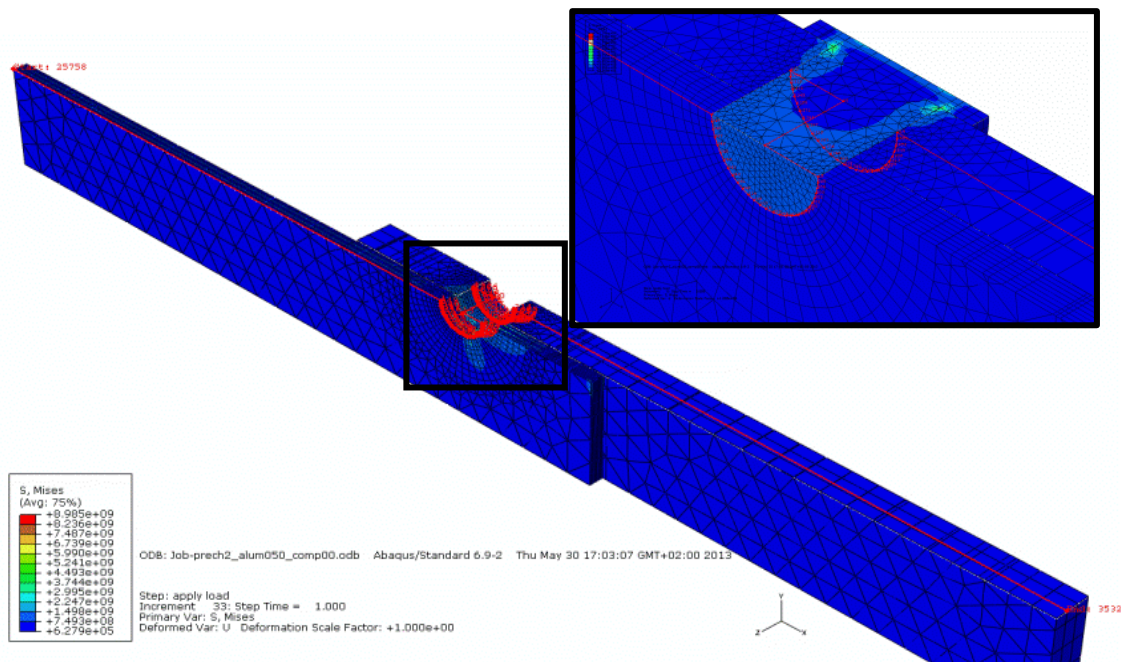


Figure 5.4.2. Chemin choisi le long de la plaque pour représenter les déplacements U_1

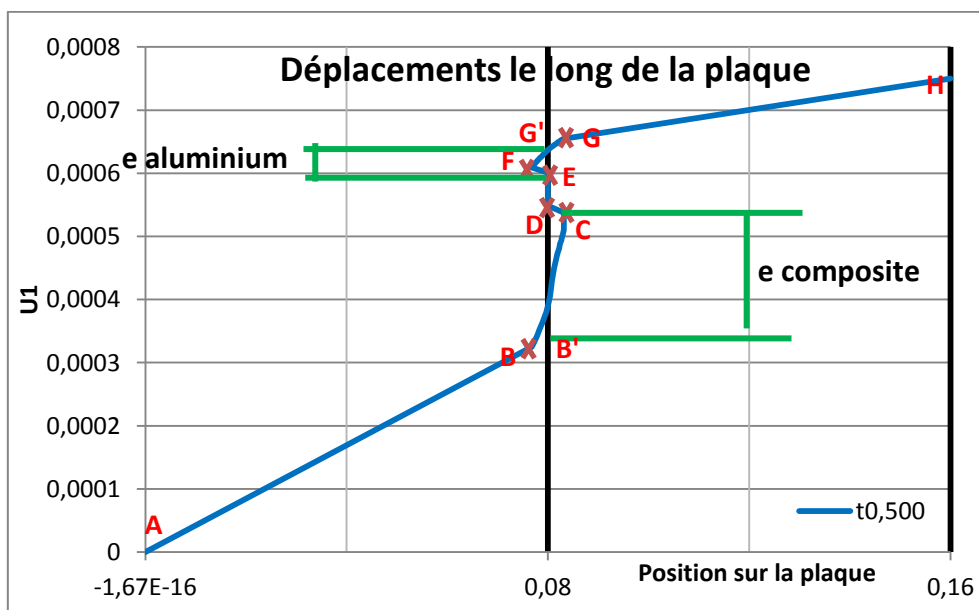


Figure 5.4.3 Représentation des déplacements le long de la plaque et de la raideur du contact.

La figure 5.4.3 montre un exemple des graphiques obtenus avec cette méthode. On distingue trois étapes clairement différenciées. La première étape (A-B) montre le déplacement dans la zone courante de la plaque composite. Ensuite, la partie courbée (B-C) correspond aux déplacements localisés sur la plaque composite dans la zone de contact. La troisième partie (C-D) correspond aux déplacements par compression dans le boulon. La partie (D-E) est quant à elle imputable à la flexion et au cisaillement du boulon. Ensuite on retrouve les mêmes parties

pour la plaque aluminium. Grâce à ce graphique on peut représenter de manière très précise la raideur du contact et comprendre les phénomènes physiques présents dans le contact. Sur cette représentation on peut parfaitement définir et calculer les valeurs de e associées aux contacts composite-boulon et aluminium-boulon. Si on fait la différence de déplacement entre le point D et l'intersection de la droite (AB) avec la position de l'axe du trou (point B'), on obtient la valeur $e_{composite}$ correspondant au contact boulon – composite :

$$e_{composite} = U_D - U_{B'}$$

Si on fait la même opération avec la plaque d'aluminium, on obtient $e_{aluminium}$ correspondante au contact aluminium – boulon :

$$e_{aluminium} = U_H - U_{G'}$$

On peut également définir e_{boulon} qui correspond à la déformation de cisaillement et de flexion du boulon.

$$e_{boulon} = U_E - U_D$$

Si on fait l'addition des trois valeurs on trouve la valeur e_{total} qui donne le déplacement total lié à l'assemblage bolonné.

$$e_{total} = e_{composite} + e_{aluminium} + e_{boulon}$$

Avec le modèle numérique, on peut déterminer ces paramètres pour chaque niveau de charge. Un exemple est montré sur la figure 5.4.4.

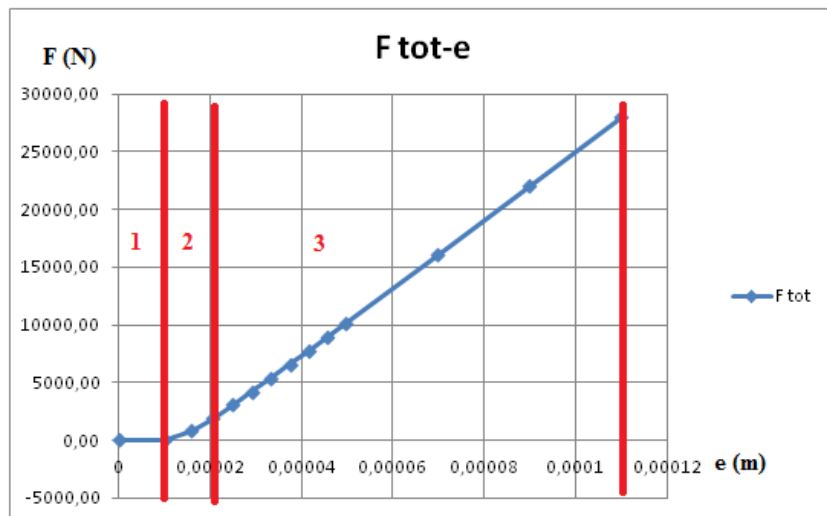


Figure 5.4.4. Représentation de e par rapport à la charge appliquée pour la plaque composite mono-recouvrement. Jeu géométrique 10 μ m

Dans la courbe représentée sur la figure 5.4.4 on peut différencier trois étapes. La première étape correspond au rattrapage du jeu géométrique. Dans une deuxième étape on peut observer la prise de contact dans laquelle la surface de contact (angle θ_0) augmente. Finalement on a la partie linéaire de la courbe dans laquelle la surface de contact tend vers le demi-cylindre.

Obtention de la raideur de contact

La pente de la partie linéaire, noté K' est directement reliée à k selon l'équation :

$$k = \frac{K'}{RL \left[\theta_0 + \frac{\sin 2\theta}{2} \right]}$$

Où R est le rayon du trou, L est l'épaisseur du recouvrement, θ_0 est l'angle maximal de contact et θ est l'angle de contact. Sur la figure 5.4.5 est représentée l'évolution de la pente en fonction de e pour déterminer le moment à partir duquel la pente est constante et ainsi identifier correctement K' .

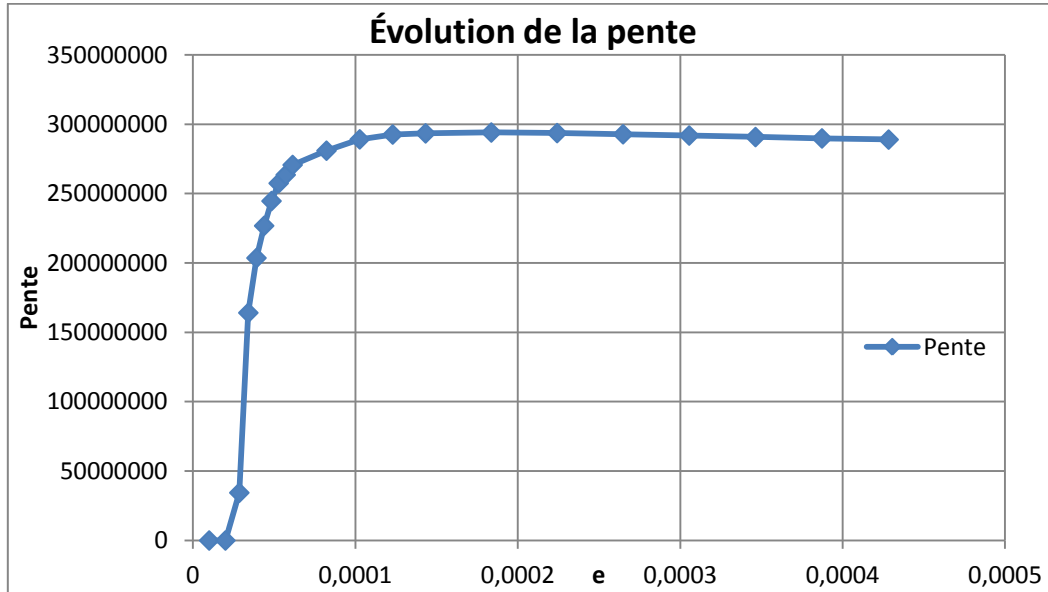


Figure 5.4.5. Evolution de la pente pour la plaque d'aluminium en fonction de e

Le tableau 5.4.1 montre les valeurs obtenues pour k à partir des simulations sans jeu.

| Configuration | Valeur de k |
|-------------------------------------------|-------------------------|
| Aluminium seul | 1.2012×10^{13} |
| Composite seul | 7.7099×10^{12} |
| Aluminium en configuration « assemblage » | 1.0919×10^{13} |
| Composite en configuration « assemblage » | 7.6883×10^{12} |

Tableau 5.4.1

Il y a un léger écart entre la configuration avec un seul substrat et la configuration « assemblage ». Cet écart est causé par la différence entre les conditions aux limites imposés et le frottement entre les plaques.

Obtention du jeu effectif

L'objectif est de trouver l'intersection de la partie linéaire de la courbe avec l'axe des abscisses. A partir des simulations éléments finis, on est capable de calculer le jeu effectif pour différents jeux géométriques dans un assemblage même si les temps de calcul sont très élevés. Dans le tableau 5.4.2 sont résumés les temps de calcul pour certaines simulations réalisées.

| Simple recouvrement | Temps (heures) | Double recouvrement | Temps (heures) |
|---------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------|----------------|
| Aluminium jeu 20 μm | 0.68 | Al. jeu 0 – Comp. jeu 0 | 9.92 |
| Aluminium jeu 100 μm | 0.48 | Al. jeu 20 μm – Comp. jeu 20 μm | 6.79 |
| Composite jeu 20 μm | 1.32 | Al. jeu 50 μm – Comp. jeu 0 | 6.03 |
| Composite jeu 100 μm | 1.16 | Al. jeu 100 μm – Comp. jeu 0 | 6.72 |

Tableau 5.4.2.

5.5- PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

On peut diviser notre étude en deux parties : les configurations avec une seule plaque et les configurations « assemblage ». Les premières ont été réalisées pour vérifier la cohérence entre les résultats analytiques et numériques. Ensuite, on a travaillé avec le modèle double recouvrement, celui qui nous intéresse. Les tableaux 5.5.1 et 5.5.2 montrent les configurations réalisées pendant l'étude.

| | | Diamètre boulon $d_b = 6,32$ mm | | |
|------------------|-----------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| | | Config. | $d_a - d_b$ (μm) | jeu géométrique (μm) |
| UNE SEULE PLAQUE | ALUMINIUM | 1 | 0 | 0 |
| | | 2 | 20 | 10 |
| | | 3 | 50 | 25 |
| | | 4 | 100 | 50 |
| | COMPOSITE | $d_b = 6,32$ (mm) | | |
| | | Config. | $d_c - d_b$ (μm) | jeu géométrique (μm) |
| | | 1 | 0 | 0 |
| | | 2 | 20 | 10 |
| | 3 | 50 | 25 | |
| | 4 | 100 | 50 | |

Tableau 5.5.1.

| | $d_b = 6,32$ (mm) | | | |
|------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| | Config. | $d_c - d_b$ (μm) | $d_a - d_b$ (μm) | jeu géométrique total (μm) |
| ASSEMBLAGE | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 20 | 0 | 10 |
| | 3 | 50 | 0 | 25 |
| | 4 | 100 | 0 | 50 |
| | 5 | 0 | 20 | 10 |
| | 6 | 0 | 50 | 25 |
| | 7 | 0 | 100 | 50 |
| | 8 | 20 | 20 | 20 |
| | 9 | 20 | 50 | 35 |
| | 10 | 150 | 150 | 150 |

Tableau 5.5.2.

La méthode de travail est toujours la même : on lance le calcul et on obtient les résultats sur Abaqus, on traite ces résultats sur Excel pour obtenir les graphiques et les valeurs du jeu effectif, ensuite, on fait le même processus avec le modèle analytique et finalement on compare les deux modèles. La figure 5.5.1 montre un exemple de comportement obtenu pour

une configuration double recouvrement avec 20 μm de jeu sur le composite et sans jeu sur l'aluminium. On voit que les courbes des deux modèles donnent les mêmes raideurs une fois que la prise de contact est faite.

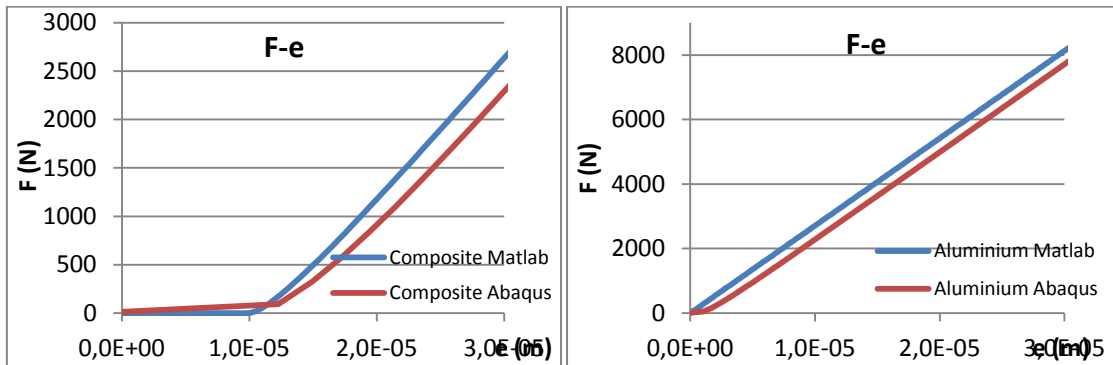


Figure 5.5.1. Représentation sur Abaqus et sur Matlab de e en fonction de la charge appliquée

Résultat obtenus pour les configurations avec une seule plaque :

Les résultats sont regroupés dans le tableau 5.5.3 pour comparer les deux modèles et conclure.

| Aluminium | $d_b = 6,32 \times 10^{-3}$ | | | | | | | |
|-----------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | Config. | $d_a - d_b$ (μm) | $(d_a - d_b) / d_b$ | j_{geom} EF (μm) | j_{eff} EF (μm) | j_{eff} AN (μm) | $j_{\text{eff}} - j_{\text{geom}}$ EF | $j_{\text{eff}} - j_{\text{geom}}$ AN |
| 1 | 0 | 0,00 ^{E+00} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 20 | 3,16 ^{E-03} | 10 | 14,13 | 12,71 | 4,13 | 2,71 | |
| 3 | 50 | 7,91 ^{E-03} | 25 | 35,18 | 31,68 | 10,18 | 6,68 | |
| 4 | 100 | 1,58 ^{E-02} | 50 | 68,76 | 62,87 | 18,76 | 12,87 | |

| Composite | $d_b = 6,32 \times 10^{-3}$ | | | | | | | |
|-----------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | Config. | $d_c - d_b$ (μm) | $(d_c - d_b) / d_b$ | j_{geom} EF (μm) | j_{eff} EF (μm) | j_{eff} AN (μm) | $j_{\text{eff}} - j_{\text{geom}}$ EF | $j_{\text{eff}} - j_{\text{geom}}$ AN |
| 1 | 0 | 0,00 ^{E+00} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 20 | 3,16 ^{E-03} | 10 | 14,05 | 12,72 | 4,05 | 2,72 | |
| 3 | 50 | 7,91 ^{E-03} | 25 | 34,9 | 31,70 | 9,9 | 6,70 | |
| 4 | 100 | 1,58 ^{E-02} | 50 | 68,5 | 62,96 | 18,5 | 12,96 | |

Tableau 5.5.3.

L'évolution du jeu géométrique et du jeu effectif en fonction jeu géométrique est tracée sur la figure 5.5.2. On peut vérifier qu'il existe une différence entre le jeu effectif et le jeu géométrique, et en plus, il existe un décalage entre les valeurs de jeu effectif obtenues avec le modèle analytique et le modèle numérique pour les deux matériaux.

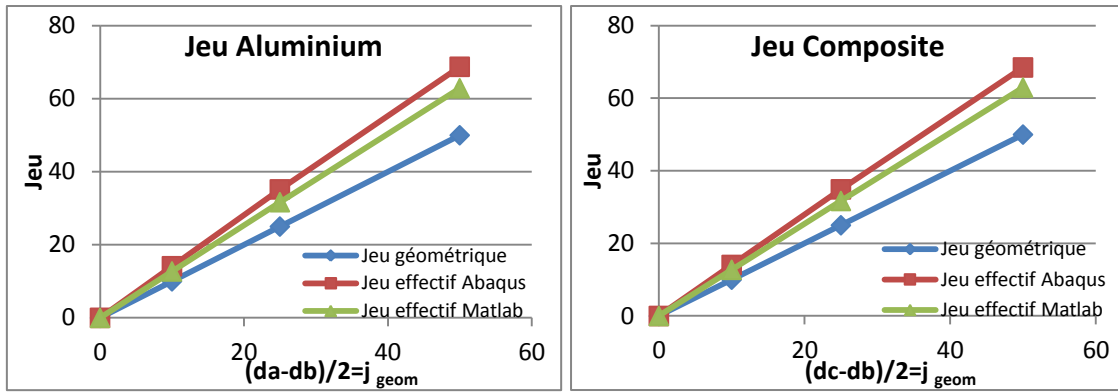


Figure 5.5.2. Comparaison du jeu géométrique et du jeu effectif obtenu avec Abaqus et avec Matlab

Ensuite, on veut trouver la relation existant entre ces différences de valeurs pour le modèle analytique et pour le modèle numérique. Pour bien représenter les données et enlever l'effet du diamètre du boulon, on a défini des paramètres adimensionnels D et J :

$$D = \frac{d_{substrat} - d_{boulon}}{d_{boulon}} = \frac{2j_{geom}}{d_{boulon}}$$

$$J = \frac{j_{eff} - j_{geom}}{d_{boulon}}$$

En représentant ces paramètres, on peut avoir une idée de la différence existant entre le modèle analytique et le modèle numérique. Un exemple est présenté dans la figure 5.5.3.

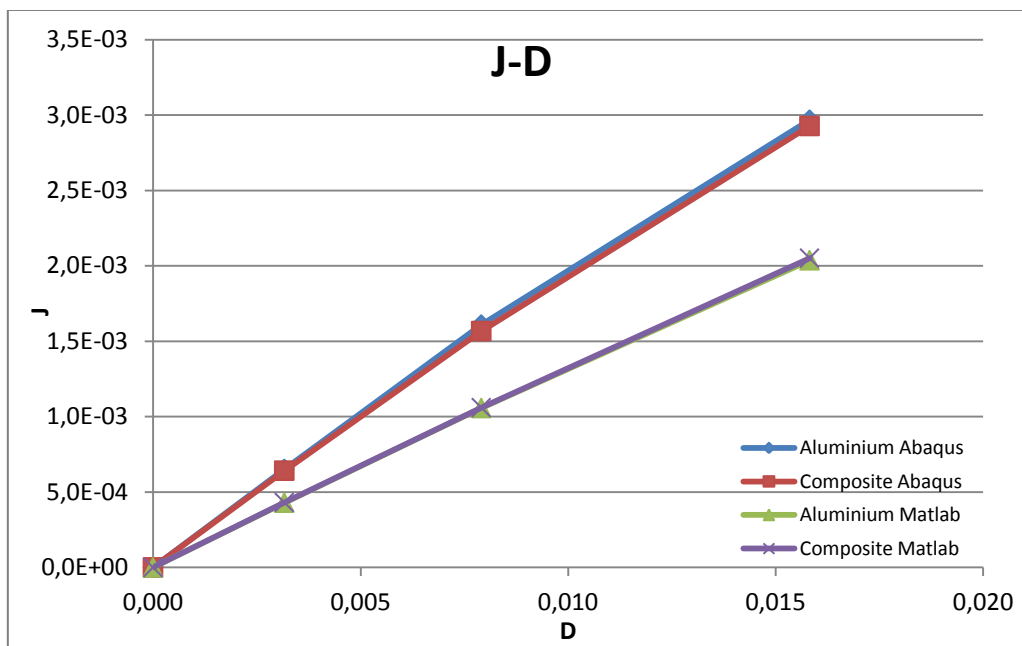


Figure 5.5.3. Représentation de la différence entre le jeu effectif sur Matlab et sur Abaqus

On voit qu'il y a une tendance quasi linéaire croissante de J par rapport à D pour les deux modèles. Cette représentation nous permet d'affirmer que la différence entre le jeu effectif et le jeu géométrique est indépendante des matériaux utilisés. Par contre, on voit qu'il existe une différence entre les deux modèles qui augmente également proportionnellement avec la valeur de D .

Résultat obtenus pour les configurations « assemblage » :

Les conditions de blocage du boulon dans la configuration substrat unique n'étant pas forcément représentative de la configuration « assemblage », des simulations sur éprouvettes double recouvrement (configuration « assemblage ») ont été réalisées pour valider les résultats sur substrat unique. Les différentes valeurs de jeu testées sont présentées dans le Tableau 5.5.2.

Tout d'abord on montre les résultats des configurations où le jeu est introduit sur une des deux plaques seulement. La figure 5.5.4 représente le jeu géométrique, le jeu effectif obtenu par le modèle numérique et le jeu effectif obtenu par le modèle analytique en fonction de D. On obtient la même tendance que dans la configuration substrat unique.

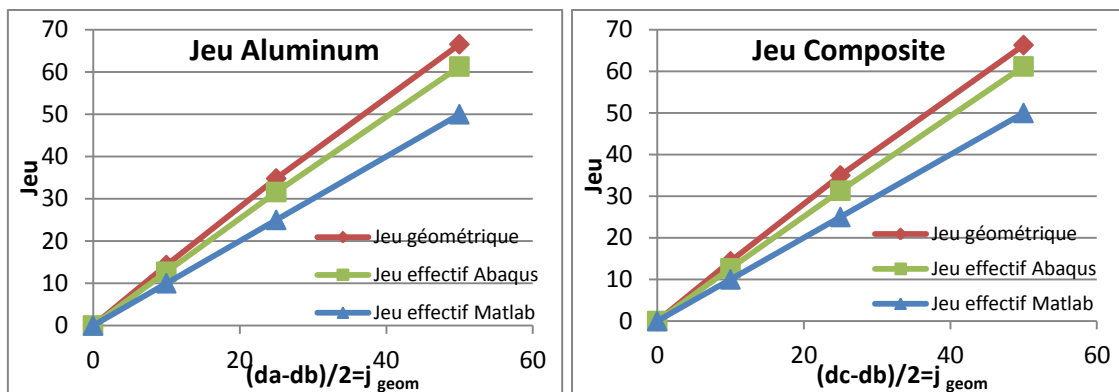


Figure 5.5.4. Comparaison du jeu géométrique et du jeu effectif obtenu avec Abaqus et avec Matlab

Si on fait la même représentation J-D que dans la configuration substrat unique, on valide les résultats et on vérifie les affirmations antérieures, mais dans ce cas-là pour le modèle double recouvrement. On voit qu'il y a quelques différences mais la tendance est la même.

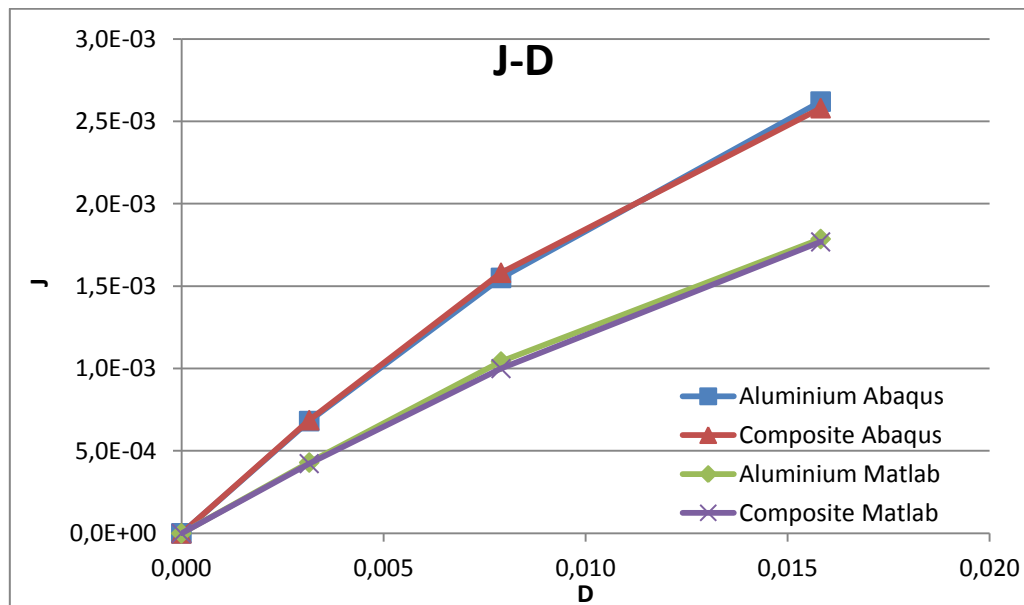


Figure 5.5.5. Représentation de la différence entre le jeu effectif sur Matlab et sur Abaqus

Finalement, on va ajouter les cas où on a introduit le jeu sur les deux plaques. On a fait trois simulations différentes avec diverses combinaisons de jeu. Par conséquent on a un ensemble

de valeurs de jeu géométrique dès 0 μm jusqu'à 150 μm . De plus, on peut obtenir la même valeur de jeu géométrique avec des configurations/combinaisons distinctes sur chaque plaque. On veut les représenter tous ensemble pour voir s'il existe une différence entre introduire le jeu sur les deux plaques ou sur une seule plaque. Les graphiques proposés sont les mêmes que ceux qu'on a utilisés dans les autres cas. Maintenant on définit les paramètres D_a et J_a tels que :

$$D_a = \frac{d_{composite} - d_{boulon}}{d_{boulon}} + \frac{d_{aluminium} - d_{boulon}}{d_{boulon}}$$

$$J_a = \frac{J_{eff} - J_{geom}}{d_{boulon}}$$

La figure 5.5.6 montre la différence entre le jeu effectif obtenu sur Matlab et sur Abaqus. On voit une bonne cohérence dans les résultats et une tendance quasi linéaire. On peut vérifier que les modèles ont le même comportement dans les configurations « substrat seul » et « assemblage ».

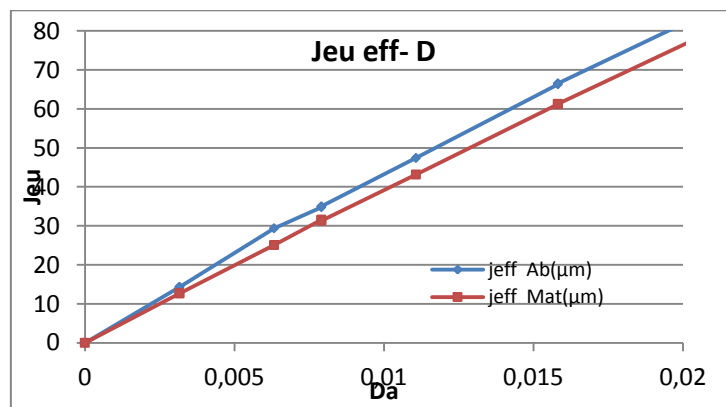


Figure 5.5.6. Différence entre le jeu effectif sur Matlab et sur Abaqus

Finalement, sur la figure 5.5.7 on a représenté le rapport existant entre le jeu effectif et le jeu géométrique pour le modèle analytique et pour le modèle numérique. On observe que pour les valeurs de jeu faibles le rapport pour le modèle analytique est autour de 1,2 et pour le modèle numérique de 1,4. On observe que pour les valeurs de jeu plus élevées (150 μm), le rapport diminue. Il faudra faire plus de simulations pour vérifier si les deux modèles convergent quand le jeu est élevé.

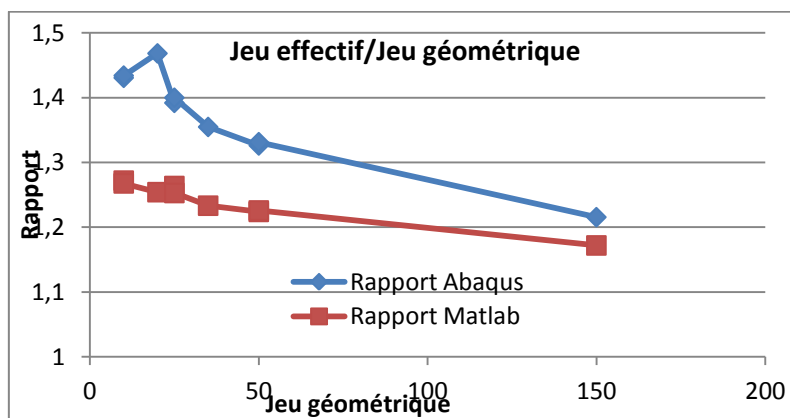


Figure 5.5.7. Rapport entre le jeu effectif et le jeu géométrique.

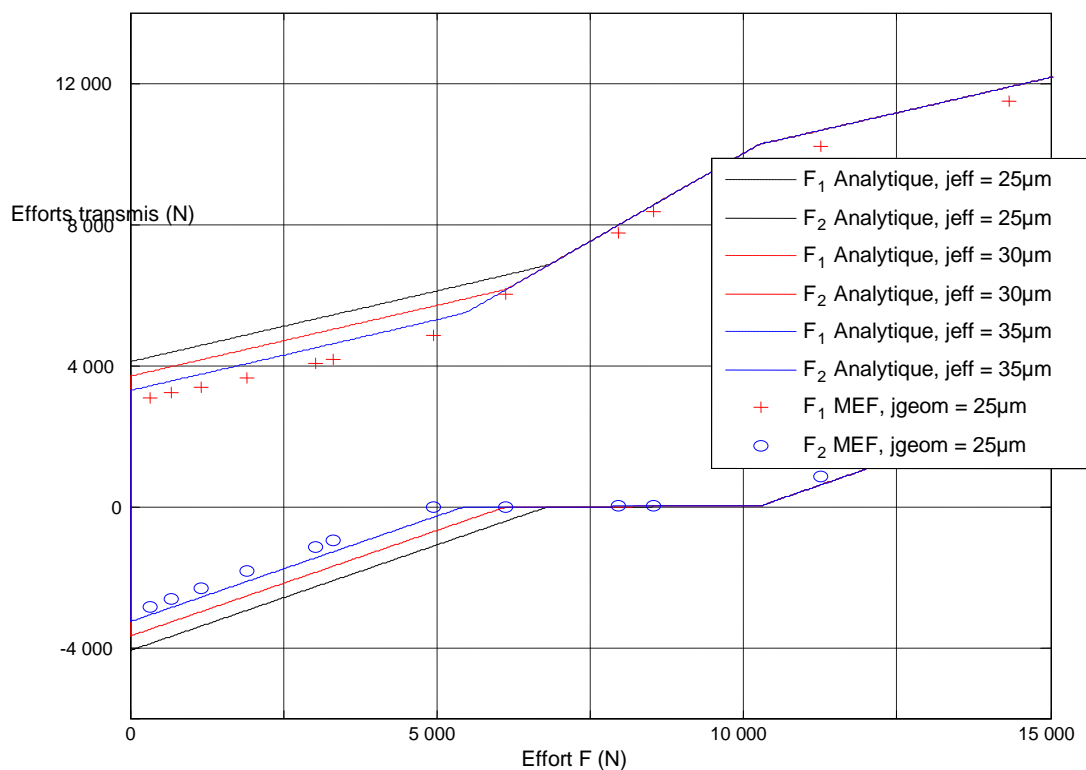


Figure 5.5.8. Correction du jeu géométrique

En appliquant les jeux effectifs obtenus pour une valeur de jeu géométrique de 25 µm, on obtient avec le modèle analytique d'assemblage double recouvrement la figure 5.5.8. La valeur de jeu effectif obtenue avec le modèle analytique est 30 µm et la valeur du jeu effectif obtenue avec le modèle numérique est 35 µm. Ces valeurs permettent de corriger la courbe initial (jeu géométrique) et d'améliorer les résultats.

Conclusion

Grâce à cette méthode on peut corriger la valeur de jeu géométrique pour obtenir un comportement proche entre le modèle numérique et analytique. On a vu que pour des valeurs faibles de jeu géométrique, il suffit d'appliquer un coefficient de correction de 1.4 pour obtenir le jeu effectif. Il n'est ainsi pas nécessaire de faire un calcul numérique dès que le jeu géométrique change. Pour valider totalement l'approche, il faudra faire une étude sur l'influence de l'épaisseur et la largeur de la plaque, ainsi que du diamètre du boulon.

6- ETUDE DE L'INFLUENCE DES DÉFAUTS GÉOMÉTRIQUES SUR LES ASSEMBLAGES MULTI-MATÉRIAUX

6.1- INTRODUCTION

Pendant la troisième partie de mon stage j'ai fait une étude sur l'influence des défauts géométriques sur les assemblages multi-matériaux. Cette étude servira de base pour une thèse qui débutera prochainement au Laboratoire I2M.

L'objectif de cette étude à long terme est d'analyser l'influence des défauts géométriques sur les assemblages composites et métal composite en considérant principalement les défauts produits pendant le perçage des alésages de fixation. Le but à court terme, est de vérifier qu'on peut modéliser ce type de défaut sur Abaqus, que les simulations fonctionnent correctement et que les résultats obtenus sont cohérents. Ensuite, il s'agira d'utiliser les outils d'analyse des transferts de charges développés dans une autre thèse pour quantifier l'effet des défauts sur le comportement des assemblages. Dans cette étude, le défaut est toujours introduit sur la plaque composite.

6.2- TYPES DE DÉFAUTS

Pendant le perçage des plaques certains défauts peuvent se produire. La précision exigée dans le domaine aéronautique est très élevée et les tolérances sont très serrées ce qui engendre des coûts et des durées de production importants. En effet, la maîtrise des défauts de perçage nécessite de contrôler finement l'usure des outils et des outillages, des réglages associés, etc. La présence de certains défauts sur un assemblage peut engendrer une perte de performance de ce dernier. Très peu de travaux se sont intéressés à la relation entre défaut géométrique et performance mécanique des assemblages composites. Par conséquent une étude sur l'influence de ces types des défauts est nécessaire. L'objectif est de déterminer le niveau maximal de défaut acceptable qui permet le bon fonctionnement de l'assemblage.

Dans l'industrie on peut trouver différents défauts de perçage. Quelques exemples sont : le défaut de perpendicularité entre l'axe du trou et la face d'appui, le défaut de forme du perçage, etc. La figure 6.2.1 montre les défauts que l'on a considérés dans cette étude : défaut de perpendicularité, forme en ellipse, en diabolo et en tonneau. Ces défauts ont été choisis relativement arbitrairement pour mettre en place la méthodologie d'analyse. Une analyse des défauts potentiellement présents et critiques dans l'industrie sera réalisée lors de la thèse qui débutera à l'automne prochain.

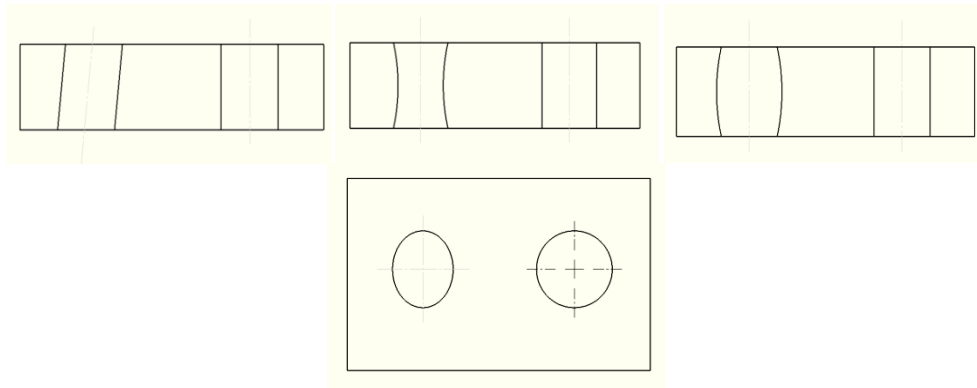


Figure 6.2.1. Défauts de perpendicularité, forme en diabolo, en tonneau et en ellipse.

6.3- MODÉLISATION

Pour analyser les défauts géométriques on a développé un modèle numérique 3-D sur Abaqus. L'assemblage considéré est pratiquement identique à celui utilisé pour étudier l'influence des défauts de positionnement sur les assemblages multi-matériaux. On considère les mêmes matériaux (comportement élastique), le même maillage, les mêmes conditions et propriétés de contact et conditions aux limites. L'explication détaillée se trouve dans le point 4.2. Les seules différences existantes sont la géométrie et les étapes de calcul.

Les épaisseurs et largeurs des substrats sont identiques mais l'assemblage comporte un seul boulon puisque les défauts étudiés sont relatifs à un seul alésage. Par ailleurs cela permet de diminuer le temps de calcul.

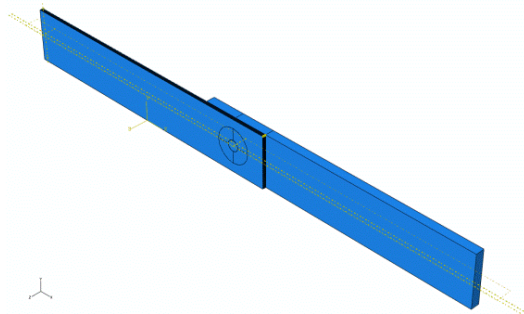


Figure 6.3.1. Modélisation 3-D de l'éprouvette

Le calcul présente deux étapes. La première étape sert à introduire le serrage du boulon et la deuxième à appliquer l'effort de traction. La figure 6.3.1 montre un exemple du modèle 3-D.

Tous les calculs lancés présentent un niveau de jeu de 20 μm et le défaut se trouve dans la plaque composite. On peut voir les configurations testées dans le tableau 6.3.1.

| Diabolo | Tonneau | Ellipse | Perpendicularité (inclinaison) |
|-------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|
| Défaut 1 μm | Défaut 1 μm | Défaut de x μm sur l'axe horizontal | 1 ^o |
| Défaut 5 μm | Défaut 5 μm | Défaut de x μm sur l'axe vertical | - |
| Défaut 10 μm | Défaut 10 μm | - | - |

Tableau 6.3.1.

Les essais réalisés avec un défaut de 1 μm servent de référence (défaut négligeable). La figure 6.3.2 montre comment les défauts ont été introduits.

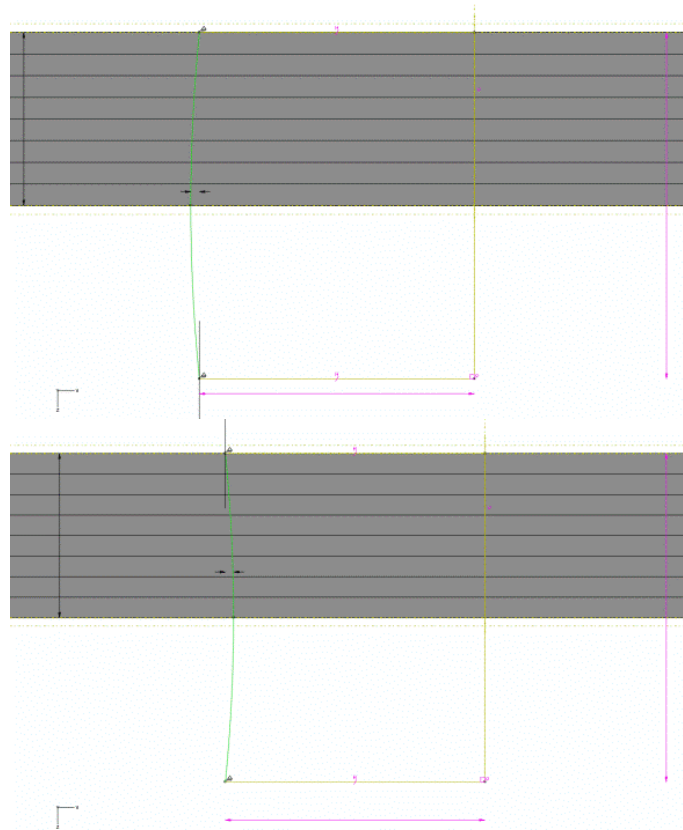


Figure 6.3.2 Esquisse de la modélisation des défauts

Dans les configurations diabolo et tonneau, on fixe les points supérieurs et inférieurs de l'arc et on ajoute le défaut en faisant varier la courbure de l'arc. On voit que le niveau de défaut qu'on peut introduire dans la configuration diabolo est limité par le jeu. Cela est la raison pour laquelle la valeur maximale introduite est de 10 μm .

L'introduction du défaut en forme d'ellipse n'est pas évidente puisqu'on peut introduire l'excentricité sur n'importe quel axe et qu'a priori le comportement ne sera pas le même. Dans cette étude on considère une ellipse avec l'axe situé parallèlement à la direction d'application de la force (défaut sur l'axe horizontal) et une autre configuration avec l'axe situé de manière perpendiculaire à la direction d'application de la force.

Enfin, l'introduction du défaut d'inclinaison rend le modèle non-symétrique. Par conséquent le temps de calcul est très élevé et nécessite de refaire le modèle.

6.4- ANALYSE DES RÉSULTATS

Le modèle numérique développé sur Abaqus donne les champs de déplacements, de déformations et de contraintes, ainsi que le champ de pression au niveau des contacts. Les résultats bruts ne sont pas très explicites et ne permettent pas d'obtenir des conclusions. Il faut traiter spécifiquement ces résultats.

On a proposé deux méthodes d'analyse. La première est un peu lourde et peu visuelle. Mais elle permet d'obtenir quelques conclusions. Elle est basée sur l'évolution des valeurs de

contraintes et de déplacements à travers l'épaisseur du trou. La seconde méthode est basée sur une analyse proposée et développée dans le cadre de la thèse d'Erwan Le Goff [11].

Dans ce document on va détailler uniquement les résultats obtenus sur les défauts de forme en « diabolo » et en « tonneau ».

Méthode 1 :

Cette méthode consiste à extraire, pour certains points, les valeurs de S11 et U1 (selon la direction d'application de la force) en fonction de la charge appliquée. Sur la figure 6.4.1 s'affichent les points sélectionnés et la nomenclature utilisée. Ces points correspondent aux plis à 0 degrés (points 2 et 3) et à 90 degrés (points 1 et 4).

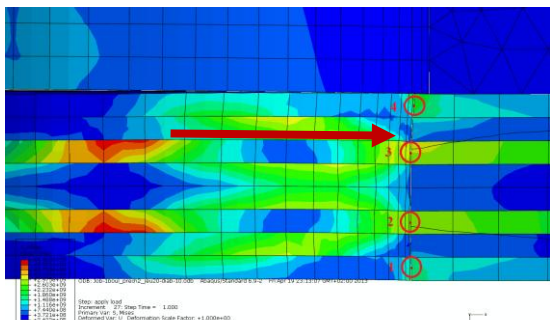


Figure 6.4.1. Points choisis pour analyser les résultats

Ainsi, on peut représenter l'évolution de S11 et de U1 en fonction de la force F appliquée sur l'éprouvette. L'anisotropie du matériau composite rend l'analyse des contraintes délicate. Les valeurs extraites étant définies dans le repère du pli (1 = sens fibre), Les valeurs correspondant aux plis à 90 degrés et celles correspondant aux plis à 0 degrés ne peuvent être comparées.

La figure 6.4.2 montre les résultats des points 1 et 4 (pli à 90 degrés) obtenus pour les 3 niveaux de défaut de forme en « tonneau ».

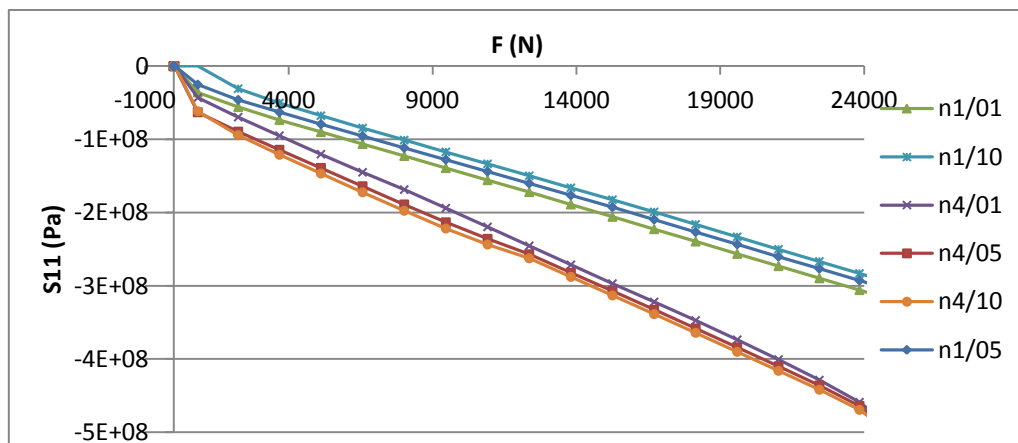


Figure 6.4.2. Evolution de S11 par rapport à la charge totale appliquée pour les points 1 et 4 pour les configurations tonneau 1 µm, 5 µm et 10 µm.

Sur ce graphique on peut différencier deux zones. La première, jusqu'à 1000 N correspond au rattrapage du jeu. Ensuite on voit un changement de pente. Cela se produit une fois que le jeu a été rattrapé. On voit que la valeur de S11 est toujours plus grande pour le point 4 que pour le point 1 et que plus grand est le défaut, plus le point 4 est chargé par rapport au point 1 à cause de la courbure introduite. Pour la configuration 10 µm, on observe qu'au début la valeur de S11 pour le point 1 est nulle et qu'une fois que le point 4 est suffisamment déformé, le point 4 commence à se charger. Notons également que même sans défaut, les plis extérieurs sont davantage sollicités en raison de la légère flexion du boulon.

La figure 6.4.3 montre les résultats des points 1 et 4 obtenus pour les 3 niveaux de défaut de forme en « diabolo ».

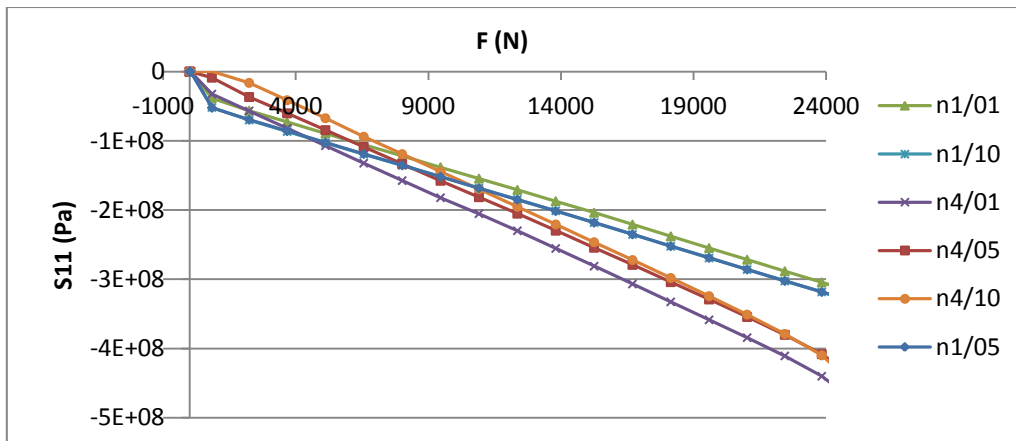


Figure 6.4.3. Evolution de S11 par rapport à la charge totale appliquée pour les points 1 et 4 pour les configurations diabolo 1 µm, 5µm et 10µm.

Sur ce graphique on observe aussi deux pentes différentes. Au début, le point 1 est plus chargé que le point 4 à cause du défaut introduit, mais quand le niveau de charge augmente, le boulon fléchit et le point 4 devient plus chargé que le point 1.

Cette méthode est lourde parce que pour chaque essai il faut extraire les contraintes en chaque point et pour chaque incrément de calcul. En plus, les résultats ne sont pas faciles à interpréter en raison de la stratification. Cela est la raison pour laquelle on a proposé une seconde méthode.

Méthode 2 :

La méthode développée pendant la thèse d'Erwan Le Goff[7] permet de comparer les transferts de charge au niveau du contact boulon alésage. Elle repose sur la définition d'un paramètre local adimensionné de transfert de charge :

$$\lambda^+(\theta) = \frac{td}{F} (\underline{\sigma} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{x} = -\frac{td}{F} (\sigma_{xx} \cos \theta + \sigma_{xy} \sin \theta)$$

En intégrant ce paramètre sur l'épaisseur du stratifié, on peut tracer le transfert de charge autour du trou (en fonction de θ) de manière adimensionnelle. Pour des raisons de temps, cette méthode n'a pas pu être exploitée pendant ce stage, mais elle pourra être mise en œuvre à partir des simulations effectuées lors du stage.

6.5- CONCLUSION

Finalement on peut affirmer que le modèle numérique développé est capable de représenter certains défauts géométriques sans qu'il y ait de problème de maillage ou de convergence.

Par contre, l'exploitation complète et méthodique des résultats n'ayant pas encore été réalisée pour l'instant, on ne peut pas conclure sur l'influence des défauts géométriques.

7- CONCLUSION DU STAGE

Pendant les six mois de stage de fin d'études j'ai eu une première approche du monde de la recherche. J'ai développé mon travail sur l'étude des assemblages hybrides dans l'aéronautique et spécialement sur l'influence des défauts dans des assemblages. J'ai eu l'opportunité de valider un modèle développé par une thèse et en plus de proposer un petit modèle sur la prise de contact et l'influence du jeu sur les assemblages. Les résultats obtenus sont positifs et laissent une porte ouverte et un chemin à suivre pour une étude future. Pendant cette période, j'ai appris l'importance d'avoir une méthode de travail et aussi de la rigueur nécessaire afin d'obtenir et d'analyser les résultats. En plus, personnellement je n'écarte pas la possibilité de dédier une période de ma vie à la recherche.

ANNEXE 1

Le modèle analytique utilisé pour étudier l'influence des défauts sur les assemblages multi-matériaux a été développé par Julie Lecomte, doctorante de l'I2M.

Son modèle sert à comprendre et à expliquer les phénomènes physiques impliqués dans les assemblages soumis à une charge à traction. La thèse essaie de répondre aux besoins de l'entreprise ASTF qui veut augmenter ses connaissances sur le comportement des matériaux composites dans les assemblages.

Pendant mon stage j'ai travaillé avec Julie pour l'aider à valider le modèle et à obtenir des conclusions. Une grande partie de mon travail est basée sur son étude. On peut trouver le détail du modèle analytique et les équations dans la référence [8]. **Le contenu de cette annexe est entièrement repris de cet article.**

La modélisation s'appuie sur le modèle 1-D proposé par Paroissien et al. [9-10]. Elle divise le substrat en $n + 1$ portions pour n boulon et considère chaque portion comme un ressort.

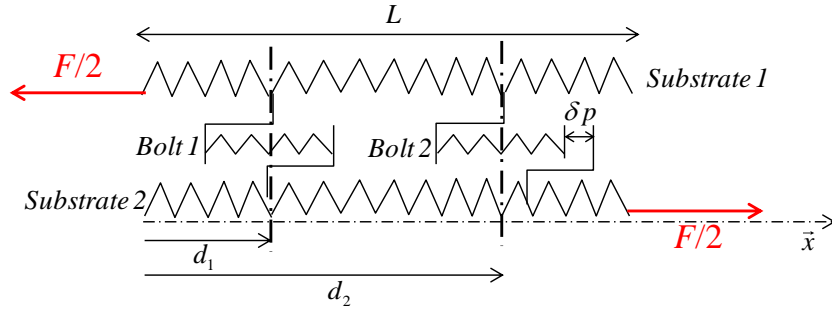


FIG. 1 - Schéma de principe du modèle analytique

Puisque l'assemblage comporte un plan de symétrie, on ne modélise que la moitié de l'ensemble. Les efforts entrant en jeu dans l'assemblage sont représentés FIG. . La charge F_i transmise par le boulon i est caractérisée par le taux de transfert de charge τ_i défini comme suit :

$$F_i = \tau_i F = k_i (\delta p_i + u_i^{(1)}(d_i) - u_i^{(2)}(d_i)) \quad (1)$$

Où k_i est la raideur du boulon i , $u_i^{(1)}(d_i)$ et $u_i^{(2)}(d_i)$ sont les déplacements des portions i des deux substrats, et δp_i le défaut de positionnement au niveau du boulon i . Dans chaque portion i du substrat 1, l'équilibre mécanique donne :

$$\frac{dN_i^{(1)}(x)}{dx} = 0, \text{ avec } i \in [1, n+1], \quad (2)$$

Où $N_i^{(1)}(x)$ est la moitié de l'effort de traction dans le substrat 1 dans la portion i . L'équilibre de l'assemblage donne l'équation suivante :

$$N_i^{(1)}(x) + N_i^{(2)}(x) = F/2, \text{ avec } i \in [1, n+1], \quad (3)$$

Où $N_i^{(2)}(x)$ est l'effort de traction dans le substrat 2, ce qui donne :

$$N_i^{(2)}(x) = F/2 - N_i^{(1)}(x). \quad (4)$$

On complète les équations par l'équilibre des substrats en $x = d_i$ donné par :

$$N_i^{(1)} - N_{i-1}^{(1)} = F_{i-1}, \text{ avec } i \in [2, n+1] \quad (5)$$

Puisque l'on considère que les portions des substrats se comportent comme des ressorts, on écrit :

$$E_1 S_1 \frac{du_i^{(1)}}{dx} = N_i^{(1)}, \text{ avec } S_1 = wh_1 \quad (6)$$

Où E_1 est le module d'Young du substrat 1. En intégrant l'équation (6), on obtient la fonction de déplacement de la portion i du substrat 1 en fonction de x :

$$u_i^{(1)}(x) = \frac{N_i^{(1)}}{E_1 S_1} (x - d_i) + u_i^{0(1)} \quad (7)$$

Où $u_i^{0(1)}$ est une constante. De la même manière, on trouve :

$$u_i^{(2)}(x) = \frac{F - N_i^{(1)}}{2E_2 S_2} (x - d_i) + u_i^{0(2)}, \text{ avec } S_2 = wh_2 \text{ et } i \in [1, n+1], \quad (8)$$

Où E_2 est le module d'Young du substrat 2 et $u_i^{0(2)}$ est une constante. La continuité des déplacements donne :

$$u_{i+1}^{(1)}(d_i) = u_i^{(1)}(d_i), \text{ avec } i \in [1, n] \quad (9)$$

En reportant (9) dans (7), on obtient :

$$u_i^{0(1)} - u_{i+1}^{0(1)} + \frac{N_{i+1}^{(1)}}{E_1 S_1} (d_{i+1} - d_i) = 0, \text{ avec } i \in [1, n] \quad (10)$$

La combinaison des équations (4) et (1) donne :

$$N_i^{(1)} - N_{i-1}^{(1)} = k_{i-1} (\delta p_{i-1} + u_{i-1}^{0(1)} - u_{i-1}^{0(2)}), \text{ avec } i \in [2, n+1] \quad (11)$$

De la même façon que pour obtenir l'équation (10), les équations (8) et (9) donnent :

$$u_i^{0(2)} - u_{i+1}^{0(2)} + \frac{F - N_{i+1}^{(1)}}{2E_2 S_2} (d_{i+1} - d_i) = 0, \text{ avec } i \in [2, n+1] \quad (12)$$

Les conditions aux limites sont les suivantes :

$$u_1^{0(2)} = 0 \quad (13) \quad N_1^{(1)} = 0 \quad (14) \quad \text{et } N_{n+1}^{(1)} = F/2 \quad (15)$$

Pour un assemblage à deux boulons, on obtient un système de 6 équations à 6 inconnues, les inconnues étant les efforts dans les substrats et leurs déplacements dans la longueur de recouvrement pour un effort donné.

ANNEXE 2

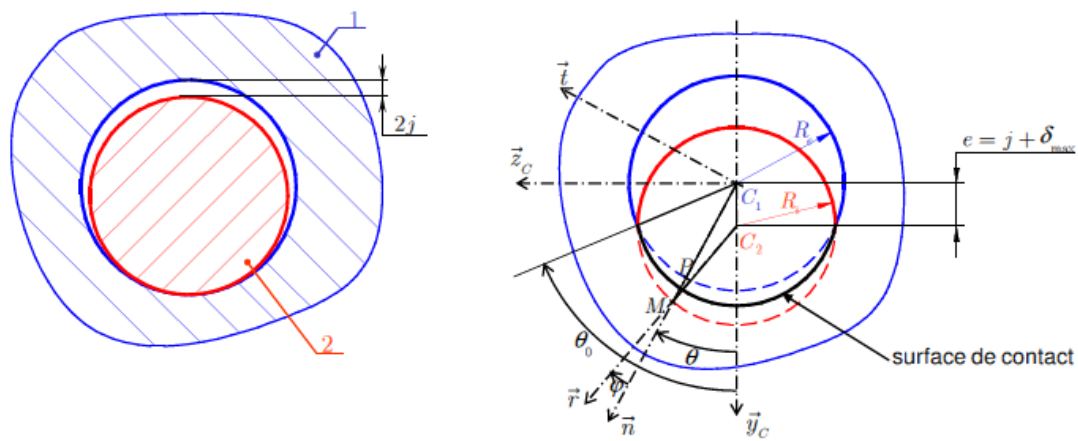
Le modèle analytique développé pour l'étude de l'influence du jeu sur le contact dans les assemblages et pour la prédiction du comportement physique de l'assemblage, s'appuie sur un modèle de répartition de pression non uniforme autour du contact. A partir de ce modèle et en développant les équations sur Matlab, on a créé un modèle qui permet de caractériser les contacts avec jeu. En plus il permet d'obtenir la raideur du contact et du boulon. Finalement il est validé par un modèle éléments finis 3-D sur Abaqus.

On peut caractériser le contact trou – boulon comme un contact superficiel avec une répartition de pression non uniforme puisque les surfaces en contact sont cylindriques. Ce modèle de pression s'appuie sur le principe que la pression autour du contact est liée à l'écrasement provoqué par la déformation des surfaces de contact. De plus il considère que les pièces en contact sont indéformables loin des surfaces de contact. Cela donne l'équation (1).

$$P = k\delta^a \tag{1}$$

Où P est la pression du contact, K est la raideur du contact, δ est l'écrasement provoqué par la déformation des surfaces et a est un coefficient expérimental qui prend la valeur $a = 1$ pour les matériaux métalliques et $a > 1$ pour les matériaux plastiques. L'équation (1) est la base à partir de laquelle on développe le modèle analytique.

Détermination du champ pression pour le cas « contact cylindrique avec jeu » :



On veut déterminer la relation existante entre le paramètre e et l'angle de contact θ . Le jeu radial introduit est appelé j. On définit e à partir de l'équation [2].

$$e = j + \delta_{max} \tag{2}$$

La fermeture du triangle C_1C_2M donne :

$$\overline{C_1C_2} + \overline{C_1M} + \overline{MP} + \overline{PC_1} = \vec{0} \tag{3}$$

$$e\vec{y}_c + R_i\vec{r} - (\delta + R_e)\vec{n} = \vec{0} \tag{4}$$

$$R_e = R_i + j \quad [5]$$

La combinaison de [4] et [5] donne :

$$e\bar{y}_c + R_i\bar{r} - (\delta + R_i + j)\bar{n} = \bar{0} \quad [6]$$

Avec:

$$\bar{y}_c = \cos\theta\bar{n} - \sin\theta\bar{t} \text{ et } \bar{r} = \cos\varphi\bar{n} + \sin\varphi\bar{t} \quad [7] \text{ et } [8]$$

En projetant sur \bar{n} et \bar{t} ;

$$e \cos\theta + R_i \cos\varphi - (\delta + R_i + j) = 0 \quad [9]$$

$$-e \sin\theta + R_i \sin\varphi = 0 \quad [10]$$

Au vu de l'équation [10] ou du schéma, l'angle φ reste petit car R_i est largement supérieur à $(j + \delta_{max})$, donc on peut prendre les approximations suivantes :

$$\cos\varphi = 1 \text{ et } \sin\varphi = \varphi$$

Les équations [9] et [10] deviennent :

$$e \cos\theta - (\delta + j) = 0 \quad [9']$$

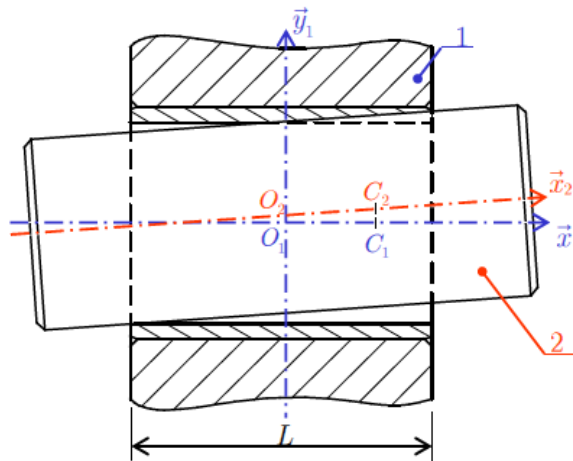
$$-e \sin\theta + R_i\varphi = 0 \quad [10']$$

Avec la condition $\delta = 0$ pour $\theta = \theta_0$ on obtient :

$$\cos\theta_0 = \frac{j}{e}$$

$$\delta = j \left(\frac{\cos\theta}{\cos\theta_0} - 1 \right) = e \cos\theta - j$$

Pour obtenir le champ de pression, il faut relier l'écrasement aux actions mécaniques globales appliquées sur le contact.



Résultante :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \iint_S \vec{dF}_{1 \rightarrow 2} = \int_{-l/2}^{l/2} \vec{dFW}_{2 \rightarrow 1} dx \quad [11]$$

Où $\vec{dFW}_{2 \rightarrow 1}$ est la résultante élémentaire pour chaque section.

En supposant qu'il n'y pas de frottement, on a :

$$\vec{dW}_{2 \rightarrow 1} = R \int_{-\theta_0}^{\theta_0} p \vec{n} d\theta = R \int_{-\theta_0}^{\theta_0} k(e \cos \theta - j)^a (\cos \theta \vec{y} + \sin \theta \vec{z}) d\theta \quad [12]$$

Dans notre cas, $a = 1$, par conséquent :

$$\vec{dW}_{2 \rightarrow 1} = Rk \left[\left(\theta_0 + \frac{\sin 2\theta_0}{2} \right) e - 2j \sin \theta_0 \right] \vec{y} \quad [13]$$

A partir de ces équations on a créé el programme Matlab qui permet d'obtenir tous les résultats.

Pour créer le programme Matlab on a discrétisé l'angle de contact et on obtient pour chaque θ_i une valeur d'écrasement δ . Le programme calcule pour une valeur du paramètre e donnée la force résultant. C'est-à-dire, dans notre cas, la force de traction F avec laquelle on tire sur la plaque. En plus le programme sort les valeurs d'écrasement maximal δ_{\max} et de la pression maximale p_{\max} . Les données d'entrée sur le programme sont : la valeur de k qu'on détermine avec un essai sur Abaqus, et les paramètres géométriques.

Un autre programme permet d'obtenir l'évolution de la force totale par rapport à e . Dans ce cas-là, on introduit une valeur d' e , on discrétise et on obtient les valeurs de F pour chaque e_i . Les données d'entrée sont la valeur de jeu radial et la valeur d' e maximal qu'on veut.

Les deux programmes sont reportés ci-dessous.

**% fonction qui calcule la force transmise
par un contact cylindrique en fonction du
jeu et du déplacement radiale**

function [F,pmax,teta0,delta] = jeu(j,e)

%Epaisseur de la plaque

long = 4e-3;

%Discrétisation de la longueur

n = 100;

%Diamètre boulon

dboul = 6.32e-3;

%Jeu radial

% j = 0;

%Coefficient de la loi d'écrasement en
Pa/m

k = 7.6883e12;

a = 1;

%Diamètre trou

dtrou = dboul + 2*j;

% déplacement radiale (m)

% e = 20e-6;

% Calcul de l'angle teta0 teta0 = acos(j/e);

%Pas d'intégration angulaire

```

pas = teta0/n;
% Discrétisation sur l'angle teta
teta = [-teta0:pas:teta0];
delta = zeros(teta0/(pas+1))
%Calcul de delta
for ii = 1 : length(teta)
delta(ii) = (e*cos(teta(ii))-j);
p(ii)=k*delta(ii); end
%Calcul de la force
W = 0
for ii = 1 : length (teta)
W= W +
sum((dtrou/2)*k*(cos(teta(ii)).*(e*cos(teta
(ii))-j))*pas);
end
F = W*long;
% calcul de l'écrasement maxi en m
deltamax = max(e-j,0);
% calcul de la pression maxi en Pa
pmax = k*deltamax;

```

% fonction qui calcule la force transmise par un contact cylindrique en fonction du jeu radial et du déplacement radial

```

e= [1e-22:0.0000001:0.0002]
F = [];
teta0 = [];
for ii = 1 : length (e)
[Fii,pmax,teta,delta] = jeu(50E-6,e(ii));
F = [F,Fii];
teta0 = [teta0,teta];
end
plot (e,F);

```

9- BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Bois, H. Wargnier, J.-C. Wahl, and E. Le Goff, "An analytical model for the strength prediction of hybrid (bolted/bonded) composite joints," *Composite Structures*, vol. 97, pp. 252–260, 2013.
- [2] M. A. McCarthy, C. T. McCarthy, V. P. Lawlor, and W. F. Stanley, "Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: Part I - Model development and validation," *Compos. Struct.*, vol. 71, no. 2, pp. 140–158, 2005.
- [3] C. T. McCarthy and M. A. McCarthy, "Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: Part II—effects of bolt-hole clearance," *Composite Structures*, vol. 71, no. 2, pp. 159–175, Nov. 2005.
- [4] V. P. Lawlor, M. A. McCarthy, and W. F. Stanley, "An experimental study of bolt-hole clearance effects in double-lap, multi-bolt composite joints," *Compos. Struct.*, vol. 71, no. 2, pp. 176–190, 2005.
- [5] C. T. McCarthy, M. A. McCarthy, and V. P. Lawlor, "Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole clearances," *Compos Part B: Eng*, vol. 36, no. 4, pp. 290–305, 2005.
- [6] C. T. McCarthy and P. J. Gray, "An analytical model for the prediction of load distribution in highly torqued multi-bolt composite joints," *Composite Structures*, vol. 93, no. 2, pp. 287–298, Jan. 2011.
- [7] D. Gay (2005). *Matériaux composites*. Paris : Lavoisier, 663 p.
- [8] J. Lecomte, C. Bois, H. Wargnier, J.-C. Wahl, A. Bautista, « Influence des défauts géométriques sur le comportement des assemblages boulonnés métal-composite, » 21^{ème} Congrès Français de Mécanique.
- [9] E. Paroissien, "Contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés) - Application aux jonctions aéronautiques," Université Toulouse III, 2006.
- [10] E. Paroissien, M. Sartor, and J. Huet, "Joints Applied to Aeronautic Parts: Analytical One-Dimensional Models of a Single-Lap Joint," in *Trends and Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II*, Springer, 2007, pp. 95–110.
- [11] E. Le Goff, "Etude des transferts de charge dans les composites stratifiés perforés, application aux renforcements des alésages," Université Bordeaux 1, 2013.