

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

THESE DE DOCTORAT LMD

Spécialité: Génie Mécanique

Option : Comportement mécanique des matériaux et des structures

Présentée par : **MERABBI Fouzia**

Intitulée

**Optimisation multi objectif des facteurs d'influence sur la
performance et fiabilité des assemblages composites hybrides**

Présentée devant le jury composé de :

Pr. RefassiKaddour :	Professeur (UDL Sidi Bel-Abbès)	<i>Président</i>
Pr. Lousdad Abdelkader	Professeur (UDL Sidi Bel-Abbès)	<i>Directeur de Thèse</i>
Pr. Elajrami Mohamed	Professeur (UDL Sidi Bel-Abbès)	<i>Examineur</i>
Dr. Ghazi Abdelkader	Maître de Conférences A (Université de Mascara)	<i>Examineur</i>
Dr. Amirat Mohamed	Maitre de Conférences A (U Ain Témouchent)	<i>Examineur</i>
Dr. SahliAbderahmane	Maître de Conférences A (UDL Sidi Bel-Abbès)	<i>Invité</i>

Soutenue le : 25 / 05 / 2021

*Laboratoire Mécanique des Structures et des Solides (LMSS)
Université de Sidi Bel-Abbès - Faculté de Technologie*

REMERCIEMENTS

- Je tiens à remercier tout particulièrement :

Mon Encadreur Professeur. **LOUSDAD** Abdelkader **du** Département de Génie Mécanique de la faculté de Technologie de l'Université de Sidi Bel-Abbes pour m'avoir guidé tout au long de mon travail, pour sa contribution à ma formation et l'aide apportée pour la réalisation de cette thèse de Doctorat. C'est grâce à ses qualités humaines et scientifiques que j'ai pu continuer et mener à bien ces travaux de recherches. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

- J'adresse mes remerciements les plus sincères au Professeur **REFASSI Kaddour** du Département de Génie Mécanique de la Faculté de Technologie de l'Université de Sidi Bel-Abbes d'avoir accepté la Présidence du Jury de cette Thèse de Doctorat.

Mes remerciements vont également :

- Au Professeur **ELAJRAMI Mohamed** du Département de Génie Mécanique de la Faculté de Technologie de l'Université de Sidi Bel-Abbes.
 - Au Dr. **GHAZI Abdelkader** Maître de conférences A de l'Université de Mascara
 - Au Dr. **AMIRAT Mohamed** Maître de conférences A du Centre d'Ain Témouchent
- pour l'intérêt qu'ils ont porté à l'évaluation de ce travail et pour avoir accepté de faire partie de mon Jury.

- je remercie ma famille surtout ma mère et mes amis pour leur support et leurs encouragements lors de mes études. Je remercie principalement mon époux **BENATTOU** pour son soutien au quotidien.
- Je tiens à remercier vivement Dr **SAHLI Abderahmane** Maître de Conférences A du Département de Génie Mécanique de la Faculté de Technologie de l'Université de Sidi Bel-Abbes pour son soutien scientifique et ses aides précieuses pour la réalisation de ce travail de Recherche.
- Un grand merci à tous mes collègues, Enseignants, Responsables et Doctorants (es) au sein du département de Génie Mécanique de la Faculté de Technologie de l'Université de Sidi Bel-Abbes ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à la réalisation de ce travail de recherche..
- A toutes les autres personnes qui m'ont aidé dans mes études et qui ne sont pas mentionnées dans ces lignes, merci.

Doctorante: F. Merabbi

Résumé

La minimisation du poids étant un objectif primordial pour l'industrie de l'aéronautique et de l'automobile, les matériaux composites sont des éléments importants de la conception des composantes mécaniques puisqu'ils possèdent une résistance élevée par rapport à leur masse. Lorsque ceux-ci sont utilisés afin de concevoir des structures complexes, il est souvent impossible de les concevoir en une seule pièce, ce qui nécessite l'utilisation de joints. Ces joints introduisent des discontinuités dans la répartition des contraintes à l'intérieur des composantes et sont souvent des sites de concentration de contraintes. Par conséquent, ils peuvent limiter les performances d'une structure, en plus d'en augmenter la masse de façon significative suite à l'utilisation d'éléments d'assemblages mécaniques tels que des boulons ou des rivets. C'est pourquoi les joints collés sont de plus en plus populaires car ceux-ci sont beaucoup plus légers que les joints boulonnés ou rivetés en plus d'être souvent plus rigides. Malheureusement, il est très difficile d'inspecter un joint collé pour en identifier les défauts car la présence de fissures dans l'adhésif ne peut être observée à l'œil nu. C'est pourquoi, en mécanique, ce type de joints n'est pas accepté pour des applications structurales par les autorités de certification. Pour pallier à ce problème, l'utilisation de joints hybrides, c'est-à-dire des joints utilisant un adhésif et des éléments de fixations mécaniques, sont de plus en plus favorables. Par contre, ces joints sont souvent très peu optimisés suite à un manque de connaissances des interactions entre les méthodes d'assemblages utilisées.

L'objectif principal de ce travail est de proposer une nouvelle méthodologie de conception des joints hybrides. Pour ce faire, des outils d'analyses performants comme les Algorithmes Génétiques (AG) et les plans d'expériences (PE) permettant d'améliorer la compréhension du comportement des joints hybrides lorsque soumis à un effort externe ont été mis en place.

Les résultats obtenus à partir des approches utilisées sont en bonne concordance avec ceux obtenus par des études théoriques et expérimentales trouvés dans la littérature.

Mots clés : Structure Composite, Adhésif, Boulon, Assemblage Composite Hybride, Algorithme, Génétique, Plan d'Expérience.

Abstract

The weight minimization is an objective of a primary concern in aeronautics and automobile industries. The composite materials are important elements in the design of mechanical components since they have a higher resistance with respect to their mass. When these materials are used in the design of complex structures it is often impossible to design them in one part thus it requires the use of joints.

These joints introduce discontinuities in the stress distributions inside the components and are often stress concentration sites. Consequently they may compromise the performance of the structure and moreover they result in a significant increase of the mass due to the use of mechanical assembly elements such as bolts or rivets. That is why the bonded joints are more preferred due to their lighter weight than the bolted or riveted joints and are often more rigid. Unfortunately it is too difficult to inspect a bonded joint in order to identify the flaws since the cracks inside the adhesive cannot be observed with the naked eye. This is why in mechanics this type of joints is not accepted for structural applications by the Certification Authorities. In order to overcome this problem, the use of hybrid joints i.e. the use of adhesive and mechanical assembly elements are more and more favorable. However, these type of joints are less optimized due to the lack of a better understanding of the interactions between the coupled assemblies methods used.

The main objective of this work is to propose a new design methodology of hybrid joints. In order to carry this, performing and robust analysis tools such as Genetic Algorithm (GA) and Design of Experiments (DOE) are used since they allow improving and better understanding of the behavior of hybrid joints when subjected to external loads. The results obtained from the approaches used are in good agreement with those obtained from theoretical and experimental studies found in the literature.

Keywords: Composite structure, Adhesive, Bolt, Hybrid composite joint, Genetic Algorithm, Design of Experiments Multi objective Optimization.

الملخص

يعتبر تقليل الوزن الهدف الأساسي في صناعة الطيران والسيارات فالمواد المتكونات عناصر مهمة في انجاز القطع الميكانيكية لأنها تتمتع بمقاومة عالية مقارنة مع المواد الأخرى وكتلة ضعيفة. عند استخدامها في تصميم هياكل معقدة، غالبًا ما يكون من المستحيل استعمالها في قطعة واحدة، مما يتطلب استخدام عناصر تجميع (اللواب و البراشم) وهذا يؤدي لانقطاع داخل المكونات وغالبًا ما تكون مواقع لتركيز الإجهادات. هذا هو السبب في أن استعمال الغراء أصبح أكثر شيوعًا لأنها كذلك أخف بكثير بالإضافة إلى كونها أكثر صلابة. لكن لسوء الحظ، من الصعب جدًا فحص تجميعات ملصقة لتحديد العيوب، لأن وجود تشققات في المادة اللاصقة لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة.

تتناول هذه الأطروحة اعتماد مناهج التحسين متعددة الأهداف خلال مراحل عملية التصميم بالتجميعات للأمان العالي و الموثوقية والأداء. تناول البحث مشكلة التركيبات المختلطة يعني تجميعات تستعمل فيها الحلول التكنولوجية الغراء واللواب (مجمعة بلواب وملصقة بغراء في آن واحد) للهياكل. الهدف الرئيسي هو تحسين العوامل المؤثرة باستخدام كل من الخوارزميات الجينية (GA) وتصميم التجارب (EP) لتحسين الأداء الميكانيكي لهذا النوع من التجميعات. النتائج التي تم الحصول عليها من المناهج المستخدمة تتوافق بشكل جيد مع تلك التي تم الحصول عليها من خلال الدراسات النظرية والتجريبية الموجودة في الأطروحات العلمية في العالم.

الكلمات الدالة: المتكونات، الغراء، اللواب، التركيبات المختلطة، الخوارزميات الجينية (GA)، تصميم التجارب (EP).

Liste des figures

Figure I.1 : Exemples de joints collés.....4

Figure I.2 : Contraintes principales dans un joint hybride5

Figure I.3 : Déformations dans un joint hybride à recouvrement simple soumis à un effort en traction.....6

Figure 1.4 : Influence de la présence d'un jeu radial entre la tige du boulon et son trou dans un joint hybride.....7

Figure I.5 : Comparaison des courbes force/déformation d'un joint boulonné avec un jeu radial nul.....7

Figure I.6 : Comparaison des courbes force/déformation d'un joint hybride et d'un joint collé (Kelly, 2006).....8

Figure I.7 : Contrainte de pelage dans l'adhésif suivant la direction longitudinale d'un joint à recouvrement simple.....10

Figure I.8 : Contrainte de cisaillement dans l'adhésif suivant la direction longitudinale d'un joint à recouvrement simple.....11

Figure I.9 : Mode de défaillance statique des joints boulonnés en matériaux composites :
a) Rupture en traction b) Rupture en cisaillement c) Rupture par clivage d) Matage (Shivashankaret Vijayarangan, 2005).....13

Figure I.10 : Mode de défaillance statique des joints collés en matériaux composites lorsque soumis à un chargement dans le plan du joint : a) Rupture cohésive de l'adhésif b) Rupture inter faciale c) Rupture mixte d) Défaillance du substrat (Kweon et al, 2006).....13

Figure I.11 : Courbe contrainte-déformation d'un joint hybride jusqu'à sa défaillance (Lee et al, 2010).....14

Figure I.12 : Configuration du joint hybride avec renforts proposée par Kumar et al. (1989).....17

Figure II.1 : Géométrie et notations de la jonction de Lunsford.....23

Figure II.2 : Le modèle étudié Kelly(2006).....28

Figure II.3 : Les conditions au limites de l'assemblage.....29

Figure II.4 : Modélisation de l'assemblage.....31

Figure II.5 : Comparaison entre la courbe contrainte/déformation obtenu par KELLY (2005) et celle du modèle numérique.....32

Figure II.6 : Déformations plastiques de la couche adhésive (avec la Pliogrip).....33

Figure II.6(b) : Contraintes des substrats en simple cisaillement.....34

Figure II.6(c) : Contraintes des substrats en matage.....34

Figure II.6(d) : Contraintes des substrats en pelage.....	34
Figure II.7 : Le modèle étudié (PAROISIEN 2006).....	35
Figure II.8 : Les conditions aux limites de l'assemblage.....	37
Figure II.9 : Modélisation de l'assemblage.....	38
Figure II.10 (a) : Comparaison entre la courbe contrainte/déformation obtenu par PAROISIEN (2006) et celle du modèle numérique	38
Figure II.11 (a) : Contrainte-longitudinale (S12).....	39
Figure II.11 (b) : Déformation totale du joint.....	39
Figure III-1 : Problème d'optimisation.....	47
Figure III-2 : Illustration des méthodes à direction de descente, fonction bi-extrema ($y = x^4 - 12x^3 + 47x^2 - 60x$), minimum global x_g en $x = 1$ et minimum local x_l en $x \approx 4.6$	51
Figure III.3 : Organigramme d'un algorithme à stratégie d'évolution.....	53
Figure IV.1(a) : Optimum pour $f=1250N$	73
Figure IV.1(b) : Le facteur le plus influent.....	73
Figure IV.2 : Optimum pour $f=8750N$	74
Figure IV.3 : Optimum pour $f=15000N$	74
Figure IV.5 : Histogramme des coefficients.....	78
Figure IV.6 : Effets de l'épaisseur et de la largeur des substrats sur l'allongement.....	79
Figure IV.7 : Histogramme des effets.....	79
Figure IV.8 : Courbes isoréponses montrant l'influence de l'épaisseur de l'adhésif et de la largeur des substrats sur l'allongement.....	80
Figure IV.9 : Dimensions et chargement de l'assemblage élémentaire.....	81
Figure IV.10 : Dispositifs expérimentaux pour l'essai d'assemblage simple (à gauche) et l'essai de matage (à droite).....	82
Figure IV.11 : Schéma de principe de l'essai de contact par un pion. D'après [Wu 98].....	83
Figure IV.12 : Histogramme des effets.....	87
Figure IV.13 : Courbes isoréponses montrant l'influence diamètre du pion D et le diamètre du trou Dt pour épaisseur de la plaque $t=1,84$	87
Figure IV.14 : Courbes isoréponses montrant l'influence diamètre du pion D et le diamètre du trou Dt pour épaisseur de la plaque $t=2,08$	88
Figure IV.15 : Courbes isoréponses montrant l'influence épaisseur de la plaque t et le diamètre du trou Dt pour un diamètre du pion $D=6$	88
Figure IV.16 : Courbes isoréponses montrant l'influence épaisseur de la plaque t et le diamètre du trou Dt pour un diamètre du pion $D=10$	89

LISTE DES FIGURES

Figure IV.17 : Courbes isoréponses montrant l'influence épaisseur de la plaque t et le diamètre du pion D pour un diamètre du trou $D_t=6,35$	89
Figure IV.18 : Courbes isoréponses montrant l'influence épaisseur de la plaque t et le diamètre du pion D pour un diamètre du trou $D_t=10,2$	90

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Valeurs des paramètres du joint Kelly 2006.....	29
Tableau II.2 : Propriétés du matériau des substrats.....	30
Tableau II.3 : Propriétés du matériau de l'adhésif.....	30
Tableau II.4 : Valeurs des paramètres du joint.....	35
Tableau II.5 : Propriétés du matériau des substrats.....	36
Tableau II.6 : Propriétés du matériau de l'adhésif.....	36
Tableau II.7 : Propriétés du matériau des boulons.....	36
Tableau III.1 : Méthodes pour le calcul de la direction de descente.....	50
Tableau III.2 : Matrice d'expériences.....	64
Tableau III.3 : Matrice d'expériences d'un plan fractionnaire.....	66
Tableau III.4 : Effets issus du plan complet et du plan fractionnaire.....	67
Tableau IV.1 : Les dimensions des facteurs de l'assemblage hybride.....	72
Tableau IV.2 : Les dimensions des facteurs de l'assemblage hybride.....	76
Tableau IV.3 : Tableau d'expérimentation (unités courantes).....	77
Tableau IV.4 : Codage des facteurs.....	77
Tableau IV.5 : Valeurs des coefficients après calcul.....	78
Tableau IV.6 : Résultats expérimentaux.....	84
Tableau IV.7 : Niveau des facteurs et domaine d'étude.....	84
Tableau IV.8 : Matrice d'expériences.....	85
Tableau IV.9 : Tableau des coefficients a_{ij}	85
Tableau IV.10 : Réponse estimée par le modèle.....	86

Sommaire

Résumé	i
Abstract	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Sommaire	v
Liste des sigles et abréviations	x
Introduction générale	1
I. CHAPITRE I.	
REVUE DE LITTÉRATURE	
I.1 Types de joints collées et boulonnées.....	3
I.2 Contraintes dans un joint hybride.....	3
I.3 Joints hybrides.....	4
I.3.1 Comportement d'un joint hybride à recouvrement simple soumis à un effort en traction.....	5
I.4 Modes de défaillance.....	13
I.4.1 Généralités.....	13
I.4.2 Modification du mode de transfert de charge.....	14
I.4.3 Propagation de fissure.....	15
I.4.4 Défaillance par matage.....	15
I.4.5 Séquence d'empilement et délamination.....	15
I.5 Vie en fatigue d'un joint à recouvrement simple soumis à un effort externe en traction.....	16
I.5.1 Effet de la précontrainte.....	16
I.5.2 Effet des joints collés et rivetés équivalents.....	16
I.6 Joints avec renforts.....	17
II. CHAPITRE II.	
ASSEMBLAGES HYBRIDES ET SIMULATION PAR OUTIL ABAQUS	
II.1 Introduction.....	20

II.2. Avantages et inconvénients du collage.....	21
II.3 Avantages et inconvénients du boulonnage.....	21
II.3.1. Point de vue de Hart-Smith.....	22
II.3.2. Analyse de Lunsford.....	22
II.3.3 Analyse de Yamaguchi et Amano.....	24
II.3.4 Le travail de Gordon Kelly (2004).....	26
II.3.4.a Le transfert de charge.....	26
II.3.4.b Résistance statique et résistance en fatigue.....	26
II.3.4. c Effet de l'environnement et durabilité.....	27
II.4 Modèle par éléments finis.....	28
II.4.1 Comparaison avec les résultats expérimentaux de Kelly.....	28
II.4.1.1 Matériaux utilisés et adhésifs.....	30
II.4.1.2 Conditions aux limites et maillage.....	30
II.4.1.2.1 Encastrement.....	31
II.5 Analyse de la déformée et de la répartition des contraintes dans les substrats...34	
II.6 Comparaison avec les résultats expérimentaux de PAROISIEN 2006.....	36
II.6.1 Matériaux utilisés et adhésifs.....	37
II.6.2 Conditions aux limites et maillage.....	37
II.6.2.1 Encastrement.....	38
II.6.2.2 Le maillage	38
II.7 Analyse de la déformée et de la répartition des contraintes dans les substrats...40	
Conclusion.....	42
CHAPITRE III.....	
OPTIMISATION PAR LA METHODE DE L'ALGHORITHME GENETIQUE	
AGET PLAN D'EXPERIENCE (DOE).	
III Généralités sur l'optimisation.....	44
III.1.1 Définition du vocabulaire.....	45
III.1.2 Formulation mathématique du problème d'optimisation.....	47
III.1.3 Les algorithmes à direction de descente.....	48

III.1.4 Les algorithmes évolutionnaires (AE).....	53
III.1.4.1 Stratégie d'évolution (SE).....	53
III.1.4.2 Les algorithmes génétiques (AG).....	58
III.1.4.3 Généralité sur les plans d'expériences.....	62
III.1.4.4 Les plans d'expériences optimaux.....	63
CHAPITRE IV	
APPLICATION D'OPTIMISATION DES ASSEMBLAGES HYBRIDES	
IV.1 Application de l'algorithme génétique AG.....	73
IV.2 Application de la méthode d'optimisation par plan d'expériences.....	77
IV.2.1 Représentation d'une étude sous forme de tableau.....	77
IV.2.2 Interprétation.....	80
IV.3 Application de la méthode PE sur une étude expérimentale de la rupture des assemblages.....	81
IV.3.1 Configurations expérimentales.....	82
IV.3.2 L'essai de matage pur.....	83
IV.3.3 Calcul des coefficients a_{ij}	86
IV.3.4 Le modèle mathématique	86
IV.3.6 Détermination de la qualité.....	86
IV.3.5 Résultat du calcul de la moyenne théorique et l'erreur expérimentale.....	87
IV.3.6 Détermination de la qualité.....	87
IV.3.7 Les courbes isoréponses.....	88
IV.3.8 Conclusion.....	91
Conclusion générale	92
Références	94
Annexes	98

LISTE DES SIGLES

AG : Algorithme Génétique

AE : Algorithme Evolutionnaire

HBC : Hybride Boulonné- Collé

SE : Les Stratégies d'Evolution

PE : Plans d'Expériences

(X,Y,Z) : Repères

f_A, f_B, f : Effort de traction

G, G_A, G_B : Module de cisaillement transversal

E, E_A, E_B : Module d'élasticité longitudinal (module de young)

L : Longueur

e, e_1, e_2 : Epaisseurs

d : Diamètre

D : Diamètre du pion

D_t : Diamètre du trou

γ_{moy} : La déformation de cisaillement moyenne

Δl_{moy} : Le déplacement moyen

Φ : Diamètre

C_u : La raideur des boulons

τ_{moy} : Contrainte de cisaillement moyenne

Δl_{total} : Déplacement total

b : Largeur

σ_e : Contrainte longitudinale d'élasticité

σ_r : Contrainte à la rupture

σ_m : Contrainte moyenne de matage

σ_{Rm} : La résistance du stratifié au matage.

ν : Coefficient de poisson

F_m : l'effort de matage

$min(f)$: Minimum de f

$max(f)$: Maximum de f

b_{inf} et b_{sup} : les bornes inférieure et supérieure

$\nabla f(x)$: Le gradient de la fonction

$perf(x)$: La performance

E^i : L'espérance

N : Nombre d'individus parents

x^{enfant} : Composante du nouvel individu

σ : La variance la loi normale centrée N .

P : Le nombre total d'individus dans la population.

V_{ma} : La variance de la masse

Ei : Les effets

$Iij.$: Les interactions entre facteurs

\hat{E} : Un estimateur

$Var(\varepsilon)$: La variance de l'approximation

$cov(\hat{E})$: Covariance

$Com(X)$: La co-matrice

R^2 : Qualité descriptive du modèle

Q^2 : Qualité prédictive du modèle

INTRODUCTION

En mécanique, l'utilisation des matériaux composites est plus fréquente à cause de leur poids minimum et de leur performance proche de celle des matériaux durs comme l'acier. Cette minimisation est trop demandée dans l'industrie surtout en aéronautique.

L'ajout de matière et de composants mécaniques tels que les boulons ou les rivets augmente la rigidité, les coûts de fabrications, en plus la masse du produit. Par contre les assemblages collés sont plus légers mais malheureusement, il est très difficile de l'inspecter pour identifier les défauts car la présence de fissures dans l'adhésif ne peut pas être observée à l'œil nu. Un autre problème apparaît pour les assemblages seulement boulonnés, le perçage des trous de passage de boulon dans les composants en matériaux composites est coûteux et peut affaiblir la structure localement par délamination. Pour pallier à ce problème, l'utilisation de joints boulonnés-collés, c'est-à-dire hybrides, est la meilleure solution afin de profiter de la grande rigidité avec une amélioration de performances mécaniques.

L'objectif principal de ce projet est donc d'obtenir un joint hybride où des performances mécaniques sont optimales.

Dans cette thèse on présente :

- ✓ Au premier chapitre on présente une étude bibliographique concernant une revue de littérature de plusieurs et différents auteurs qui ont développé de différents modèles analytiques afin d'analyser les joints hybrides.
- ✓ Dans le cadre de ces travaux publiés sur l'analyse des modèles analytiques et modèles éléments finis de Paroisien(Paroisien 2006) et de Kelly (Kelly 2006), on présente dans le deuxième chapitre une modélisation réalisée sur logiciel ABAQUS afin de comparer et de s'assurer de la fiabilité de notre modèle et travail.
- ✓ dans le troisième chapitre les outils d'optimisations seront représentés. Vu que les performances des joints hybrides dépendent de plusieurs paramètres leur conception devient très complexe lorsque l'on tente d'optimiser plusieurs paramètres à la fois. Pour cette raison, l'utilisation d'outils de conception telle que l'algorithme génétique et plans d'expériences est très intéressante.
- ✓ Le quatrième chapitre , on applique les deux approches algorithme génétique et plans d'expériences sur un joint hybride à simple recouvrement chargé en traction pour analyser sa sensibilité dans le domaine statique et faire sortir les paramètres les plus influents sur les performances mécaniques.

- ✓ Finalement, la conclusion de ce travail sur les résultats obtenus dans chacun des chapitres. La conclusion se termine par une ouverture sur les projets et perspectives pouvant découler de ce travail.

CHAPITRE I

REVUE DE LITTERATURE

I.1 Types de joints collés

Parmi les types de joints représentés sur la Figure I.1, les joints à recouvrement simples sont les plus faciles à réaliser. Malgré leur résistance inférieure à celle de certaines autres configurations de joints, leur faible coût de fabrication et leur simplicité de mise en œuvre, ils sont régulièrement utilisés. Cette configuration de joint est d'ailleurs particulièrement privilégiée par plusieurs chercheurs. Les travaux de ce document seront principalement orientés vers l'analyse de cette configuration de joint.

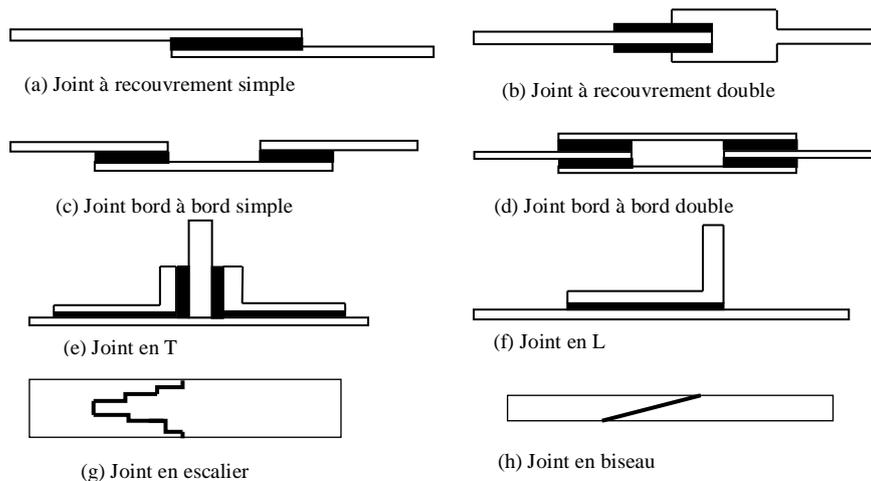


Figure I.1 : Exemples de joints collés

I.2 Contraintes dans un joint hybride

Un joint hybride est obtenu en assemblant deux composants, appelés substrats, à l'aide d'au moins deux méthodes d'assemblage simultanément. Dans le cadre de ces travaux, les joints collés et boulonnés seront utilisés.

Pour ce type de joint, il existe 4 types de contraintes qui sont principalement étudiées. La plus importante est la contrainte de pelage dans l'adhésif causée par la force de séparation entre les substrats. Toujours dans l'adhésif, la contrainte de cisaillement causée par les forces parallèles aux surfaces collées est très importante. Ensuite, les forces de contact entre la tige du boulon et les substrats au niveau du trou de passage causent des contraintes parfois très élevées appelées matage. Finalement, il faut aussi considérer les contraintes normales dans les substrats provenant des charges externes. Ces contraintes sont représentées sur la figure I.2

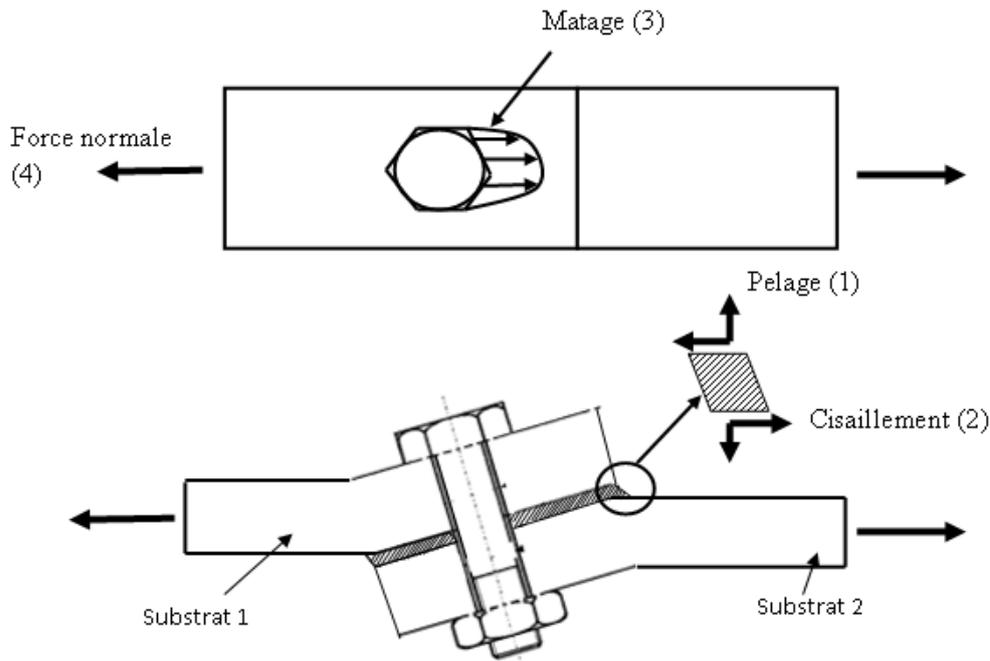


Figure I.2 : Contraintes principales dans un joint hybride : (1) pelage dans l'adhésif, (2) cisaillement de l'adhésif, (3) matage des substrats, (4) force normale dans les substrats

I.3 Joints hybrides

I.3.1 Comportement d'un joint hybride à recouvrement simple soumis à un effort en traction

I.3.1.1 Flexion secondaire

La figure I.3 illustre de façon exagérée la manière dont un joint à recouvrement simple se déforme lorsqu'il est soumis à une force de traction. Dans ce type de joint, la charge est excentrée par rapport aux axes neutres des substrats, ce qui cause une flexion secondaire dans le joint.

Cette flexion des substrats entraîne des contraintes de pelage dans l'adhésif tel que montré à la figure I.2.

Pour un joint en matériaux composites, il est possible de réduire la flexion secondaire en repositionnant les plis orientés dans la direction de la charge plus près du plan du joint. Ceci permet de réduire l'excentricité entre les chemins de transfert de charge des deux substrats (Stewart, 1997). Augmenter l'épaisseur des substrats permet aussi de réduire la flexion secondaire en augmentant la rigidité de flexion des substrats (Kelly, 2005).

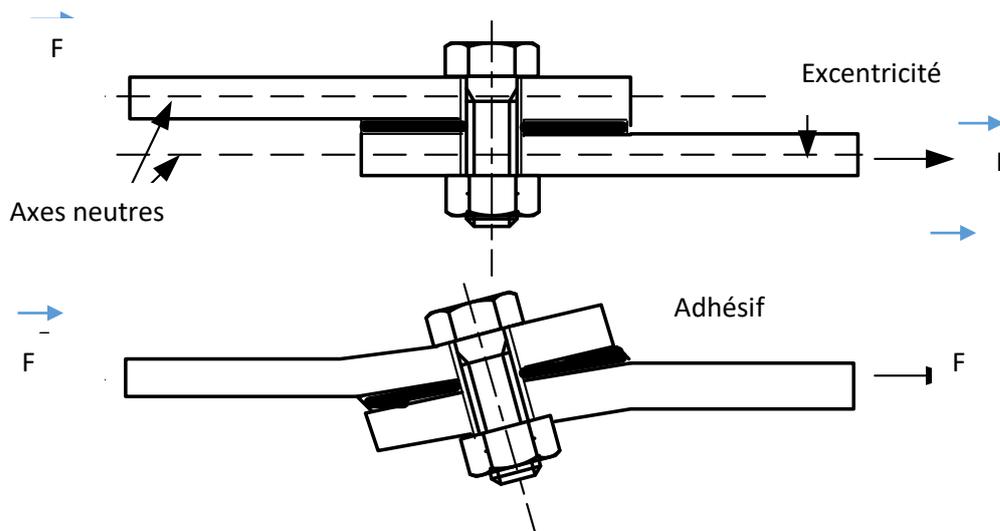


Figure I.3 : Déformations dans un joint hybride à recouvrement simple soumis à un effort en traction

I.3.1.2 Transfert de charge par les boulons

Selon [Hart-Smith \(1985\)](#), les boulons ne participent pas au transfert de charge dans un joint hybride tant que l'adhésif reste intact. Cette conclusion fut obtenue par une étude analytique réalisée sur un joint en escalier (voir figure I.1) utilisant 7 rangées de boulons et un adhésif possédant une rigidité élevée. La Figure I.4 illustre ce raisonnement. La présence d'un jeu radial entre la tige du boulon et le trou dans les laminés empêche le boulon de participer au transfert de charge tant que le déplacement relatif entre les deux laminés n'aura pas comblé ce jeu radial ([Hart-Smith, 1985](#)). Cette situation diffère du cas des joints boulonnés où la friction entre les pièces permet aux boulons de participer au transfert de charge même s'il n'y a pas de contact entre la tige et les pièces. La présence de l'adhésif fait en sorte qu'il n'y a pas de friction entre les pièces.

Par le fait même, le transfert de charge par le boulon diminue lorsque la rigidité de l'adhésif augmente. Selon [Kelly \(2005\)](#) : « avec un adhésif à grande rigidité, la charge transférée par le boulon est de l'ordre de 2% alors qu'elle peut atteindre jusqu'à 35% avec un adhésif moins rigide. »

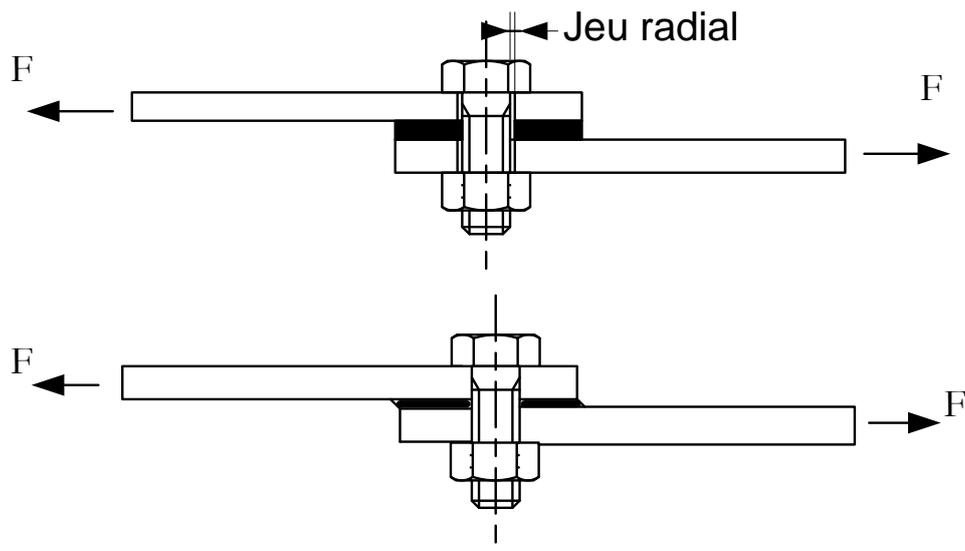


Figure I.4 : Influence de la présence d'un jeu radial entre la tige du boulon et son trou dans un joint hybride

La figure I.5 montre des résultats expérimentaux obtenus par McCarthy et McCarthy (2005) sur des joints boulonnés pour deux valeurs du jeu radial autour du boulon. Cette figure montre bien « l'effet de retard » dans le transfert de charge par contact entre les plaques et la tige du boulon lorsqu'il y a présence d'un jeu radial.

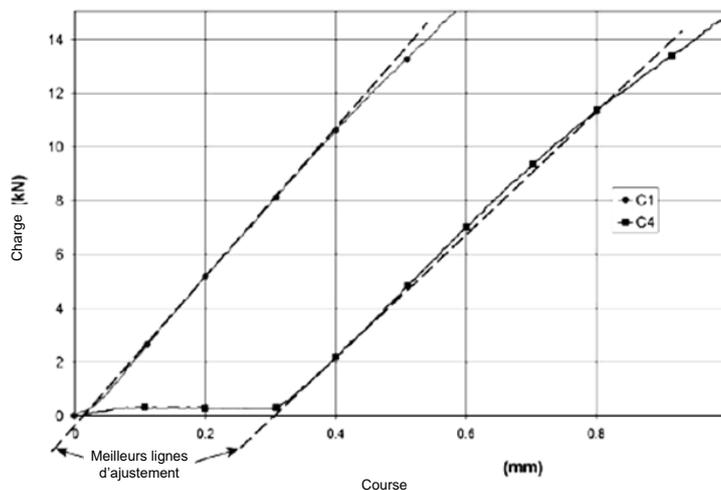


Figure I.5 : Comparaison des courbes force/déformation d'un joint boulonné avec un jeu radial nul (C1) et d'un joint boulonné avec un grand jeu radial (C4). Les lignes pleines représentent les résultats en laboratoire. Les lignes pointillées sont des courbes ajustées (McCarthy et McCarthy, 2005)

La figure I.6 montre le comportement d'un joint à recouvrement simple soumis à un effort externe en traction. Cette figure compare un joint collé et un joint hybride utilisant un adhésif dont le comportement suit une courbe élastique-plastique. Lorsque la charge externe est faible, les deux

joint se comportent de façon très similaire. Par contre, lorsque la charge devient assez grande pour causer des déformations plastiques dans l'adhésif, la rigidité du joint collé diminue. Dans le cas du joint hybride, cette diminution de la rigidité de l'adhésif entraîne une augmentation du taux de transfert de charge des boulons. Par conséquent, les deux types de joints offrent une rigidité similaire à faible charge mais le joint hybride présente une plus grande rigidité lorsque la charge externe augmente (Kelly, 2006 ; Paroissien, 2006).

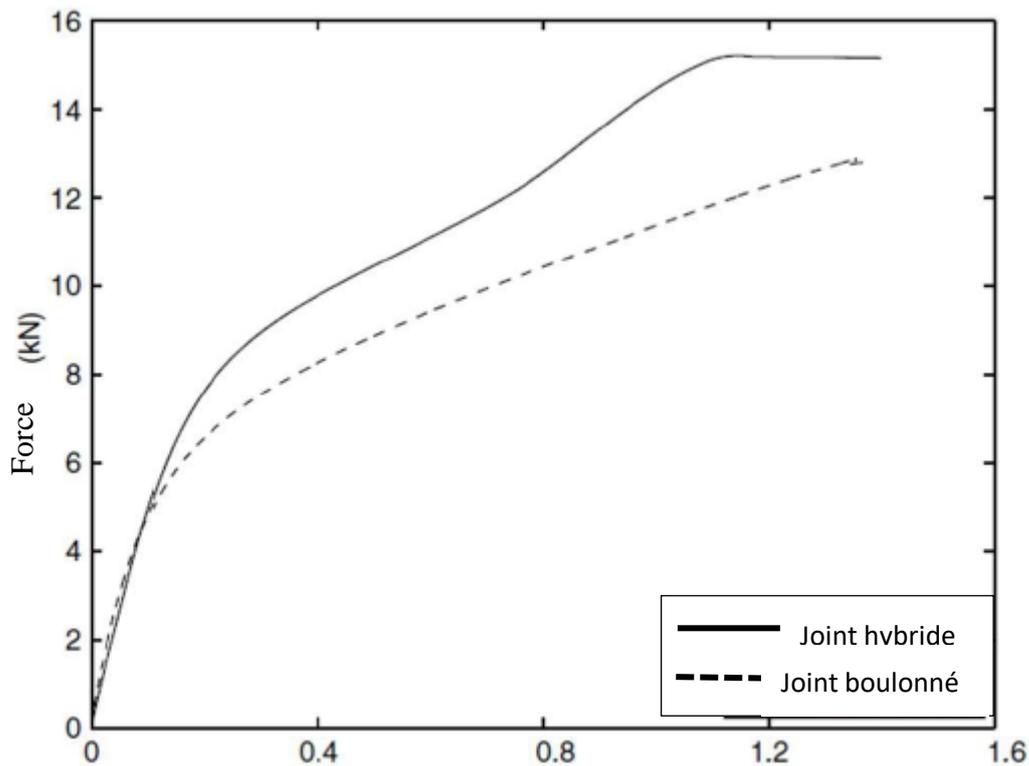


Figure I.6 : Comparaison des courbes force/déformation d'un joint hybride et d'un joint collé

(Kelly, 2006)

Selon les travaux réalisés par Kelly (2005) ainsi que ceux de Ganji (2007), le transfert de charge des boulons est affecté par plusieurs paramètres autres que la rigidité de l'adhésif :

- ✓ Une augmentation de l'épaisseur de la couche d'adhésif entraîne une augmentation du déplacement relatif entre les substrats pour le même niveau de chargement externe, ce qui résulte en une augmentation du transfert de charge par les boulons.
- ✓ Une augmentation de la longueur du recouvrement résulte en une augmentation de la rigidité du joint collé correspondant à l'augmentation de la surface collée. L'augmentation de la rigidité du joint collé résulte en une diminution du transfert de charge par les boulons. Pour la même raison, augmenter la distance entre les boulons réduit aussi le transfert de charge par les boulons suite à l'augmentation résultante de la longueur du joint de colle.

- ✓ L'agrandissement de l'épaisseur des substrats augmente la charge transférée par les boulons avec. Ceci est le résultat de deux interactions différentes à l'intérieur du joint. Pour commencer, l'augmentation de l'épaisseur des substrats résulte en une diminution de la flexion secondaire. Cette diminution du niveau de déformation hors-plan introduit une augmentation du niveau de déformation dans le plan, et donc une augmentation de la charge transférée par les boulons. De plus, la plus grande résistance au matage des substrats plus épais permet aussi aux boulons de transférer une plus grande charge.
- ✓ Selon Ganji (2007), les propriétés des matériaux utilisés pour les substrats influencent grandement le transfert de charge par les boulons. Les résultats obtenus par l'auteur montrent une augmentation du transfert de charge par les boulons lorsque la rigidité axiale du matériau des substrats diminue.

I.3.1.3 Contrainte dans l'adhésif

La figure I.7 montre la répartition de la contrainte de pelage dans un joint hybride. Sur cette figure obtenue à l'aide du modèle analytique décrit par (Paroissien et al, 2007a), la contrainte de pelage atteint un maximum aux extrémités du joint. D'après plusieurs auteurs (Kelly, 2005 ; Hart-Smith, 1985 ; Paroissien, 2006), la présence des boulons n'influence pas la contrainte de pelage dans l'adhésif aux extrémités du joint. Par contre, cette contrainte varie le long de la région collée et atteint un minimum près du boulon (Kelly, 2005). Des analyses par éléments finis ont aussi démontré qu'il n'y a aucun effet de la présence des rivets sur la contrainte de pelage aux extrémités du joint (Imanaka et al, 1995). La concentration de contraintes aux extrémités de la zone collée peut être diminuée en utilisant un filet de colle. Ceci permet d'augmenter la résistance du joint (Lin et Jen, 1999). Augmenter l'épaisseur de l'adhésif permet aussi de réduire cette concentration de contrainte (Kelly, 2005).

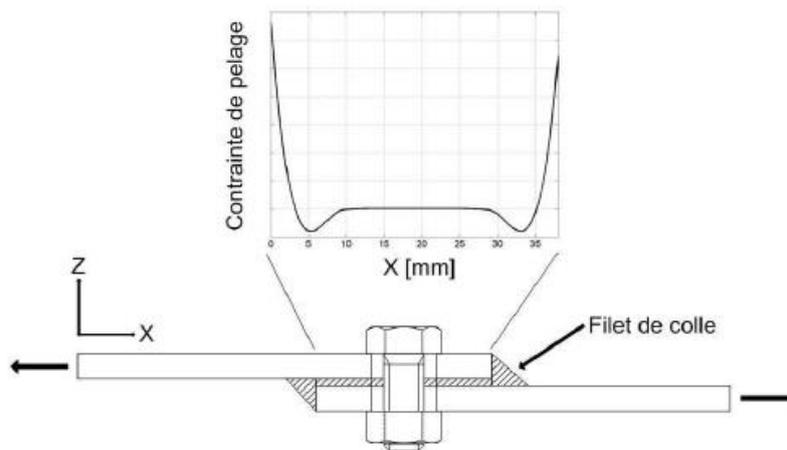


Figure I.7 : Contrainte de pelage dans l'adhésif suivant la direction longitudinale d'un joint à recouvrement simple (Paroissien et al, 2007a).

La figure I.8 montre la contrainte de cisaillement dans l'adhésif pour un joint hybride. Lorsque le module de cisaillement de l'adhésif utilisé est faible, l'ajout de boulons peut permettre de réduire la contrainte de cisaillement dans l'adhésif de près de 50% par rapport à un joint collé (Kelly, 2005). Cette diminution de la contrainte moyenne est directement liée à la charge transférée par le boulon. Dans un joint à recouvrement simple, la contrainte de cisaillement est aussi liée à l'épaisseur des substrats. En augmentant l'épaisseur des substrats, les déformations liées à la flexion secondaire sont réduites. Cette réduction des déformations en flexion entraîne une augmentation des déformations dans le plan du joint ainsi qu'une augmentation des déplacements relatifs entre les substrats, ce qui permet un plus grand transfert de charge par le boulon mais aussi une plus grande contrainte de cisaillement dans l'adhésif (Kelly, 2005).

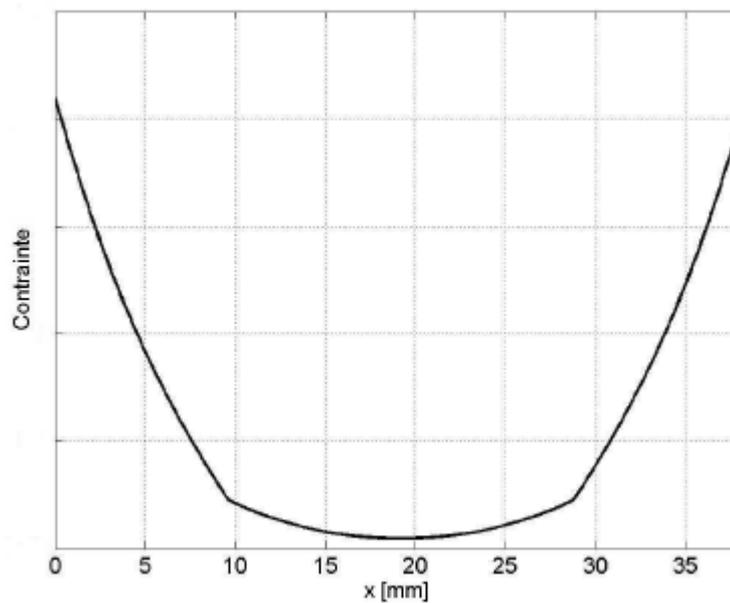


Figure I.8 : Contrainte de cisaillement dans l'adhésif suivant la direction longitudinale d'un joint à recouvrement simple (Kelly, 2005)

I.1.3.4 Résistance des joints hybrides

La résistance des joints hybrides est grandement affectée par les paramètres des joints boulonnés et collés équivalents. Les travaux de Lee et al. (2010) démontrent la complexité d'analyse des joints hybrides. Dans ses travaux, l'auteur effectue des tests destructifs sur des joints hybrides aluminium-à-composite. Dans un premier temps, un adhésif très rigide est utilisé. Les conclusions de cette première expérience sont les suivantes :

- ✓ Seulement 3% de la charge externe est transférée par les boulons.
- ✓ A la rupture finale du joint, la charge maximale mesurée est identique entre le joint collé et le joint hybride. Ceci indique que, pour ce joint, la résistance du joint collé équivalent est supérieure à la résistance au matage du joint boulonné équivalent. Autrement dit, au moment où l'adhésif se rompt complètement lors de l'application de la charge maximale, la charge transférée au boulon est déjà supérieure à sa résistance maximale. Le boulon ne permet donc pas au joint hybride de transférer une charge supérieure à celle du joint collé équivalent.
- ✓ Finalement, sur cette configuration de joint hybride, la défaillance finale se produit à un niveau de déformation supérieur à celui du joint boulonné équivalent, indiquant que la défaillance en matage s'était déjà produite au moment de la rupture de l'adhésif.

Dans un second temps, [Lee et al. \(2010\)](#) effectuent les mêmes tests que précédemment avec un adhésif beaucoup moins rigide. Ses observations sont les suivantes :

- ✓ A la rupture du joint, la charge maximale appliquée sur le joint hybride est supérieure à celle des joints collés et boulonnés équivalents.
- ✓ Si l'on analyse séparément les joints seulement collés et seulement boulonnés équivalents au joint hybride analysé lors de cette expérience, la résistance du joint hybride est supérieure à celle de ces deux autres joints et est égale à 84% de la somme de leur résistance. Par conséquent, il y a une interaction entre les deux méthodes d'assemblage.
- ✓ Une meilleure compréhension de ce phénomène est donc requise afin de tirer un maximum de performance d'un joint hybride.

I.1.3.5 Contraintes environnementales

Pour un joint collé, la température de service a un effet très marqué sur les performances du joint. Une augmentation de la température résulte en une diminution de la rigidité ainsi qu'une diminution de sa résistance ([Moroni et al, 2010](#)). Puisque le comportement mécanique des joints hybrides utilisant des éléments de fixations mécaniques (boulons, rivets, etc.)est principalement dicté par le comportement de l'adhésif, la température peut grandement influencer ce type de joint. Suite à ses travaux sur des joints hybrides collés/soudés, [Moroni t al. \(2010\)](#) concluent que malgré l'influence de la température de service sur les performances mécaniques des joints testés, ceux-ci performant, dans tous les cas, aussi bien sinon mieux qu'un joint collé lorsque soumis à un changement de température puisque les soudures (ou les boulons/rivets) peuvent compenser la diminution des performances mécaniques du joint collé.

I.4 Modes de défaillance

I.4.1 Généralités

Les figure I.9 et figure I.10 montrent différents modes de défaillance statique des joints boulonnés et des joints collés en matériaux composites. Dans le cas des joints hybrides, la défaillance du joint peut se produire selon un ou plusieurs de ces modes (Lee et al, 2010).

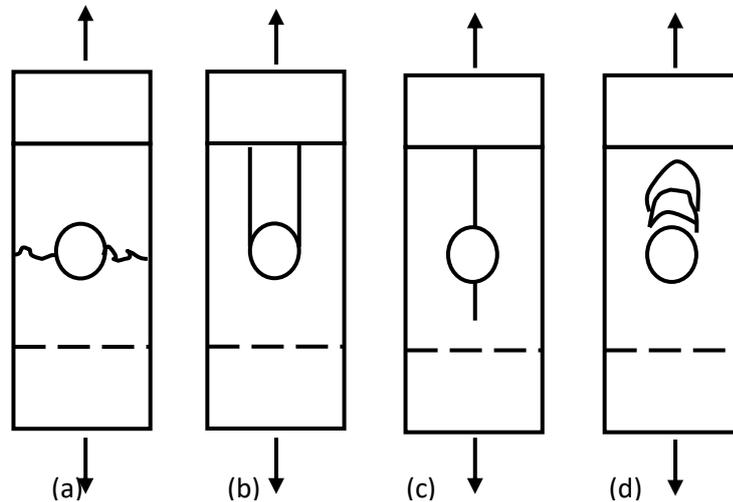


Figure I.9 : Mode de défaillance statique des joints boulonnés en matériaux composites :

a) Rupture en traction b) Rupture en cisaillement c) Rupture par clivage d) Matage (Shivashankar et Vijayarangan, 2005)

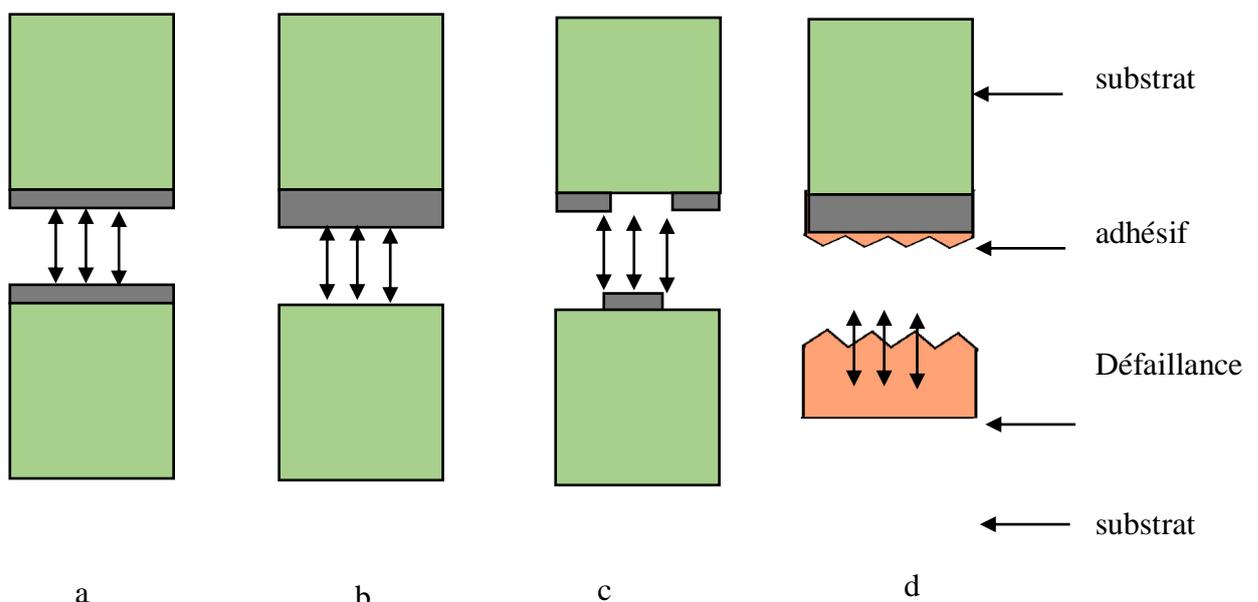


Figure I.10 : Mode de défaillance statique des joints collés en matériaux composites lorsque soumis à un chargement dans le plan du joint : a) Rupture cohésive de l'adhésif b) Rupture interfaciale c) Rupture mixte d) Défaillance du substrat (Kweon et al, 2006)

I.4.2 Modification du mode de transfert de charge

La figure I.11 montre les courbes de contraintes-déformations d'un joint hybride en matériaux composites lorsque soumis à une force en traction. La courbe représente la force exercée par la machine de traction alors que les points proviennent de mesures acoustiques du joint.

Par comparaison avec un joint collé, [Lee et al. \(2010\)](#) ont déterminé que les fréquences acoustiques obtenues lors des deux pics correspondent à la défaillance de l'adhésif. Par conséquent, en fonction des paramètres utilisés, les joints testés démontrent une défaillance initiale de l'adhésif suivie d'une seconde phase de chargement possédant une rigidité légèrement inférieure jusqu'à la rupture totale du joint. Cette phase correspond à l'augmentation graduelle du taux de transfert par les boulons alors que la fissure dans l'adhésif se propage. Ces résultats dépendent des paramètres géométriques du joint ainsi que des matériaux utilisés.

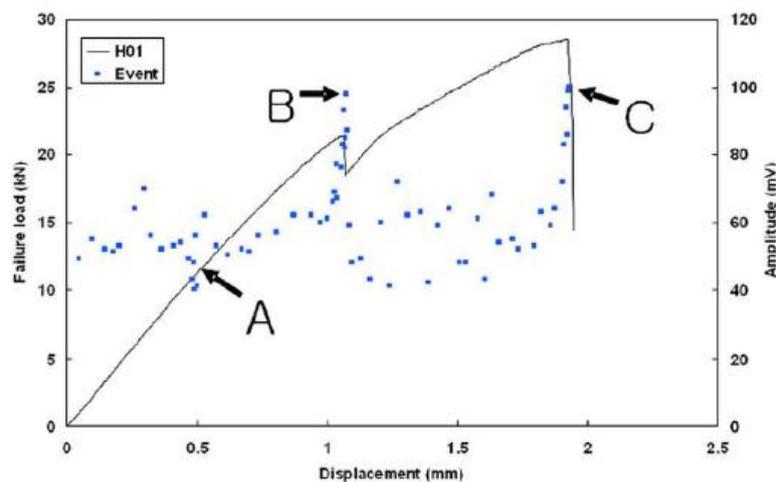


Figure I.11 : Courbe contrainte-déformation d'un joint hybride jusqu'à sa défaillance ([Lee et al, 2010](#))

Dans ses essais en laboratoire, [Wang \(2010\)](#) obtient des résultats similaires pour les joints hybrides testés. Par contre, la résistance ultime des joints testés est dictée entièrement par le joint collé. Une fois la défaillance de l'adhésif survenue, la charge est transférée au boulon jusqu'à la rupture des laminés par matage. La résistance résiduelle du joint suite à la rupture de l'adhésif (2^e pic) est environ la moitié de la résistance initiale (1^{re} pic).

I.4.3 Propagation de fissure

Selon les études réalisées par [Hart-Smith \(1985\)](#) sur un joint en escalier joignant un substrat en titane à un substrat en carbone, la présence des boulons permet de ralentir la propagation de fissures. Lorsqu'une fissure se développe dans l'adhésif de l'une des marches, la charge initialement transférée par l'adhésif à cet endroit est reprise par le boulon et ensuite transférée aux autres marches du joint. Ceci permet de ralentir ou même freiner la propagation de fissures. [Fu et Mallick \(2001\)](#) ont aussi démontré l'efficacité de la présence de précontrainte des boulons afin de ralentir la propagation de fissure dans la zone précontrainte.

I.4.4 Défaillance par matage

Dans un joint hybride, le faible transfert de charge entre l'adhésif et les boulons fait en sorte que les contraintes de matage dans les laminés sont relativement faibles. Des analyses par éléments finis effectuées par [Chan \(2001\)](#) ont permis d'arriver à la conclusion que la défaillance par matage d'un joint hybride est très peu probable. Dans une majorité des cas, ce type de défaillance ne devrait se produire que suite à la défaillance initiale du joint collé.

I.4.5 Séquence d'empilement et délamination

Dans ses travaux, [Stewart \(1997\)](#) analyse expérimentalement l'influence de la séquence d'empilement des laminés sur le mode de défaillance en statique du joint. La fissure initiale se produit dans l'adhésif aux extrémités de la zone de recouvrement suite à la présence de contraintes de pelage plus élevées dans ces zones tel qu'indiqué sur la figure I.7. Par la suite, la fissure se propage à l'intérieur des laminés par délamination.

Dans un premier laminé [+45;-45; 0; +45;-45;-45; +45;-45; +45]T, le seul pli orienté à 0° se retrouve relativement éloigné du plan du joint, ce qui force la fissure à traverser plusieurs plis à 45° en plus de changer de direction à plusieurs reprises avant la rupture finale du joint. Par contre, dans un second laminé, [-45 ; +45 ; -45 ; +45 ; +45 ; -45 ; 0 ; +45 ; -45] T le pli à 0° est plus proche du plan du joint. Par conséquent, la fissure l'atteint rapidement et se propage alors très rapidement par délamination le long de la zone de recouvrement en suivant le pli à 0°. Dans une telle configuration, l'initiation de la fissure, sa propagation et la rupture finale se produisent pratiquement au même moment. Il est à noter que, malgré tout, le fait de rapprocher le pli à 0° du plan du joint diminue les déformations par flexion secondaire, ce qui résulte en une résistance statique plus importante malgré la défaillance finale plus rapide une fois l'apparition d'une fissure initiale ([Stewart, 1997](#)).

I.5 La durée de vie d'un joint à recouvrement simple soumis à un effort externe en traction

Un joint collé à recouvrement simple est très résistant en cisaillement mais a tendance à briser suite aux contraintes de pelage importantes issues de la configuration du joint (Lees et Makarov, 2004). Comme la figure I.7 le démontre, les contraintes de pelage sont maximales aux extrémités de la zone de recouvrement. Par conséquent, ces endroits sont des sites d'initialisation de fissures.

I.5.1 Effet de la précontrainte

Comme plusieurs auteurs le mentionnent (Kelly, 2006 ; Imanaka et al, 1995 ; Fu et Mallick, 2001), dans un joint hybride, la présence de zones sous contraintes de compression limite la propagation de fissures. La zone sous contrainte peut soit provenir de la force de serrage utilisée pour l'installation des boulons ou de la force de compression requise pour installer les rivets (Imanaka et al, 1995). Dans un joint où la précontrainte n'est appliquée que sur une partie de la zone de recouvrement, une fissure peut apparaître aux extrémités de la zone de recouvrement et se propager vers le centre. En se rapprochant du centre, la contrainte de pelage diminue et peut même devenir négative, c'est-à-dire en compression, dans la zone de précontrainte. Selon Fu et Mallick (2001), cette contrainte négative permet de stopper la propagation de la fissure jusqu'à ce que les forces externes soient assez importantes pour générer une contrainte de pelage positive dans cette zone. Ils ont démontré à l'aide d'analyses par éléments finis sur des joints collés que la précontrainte des boulons peut réduire efficacement la contrainte de pelage maximale seulement si cette précontrainte s'étend sur la totalité du recouvrement.

Selon les tests en laboratoires effectués par Kelly (2006) sur des joints hybrides utilisant un adhésif de grande rigidité, le nombre de cycles avant l'initiation de fissure n'est pas affectée par la présence du boulon. Par contre, la fissure se propage moins rapidement dû à la présence de zones en compression. En moyenne, le nombre de cycles avant la défaillance des joints hybrides mesurés expérimentalement par Kelly (2006) est 10 fois supérieure à celle des joints collés.

I.5.2 Effet des joints collés et rivetés équivalents

Dans leurs travaux sur des joints hybrides collés/rivetés, Imanaka et al. (1995) ont testé l'influence du ratio entre la résistance du joint équivalent collé par rapport au joint équivalent riveté. En utilisant un adhésif dont la résistance à la fatigue du joint collé est 2.5 fois plus élevée que celle d'un joint riveté de dimensions identiques, il n'y a pratiquement aucun gain sur la vie en fatigue en

utilisant un joint hybride collé/riqueté. Lorsque la résistance à la fatigue du joint collé est grandement supérieure ou inférieure au joint riveté, les rivets se brisent au même moment que l'adhésif. Les expériences effectuées ne démontrent donc aucune augmentation de la résistance du joint collé par l'ajout de rivets. Par contre, lorsque la résistance à la fatigue du joint collé est similaire à celle du joint riveté, la résistance du joint est améliorée par la présence de rivets. Par conséquent, les auteurs concluent qu'il ne semble y avoir une augmentation de la résistance du joint qu'à l'intérieur d'une certaine limite du ratio de la résistance du joint collé sur la résistance du joint riveté (Imanaka et al, 1995).

I.6 Joints avec renforts

Une configuration de joints hybrides avec renforts a été proposée par Kumar et al. (1989).

Dans cette configuration de joint hybride à recouvrement simple, un renfort en aluminium est collé de chaque côté du joint tel que présenté sur la figure I.12. Les expériences en laboratoire effectuées par Kumar et Al montrent que les charges externes lors de la défaillance initiale et finale de ce type de joint sont environ 75% plus élevées que celles d'un joint collé, boulonné ou hybride ayant les mêmes dimensions. La résistance spécifique du joint hybride avec renforts est environ 60% plus élevée que pour un joint hybride conventionnel en utilisant des spécimens en aluminium (Kumar et al, 1989). La rigidité de ce joint hybride modifié est aussi plus grande que celle des autres types de joints de mêmes dimensions. Les résultats d'éléments finis démontrent aussi que les renforts réduisent les contraintes de cisaillement et de pelage significativement par rapport à un joint hybride conventionnel.

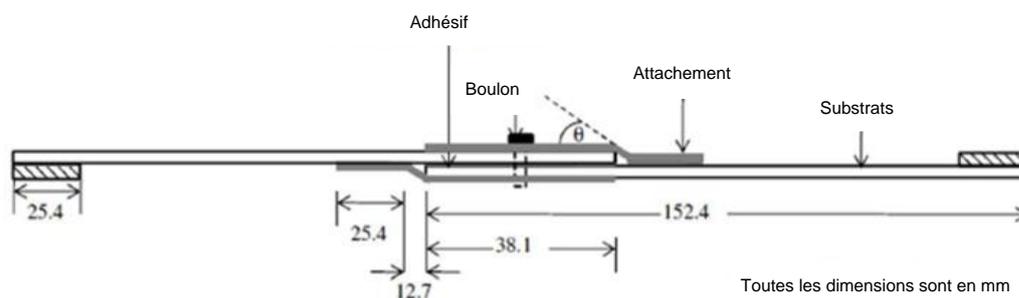


Figure I.12 : Configuration du joint hybride avec renforts proposée par Kumar et al. (1989)

CHAPITRE II

ASSEMBLAGES HYBRIDES ET SIMULATION PAR OUTIL ABAQUS

II.1 Introduction

Nous obtenons un assemblage hybride quand nous combinons deux techniques d'assemblage différentes. Le but est de profiter d'une possible complémentarité et de diminuer les inconvénients de chacune des deux techniques.

Ici, nous nous intéressons aux techniques du boulonnage et du collage.

Dans ce qui suit nous comparons entre elles ces deux techniques d'assemblage, en donnant les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles dans le but de réaliser un assemblage structural, et nous préciserons parfois en nous plaçant dans le cadre de l'avion civil.

II.2. Avantages et inconvénients du collage

II.2.1 Avantages

- ✓ Le collage est une technique d'assemblage performante et les avantages sont nombreux. Cette technique est utilisée par de nombreuses industries : automobile, bâtiment, électroménager, électronique, loisirs, aéronautique, mécanique ...
- ✓ Le collage est une technique universelle puisqu'à priori il est possible de tout coller, si nous conditionnons convenablement les surfaces à assembler.
- ✓ Le collage altère peu les substrats puisque seul le traitement de surface des substrats intervient (dans le sens où le décapage dégrade la surface mais moins que le perçage).
- ✓ Le collage permet d'obtenir une meilleure répartition des contraintes, due au transfert de charge continu. Ceci implique une meilleure tenue aux chocs, aux vibrations.
- ✓ Le collage permet d'assembler des matériaux composites, sans en rompre les fibres.
- ✓ Le collage diminue le risque de corrosion galvanique entre deux métaux différents.
- ✓ Le collage permet de réduire le poids de la structure assemblée (comparée à une structure boulonnée).
- ✓ Le collage peut avoir en plus de sa fonction d'assemblage un rôle d'étanchéité (mastic).
- ✓ Le collage permet d'obtenir des structures lisses (avantage aérodynamique).
- ✓ Le collage permet d'assembler entre eux des matériaux différents sans précaution particulière (corrosion).

II.2.2 Inconvénients

- ✓ Les colles ont une tenue limitée en température. Dans le cas de l'aéronautique, l'intervalle de température de travail est -50°C $+70^{\circ}\text{C}$; par conséquent, cela ne semble pas être un problème.

- ✓ Le collage résiste mal au vieillissement humide. L'humidité diminue l'adhésion en s'infiltrant aux interfaces ; elle dégrade aussi la résine et diminue ses performances mécaniques. Il convient donc d'isoler la zone collée par un joint étanche.
- ✓ Le collage exige une préparation des surfaces soignée et précise, ce qui peut être contraignant dans une chaîne d'assemblage.
- ✓ Le temps de prise des colles peut être incompatible avec les cadences industrielles.
- ✓ Le collage ne permet pas un démontage aisé des structures assemblées. Les techniques utilisées (chauffage, refroidissement, utilisation de solvant, cisaillement) peuvent altérer les substrats.
- ✓ Les colles possèdent une mauvaise conductivité électrique pour évacuer les courants de Foucault sur avion.
- ✓ De plus, l'épaisseur de colle doit être maîtrisée au niveau de l'assemblage, afin de prédire la tenue de l'assemblage obtenu. Cette maîtrise de l'épaisseur représente une contrainte industrielle supplémentaire.

II.3 Avantages et inconvénients du boulonnage

II.3.1 Avantages

- ✓ Le boulonnage est une technique d'assemblage rapide et précise, du moins quand elle est bien maîtrisée.
- ✓ Le boulonnage permet un contrôle aisé et maîtrisé des structures assemblées, une fois que les fissures se sont propagées au-delà des têtes de vis.
- ✓ Le boulonnage permet d'assembler tout type de matériaux, même différents.
- ✓ Le boulonnage autorise un transfert de charge élevé, pour des substrats épais.
- ✓ Le boulonnage permet d'obtenir un assemblage de bonne conductivité électrique.

II.3.2 Inconvénients

- ✓ Le boulonnage altère les substrats, du fait du perçage. Il y a concentration de contraintes au niveau du trou qui augmente les risques de fissures. Le repérage de ces fissures n'est possible qu'une fois que leur taille a dépassé la tête de vis.
- ✓ Le boulonnage ne permet pas d'obtenir des joints étanches. D'où la nécessité d'ajouter du mastic par exemple.
- ✓ Le boulonnage permet d'obtenir des surfaces lisses, seulement dans le cas de l'utilisation de têtes fraisées.

- ✓ La mise en œuvre du boulonnage sur avion coûte cher du fait de la haute qualité d'ajustement et des traitements de surface à obtenir (contrer les couples galvaniques).

II.3.1. Point de vue de Hart-Smith

Selon Hart-Smith, dans [HAR85], la combinaison des deux techniques d'assemblage pour des applications aérospatiales ne présente pas d'amélioration significative par rapport au collage ou au boulonnage. Ceci vient essentiellement du fait que les adhésifs employés sont très rigides, et ne permettent pas alors de répartir le transfert de charge équitablement entre les fixations et l'adhésif, l'adhésif ayant à supporter la plus grande partie de la charge. Par contre, l'application de jonctions hybrides se révèlent être efficace pour les réparations, ou, pour diminuer la charge adhésive en fin de joint par l'introduction des fixations afin de contrer le pelage.

II.3.2. Approche analytique de Lunsford

Lunsford, dans [LUN66], étudie théoriquement trois différents types de jonctions collées métal-métal. Ce travail pour Lockheed Missiles and SpaceCompany vise à développer des outils théoriques pour concevoir des jonctions collées métal-métal et remplacer les campagnes d'essais trop coûteuses.

Le troisième des trois types de jonction est tel que la charge est transférée par une rangée de fixations et par un film de colle travaillant en cisaillement. Ce type de jonction n'est pas encore appelé hybride. La figure II.1 illustre le type de jonctions particulier utilisé par Lunsford, ainsi que les notations et conditions aux limites.

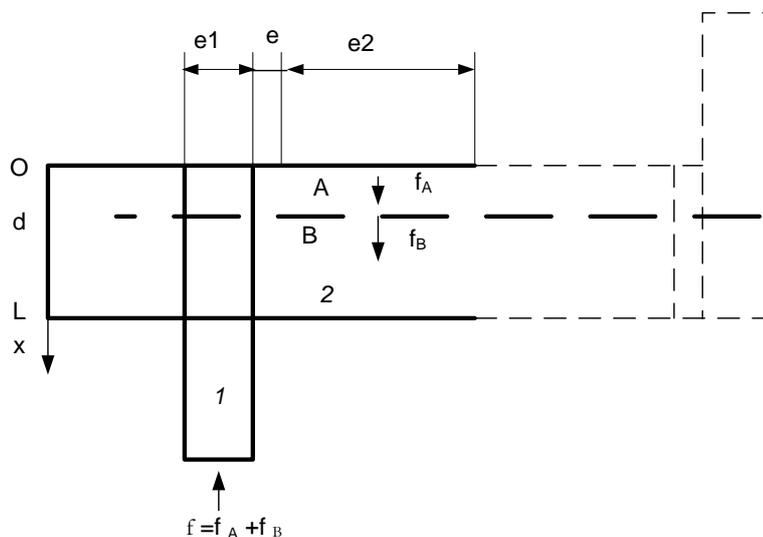


Figure. II.1 : Géométrie et notations de la jonction de Lunsford

Le bloc A est soumis à un effort de traction f_A en l'abscisse d , tandis que le bloc B est soumis à un effort de compression f_B en l'abscisse d . L'auteur travaille en déformations planes, dans le domaine élastique, selon un axe longitudinal (pas de prise en compte de la flexion des substrats, seules les contraintes de cisaillement dans l'adhésif et les contraintes normales dans les substrats sont prises en compte).

Il suppose que la distribution des efforts dans les substrats est uniforme au niveau de la ligne de fixations.

Il détermine alors les équations de la distribution des contraintes dans le film de colle dans le bloc A et le bloc B, en utilisant l'approche classique du collage de Volkersen, et la contrainte maximale dans le film de colle en $x = L$:

$$\tau_{max} = fG\{E_1e_1 + E_2e_2 [\cosh(\eta_v (L - d)) + \tanh(\eta_v d) \sinh(\eta_v (L - d))]\} + f / (\eta_v E_1 E_2 e_1 e_2 [\sinh(\eta_v (L - d)) + \tanh(\eta_v d) \cosh(\eta_v (L - d))]) \quad (2.1)$$

$$\text{Où } \eta_v = \sqrt{(2G / (e e_1 E_1))} \quad (2.2)$$

L'auteur aboutit alors à une expression ne contenant aucun taux de transfert, qu'il n'a d'ailleurs pas eu besoin d'introduire dans ses développements. La rigidité des fixations n'apparaît pas non plus.

II.3.3 Analyse de Yamaguchi et Amano

Yamaguchi et Amano, dans [YAM85], étudient de manière générale des jonctions "combinées", à partir des modes d'assemblage par boulonnage et par collage. Plus précisément, pour assembler deux pièces, il est possible de combiner ces deux modes d'assemblage. Ces combinaisons sont soit en série soit en parallèle. Les jonctions sont alors hybrides quand elles sont définies par la combinaison de ces deux modes d'assemblage en parallèle. Les auteurs analysent alors ces joints combinés en parallèle, et, en particulier, dans la configuration à simple recouvrement.

La jonction considérée est équilibrée, et comporte n lignes de fixations. L'étude est réalisée dans le cadre de l'élasticité linéaire. L'approche du collage utilisée est celle de Volkersen ([VOL38]) : la flexion des substrats n'est donc pas prise en compte.

Une force de traction f est appliquée à la jonction. Cet effort se décompose en :

$$f_{AB} = f_A + f_B \quad (2.3)$$

où f_A est l'effort appliqué à l'adhésif et f_B est l'effort appliqué aux boulons.

Ainsi, en notant $(\gamma_{moy})_A$ la déformation de cisaillement moyenne de l'adhésif, $(\Delta l_{moy})_A$ le déplacement moyen de cisaillement de l'adhésif, G_A le module de cisaillement de l'adhésif et ϕ le diamètre des fixations, nous avons :

$$\tau_{moy} = f_A / (bL - n(\pi\phi^2)/4) \quad (2.4)$$

Et

$$f_A = (\tau_{moy})_A (bL - n\pi\phi^2/4) = G_A(\gamma_{moy})_A(bL - n\pi\phi^2/4) = G_A ((\Delta l_{moy})_A) / e (bL - n\pi\phi^2/4) \quad (2.5)$$

Ils considèrent ensuite que les boulons ne se déforment qu'en cisaillement uniformément sur sa section au niveau du plan de joint. Par conséquent, en notant G_B le module de cisaillement du boulon, T_B la contrainte (uniforme) du boulon et Δl_B la déformation de cisaillement du boulon, il vient :

$$T_B = f_B / (n(\pi\phi^2)/4) \quad (2.6)$$

Et

$$f_B = \frac{T_B n(\pi\phi^2)}{4} = \Delta l_{moyB} / en(\pi\phi^2)/4 \quad (2.7)$$

En notant,

$$k = (\Delta l)_B / (\Delta l_{moy})_A \quad (2.8)$$

les auteurs déduisent :

$$f_B = G_B k ((\Delta l_{moy})_A) / en(\pi\phi^2)/4 \quad (2.9)$$

D'où :

$$f = ((\Delta l_{moy})_A) / e [G_A (bL - n(\pi\phi^2)/4) + kG_B n(\pi\phi^2)/4] \quad (2.10)$$

En définissant ainsi un facteur α de concentration de contraintes :

$$\alpha = \Delta l_{total} / (\Delta l_{moy})_A \quad (2.11)$$

et, partant de :

$$(\tau_{max})_A = G_A \Delta l_{total} / e = \alpha G_A \gamma_{moyA} \quad (2.12)$$

où $(T_{max})_A$ est la contrainte maximale dans l'adhésif, il vient :

$$f = 1/e\alpha [G_A (bL - n (\pi\varphi^2)/4) + kG_B n (\pi\varphi^2)/4] \Delta l_{total} \quad (2.13)$$

Les résultats expérimentaux présentés montrent une bonne concordance avec cette équation.

Les auteurs analysent de manière découplée l'association des deux modes d'assemblage. De plus, la répartition de la charge transférée dans les substrats le long du recouvrement ainsi que dans les lignes de fixations n'est pas donnée : l'analyse précédente donne la part moyenne de la charge supportée par la couche adhésive et la part moyenne de la charge supportée par les n lignes de fixations.

En notant C_H la raideur issue de la dernière équation, soit :

$$C_H = (G_A (bL - n (\pi\varphi^2)/4) + kG_B n (\pi\varphi^2)/4)/e\alpha \quad (2.14)$$

Le paramètre α peut être déterminé analytiquement. Le paramètre k peut être réécrit :

$$k = (f/C_u)/(ef/(G_A (bL - n (\pi\varphi^2)/4))) = (G_A (bL - n (\pi\varphi^2)/4))/(eC_u) \quad (2.15)$$

Nous constatons ainsi qu'il est possible d'utiliser et de tester les différentes formulations du calcul de la raideur des fixations en combinaison avec les différentes approches analytiques du collage, pour déterminer une raideur globale de l'assemblage hybride.

II.3.4 Le travail de Gordon Kelly (2004)

Gordon Kelly, dans [KEL04], a travaillé sur les jonctions hybrides entre des substrats en matériau composite pour l'industrie automobile de manière expérimentale et numérique. Nous trouvons dans son mémoire de thèse, des articles qui couvrent ses travaux de doctorat et qui sont résumés ci-dessous.

II.3.4. 1 Le transfert de charge

L'auteur s'intéresse au transfert de charge dans le cas du simple cisaillement dans un assemblage HBC. Il compare les résultats donnés par un modèle numérique paramétrique 3D et des expériences.

Le modèle numérique permet de réaliser une étude paramétrique. Il obtient alors les tendances suivantes ; la charge transférée par le boulon :

- ✓ augmente quand l'épaisseur des substrats augmente ; de plus il met en évidence que la charge que peut transférer la fixation est limitée et est dépendante des propriétés des substrats.
- ✓ augmente quand l'épaisseur de l'adhésif augmente, ce qui s'explique par le fait que la jonction devient plus flexible ;
- ✓ diminue quand la longueur du recouvrement augmente ;
- ✓ diminue quand le pas transverse augmente, puisque nous augmentons la surface de collage;
- ✓ diminue quand le module de cisaillement de l'adhésif augmente, puisque la jonction devient plus rigide.

Les résultats d'essais montrent que les écarts avec les résultats numériques dépendent du jeu de la fixation.

Les deux méthodes d'investigation utilisées (modèle numérique et essais) montrent que la charge transférée par la fixation dépend de la charge appliquée à l'assemblage ; toutefois, au-delà d'une certaine charge, le taux de transfert reste constant.

II.3.4.2 Résistance statique et résistance en fatigue

Kelly s'intéresse à la résistance en statique et en fatigue des jonctions HBC composites à fibres de carbone. Il les détermine expérimentalement et montrent que les jonctions HBC ont une plus grande résistance et durée de vie en fatigue que les jonctions collées, d'autant plus que le module d'Young des adhésifs utilisés est faible. En effet, ce type d'adhésif doit permettre de mieux répartir le transfert de charge entre les fixations et l'adhésif. Les jonctions hybrides à haut module ne montrent pas une meilleure résistance, mais une durée de vie allongée, due à la présence des fixations.

Remarque :

Fu et Mallick, dans [FU01], étudient expérimentalement les résistances statiques et en fatigue des jonctions HBC. Ils montrent aussi que les jonctions hybrides ont une meilleure résistance statique et en fatigue. Ils ajoutent de plus que les performances des jonctions hybrides dépendent des rondelles au niveau des fixations. La pression qu'exercent les rondelles sur les substrats permet de réduire les contraintes de pelage dans l'adhésif.

II.3.4. 3 Effet de l'environnement et durabilité

Kelly étudie expérimentalement l'effet de l'environnement sur la résistance et la durée de vie en fatigue des jonctions collées et HBC en composites en simple cisaillement. Il utilise un adhésif à faible module.

Les résultats montrent que la résistance et la durée de vie en fatigue sont considérablement diminuées quand les jonctions sont vieillies thermiquement ou hydrauliquement.

Cependant, même vieillies, les jonctions hybrides ont une résistance et une durée de vie en fatigue plus grande que les jonctions collées.

Remarque

A la lumière des informations présentées dans cette revue de littérature, il semble que les conclusions des différents auteurs se contredisent. Alors que certains prétendent qu'il n'y a aucune amélioration des performances mécaniques des joints collés par l'ajout d'éléments de fixations mécaniques, d'autres concluent que les joints hybrides performant mieux en statique et en fatigue que leurs équivalents collés. Bien qu'il y ait plusieurs publications portant sur les joints hybrides, la plupart ne se concentrent que sur un nombre limité de paramètres et sur un nombre encore plus limité de variation des valeurs de ces paramètres. Par conséquent, l'effet de chaque paramètre ainsi que ses interactions avec les autres paramètres n'est que très peu connu.

II.4 MODELE PAR ELEMENTS FINIS

Afin de pouvoir concevoir un joint hybride, il est important de bien comprendre la façon dont les charges sont transmises à l'intérieur du joint. La revue de littérature dans les sections précédentes a permis de dresser le portrait du comportement du joint hybride lorsqu'une charge externe est appliquée. Par contre, dans le cadre de ces travaux, il est important de bien comprendre ce comportement. C'est pour cette raison que cette section présentera une analyse réalisée sur un modèle de joint à simple recouvrement à l'aide de la méthode des éléments finis. Cette méthode a été choisie car elle permet de prédire les déformations des composants du joint ainsi que de visualiser la répartition des contraintes à l'intérieur du joint.

Nous considérons une jonction boulonnée collée à simple recouvrement. Cette jonction possède 2 fixations sur une longueur de recouvrement L . Cette jonction comporte donc 3 intervalles de jonction collée (travée) est chargée en traction avec une force f , à une extrémité et encastree sur l'autre (voir figure II.2). Nous développons dans un premier temps des outils paramétriques sous forme de programmes informatiques sur logiciel ABAQUS, la géométrie et le maillage seront présentés. Par la suite, les conditions aux rives ainsi que la modélisation des zones de contact

seront introduites. Afin de déterminer le comportement mécanique global, nous lançons des campagnes d'essais statiques ensuite on peut comparer et valider nos résultats aux résultats expérimentaux obtenus par Kelly (2006) ainsi que ceux obtenus par Paroissien (2006).

Seconde phase consiste à optimiser des paramètres bien définis comme variables d'optimisation.

II.4.1 Comparaison avec les résultats expérimentaux de Kelly

Cette section présente la comparaison entre les résultats d'éléments finis d'un modèle avec un seul boulon et les travaux de Kelly (2006). Cette analyse a été réalisée afin de comparer les résultats expérimentaux obtenus avec ceux obtenus par l'approche proposée.

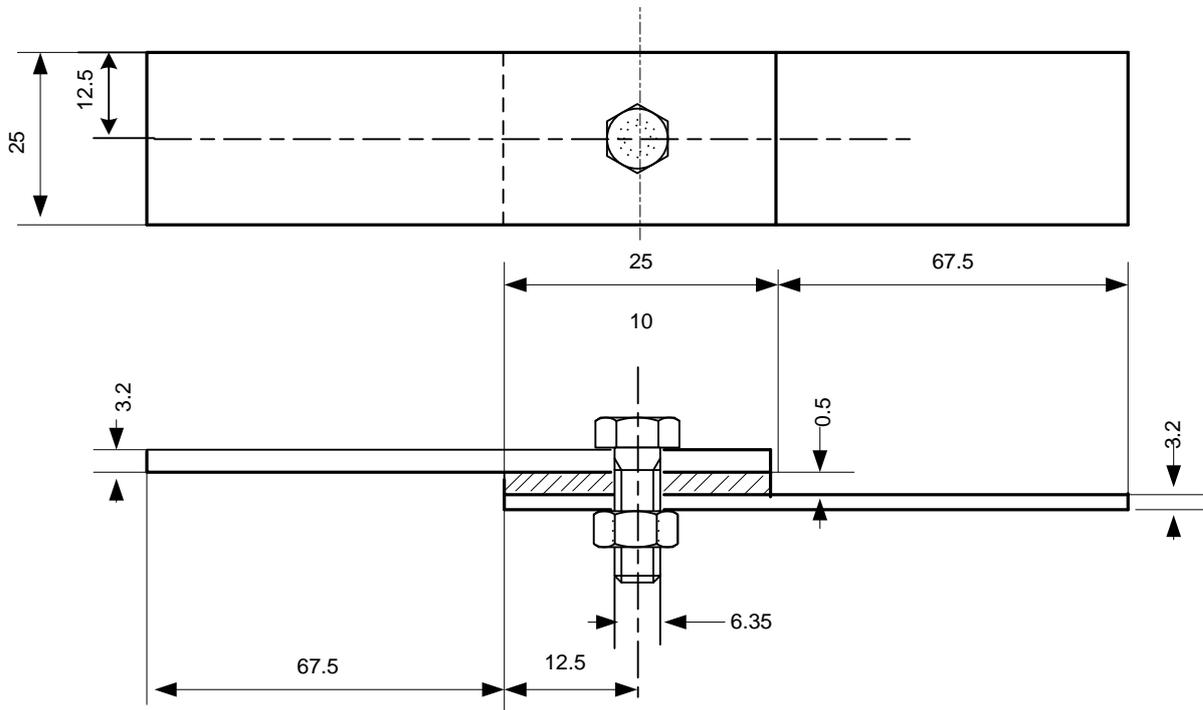


Figure II.2 : Le modèle étudié Kelly(2006)

Paramètres	Valeur
Diamètre des fixations D (mm)	6.35
Epaisseur des substrats e_s (mm)	3.2
Largeur b (mm)	25
Epaisseur de l'adhésif e (mm)	0.5
La distance au bord libre du boulon (mm)	12.5
Largeur de la partie non collée (mm)	67.5

Tableau II.1 : Valeurs des paramètres du joint Kelly(2006)

II.4.1.1 Matériaux utilisés et adhésifs

Dans ses travaux, Kelly (2006) utilise des laminés époxy/fibres de carbone dont les propriétés sont présentées dans le Tableau II.2

Propriétés du matériau				
	E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}
Les substrats	98000	7800	4700	0.34

Tableau II.2 : Propriétés du matériau des substrats Kelly(2006)

L'adhésif utilisé est un adhésif bi-composant polyuréthane nommé Pilogrip 7400/7410.

Cet adhésif est aussi utilisé par Paroissien (2006).

Propriétés de Poligrip 7400/7410				
	E_1 (MPa)	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	ν_1
L'adhésif	620	3	24	0.24

Tableau II.3 : Propriétés du matériau de l'adhésif Kelly(2006)

Le boulon est modélisé en utilisant de l'acier. Un module de Young de 205 GPa et un coefficient de Poisson de 0.3 ont été utilisés.

II.4.1.2 Conditions aux limites et maillage

II.4.1.2.1 Encastrement

Le substrat du dessus est encastre a son extrémité la plus éloignée de la zone de recouvrement.

Les conditions aux limites sont ensuite appliquées seulement sur les nœuds des surfaces en contact avec les mors. Pour le premier substrat, les trois translations sont bloquées à l'encastrement. Pour le deuxième substrat, seulement les translations transversales (Y,Z) sont bloquées.

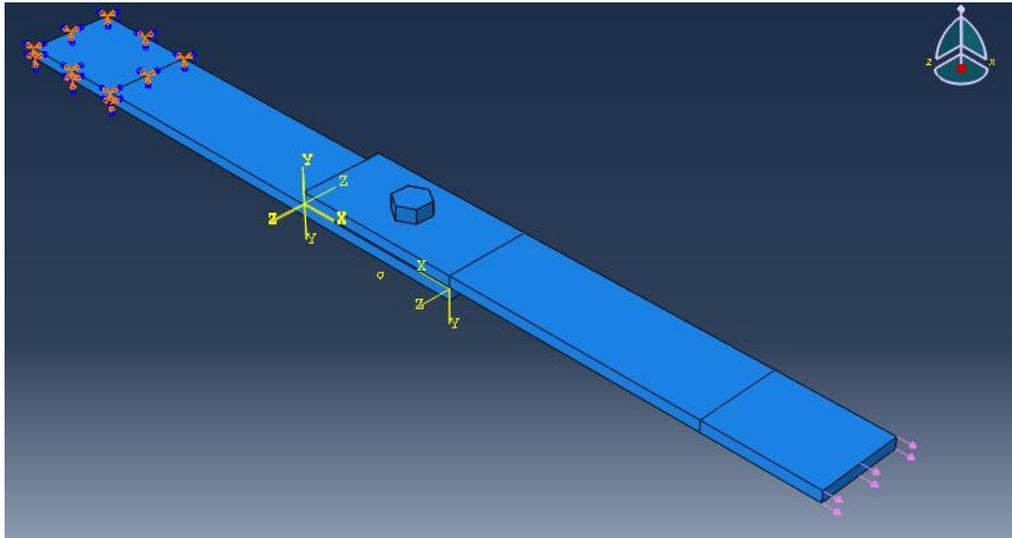


Figure II.3 : Les conditions aux limites de l'assemblage

II.4.2.2 le maillage

Le maillage des substrats et de l'adhésif est fait à partir d'éléments de type (C3D8R: An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control) dans ABAQUS (figure II.4 (a) et (b)). Ces éléments sont des éléments solides 3D à 8 nœuds de type tétraédrique et 83642 éléments. Ils sont principalement utilisés en analyse structurale. Pour les jonctions on a utilisé toujours même type tétraédrique mais à 4 nœuds (C3D4: A 4-node lineartetrahedron) et 4628 éléments (figure II.4 (c) et (d)).

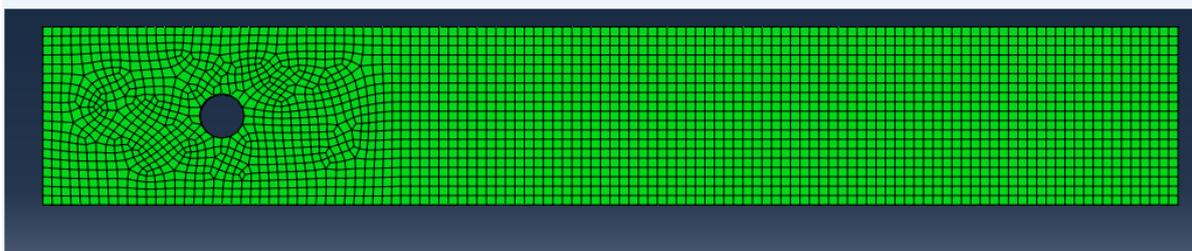


Figure II.4 (b) : Maillage dans les substrats

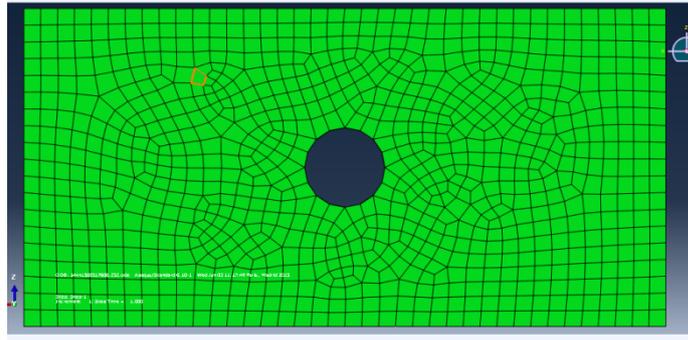


Figure II.4 (a) : Maillage dans l'adhésif

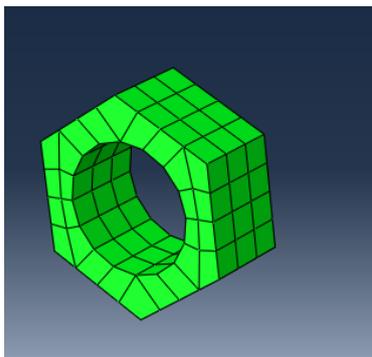


Figure II.4(c) : Maillage dans l'écrou

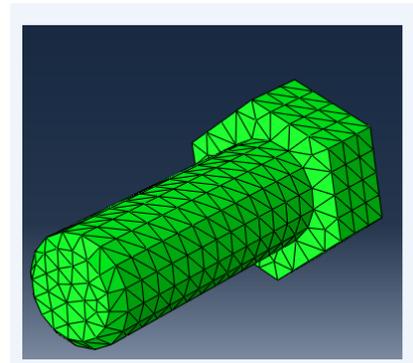


Figure II.4 (d) : Maillage dans la vis du

Figure II.4 : Modélisation de l'assemblage Kelly(2006)

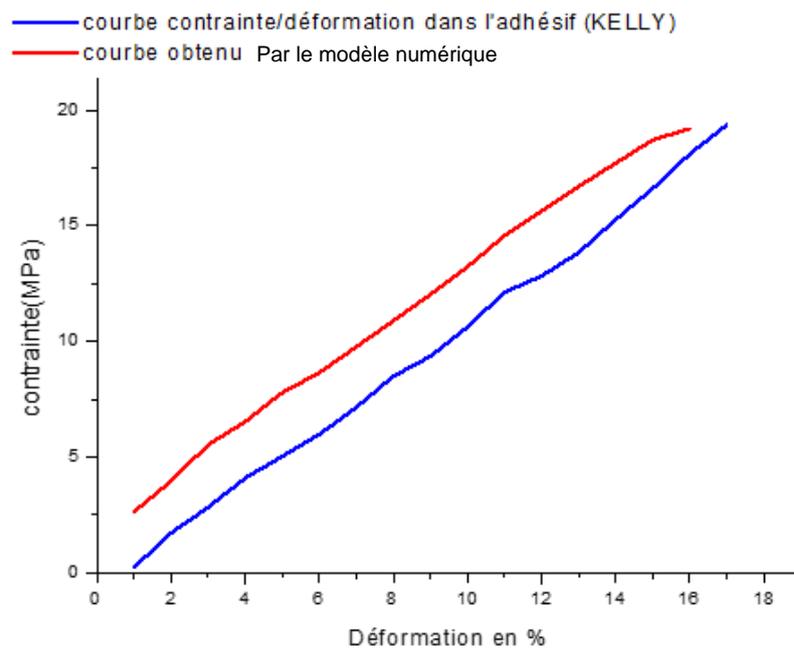


Figure II.5 (a) : Comparaison entre la courbe contrainte/déformation obtenu par Kelly (2005) et celle obtenu par le modèle numérique

Nous observons que, dans les deux cas, le comportement obtenu est globalement linéaire.

La figure II.5 (a) montre la courbe contrainte/déformation dans les substrats d'un joint hybride avec l'adhésif Pilogrip 7400/7410. Les résultats du modèle d'éléments finis sont près de ceux obtenus en laboratoire par KELLY (2005). Ces résultats, ainsi que ceux obtenus à l'étude permettent de bien voir l'approche à une erreur minimale.

Une des explications possibles de cette différence provient de l'utilisation d'une méthode numérique à notre laboratoire et la méthode expérimentale de Kelly.

II.5 Analyse de la déformation et de la répartition des contraintes dans les substrats

La modélisation numérique permet de retrouver les résultats obtenus lors des essais statiques. Pour les adhésifs utilisés, la présence des fixations n'a que peu d'influence sur le comportement de l'assemblage.

Nous constatons que les déformations importantes sont confinées aux extrémités de l'assemblage, et qu'elles restent faibles ailleurs (figure II.6 (a), figure II.6(b), figure II.6(c))

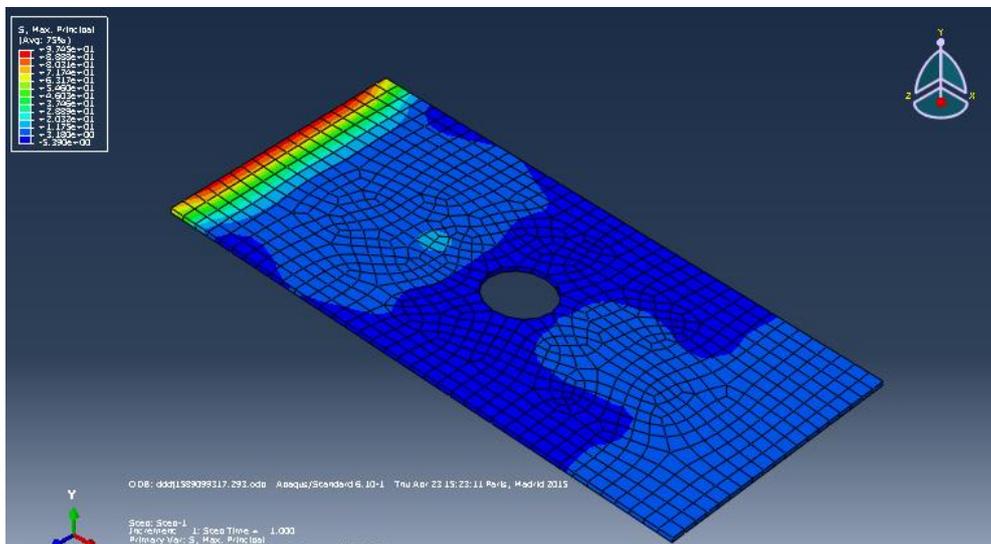


Figure II.6 (a) : Contraintes dans la couche de l'adhésif (avec la Pliogrip)

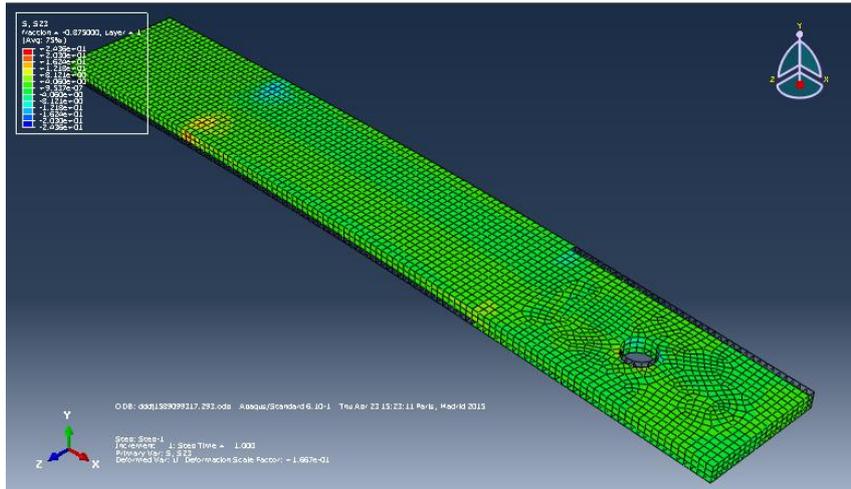


Figure II.6(b) : Contraintes dans les substrats en simple cisaillement

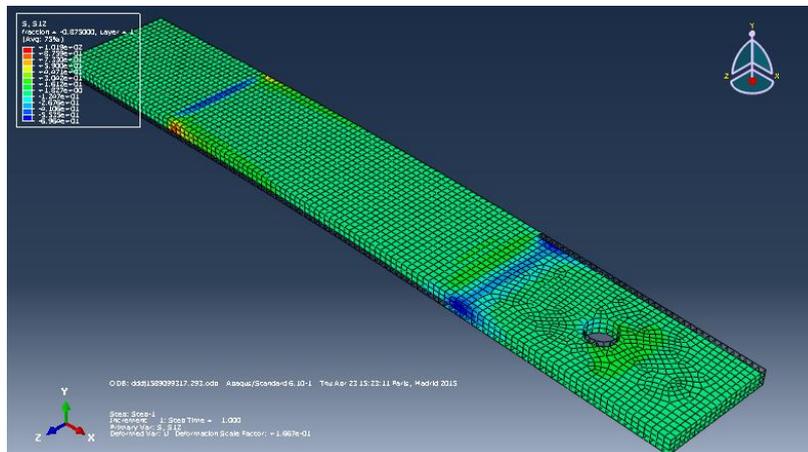


Figure II.6(c) : Contraintes dans les substrats en matage.

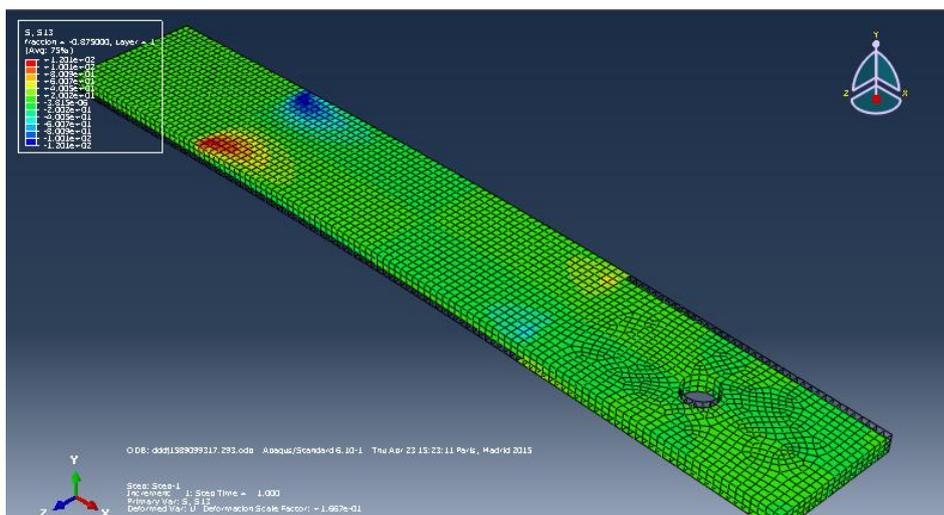


Figure II.6(d) : Contraintes dans les substrats en pelage.

II.6 Comparaison avec les résultats expérimentaux de PAROISIEN 2006

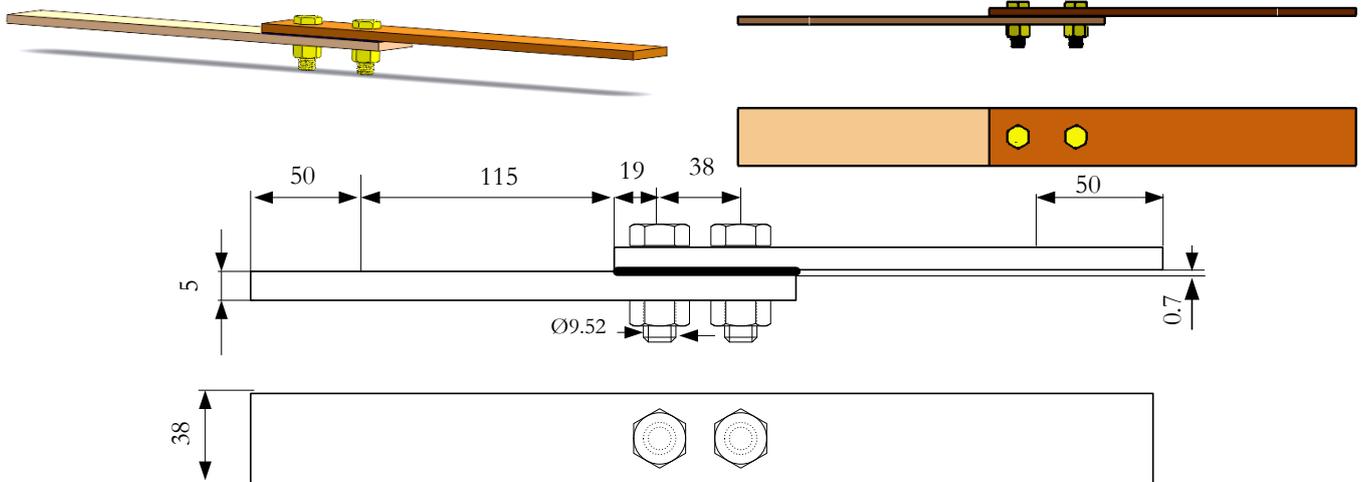


Figure II.7 : Le modèle étudié (PAROISIEN 2006)

Nous dirons qu'un assemblage hybride boulonné-collé est équilibré quand les substrats sont du même matériau et qu'ils ont la même épaisseur afin de faciliter la présentation.

Paramètres	Valeur
Diamètre des fixations D (mm)	9.52
Epaisseur des substrats e_s (mm)	5
Largeur b (mm)	38
Epaisseur de l'adhésif e (mm)	0.7
La distance au bord libre des boulons (mm)	19
Distance entre les boulons (mm)	38
Largeur de la partie non collée (mm)	115

Tableau II.4 : Valeurs des paramètres du joint PAROISIEN 2006

II.6.1 Matériaux utilisés et adhésifs

Les deux substrats sont de matériaux composite [0,+45,-45,90]S2 à matrice organique carbone/époxyde, l'adhésif choisi est bi-composant polyuréthane nommé Poligrip7400/7410 et finalement le matériau des boulons est le titane Ti-6Al-4v.

		Propriétés du matériau								
		E11(GPa)	E22(GPa)	E33(GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G12(GPa)	G13(GPa)	G23(GPa)
Les substrats		140	10	5.2	0.3	0.3	0.5	5.3	5.2	3.9

Tableau II.5 : Propriétés du matériau des substrats PAROISIEN 2006

Propriétés de Poligrip 7400/7410				
	E1(MPa)	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	ν_1
L'adhésif	620	3	24	0.24

Tableau II.6 : Propriétés du matériau de l'adhésif PAROISIEN 2006

Propriétés de titane Ti-6Al-4v				
	E1(MPa)	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	ν_1
Les boulons	114000	1100	1170	0.33

Tableau II.7 : Propriétés du matériau des boulons PAROISIEN 2006

II.6.2 Conditions aux limites et maillage

II.6.2.1 Encastrement

Le substrat du dessus est encasturé à son extrémité la plus éloignée de la zone de recouvrement. Les conditions aux rives sont ensuite appliquées seulement sur les nœuds des surfaces en contact avec les mors. Pour le premier substrat, les trois translations sont bloquées à l'encastrement. Pour le deuxième substrat, seulement les translations transversales (Y,Z) sont bloquées.

Le chargement externe est appliqué sur le deuxième substrat à l'aide d'un déplacement imposé sur les nœuds en contact avec les mors selon la direction longitudinale (X).

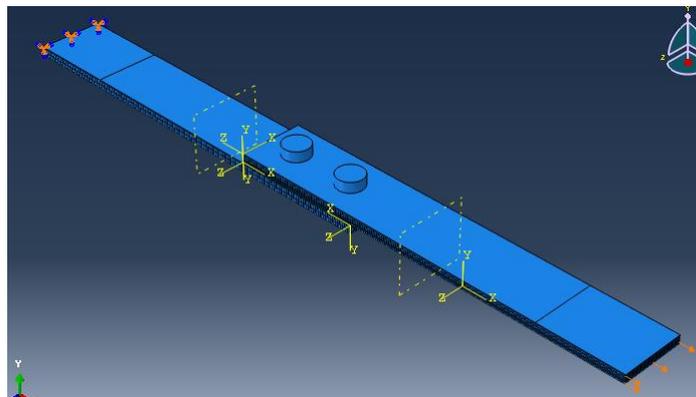


Figure II.8 : Les conditions aux limites de l'assemblage

II.6.2.2 Le maillage

Le maillage des substrats et de l'adhésif est fait à partir d'éléments de type (C3D8R: An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control) dans ABAQUS (figure II.9 (a) et (b)). Ces éléments sont des éléments solides 3D à 8 nœuds de type tétraédrique et 83642 éléments. Ils sont principalement utilisés en analyse structurale. Pour les jonctions on a utilisé toujours même type tétraédrique mais à 4 nœuds (C3D4: A 4-node lineartetrahedron) et 4628 éléments (figure II.9 (c) et (d)).

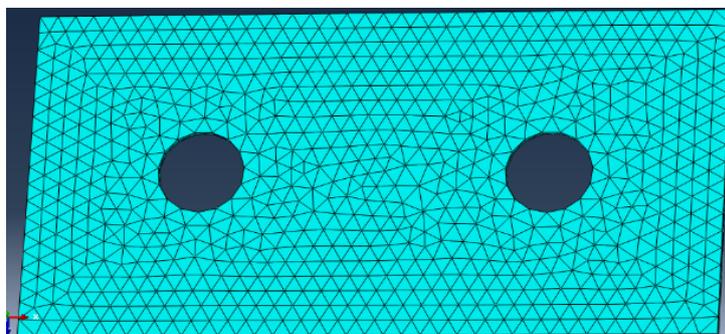


Figure II.9 (a) : Maillage dans l'adhésif

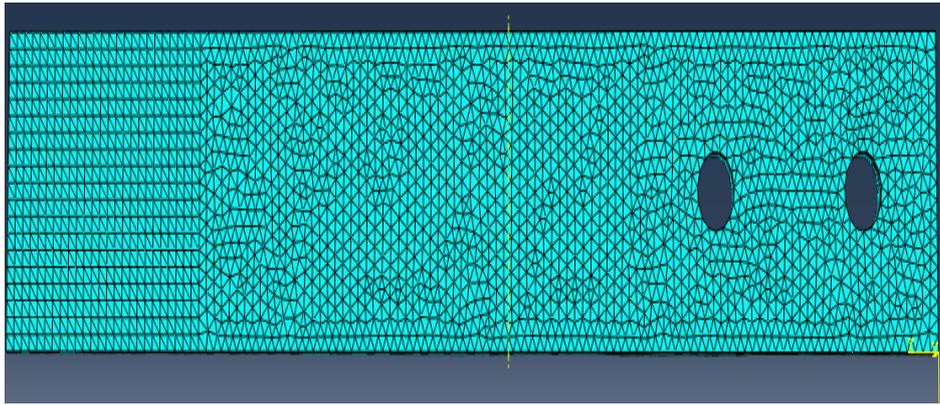


Figure II.9 (b) : Maillage dans les substrats

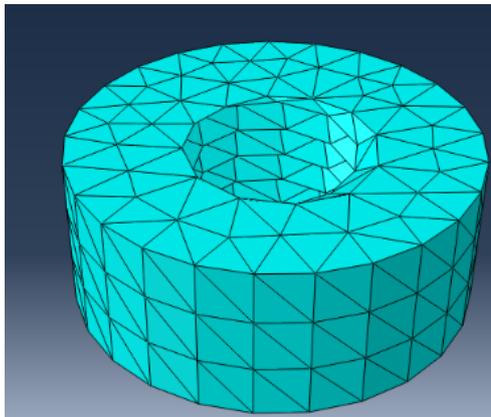


Figure II.9(c) : Maillage dans l'écrou

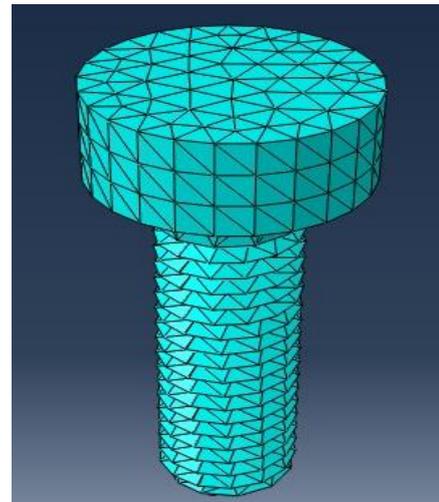


Figure II.9(d) : Maillage dans la vis du boulon

Figure II.9 : Modélisation de l'assemblage

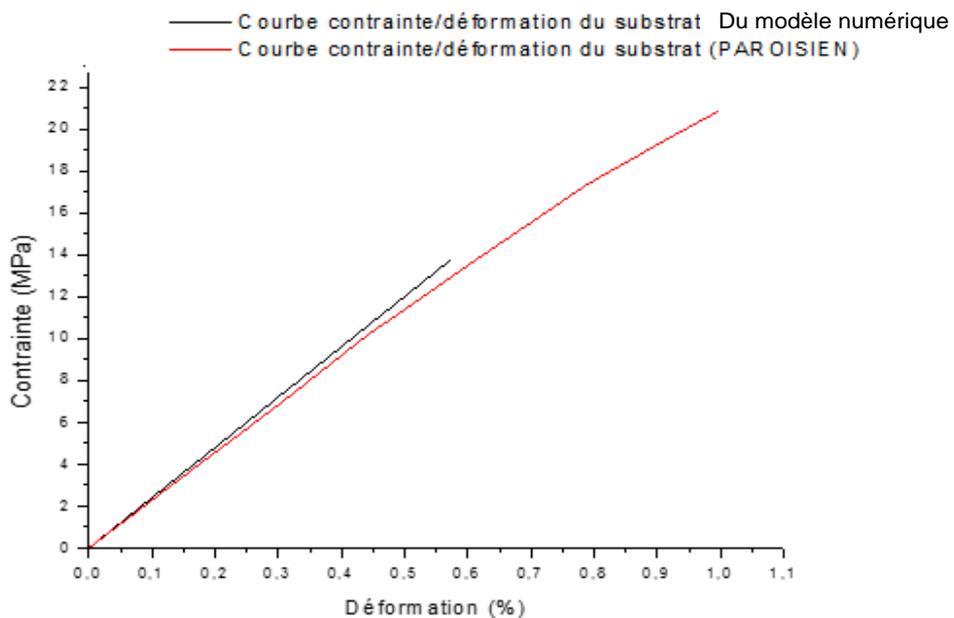


Figure II.10 (a) : Comparaison entre la courbe contrainte/déformation obtenue par Paroisien (2006) et celle obtenue par le modèle numérique

La figure II.10(a) montre la courbe contrainte/déplacement des mors pour un joint hybride avec les résultats obtenus par [PAROISIEN \(2006\)](#). Les résultats obtenus sont jugés acceptables.

II.7 Analyse de la déformation et de la répartition des contraintes dans les substrats

La figure II.11 (a) présente la contrainte longitudinale dans la zone de recouvrement au niveau des substrats montre la répartition de la contrainte dans le plan suite à l'application de la charge externe de traction (matage), elle est maximale au niveau des trous du joint et aux limites de l'adhésif. De plus, la figure II.11 (b) la flexion secondaire causée par la géométrie du joint crée un gradient de contrainte important à l'intérieur de l'épaisseur des substrats.

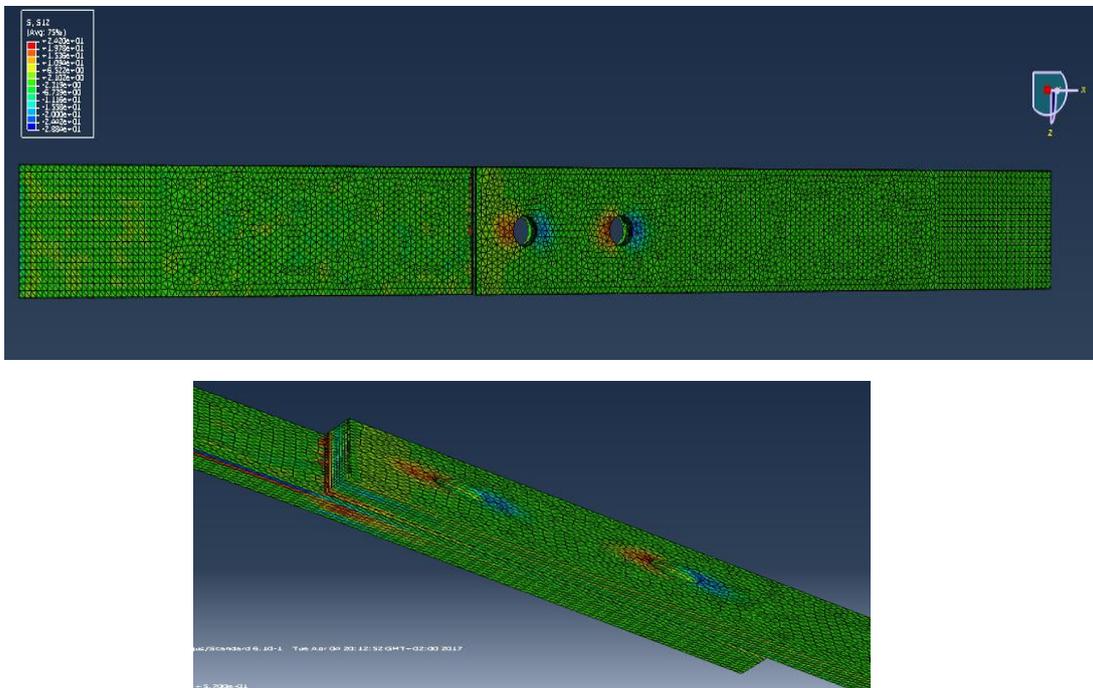


Figure II.11 (a) : Contrainte-longitudinale (S12)

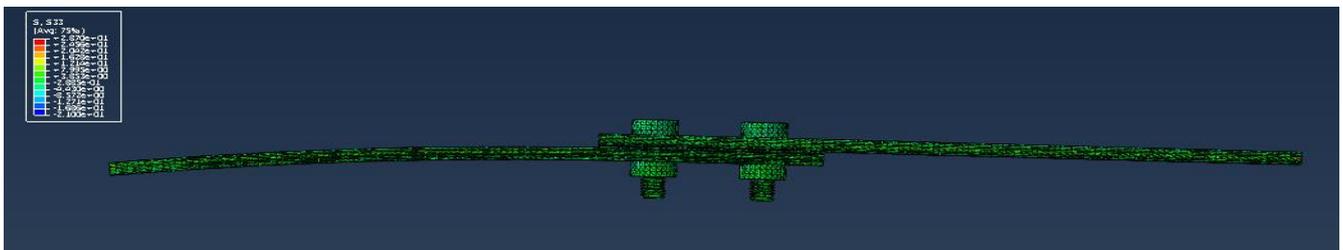


Figure II.11 (b) : Flexion totale du joint

Conclusion

L'objectif du modèle par éléments finis est d'aider à l'analyse de la répartition des contraintes et des forces dans un joint hybride suite à l'application d'un chargement externe.

La comparaison des résultats obtenus avec ceux publiés par Kelly (2006) et par Paroissien (2006) a permis de bâtir un modèle fiable avec une bonne répétition de l'ensemble des phénomènes d'un joint hybride.

Au total, deux analyses ont été réalisées. Celles-ci ont permis d'améliorer la compréhension des effets du chargement externe sur la répartition des contraintes dans le joint. Dans le cas des joints à deux boulons, les résultats ont montré que la répartition de la charge est distribuée également sur les deux boulons. Avec l'adhésif utilisé.

Finalement, l'analyse du contact entre la tige des boulons et les substrats a mis en évidence la répartition non homogène des contraintes de contact dans l'épaisseur des substrats. Ceci est une observation importante car cette répartition non homogène des forces de contact pourrait accélérer l'apparition de matage dans les substrats

CHAPITRE III

*OPTIMISATION PAR LA METHODE DE L'ALGORITHME
GENETIQUE (AG) ET PLAN D'EXPERIENCE (DOE).*

Introduction

Les performances des joints hybrides dépendent de plusieurs paramètres. Par conséquent, leur conception devient très complexe lorsque l'on tente d'optimiser plusieurs paramètres à la fois. Pour cette raison, l'utilisation d'un outil de conception tel que l'algorithme génétique ou plan d'expérience est très intéressante. Ces outils de conception permettent d'identifier le couplage entre les différentes fonctions d'un produit ou d'un système et permettent ensuite de déterminer un ordre de conception afin de réduire grandement les itérations de conception d'un produit.

Dans ce chapitre, une théorie sera présentée de différentes optimisations. Par la suite, l'outil de conception (AG et PE) sera utilisé afin d'analyser les joints hybrides à recouvrement simple. L'objectif étant d'identifier les fonctions du joint ainsi que leurs paramètres de conception associés.

III Généralités sur l'optimisation

III.1 Définition du vocabulaire

III.1.1 Fonction coût - Fonction objectif

La fonction coût, ou fonction objectif, est une évaluation de la qualité d'une solution.

L'objectif de l'optimisation sera de maximiser ou de minimiser sa valeur. Dans le cas de l'optimisation des assemblages, la fonction à maximiser est typiquement la force d'arrachement. Il est à noter qu'un problème de maximisation peut facilement se formuler sous la forme d'un problème de minimisation.

$$\min(f) = \max(-f) \quad (3.1)$$

Où f est la fonction coût. Dans la suite on s'attachera à résoudre un problème de minimisation.

III.1.2 Variables d'optimisation – paramètres

Dans l'objectif de minimiser la fonction coût f , il est nécessaire de définir les paramètres, c'est-à-dire les variables d'optimisation qui permettent de faire varier la valeur de f . Ces paramètres sont notés x .

$$\min_x(f(x)) \quad (3.2)$$

Dans la plupart des cas, les paramètres d'entrée d'un processus sont très nombreux. Pour un point d'assemblage de deux tôles par rivetage, on peut lister : les diamètres des perçages des deux tôles, le diamètre du rivet, la longueur du rivet, la forme de la tête du rivet, la vitesse de la bouterolle,

l'effort de pose, la forme des outils... Tous ces paramètres ont une influence plus ou moins importante sur la tenue mécanique de l'assemblage et peuvent donc être considérés comme des variables d'optimisation.

III.1.3 Dimension du problème d'optimisation

La dimension du problème d'optimisation, notée n , correspond au nombre de variables d'optimisation considérées. Le vecteur des variables d'optimisation x est donc de la dimension du problème d'optimisation n .

III.1.4 Domaine d'optimisation

La définition des variables d'optimisation pousse naturellement à définir le domaine d'optimisation, c'est-à-dire l'espace de variation des paramètres x . On le notera X . Dans le cadre de ce manuscrit on travaillera exclusivement sur des domaines d'optimisation continus.

$$x \in X$$

$$X \subset \mathbb{R}^n$$

Il est à noter qu'il existe des méthodes adaptées aux domaines non continus, comme par exemple les plans d'expériences (présentés au paragraphe 3.1.4.3) qui peuvent prendre en considération ce type de variables.

Dans le cadre de l'optimisation des assemblages, la définition des bornes de variation des paramètres d'optimisation permet de définir ce domaine d'optimisation.

III.1.5 Contraintes

Les contraintes peuvent être classées en deux catégories : les contraintes explicites et les contraintes implicites.

Les contraintes explicites sont directement appliquées aux paramètres d'optimisation ; le jeu de paramètres x peut être déclaré non conforme sans même évaluer la solution complète.

Par exemple pour un assemblage par rivetage le rivet devra avoir un diamètre inférieur ou égal au diamètre de perçage.

Les contraintes implicites ne sont, quant à elles, appliquées qu'après évaluation complète d'une solution.

Ces contraintes peuvent être représentées mathématiquement sous forme d'égalité ou d'inégalité entre les variables d'optimisation.

III.2 Formulation mathématique du problème d'optimisation

Un problème d'optimisation se formule mathématiquement de la manière suivante :

$$\min_{x \in X} (f(x)) \quad \left\{ \begin{array}{l} g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \\ b_{min} \leq x \leq b_{max} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

La solution du problème d'optimisation vérifie ces quatre conditions. x représente les variables d'optimisation, h et g les contraintes d'égalité et d'inégalité, et b_{inf} et b_{sup} les bornes inférieure et supérieure de l'espace de recherche X .

L'objectif de l'algorithme d'optimisation est de résoudre ce problème dont la complexité dépend de la forme de la fonction coût f et des fonctions contraintes h et g . La résolution se fait de manière itérative suivant le schéma de communication de la figure III-1.

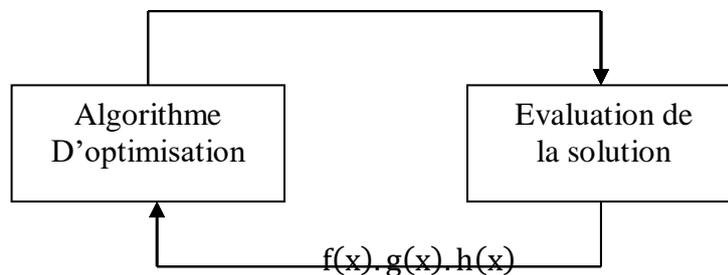


Figure III-1 : Problème d'optimisation

III.3 Les algorithmes à direction de descente

Pour ces méthodes la première chose à noter est la nécessité de pouvoir évaluer le gradient de la fonction coût, ce qui implique que cette fonction soit au moins une fois dérivable par rapport aux n variables d'optimisation. Ces méthodes sont dites d'ordre 1, ou plus si des dérivées d'ordre supérieur sont nécessaires.

III.3.1 Principes généraux

Supposons que la fonction coût soit continue et dérivable sur l'ensemble de l'espace de recherche, et notons $\nabla f(x)$ le gradient de la fonction coût en x .

La condition nécessaire d'optimalité s'écrit :

$$\nabla f(x) = 0 \quad (3.4)$$

Si $f(x)$ est deux fois différentiable il est possible d'écrire la condition suffisante d'optimalité :

$$\begin{cases} \nabla f(x) = 0 \\ \nabla^2 f(x) \text{ définie positive} \end{cases} \quad (3.5)$$

Les méthodes à direction de descente ont pour objectif de calculer le vecteur x satisfaisant la condition nécessaire (3.4).

Pour atteindre cet objectif, définissons la notion de direction de descente.

On dit que d est une direction de descente de $f(x)$ en x si :

$$d \cdot \nabla f(x) < 0 \quad (3.6)$$

En utilisant un développement de Taylor d'ordre 1 de (3.5), et en considérant un $\lambda > 0$ suffisamment petit, on obtient :

$$f(x + \lambda d) < f(x) \quad (3.7)$$

Cette direction de descente est très intéressante puisque qu'elle indique une direction qui permet de minimiser $f(x)$ en faisant varier x dans la direction d .

On peut alors approcher la solution optimale par une récurrence :

$$\begin{aligned} x^0 &\in R^N \\ x^{k+1} &= x^k + \lambda^k \cdot d^k, \forall k \geq 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Où $\lambda^k > 0$ est le pas de descente, d^k la direction de descente de f en x^k .

Cette présentation générale fait apparaître les deux paramètres de base des algorithmes à direction de descente : la direction de descente d et le pas de descente λ .

Les différentes méthodes résident dans la manière de choisir la direction de descente et de calculer le pas de descente optimum à chaque itération.

III.3.2 Choix de la direction de descente

Plusieurs méthodes sont présentes dans la littérature, les plus répandues sont présentées dans le tableau suivant (Tableau III.1), on peut par exemple citer la méthode de Newton.

III.3.3 Bilan des algorithmes à direction de descente

Ces algorithmes à direction de descente sont largement utilisés et très efficaces. Ils permettent à chaque itération de proposer une amélioration de la solution. Cependant, ces algorithmes présentent deux biais majeurs :

La dérivabilité de la fonction coût par rapport aux variables d'optimisation doit être vérifiée, la fonction ne doit pas être bruitée. Dans le cadre de calculs éléments finis, cela peut poser problème lorsque le calcul de la fonction coût est sensible à la finesse du maillage ou au remaillage.

· La solution obtenue vérifie la condition nécessaire d'optimalité (3.4), cette condition permet uniquement de conclure que la solution proposée est un minimum local et non global sur le domaine. Cette solution dépend fortement du point de départ x^0 (3.8).

Méthode	Principe	Direction de descente	Avantage	Inconvénient
Plus forte pente	L'opposé du gradient est une direction de descente si x n'est pas un point stationnaire. Cette direction est la plus forte décroissance de f .	$d^k = \frac{\nabla f(x^k)}{\ \nabla f(x^k)\ }$	Mise en œuvre simple	La convergence peut être très lente, notamment au voisinage de la solution.
Gradient conjugué	Basé sur la méthode de la plus forte pente, avec une mise en mémoire de la direction de descente de l'itération précédente.	$d^k = -\nabla f(x) + \beta^{k-1} d^{k-1}$ différentes valeurs de β sont présentes dans la littérature ([Fle64], [Pol69]).		Problèmes de convergence dus à l'accumulation d'erreurs d'arrondi.
Newton	Approximation quadratique $Q(x)$ de $f(x)$ au voisinage de x^k à l'itération k . $Q(x) = f(x^k) + \nabla f(x^k) \cdot (x - x^k) + \frac{1}{2} (x - x^k)^t \cdot \nabla^2 f(x^k) \cdot (x - x^k)$ On choisit x^{k+1} qui minimise $Q(x)$, on obtient alors la direction de descente grâce à la condition d'optimalité.	$d^k = -[\nabla^2 f(x^k)]^{-1} \cdot \nabla f(x^k)$	Méthode efficace	Difficulté de calculer le hessien $\nabla^2 f(x)$ de f
Gauss-Newton / Levenberg-Marquardt	Extension de la méthode de Newton basée sur une approximation du hessien de f dans le cas où la fonction coût s'exprime sous forme de moindres carrés [Min98].	$d^k = -(\tilde{H}^k)^{-1} \cdot \nabla f(x^k)$	Largement exploitée pour l'identification de paramètres	
Quasi-Newton	Approximation itérative du hessien de f . Les méthodes les plus populaires pour construire cette approximation \tilde{H}^k sont DFP ([Fle63]), et BFGS [Bro70].		Efficacité	

Tableau III.1 : Méthodes pour le calcul de la direction de descente.

III.3.4 Optimum local - optimum global

En exploitant les méthodes à direction de descente sur la fonction bi-extrema présentée figure III-2, deux solutions peuvent apparaître. Dans le cas où le point de départ x_0' se situe dans le voisinage de x_l , la direction de descente d' tend à faire converger l'algorithme vers le minimum local x_l . Si en revanche le point de départ x_0 se situe dans le voisinage de x_g , la direction de descente d tend à faire converger l'algorithme vers le minimum global x_g . De ces deux solutions, seule la solution x_g satisfait au problème de minimisation (3.3).

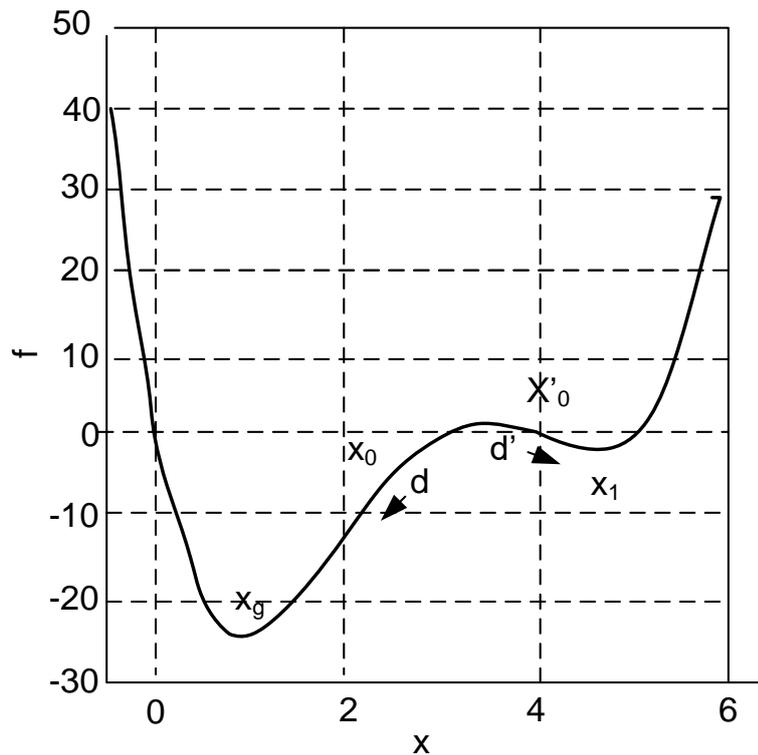


Figure III-2 : Illustration des méthodes à direction de descente, fonction bi-extrema
($y = x^4 - 12x^3 + 47x^2 - 60x$), minimum global x_g en $x = 1$ et minimum local x_l en $x \approx 4.6$

Pour dépasser ces problèmes de minima locaux et de dérivabilité, il existe les algorithmes dits globaux. Ils font l'objet des paragraphes suivants.

III.1.4 Les algorithmes évolutionnaires (AE)

Ces approches sont directement inspirées de la théorie de l'évolution de Darwin. Elles sont basées sur le principe selon lequel la vie est une compétition où seuls les mieux adaptés se reproduisent et survivent. La terminologie utilisée dans ce type d'algorithmes est empruntée au vocabulaire de la biologie. On parlera de sélection, de croisement et de mutation. Les AE utilisent la notion de population d'individus, dans laquelle chaque individu représente une solution potentielle.

Ces méthodes sont très robustes et permettent d'aborder des problèmes dont la fonction peut être non continue et mal connue. En revanche elles peuvent être très gourmandes en temps de calcul. En effet, la fonction coût doit souvent être évaluée en un grand nombre de points pour obtenir l'optimum. Ces méthodes ont vu le jour dans les années 60, avec les travaux de Holland [Hol62],[Hol75]. Elles ont ensuite connu un large développement et sont actuellement des méthodes très utilisées.

On distingue deux types d'algorithmes évolutionnaires adaptés à notre problématique :

- ✓ Les algorithmes génétiques (AG) qui se basent sur une représentation binaire des individus.
- ✓ Les stratégies d'évolution (SE) qui se basent sur une représentation en nombres réels et de dimension fixe des individus.

En effet les algorithmes génétiques et les stratégies d'évolution sont relativement bien adaptés à notre cadre de travail sur l'optimisation des assemblages et l'identification de paramètres de lois rhéologiques.

III.1.4.1 Stratégie d'évolution (SE)

La principale caractéristique qui différencie les AG des SE est le type de représentation, de codage, des variables d'optimisation. Pour les AG les variables d'optimisation sont codées en binaire, pour les SE les variables d'optimisation sont représentées dans l'espace des réels. A chacun de ces deux types de codage est associée une algèbre spécifique. Dans la suite on focalise la description de ce type de méthode sur les algorithmes à stratégie d'évolution. On définit tout d'abord le vocabulaire spécifique, puis ensuite le déroulement général d'un algorithme par SE sera décrit.

Vocabulaire des algorithmes à stratégie d'évolution

- ✓ *Individu* : un individu correspond à un jeu de variables d'optimisation.
- ✓ *Population* : une population est un ensemble d'individus.

- ✓ *Évaluation* : calcul de la fonction coût associée à un individu.
- ✓ *Opérateurs génétiques* : ensemble d'opérations appliquées aux individus (sélection, croisement, mutation).
- ✓ *Sélection* : opérateur qui sélectionne les individus destinés au croisement.
- ✓ *Croisement* : opérateur d'obtention d'un nouvel individu à partir des individus sélectionnés.
- ✓ *Mutation* : opérateur de modification, de perturbation d'un individu.
- ✓ *Actualisation de la population* : sélection de la nouvelle population à partir de l'ancienne et des enfants.
- ✓ *Génération* : une génération est un cycle complet comprenant les opérateurs génétiques, la génération d'une population enfants et l'actualisation de la population.

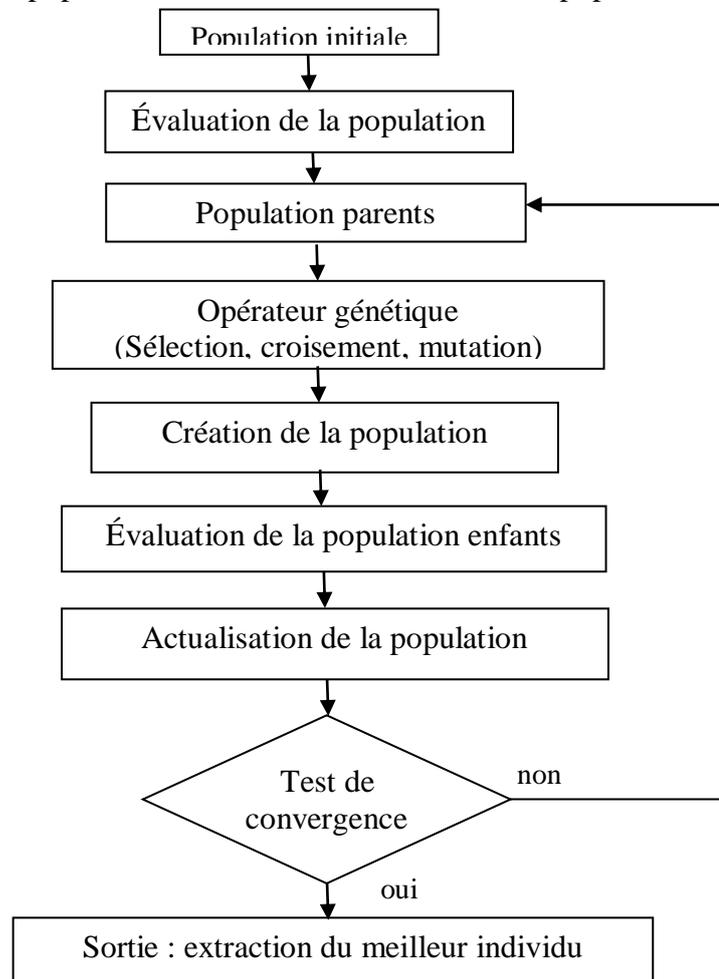


Figure III-3 : Organigramme d'un algorithme à stratégie d'évolution

La méthode générale d'un algorithme à stratégie d'évolution est présentée par l'organigramme de la figure III-3. Les étapes sont détaillées dans la suite :

✓ *Initialisation de la population*

La population initiale est générée dans le domaine d'optimisation. Le nombre d'individus est fixé par l'utilisateur. Cette génération peut être soit aléatoire, soit suivre des règles d'échantillonnage comme les méthodes Latin Hyper Cube [Tan93].

✓ *Évaluation de la population*

L'évaluation de la population est une étape qui peut devenir coûteuse si le temps d'évaluation de la fonction coût est important.

✓ *La sélection*

La sélection permet de choisir, parmi toute la population, les individus qui seront à l'origine de la génération suivante. Il existe plusieurs méthodes. Les plus utilisées sont la sélection par tournoi et la sélection proportionnelle.

- *La sélection par tournoi :*

La sélection par tournoi consiste à choisir le meilleur individu parmi un sous-ensemble de la population. On répète cette opération autant de fois que le nombre d'individus souhaité.

Cette méthode présente l'intérêt d'être facilement ajustée en jouant sur le nombre q d'individus participant au tournoi. Plus q est grand, plus la pression de sélection n'est forte.

- *La sélection proportionnelle :*

Cette méthode, introduite en 1989 [Go189], est la plus utilisée. Elle reproduit un jeu de casino : la roulette russe. Cette roulette comporte autant de cases que d'individus. Si toutes les cases ont la même taille il y aura équiprobabilité de sélection de l'un ou l'autre des individus.

Si chaque case a une taille proportionnelle à la performance $perf(x)$ d'un individu x et prend la valeur $\frac{perf(x)}{\sum_{j=1}^N perf(x^j)}$ alors les individus les plus performants ont une plus grande probabilité d'être sélectionnés. Pour un problème de minimisation, la performance est définie comme l'inverse de la fonction coût.

L'espérance E^i de sélection d'un individu x_i est donnée par $E^i = \frac{N}{\sum_{j=1}^N perf(x^j)} perf(x^i)$.

Où N est le nombre d'individus parents.

La pression sélective est définie comme le maximum des E^i sur la population.

Cette méthode favorise les individus les plus forts mais laisse une chance à tous les individus. Cependant, si la pression sélective est trop élevée, on risque une perte de la diversité.

✓ *Le croisement*

Cette étape est facultative pour les SE, et n'est pas toujours présente dans la génération de nouveaux individus. La représentation par des nombres réels des individus rend les règles de recombinaison simples.

- *La recombinaison discrète*

On choisit par sélection deux parents dans la population. Chaque composante du nouvel individu est alors créée en choisissant aléatoirement la valeur de l'un des deux parents.

- *La recombinaison intermédiaire*

On choisit par sélection deux parents dans la population x^1 et x^2 . Chaque composante du nouvel individu x^{enfant} est alors créée en faisant une combinaison linéaire des valeurs des deux parents.

$$x_i^{enfant} = x_i^1 + x(x_i^2 - x_i^1) \quad (3.9)$$

Où x est une variable aléatoire uniforme comprise entre 0 et 1, et fixée à 0.5 dans beaucoup de cas.

- *La recombinaison globale discrète et globale intermédiaire*

La recombinaison est identique à celle présentée ci-dessus, à la seule différence que pour chaque composante du vecteur des variables d'optimisation un nouveau couple de parents est choisi.

✓ *La mutation gaussienne*

L'opérateur de mutation est toujours présent dans les SE. Il est le principal opérateur d'exploration et est le garant de la recherche globale.

Le principe de la mutation gaussienne est d'ajouter un bruit gaussien centré sur les variables que l'on souhaite faire muter.

$$x_i = x_i + N(0, \sigma) \quad (3.10)$$

Toute la difficulté réside dans le bon choix de la valeur de σ , σ étant la variance la loi normale centrée N . La mutation auto-adaptative propose de faire évoluer cette grandeur avec l'individu. Ainsi, les individus ayant une bonne valeur de σ effectueront des mutations réussies et seront donc plus compétitifs. Cette grandeur σ évolue en suivant les mêmes opérateurs que les variables d'optimisation. La mutation auto-adaptative a été proposée par Rechenberg [Rec73] et Schwefel

[Sch81]. Cette méthode présente l'avantage de ne pas ajouter de paramètre de réglage de l'algorithme, et permet en plus d'assurer à la fois l'aspect global de la recherche et une bonne efficacité de la recherche locale lors de la convergence vers la solution.

✓ *Le remplacement (Sélection de la nouvelle population)*

Il existe deux stratégies de remplacement :

L'une qui consiste à sélectionner les meilleurs individus parmi les enfants et les parents.

Cette méthode est élitiste et peut conduire à une concentration de tous les individus dans un minimum local, la recherche n'est alors plus globale.

L'autre consiste à sélectionner les meilleurs individus uniquement parmi les enfants. Cette méthode est plus robuste pour les environnements très accidentés, mais elle peut conduire à une diminution de la performance. Cette méthode reste cependant intéressante pour sortir d'un minimum local.

✓ *Aspect global de la recherche*

Les méthodes à direction de descente présentées précédemment sont des méthodes de recherche locale. En revanche, les méthodes évolutionnaires sont des méthodes dites globales.

Cet aspect global est garanti par l'opérateur de mutation gaussien. Pour la mutation suivant une loi gaussienne, un individu est susceptible d'être muté, déplacé, dans tout point de l'espace avec une probabilité non nulle, et donc de détecter un minimum global très étroit. Cependant, cette convergence hypothétique globale n'est assurée que pour un nombre infini de générations. La solution obtenue ne pourra jamais être définie avec certitude comme "LE" minimum global du problème d'optimisation.

III.1.4.2 Les algorithmes génétiques (AG)

Les algorithmes génétiques sont très proches des algorithmes par stratégie d'évolution. La différence fondamentale se situe dans la représentation des individus qui se fait de manière binaire. Contrairement aux SE, les AG peuvent résoudre des problèmes où les variables d'optimisation sont non continues, le codage binaire étant discret. De plus, les opérateurs associés sont adaptés au codage binaire.

Les algorithmes génétiques étant basés sur des phénomènes biologiques, il convient de rappeler au préalable quelques termes de génétique.

Les organismes vivants sont constitués de cellules, dont les noyaux comportent des chromosomes qui sont des chaînes d'ADN. L'élément de base de ces chaînes est un nucléotide, identifié par sa base azotée (A, T, C ou G). Sur chacun de ces chromosomes, une suite de nucléotides constitue une chaîne qui code les fonctionnalités de l'organisme (la couleur des yeux par exemple). Ainsi, un gène est une phrase fonctionnelle le long de la chaîne. La position d'un gène sur le chromosome est son locus. L'ensemble des gènes d'un individu est son génotype et l'ensemble du patrimoine génétique d'une espèce est le génome. Les différentes versions d'un même gène sont appelées allèles.

On utilise aussi, dans les algorithmes génétiques, une analogie avec la théorie de l'évolution qui propose qu'au fil du temps, les gènes conservés au sein d'une population donnée sont ceux qui sont le plus adaptés aux besoins de l'espèce vis-à-vis de son environnement. En effet, certaines variations de gènes confèrent aux individus les possédant un avantage compétitif par rapport au reste de la population. Cet avantage compétitif se traduit alors par une meilleure reproduction de ces individus qui permet de transmettre les allèles à l'ensemble de la population après de nombreuses générations.

✓ Outils bioinspirés

La génétique a mis en évidence l'existence de processus importants au sein d'un groupe d'organismes d'une même espèce (ou d'espèces proches chez les bactéries) donnant lieu au brassage génétique. Ces processus interviennent lors de la phase de reproduction lorsque les chromosomes de deux organismes fusionnent en créant un nouvel organisme.

Ces opérations sont « imitées » par les algorithmes génétiques afin de faire évoluer les populations de solutions de manière progressive.

✓ *Sélection*

Pour déterminer quels individus sont plus enclins à obtenir les meilleurs résultats, une sélection est opérée.

Ce processus est analogue à un processus de sélection naturelle, les individus les plus adaptés gagnent la compétition de la reproduction tandis que les moins adaptés meurent avant la reproduction, ce qui améliore globalement l'adaptation.

Étant donné que la sélection est le résultat d'une intervention humaine ou, du moins, l'application d'un critère défini par l'homme, les algorithmes génétiques devraient donc plutôt être rapprochés de la sélection artificielle telle que la pratiquent les agriculteurs que de la sélection naturelle, qui œuvre « en aveugle ».

✓ *Enjambement, croisement ou recombinaison*

Lors de cette opération, deux chromosomes s'échangent des parties de leurs chaînes, pour donner de nouveaux chromosomes. Ces enjambements peuvent être simples ou multiples.

Dans le premier cas, les deux chromosomes se croisent et s'échangent des portions d'ADN en un seul point. Dans le deuxième cas, il y a plusieurs points de croisement. Pour les algorithmes génétiques, c'est cette opération (le plus souvent sous sa forme simple) qui est prépondérante. Sa probabilité d'apparition lors d'un croisement entre deux chromosomes est un paramètre de l'algorithme génétique et dépend du problème et de la technique de recombinaison.

✓ *Mutations*

De façon aléatoire, un gène peut, au sein d'un chromosome, être substitué à un autre. De la même manière que pour les enjambements, on définit ici un taux de mutation lors des changements de population qui est généralement compris entre 0,001 et 0,01. Il est nécessaire de choisir pour ce taux une valeur relativement faible, de manière à ne pas tomber dans une recherche aléatoire et à conserver le principe de sélection et d'évolution. La mutation sert à éviter une convergence prématurée de l'algorithme. Par exemple, lors d'une recherche d'extremum, la mutation sert à éviter la convergence vers un extremum local.

- *Principe*

De manière globale, on commence avec une population de base qui se compose le plus souvent de chaînes de caractères correspondant chacune à un chromosome. Nous reviendrons par la suite sur les différentes structures de données possibles (voir Codage) mais nous retiendrons pour le moment l'utilisation du codage binaire (ex. : 0100110).

Le contenu de cette population initiale est généré aléatoirement. On attribue à chacune des solutions une note qui correspond à son adaptation au problème. Ensuite, on effectue une sélection au sein de cette population.

Il existe plusieurs techniques de sélection. Voici les principales utilisées :

- *Sélection par rang*

Cette technique de sélection choisit toujours les individus possédant les meilleurs scores d'adaptation, le hasard n'entre donc pas dans ce mode de sélection. En fait, si n individus constituent la population, la sélection appliquée consiste à conserver les k meilleurs individus (au sens de la fonction d'évaluation) suivant une probabilité qui dépend du rang (et pas de la fonction d'évaluation).

- *Probabilité de sélection proportionnelle à l'adaptation*

Appelé aussi « roulette » ou « roue de la fortune », pour chaque individu, la probabilité d'être sélectionné est proportionnelle à son adaptation au problème. Afin de sélectionner un individu, on utilise le principe de la roue de la fortune biaisée. Cette roue est une roue de la fortune classique sur laquelle chaque individu est représenté par une portion proportionnelle à son adaptation. On effectue ensuite un tirage au sort homogène sur cette roue.

- *Sélection par tournoi*

Cette technique utilise la sélection proportionnelle sur des paires d'individus, puis choisit parmi ces paires l'individu qui a le meilleur score d'adaptation.

- *Sélection uniforme*

La sélection se fait aléatoirement, uniformément et sans intervention de la valeur d'adaptation. Chaque individu a donc une probabilité $1/P$ d'être sélectionné, où P est le nombre total d'individus dans la population.

Lorsque deux chromosomes ont été sélectionnés, on réalise un croisement. On effectue ensuite des mutations sur une faible proportion d'individus, choisis aléatoirement. Ce processus nous fournit une nouvelle population. On réitère le processus un grand nombre de fois de manière à imiter le principe d'évolution, qui ne prend son sens que sur un nombre important de générations. On peut arrêter le processus au bout d'un nombre arbitraire de générations ou lorsqu'une solution possède une note suffisamment satisfaisante.

Considérons par exemple les deux individus suivants dans une population où chaque individu correspond à une chaîne de 8 bits : A = 00110010 et B = 01010100. On ajuste la probabilité d'enjambement à 0,7 ($8 \times 0,7 = 5,6$ alors on va croiser 6 bits sur les 8 bits des deux mots).

Supposons ici que l'enjambement ait lieu, on choisit alors aléatoirement la place de cet enjambement (toutes les places ayant la même probabilité d'être choisies). En supposant que l'enjambement ait lieu après le deuxième allèle, on obtient A' et B' (« : » marquant l'enjambement sur A et B). Ensuite, chacun des gènes des fils (ici, chacun des bits des chaînes) est sujet à la mutation. De la même manière que pour les combinaisons, on définit un taux de mutation (très bas, de l'ordre de 0,001 – ici on peut s'attendre à ce qu'A' et B' restent identiques).

Chromosome	Contenu
A	00110010
B	01010100
A'	00 010100
B'	01 110010

En effectuant ces opérations (sélection de deux individus, enjambement, mutation), un nombre de fois correspondant à la taille de la population divisée par deux, on se retrouve alors avec une nouvelle population (la première génération) ayant la même taille que la population initiale, et qui contient globalement des solutions plus proches de l'optimum. Le principe des algorithmes génétiques est d'effectuer ces opérations un maximum de fois de façon à augmenter la justesse du résultat.

Il existe plusieurs techniques qui permettent éventuellement d'optimiser ces algorithmes, on trouve par exemple des techniques dans lesquelles on insère à chaque génération quelques individus non issus de la descendance de la génération précédente mais générés aléatoirement. Ainsi, on peut espérer éviter une convergence vers un optimum local.

- Codage d'un algorithme génétique

Pour les algorithmes génétiques, un des facteurs les plus importants, si ce n'est le plus important, est la façon dont sont codées les solutions (ce que l'on a nommé ici les chromosomes), c'est-à-dire les structures de données qui coderont les gènes.

- *Codage binaire*

Ce type de codage est certainement le plus utilisé car il présente plusieurs avantages. Son principe est de coder la solution selon une chaîne de bits (qui peuvent prendre les valeurs 0 ou 1). Les raisons pour lesquelles ce type de codage est le plus utilisé sont tout d'abord historiques. En effet, lors des premiers travaux de Holland, les théories ont été élaborées en se basant sur ce type de codage. Et même si la plupart de ces théories peuvent être étendues à des données autres que des chaînes de bits, elles n'ont pas été autant étudiées dans ces contextes. Cependant, l'avantage de ce type de codage sur ses concurrents a tendance à être remis en question par les chercheurs actuels qui estiment que les démonstrations de Holland sur les avantages supposés de ce codage ne sont pas révélatrices.

La démonstration de Holland (en 1975) pour prouver la supériorité de ce type de codage est la suivante. Il compara deux types de codage pour le même problème. Le premier était composé de peu de types d'allèles mais avec des chromosomes d'une longueur importante (des chaînes de 100 bits par exemple), l'autre était composé de chaînes plus courtes mais contenant plus d'allèles (en sachant que tout autre codage, pour le même chromosome, aboutira à une chaîne plus courte). Il prouva que le codage sous forme de bits était plus efficace de manière assez simple. En effet, les chaînes de 100 bits permettent d'avoir plus de possibilités d'enjambement. Entre deux chromosomes du premier type, l'enjambement peut avoir lieu à 100 endroits différents contre 30 pour ceux du second type. Le brassage génétique sur lequel repose l'efficacité des algorithmes génétiques sera donc plus important dans le premier cas.

Il existe cependant au moins un côté négatif à ce type de codage qui fait que d'autres existent. En effet, ce codage est souvent peu naturel par rapport à un problème donné (l'évolution des poids d'arcs dans un graphe par exemple est difficile à coder sous la forme d'une chaîne de bits).

- *Codage à caractères multiples*

Une autre manière de coder les chromosomes d'un algorithme génétique est donc le codage à l'aide de caractères multiples (par opposition aux bits). Souvent, ce type de codage est plus naturel que celui énoncé ci-avant. C'est d'ailleurs celui-ci qui est utilisé dans de nombreux cas poussés d'algorithmes génétiques que nous présenterons par la suite.

- *Codage sous forme d'arbre*

Ce codage utilise une structure arborescente avec une racine de laquelle peuvent être issus un ou plusieurs fils. Un de leurs avantages est qu'ils peuvent être utilisés dans le cas de problèmes où les

solutions n'ont pas une taille finie. En principe, des arbres de taille quelconque peuvent être formés par le biais d'enjambements et de mutations.

Le problème de ce type de codage est que les arbres résultants sont souvent difficiles à analyser et que l'on peut se retrouver avec des arbres « solutions » dont la taille sera importante alors qu'il existe des solutions plus simples et plus structurées à côté desquelles sera passé l'algorithme. De plus, les performances de ce type de codage par rapport à des codages en chaînes n'ont pas encore été comparées ou très peu. En effet, ce type d'expérience ne fait que commencer et les informations sont trop faibles pour se prononcer.

Finalement, le choix du type de codage ne peut pas être effectué de manière sûre dans l'état actuel des connaissances. Selon les chercheurs dans ce domaine, la méthode actuelle à appliquer dans le choix du codage consiste à choisir celui qui semble le plus naturel en fonction du problème à traiter et développer ensuite l'algorithme de traitement.

III.1.4.3 Généralités sur les plans d'expériences

L'objectif des plans d'expériences (PE) est d'obtenir le maximum d'informations sur l'influence des paramètres d'entrée sur les observables en sortie, en minimisant le nombre d'expériences à réaliser. La particularité de cette méthode est de mettre en place une campagne expérimentale, la plus optimale possible, en s'appuyant sur des considérations mathématiques. Dans la méthode des PE, les essais réalisés sont directement liés à l'objectif que l'on souhaite atteindre : soit la détermination de la sensibilité de l'observable aux paramètres d'entrée, soit la modélisation d'un système ou l'optimisation d'un procédé. Dans la suite on s'efforcera de démontrer l'utilité et l'intérêt de telles méthodes.

Historiquement la notion de PE date des années 1925, et a été initiée par Fisher et Yate lors de leurs travaux en agronomie [Fis25]. La méthode gagne ensuite le monde industriel, notamment grâce à Taguchi qui internationalise cette approche dans la fin des années 70 [Tag78] : il approfondit la méthode pour l'associer à la notion de qualité. Depuis, les PE ont pris un essor considérable avec le développement de l'informatique et la puissance de calcul qui l'accompagne.

On présentera d'abord un exemple pédagogique pour mettre en avant la puissance de la méthode des PE. Puis, on abordera les PE factoriels et optimaux, qui sont des méthodes déjà bien abouties.

En dernier lieu, on exposera une méthode plus moderne : la notion de plan adaptatif, plan qui évolue au cours du déroulement de la campagne.

- Un exemple (tiré de l'ouvrage de J. Goupy [Gou03, Chapitre 4]) :

Prenons un exemple simple pour illustrer l'intérêt des plans d'expériences, exemple tiré de l'ouvrage de J. Goupy [Gou03, Chapitre 4] : la pesée de deux masses m_a et m_b avec une balance à plateau. Cette balance commet une erreur, notée σ , sur chaque mesure.

Méthode classique : on réalise d'abord la mesure de m_a : $m_a = p_1 \pm \sigma$;

puis la mesure de m_b : $m_b = p_2 \pm \sigma$; les deux masses sont donc pesées avec une précision de σ .

Méthode d'Hotelling : dans cette méthode on mesure d'abord la somme des deux masses, notée p_1 , puis la différence, notée p_2 .

$$m_a + m_b = p_1 \quad \text{et} \quad m_a - m_b = p_2 \quad (3.11)$$

$$m_a = \frac{1}{2}(p_1 + p_2) \quad \text{et} \quad m_b = \frac{1}{2}(p_1 - p_2) \quad (3.12)$$

Si on applique le théorème de la variance à (3.12):

$$V_{m_a} = \frac{1}{4}[V_{(p_1)} + V_{(p_2)}] = \frac{1}{4}(\sigma^2 + \sigma^2) = \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (3.13)$$

Où la variance est le carré de l'écart type de la mesure $V_{(p)} = \sigma^2$, on fait ici l'hypothèse que l'erreur sur la mesure est de type gaussienne. L'erreur ainsi commise est de $\frac{\sigma}{\sqrt{2}}$ au lieu de σ , soit une amélioration de 30% de la précision. On voit ici l'intérêt de faire varier tous les paramètres (les masses) à chaque expérience (les pesées) : avec le même nombre d'expériences la précision est améliorée.

Comme le montre l'exemple précédent, une organisation rationnelle des expériences peut réellement apporter une amélioration de la précision. Avant de détailler les différentes méthodes de construction des plans d'expériences, présentons la démarche globale des PE.

- ✓ Etape a : définition des objectifs et listage des réponses expérimentales possibles.
- ✓ Etape b : choix des facteurs pris en considération, des interactions entre facteurs et du domaine expérimental.
- ✓ Etape c : proposition d'un plan d'expérience adapté à la modélisation souhaitée.
- ✓ Etape d : estimation des coefficients du modèle.
- ✓ Etape e : validation du modèle.

III.1.4.3.1 Les plans d'expériences classiques✓ *Les plans factoriels complets*

Pour présenter les plans factoriels appuyons nous sur un exemple : un plan étudiant 3 facteurs pouvant prendre chacun 2 valeurs différentes, notées - et + (un changement d'échelle permet de toujours se rapporter à cet intervalle). Par définition du plan complet toutes les combinaisons possibles sont étudiées, soit $2^3 = 8$ expériences.

Les 8 expériences et leurs réponses sont présentées dans le Tableau III.2. Chacune de ces expériences est réalisée avec une erreur $\sigma = 2\%$ au sens de la variance.

Num d'essai	x_1	x_2	x_3	réponses
1	-	-	-	$y_1=38$
2	+	-	-	$y_2=37$
3	-	+	-	$y_3=26$
4	+	+	-	$y_4=24$
5	-	-	+	$y_5=30$
6	+	-	+	$y_6=28$
7	-	+	+	$y_7=19$
8	+	+	+	$y_8=16$

Tableau III.2 : Matrice d'expériences

Ce type de plan est associé à une surface de réponse polynomiale Q1, dans notre cas :

$$y = m + E_1x_1 + E_2x_2 + E_3x_3 + I_{12}x_1x_2 + I_{23}x_2x_3 + I_{13}x_1x_3 + I_{123}x_1x_2x_3 \quad (3.14)$$

Ce polynôme (3.14) fait apparaître y la réponse, x_i la valeur des facteurs, m la valeur moyenne, les effets E_i et les interactions entre facteurs I_{ij} .

Les effets sont directement à relier à la notion de sensibilité par rapport à un paramètre.

Les interactions caractérisent le couplage entre certains paramètres. Elles prennent tout leur sens lorsque l'on étudie des réactions chimiques, où les interactions sont à l'origine de la réaction.

Une représentation matricielle du plan est alors naturellement mise en place : Y le vecteur réponse, E le vecteur des effets, et X la matrice d'expériences.

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_1x_2 & x_2x_3 & x_1x_3 & x_1x_2x_3 \\ 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_1x_2 & x_2x_3 & x_1x_3 & x_1x_2x_3 \\ 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_1x_2 & x_2x_3 & x_1x_3 & x_1x_2x_3 \\ 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_1x_2 & x_2x_3 & x_1x_3 & x_1x_2x_3 \\ 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_1x_2 & x_2x_3 & x_1x_3 & x_1x_2x_3 \\ 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_1x_2 & x_2x_3 & x_1x_3 & x_1x_2x_3 \\ 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_1x_2 & x_2x_3 & x_1x_3 & x_1x_2x_3 \\ 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_1x_2 & x_2x_3 & x_1x_3 & x_1x_2x_3 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} y_1=38 \\ y_2=37 \\ y_3=26 \\ y_4=24 \\ y_5=30 \\ y_6=28 \\ y_7=19 \\ y_8=16 \end{pmatrix} \quad E = \begin{pmatrix} m \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ I_{12} \\ I_{23} \\ I_{13} \\ I_{123} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

Pour chaque ligne de la matrice X (3.15), x_1 , x_2 et x_3 prennent les valeurs +1 ou -1 suivant l'essai réalisé (Tableau III.2).

Le système s'écrit alors : $Y = X E$

Dans le cas d'un plan factoriel, la matrice d'expériences X a des propriétés spéciales (matrices d'Hadamard), notamment $X^{-1} = \frac{1}{n} X^t$

où n est la taille de la matrice. On obtient alors rapidement la valeur du vecteur d'effet :

$$E = \frac{1}{n} X^t Y \quad \Rightarrow \quad \begin{pmatrix} m=27.5 \\ E_1= -1 \\ E_2= -6 \\ E_3= -4 \\ I_{12}= -0.25 \\ I_{23}= -0.25 \\ I_{13}=0.25 \\ I_{123}=0 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Plusieurs choses peuvent être notées :

- L'utilisation d'une échelle réduite permet de normaliser les différents facteurs et donc de comparer directement leurs effets relatifs.
- L'erreur sur chaque effet est, d'après le théorème de la variance, de $\Delta = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < 0.7\%$
- L'interaction au troisième ordre I_{123} est nulle.

Cette dernière remarque fait apparaître que si l'on fait l'hypothèse a priori que cette interaction est négligeable, un certain nombre d'essais peut être économisé. Ces types de plans sont appelés plans factoriels fractionnaires.

Cette méthode, bien que coûteuse en nombre d'essais, est utilisée lorsque l'on traite peu de paramètres. On peut citer le travail de Hana [Han06] sur le procédé de frettage : il réalise un plan factoriel 2^3 pour modéliser le ratio d'énergie de glissement avec comme facteur la pression de contact, la fréquence, et le déplacement. Dans ce cas les PE ont permis de déterminer les conditions de frettage avec un minimum d'essais et de comparer deux états de surface différents.

✓ *Les plans factoriels fractionnaires*

Appuyons nous sur l'exemple précédent pour construire un plan factoriel fractionnaire : 2^{3-1} .

Seuls 4 essais sont réalisés (Tableau III.3). La surface de réponse associée à ce plan est :

$$y = m + I_1x_1 + I_2x_2 + I_3x_3 \quad (3.17)$$

Num essai	X ₁	X ₂	X ₃	y
2	+	-	-	Y ₂
3	-	+	-	Y ₃
5	+	-	+	Y ₅
8	-	+	+	Y ₈

Tableau III.3 : Matrice d'expériences d'un plan fractionnaire

Où li est l'effet du facteur xi . On applique le même type de traitement que pour le plan complet, les effets li sont alors calculés et comparés avec les effets Ei issus du plan complet (Tableau III.4).

Effet	Plan complet	Plan fractionnaire
Moyenne	27.5	27.25
1	-1	-0.75
2	-6	-6.25
3	-4	-4.25

Tableau III.4 : Effets issus du plan complet et du plan fractionnaire

Les résultats sont comparables, mais ils ont été obtenus avec moitié moins d'essais que pour un plan complet. Cette réduction du nombre d'essais a forcément une contrepartie, certaines approximations sont faites.

Détaillons le calcul de l_3 :

$$l_3 = \frac{1}{4}(-y_2 - y_3 + y_5 + y_8) \quad (3.18)$$

Si l'on revient sur le plan complet :

$$E_3 = \frac{1}{8}(-y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) \quad (3.19)$$

$$I_{12} = \frac{1}{8}(+y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8)$$

On remarque alors : $l_3 = E_3 + I_{12}$

l_3 est en réalité la somme de l'effet E_3 et de l'interaction I_{12} , ces deux grandeurs sont dites "aliasées". l_3 est donc représentatif de l'effet du facteur x_3 sous l'hypothèse que l'interaction I_{12} soit négligeable, ou inversement. La mise en place d'un plan fractionnaire doit donc être précédée d'une phase de réflexion poussée sur les acteurs à prendre en compte, ainsi que sur leurs interactions afin de décider lesquelles sont négligeables ou non.

Dans notre exemple, seuls les effets sont calculés, l'ensemble des interactions étant considéré comme négligeable. Ce plan est dit de résolution I.

✓ Les plans de TAGUCHI

Taguchi a principalement travaillé dans le domaine de la qualité. Sa méthode s'appuie sur des plans factoriels fractionnaires. Ces plans sont construits en faisant l'hypothèse que seules certaines interactions entre deux facteurs sont non nulles, interactions parfaitement identifiées par l'expérimentateur, les interactions d'ordre supérieur étant toutes supposées négligeables.

L'un des principaux intérêts de la méthode réside dans sa standardisation [Tag87].

Comme pour les plans fractionnaires présentés précédemment, il ne faut pas oublier que les effets calculés sont "aliasés" avec des interactions d'ordres supérieurs. Il est préconisé de réaliser une ou

plusieurs expériences supplémentaires dans le domaine d'étude pour valider le modèle mis en place [Pil05].

III.1.4.4 Les plans d'expériences optimaux

Les plans présentés précédemment sont des plans orthogonaux, leur matrice d'expériences vérifie $X^t X = I_d$ mais dans de nombreux cas, il est impossible de construire de tels plans. Par exemple, si certaines combinaisons de paramètres sont interdites, ou si l'on veut intégrer des expériences déjà réalisées. L'alternative est donc de construire des plans optimaux, plans qui donneront la meilleure précision sur les paramètres du modèle.

On se posera alors deux questions :

- que doit-on optimiser pour aboutir à un plan optimal ?
- suivant quel critère doit être réalisée cette optimisation ?

✓ Précision du plan

Pour répondre à la première question, prenons le modèle linéaire suivant :

$$y = XE + e \quad (3.20)$$

Où y est le vecteur des N réponses, X la matrice des N essais de taille $N \times p$, E le vecteur des p coefficients du modèle, et ε le vecteur des erreurs d'approximation. La solution du système (3.20) est obtenue par l'approximation des moindres carrés :

$$\hat{E} = (X^t X)^{-1} X^t y \quad (3.21)$$

\hat{E} est un estimateur de E . Cet estimateur par moindre carré a de très bonnes propriétés. On démontre que sa matrice de variance-covariance est :

$$\text{cov}(\hat{E}) = (X^t X)^{-1} \sigma^2 \quad (3.22)$$

Où $\sigma^2 = \text{Var}(\varepsilon)$ est la variance de l'approximation.

On arrive ainsi à exprimer la variance et la covariance des paramètres du modèle sans faire intervenir les valeurs des réponses. On peut donc construire le plan d'expériences à priori. Un PE optimal minimisera donc la valeur des termes de cette matrice.

✓ Critères d'optimalité

Pour répondre à la deuxième question, citons les critères les plus utilisés.

- D-Optimalité : ce critère est basé sur la minimisation du déterminant de la matrice $X^t X$, que l'on peut assimiler à la variance globale du système, si l'on développe la matrice de variance-covariance de \hat{E} (3.21)

$$(X^t X)^{-1} = \frac{1}{\det(X^t X)} [com(X^t X)]^t \quad (3.23)$$

où $Com(X)$ est la co-matrice de X .

$$\text{Le critère s'exprime alors } \pi_D = \min \frac{\det(X^t X)}{N} \quad (3.24)$$

Il est alors possible de déterminer le plan D-Optimal parmi un ensemble U de N expériences possibles, pour un modèle donné. Ce type de critère est utilisé comme point de départ pour la mise en place de plans à nombre d'expériences réduit [Kov07].

- A-Optimalité : ce critère optimise la trace de la matrice $(X^t X)^{-1}$ c'est-à-dire la somme des variances des coefficients.

$$P_A = \min(\text{trace}(X^t X)^{-1}) \quad (3.25)$$

Il existe de nombreux autres critères d'optimalité. On pourra se référer à l'ouvrage de Dreesbeke [Dro97] pour plus de détails. Dans la pratique, l'ensemble des expériences possibles est obtenu par un quadrillage du domaine d'étude des facteurs. Les essais sont alors sélectionnés par des méthodes d'optimisation dédiées. Les plus utilisées sont les algorithmes d'échange de Fedorov et de Mitchell.

✓ Application des plans optimaux

Il est à noter que les plans classiques factoriels sont par nature optimaux, il faut donc s'y rattacher le plus souvent possible. Les plans optimaux sont utilisés dans les cas suivants :

- combinaisons de facteurs interdits (par exemple en chimie un mélange peut devenir dangereux pour certaines proportions),
- réutilisation d'expériences déjà réalisées,
- récupération de plans dont certaines difficultés n'avaient pas été envisagées,
- réalisation d'un plan avec un nombre limité et fixe d'expériences [Kov07].

✓ Bilan des méthodes par plans d'expériences

Les méthodes par plans d'expériences ne sont pas à proprement parlé des méthodes d'optimisation, elles ne permettent pas de résoudre le problème de minimisation (3.3). Elles permettent cependant d'analyser un procédé, un système, en contrôlant le nombre de tests réalisés et en appliquant une méthodologie rigoureuse. Des informations très importantes sur la sensibilité du procédé par rapport aux variables d'optimisation peuvent être obtenues par les plans d'expériences.

CHAPITRE IV

OPTIMISATION DES ASSEMBLAGES HYBRIDES

IV.1 Application de l'algorithme génétique AG

L'objectif de l'optimisation est de minimiser le déplacement total Δl dans les substrats de l'assemblage hybride, due à l'application d'une force de traction f .

La fonction objective est donc directement cette force calculée par la théorie Yamaguchi et Amano, dans [YAM85]

$$\Delta l_{total} = \frac{f \cdot e \cdot \alpha}{G_A \left(b \cdot l - n \cdot \frac{\pi}{4} \phi^2 \right) + k \cdot G_B \cdot n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \phi^2} \quad (4.1)$$

avec
$$k = \frac{G_A \left(bL - n \frac{\pi \phi^2}{4} \right)}{e C_u} \quad (4.2)$$

$$\alpha = \frac{\eta_v \cdot l}{2 \cdot \tanh(\eta_v \cdot l)} \quad (4.3)$$

et
$$\eta_v = \sqrt{\frac{2 \cdot G_A}{e \cdot e_1 \cdot E_1}} \quad (4.4)$$

Les paramètres de l'assemblage sont présentés au tableau IV.1 cidessous :

paramètres	notation	Dimension
Module transversal dans l'adhésif(MPa)	GA	218.30
Module transversal dans la jonction(MPa)	GB	4285.71
Epaisseur de l'adhésif (mm)	e	Paramètre variable $0.3 \leq e \leq 0.7$
Epaisseur du substrat (mm)	e ₁	5
La largeur de l'adhésif (mm)	b	Paramètre variable $38 \leq b \leq 100$
La longueur collée (mm)	l	76
Nombre de boulons	n	2
Le diamètre des boulons (mm)	φ	9.52
La force (N)	f	[1250 ;3875 ;15000]
La raideur des boulons (KN/mm)	C _u	70
Module de Young des substrats	E ₁	Paramètre variable $7000 \leq E_1 \leq 13400$

Tableau IV.1 : Les dimensions des facteurs de l'assemblage hybride

Au début on va choisir trois paramètres variables (epaisseur de l'adhésif e , la largeur de l'adhésif l et le module de young des substrats)

On utilisant logiciel MATLAB,c'est une optimisation sans contrainte avec des paramètres variables continus,de 50 générations et 100 populations. La figure IV.1 (a) et la figure IV.1(b)

montrent respectivement la convergence de l'allongement minimum Δl et l'histogramme des facteurs les plus influents (épaisseur de l'adhésif, le module de young des substrats, la largeur des substrats) pour une force de traction de 1250N. Même chose pour les figures IV.2, et figure IV.3, pour respectivement les forces 8750N et 15000N.

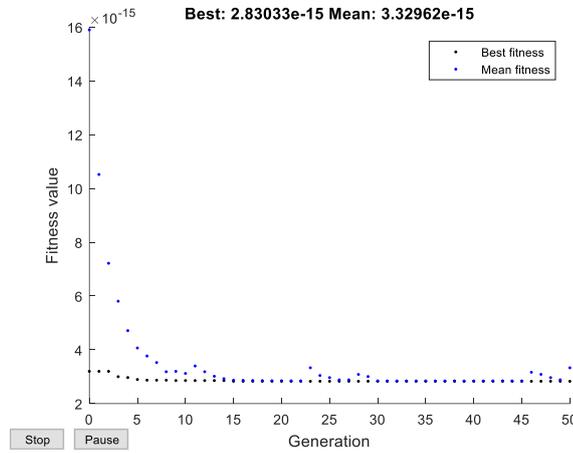


Figure IV.1(a) : Optimum pour f=1250N

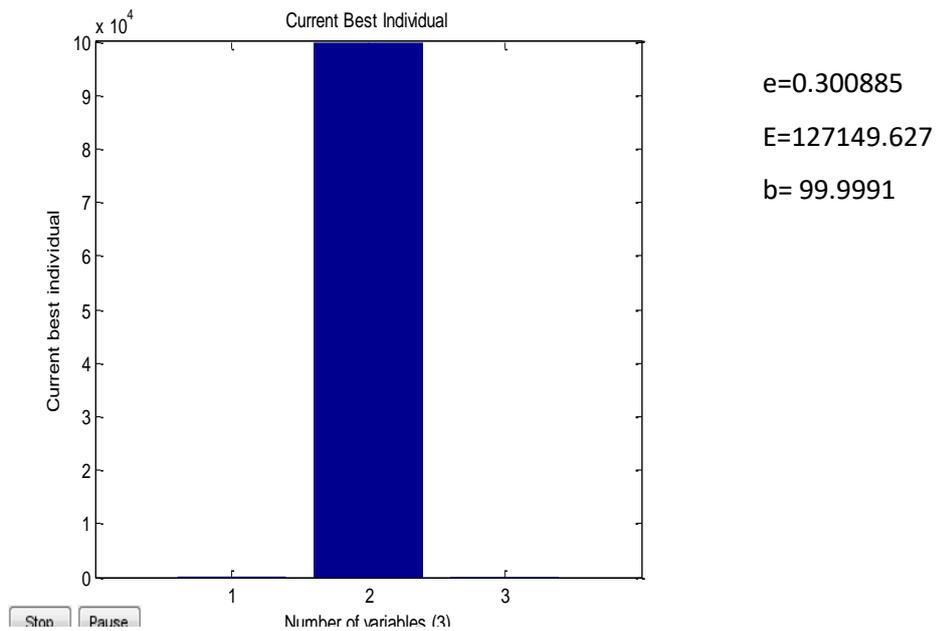
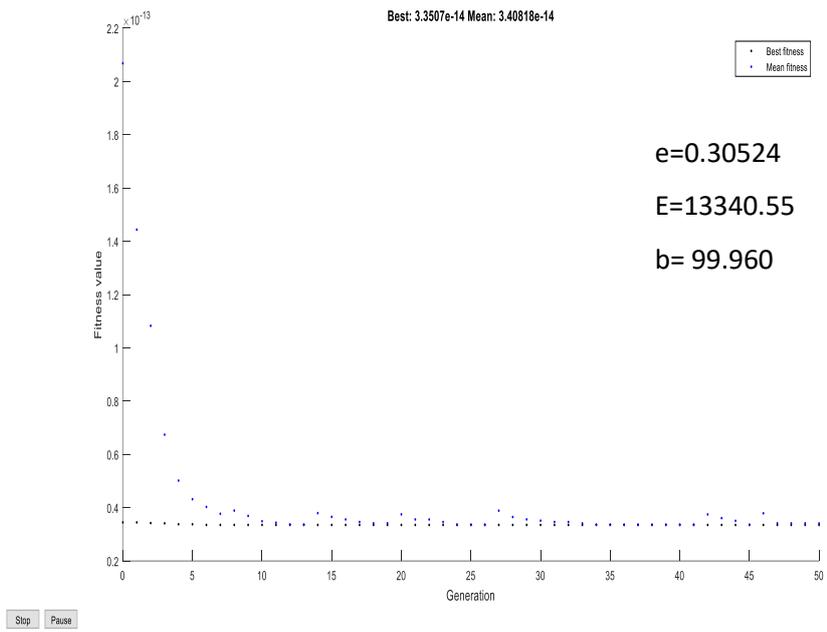
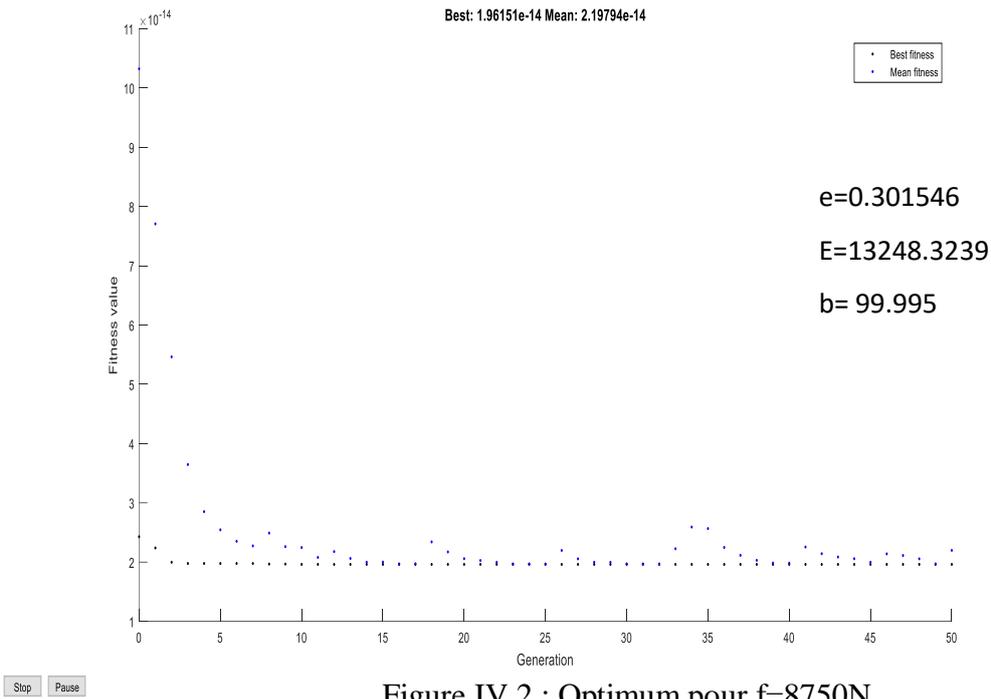


Figure IV.1(b) : Le facteur le plus influent



Conclusion

Dans ce chapitre, le comportement d'un assemblage hybride (collé - boulonné) est étudié. L'étude a été réalisée à l'aide de l'algorithme génétique pour l'optimisation des facteurs à savoir l'épaisseur de l'adhésif, les substrats et le module de young sur le déplacement

Deuxièmement, afin d'optimiser le paramètre de l'assemblage, une conception de la méthode expérimentale a été utilisée en considérant deux facteurs à deux niveaux à savoir l'épaisseur, la largeur et leur interaction.

Les résultats obtenus sont:

- ✓ l'épaisseur optimale est de 0,33 mm
- ✓ le module du young est de 13248N / mm²
- ✓ la largeur est de 99,995 mm.

IV.2 Application de la méthode d'optimisation par plan d'expériences PE

L'objectif de l'optimisation est de minimiser le déplacement total Δl dans les substrats de l'assemblage hybride, due à l'application d'une force de traction f .

Les paramètres de l'assemblage sont présentés au tableau IV.2:

paramètres	notation	Dimension
Module transversal dans l'adhésif(MPa)	GA	218.30
Module transversal dans la jonction(MPa)	GB	4285.71
Epaisseur de l'adhésif (mm)	e	Paramètre variable $0.3 \leq e \leq 0.7$
Epaisseur du substrat (mm)	e_1	5
La largeur de l'adhésif (mm)	b	Paramètre variable $38 \leq b \leq 100$
La longueur collée (mm)	l	76
Nombre de boulons	n	2
Le diamètre des boulons (mm)	φ	9.52
La force (N)	f	14000
La raideur des boulons (KN/mm)	C_u	70
Module de Young des substrats (N/mm ²)	E_1	63131.74

Tableau IV.2 : Les dimensions des facteurs de l'assemblage hybride

On a choisis la variation de l'épaisseur de l'adhésif et la largeur des substrats, la valeur du module de young du stratifié est calculée.

IV.2.1. Représentation d'une étude sous forme de tableau

Les variables sont l'épaisseur de l'adhésif et la largeur des substrats.

✓ *Tableau d'expérimentation :*

on a deux variables donc 2^2 essais

N° d'essai	Epaisseur d'adhésif	Largeur des substrats	L'allongement Δl
01	0.3	38	4.981e-14
02	0.3	100	4.93 e-14
03	0.7	38	5.501 e-14
04	0.7	100	5.44 e-14

Tableau IV.3 : Tableau d'expérimentation (unités courantes).

✓ *Représentation des facteurs codés*

	epa	lar	epa*lar	all
Epaisseur (epa)	<u>1</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	0.994094
Largeur (lar)	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>0</u>	-0.108096
epa*lar	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>1</u>	-0.00965127
Allongement (all)	0.994094	-0.108096	-0.00965127	<u>1</u>

Tableau IV.4 : Codage des facteurs

Modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 \quad (4.5)$$

- y est la réponse
- x_i représente le niveau attribué au facteur i.
- a_0 est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- a_1 est l'effet (ou effet principal) du facteur 1.
- a_2 est l'effet (ou effet principal) du facteur 2.
- a_{12} est l'interaction entre les facteurs 1 et 2.

La résolution de ce système donne la valeur des coefficients avec l'utilisation de l'outil MOODE :

coefficients	Valeur
a_0 la moyenne	5.213
a_1 effet 1 épaisseur de la colle	0.297335
a_2 effet 2 largeur des substrats	-0.0323316
a_{12} interaction	-0.00333319

Tableau IV.5 : Valeurs des coefficients après calcul.

✓ Le modèle mathématique est :

$$y = 5.213 + 0.297335x_1 - 0.0323316x_2 - 0.00333319x_1x_2 \quad (4.6)$$

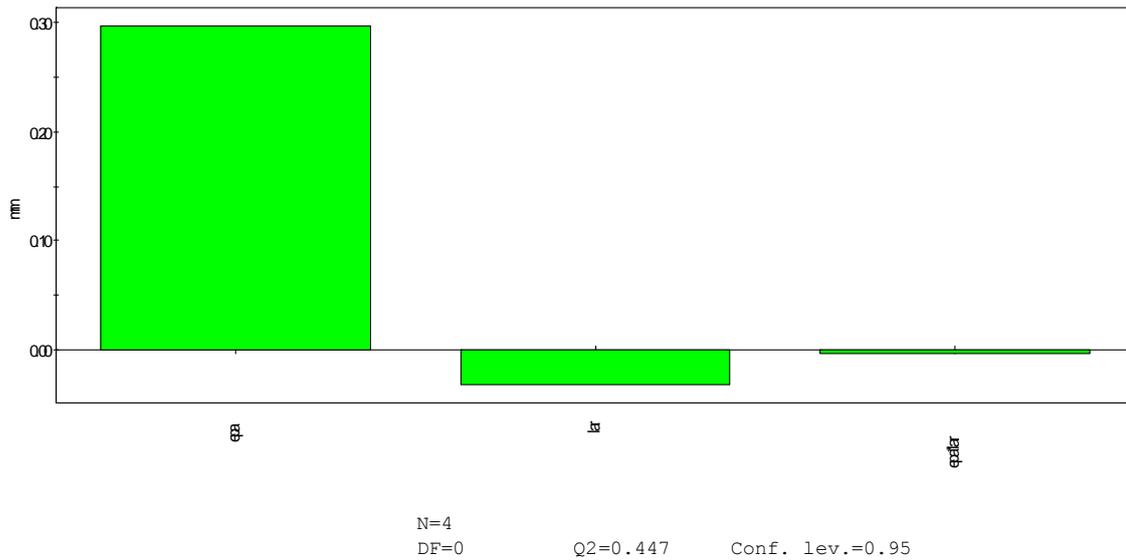
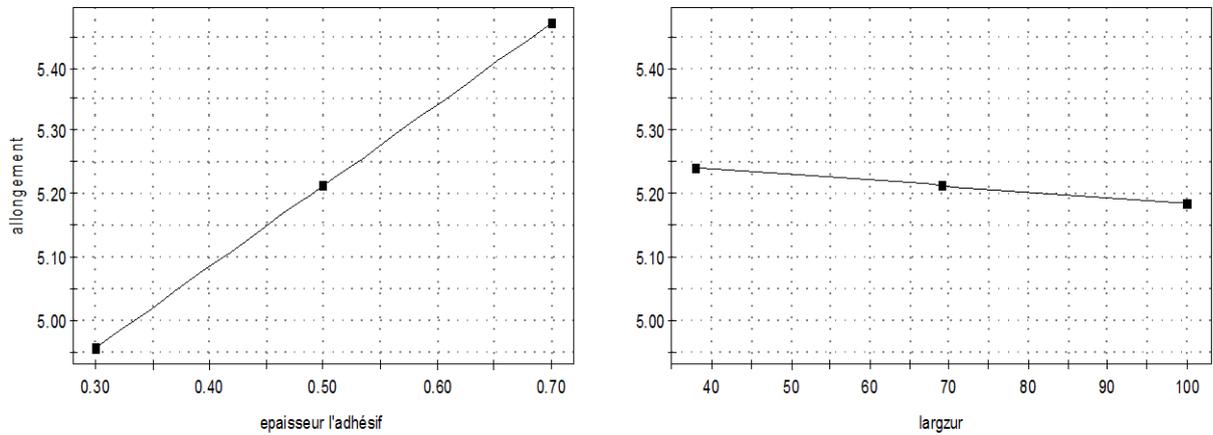


Figure IV.5 : Histogramme des coefficients

IV.2.2 Interprétation



N=4 DF=0 Conf. lev.=0.95

Figure IV.6 : Effets de l'épaisseur et de la largeur des substrats sur l'allongement

L'effet de l'épaisseur est de 0.29 mm pour une variation de 0.033 de la largeur des substrats (figure IV.6). On peut donc améliorer l'allongement en diminuant l'épaisseur de l'adhésif. L'effet de la largeur -0.033 mm pour une variation de 31mm. Il en résulte qu'il faut augmenter la largeur pour améliorer l'allongement.

✓ L'effet le plus important

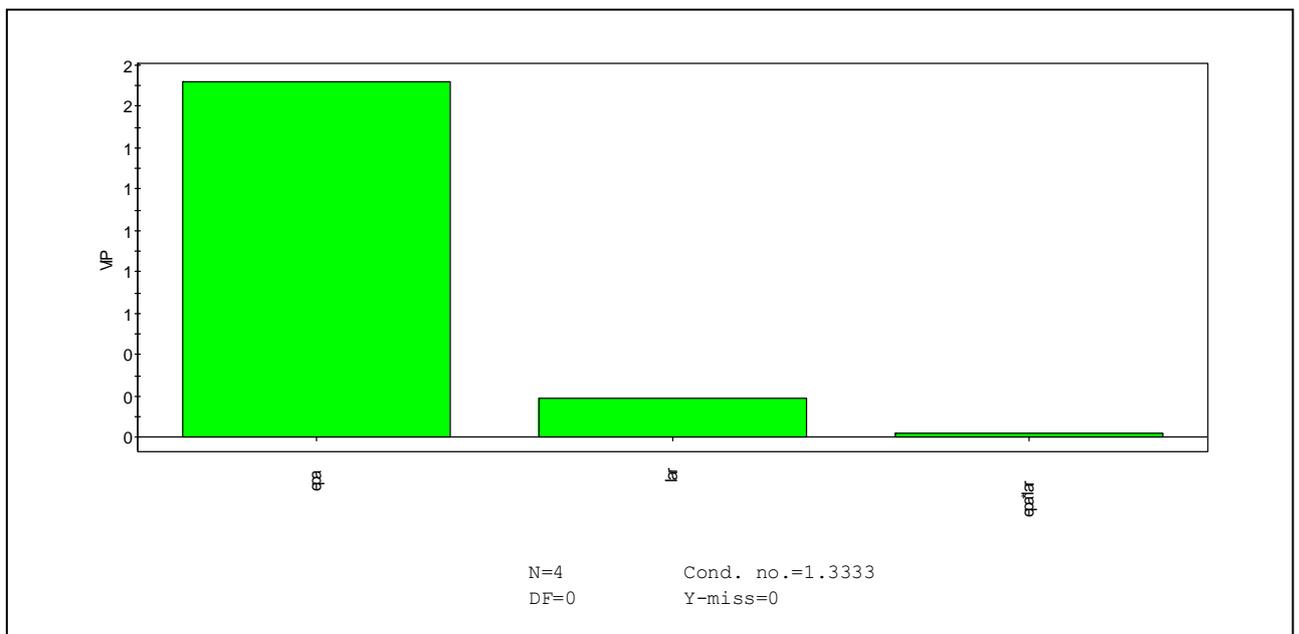


Figure 4.7 : Histogramme des effets.

Pour avoir une vue d'ensemble des résultats, on trace les courbes isoréponses dans le domaine d'étude (figure IV.8)

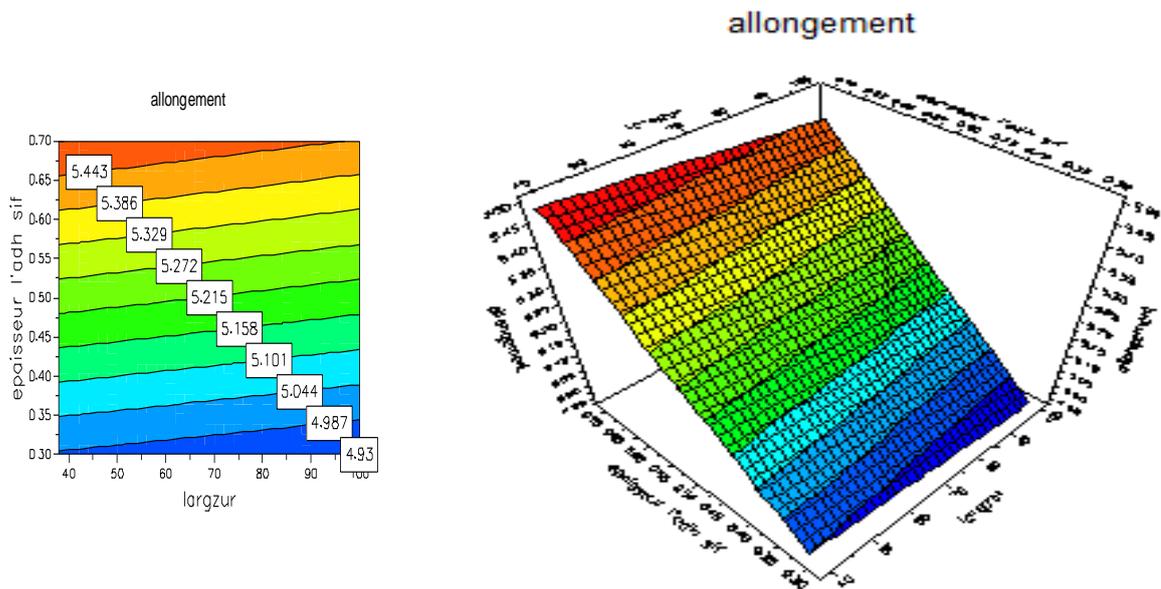


Figure IV.8 : Courbes isoréponses montrant l'influence de l'épaisseur de l'adhésif et de la largeur des substrats sur l'allongement.

IV.3 APPLICATION DE LA METHODE PE SUR UNE ETUDE EXPERIMENTALE DE LA RUPTURE DES ASSEMBLAGES

Notre objectif consiste essentiellement à améliorer la prévision du matage, jusqu'au premier pic de contrainte.

Nous avons définis ces essais, qui ont ensuite été réalisés à l'Onera, dans le cadre du projet Americo, en étroite collaboration avec P. Paulmier, responsable des essais composites de l'exdépartement DMSE. [Frc09]

IV.3.1 Configurations expérimentales

Une configuration de matage pur (figure IV.9), afin de suivre le développement du matage sans que d'autres modes de rupture ne viennent interférer.

La distance e à l'extrémité de la plaque, la largeur w , le diamètre du trou D et l'épaisseur t .

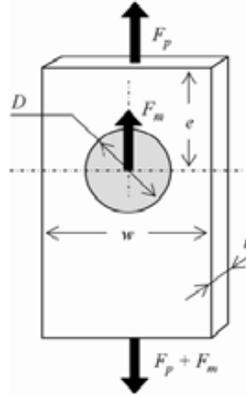


Figure IV.9 : Dimensions et chargement de l'assemblage élémentaire

L'essai est réalisé dans les conditions ambiantes. Il est piloté en déplacement. On utilise une machine de traction/compression Schenck de ± 4000 daN, électro-hydraulique asservie. Celle-ci fournit les mesures du déplacement du piston et de l'effort résultant. En outre, on dispose d'un capteur de déplacement pour une mesure plus précise des déplacements vus par l'éprouvette. Un dispositif d'acquisition d'images (appareil photo numérique, objectifs, trépied et éclairage), combiné à un logiciel de corrélation d'images, permet d'obtenir une mesure de déplacement sur la face de l'éprouvette afin d'estimer les champs de déformation autour d'un trou. Enfin, le suivi de l'évolution de l'endommagement au cours du chargement est assuré par un dispositif d'émission acoustique. Les dispositifs expérimentaux sont présentés sur la figure IV.10.

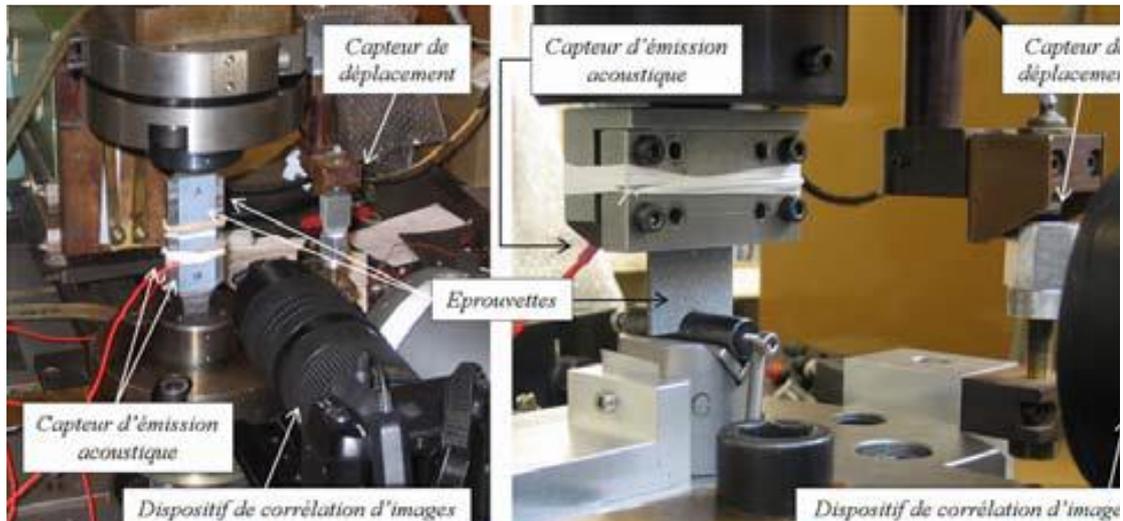


Figure IV.10 : Dispositifs expérimentaux pour l'essai d'assemblage simple (à gauche) et l'essai de matage (à droite).

IV.3.2 L'essai de matage pur

La configuration de matage pur est inspirée de l'essai de contact par un pion proposé par [Wu 98]. Il s'agit d'un essai relativement simple, dont l'observation est plus aisée que le montage conventionnel en double recouvrement, et qui permet d'employer des éprouvettes de dimensions beaucoup plus réduites. L'essai consiste à venir écraser (indenter) la tranche de l'éprouvette par un pion, l'extrémité opposée de l'éprouvette étant bloquée dans un mors (voir figure IV.11). Cependant, à la différence de l'essai de contact par un pion, le pion ne vient pas solliciter une surface plane, mais un demi-trou découpé dans la tranche de l'éprouvette. Ceci dans le but d'être plus représentatif de la réalité d'un assemblage et de capturer l'influence du diamètre du trou. Une précaution pour ce type de montage consiste à limiter la longueur utile de l'éprouvette pour éviter le flambement. Dans ces travaux, cette longueur est fixée à approximativement 30mm. A cette distance, on considère que les contraintes locales en bord de trou et l'endommagement de matage qui en découle ne sont pas perturbés par la présence des mors, au moins jusqu'au pic de matage.

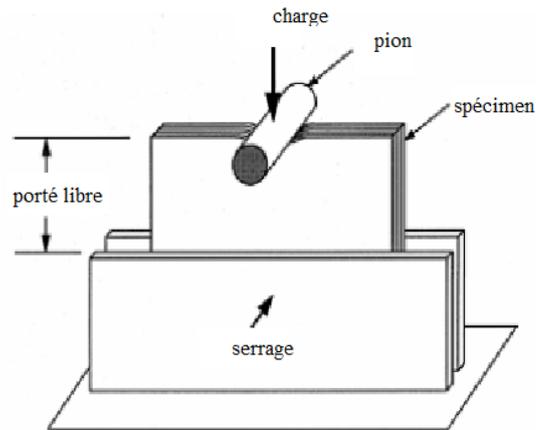


Figure IV.11 : Schéma de principe de l'essai de contact par un pion. D'après [Wu 98].

Pour un empilement donné sollicité en matage pur, la transition entre les modes de cisaillement et de matage dépend essentiellement du rapport e/D . La transition entre les modes de traction et de matage dépend du rapport w/D . La contrainte représentée correspond à la contrainte moyenne de matage σ_m , définie par le rapport entre l'effort de matage F_m et la section de matage théorique :

$$\sigma_m = F_m / (D \cdot x \cdot t) . \quad (4.7)$$

La saturation observée correspond à la rupture en matage, pour laquelle la contrainte moyenne de matage atteint sa valeur maximale σ_{Rm} , définie comme la résistance du stratifié au matage.

Résultat de l'expérience en variant les paramètres géométriques apparaît au tableau IV.6 ci-dessous :

Numéro de l'expérience	D (mm)	Dt (trou) (mm)	t(mm)	σ_m contrainte de rupture de fibres (MPa)
01	6	6.35	1.84	176
02	6	6.35	1.93	213
03	6	6.4	1.84	223
04	6	6.4	1.84	200
05	8	8.15	1.84	307
06	8	8.15	1.84	250
07	10	10.2	2.08	228
08	10	10.2	2.08	332

Tableau IV.6 : Résultats expérimentaux

On veut étudier l'influence des facteurs x_i qui sont les paramètres géométriques D (diamètre du pion), Dt (diamètre du trou), t (épaisseur de la plaque) sur la réponse y qui représente la contrainte moyenne en traction σ_m

facteurs	Niveau -1	Niveau +1
D (1)	6	10
Dt (2)	6.35	10.2
t (3)	1.84	2.08

Tableau IV.7 : Niveau des facteurs et domaine d'étude.

Les valeurs intermédiaires sont des valeurs codées par la loi : $x_{i=ui} = \frac{u_{max}+u_{min}}{2} - \frac{u_{max}-u_{min}}{2} x_i$ (4.8)

Puisqu'il y a trois facteurs, il faut 2^3 expériences, donc on peut appliquer le Plan factoriel complet.

N° d'essais	X1(D mm)	X2 (Dt mm)	X3 (t mm)	X12 (D* Dt)	X13 (D*t)	X23 (Dt*t)	X123(D*Dt*t)	y (σ_m Mpa)
01	-1	-1	-1	1	1	1	-1	176
02	-1	-1	-0.33	1	0.333	0.333	-0.333	213
03	-1	-0.99	0.03	0.99	-0.03	-0.03	0.036	223
04	-1	-0.97	-0.11	0.97	0.11	0.10	-0.10	200
05	0	-0.66	1	0	0	-0.66	0	307
06	0	-0.06	-0.70	0	0	0.04	0	250
07	1	1	0.77	1	0.77	0.77	0.77	228
08	1	1	0.77	1	0.77	0.77	0.77	332

Tableau IV.8 : Matrice d'expériences

IV.3.3 Calcul des coefficients a_{ij}

Les coefficients du modèle ont été déterminés par programmation sur Matlab.

a_0	a_1	a_2	a_3	a_{12}	a_{13}	a_{23}	a_{123}
241.125	7.625	4.625	38.125	12.625	4.125	-3.875	27.625

Tableau IV.9 : Coefficients a_{ij}

IV.3.4 Le modèle mathématique :

Le modèle élaboré obtenu par programmation MATLAB est exprimé par:

$$y = 241.125 + 7.625 x_1 + 4.625 x_2 + 38.125 x_3 + 12.625 x_1 x_2 + 4.125 x_1 x_3 - 3.875 x_2 x_3 + 27.625 x_1 x_2 x_3 \quad (4.9)$$

IV.3.5 Résultat du calcul de la moyenne théorique et l'erreur expérimentale :

N°expérience	La réponse estimée Y_{est}	Erreur expérimentale er
01	176.0000	0
02	219.6669	0.000444
03	243.6878	0.0004280
04	234.1054	0.0011632
05	279.2013	0.0007728
06	213.8189	0.0013091
07	317.3328	0.0079804
08	317.3328	0.0002151

Tableau IV.10 : Réponse estimée par le modèle

IV.3.6 Détermination de la qualité**IV.3.6.1 Qualité descriptive du modèle R^2**

$$R^2 = 0.6092$$

IV.3.6.2 Qualité prédictive du modèle Q^2

$$Q^2 = 0.6092$$

IV.3.6.3 Intervalle de coefficients de confiance :

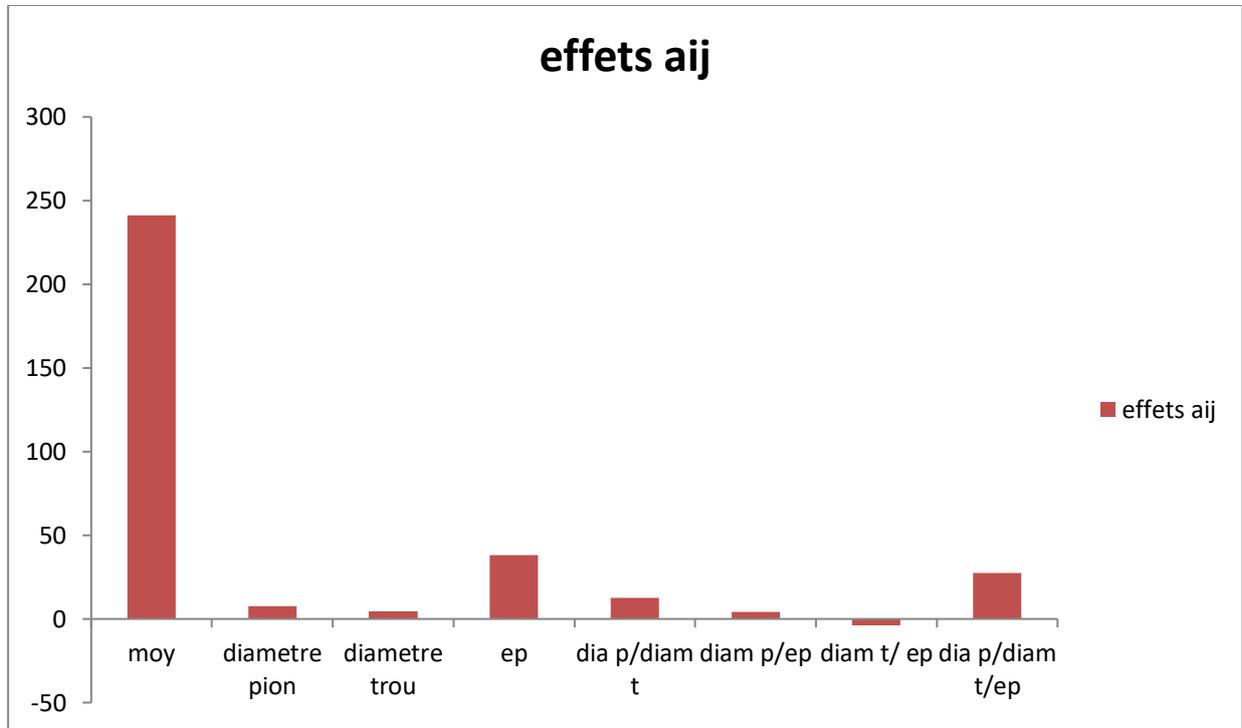


Figure IV.12 : Histogramme des effets

IV.3.7 Les courbes isoréponses

- On fixe l'épaisseur $t = 1,84$ mm et on varie D et Dt

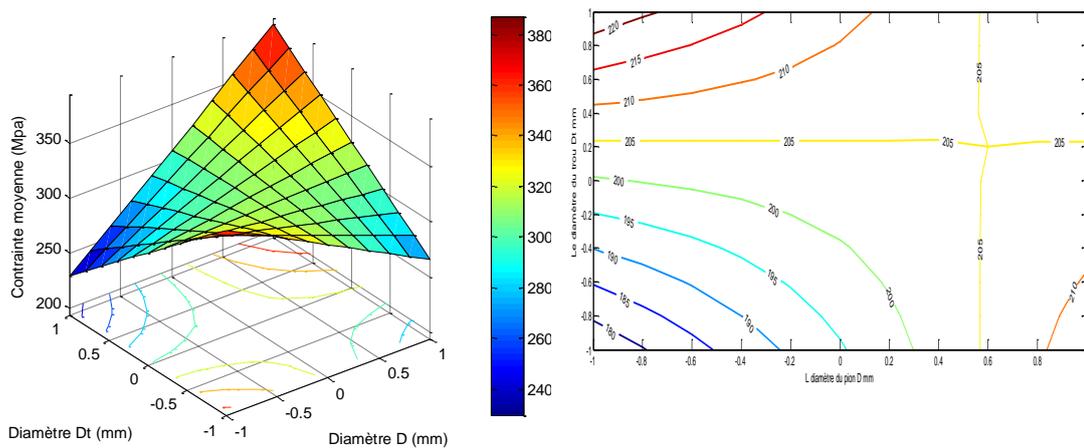


Figure IV.13 : Courbes isoréponses montrant l'influence diamètre du pion D et le diamètre du trou Dt pour épaisseur de la plaque $t=1,84$.

- $t = 2,08 \text{ mm}$

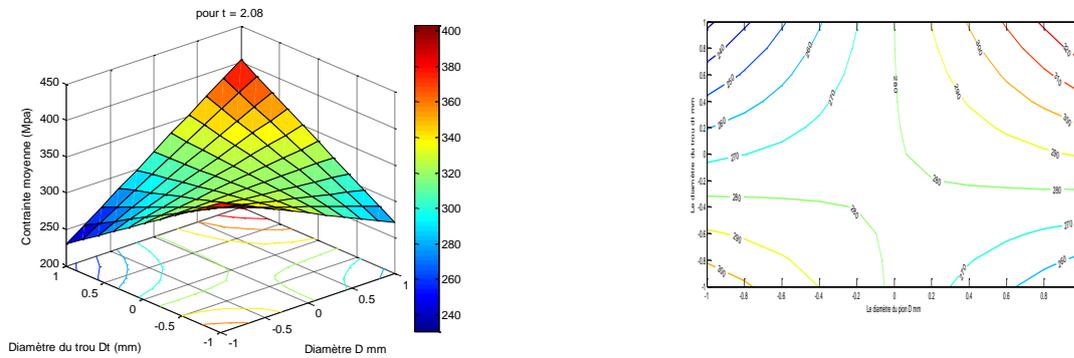


Figure IV.14 : Courbes isoréponses montrant l'influence diamètre du pion D et le diamètre du trou Dt pour épaisseur de la plaque $t=2,08$.

- On fixe l'épaisseur $D = 6 \text{ mm}$ et on varie Dt et t

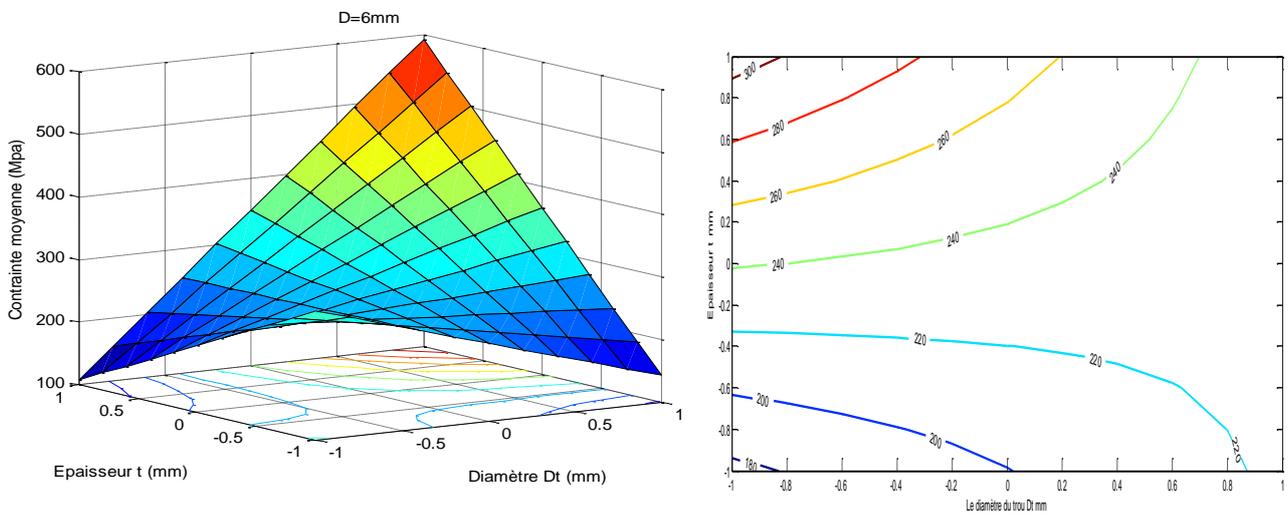


Figure IV.15 : Courbes isoréponses montrant l'influence épaisseur de la plaque t et le diamètre du trou Dt pour un diamètre du pion $D=6$.

- $D=10\text{mm}$

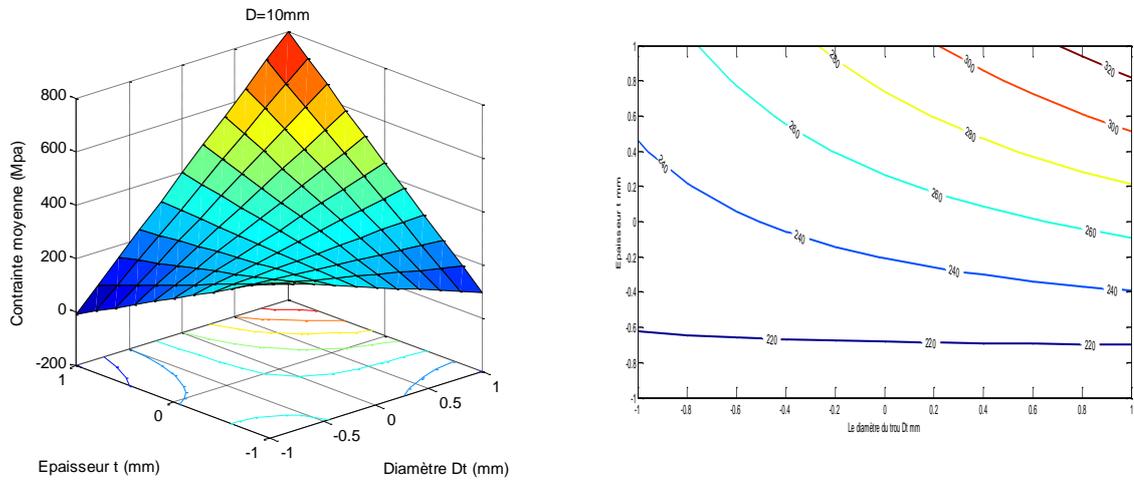


Figure IV.16 : Courbes isoréponses montrant l'influence épaisseur de la plaque t et le diamètre du trou Dt pour un diamètre du pion $D=10$.

- On fixe l'épaisseur $Dt = 6,35$ mm et on varie D et t

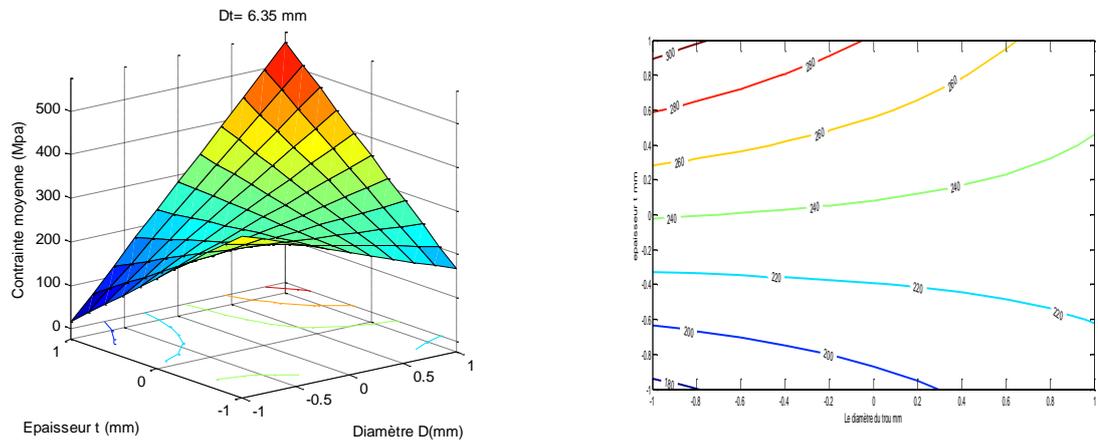


Figure IV.17 : Courbes isoréponses montrant l'influence épaisseur de la plaque t et le diamètre du pion D pour un diamètre dutrou $Dt=6,35$.

- $Dt = 10,2\text{mm}$

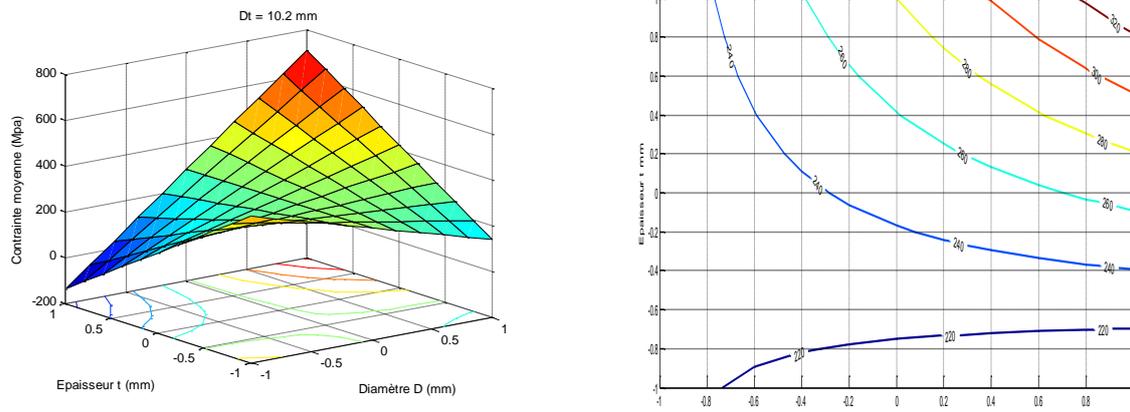


Figure IV.18 : Courbes isoréponses montrant l'influence épaisseur de la plaque t et le diamètre du pion D pour un diamètre du trou $Dt=10,2$.

IV.3.8 CONCLUSION

L'étude présentée dans ce travail met en évidence l'effet du matage sur la résistance à la traction des fibres d'un matériau stratifié type T300/914, $[90_2/0_2/90_2/0_2]_s$ de dimensions $100 \times 150\text{mm}$ dans le plan et d'une épaisseur théorique de 2mm .

Le modèle mathématique obtenu par la méthode des plans d'expériences a permis de mettre en évidence l'influence du matage ainsi que les effets des facteurs pris en considération à savoir: le diamètre du trou, le diamètre du pion et l'épaisseur de la plaque. L'analyse montre que l'épaisseur est l'effet le plus significatif, puis l'effet simultané de l'interaction des trois paramètres ensuite l'effet de l'interaction diamètre du trou et diamètre du pion.

Le modèle mathématique obtenu décrit de manière satisfaisante les résultats expérimentaux ; Les qualités descriptive et prédictive du modèle R^2 et Q^2 sont de l'ordre de $0,7$.

CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés dans cette Thèse s'intéressent aux assemblages issus de la combinaison entre le procédé de collage à l'aide d'un adhésif et le procédé de serrage mécanique à l'aide d'un boulon (boulonnage).

L'utilisation conjointe de ces deux procédés est désigné par "assemblage hybride (boulonné/collé)". La présente Thèse traite l'adoption d'approches d'optimisation multi objectifs durant la phases de conception et processus d'assemblage de structures mécaniques de haute sécurité, fiabilité et performance.

La recherche traite le problème des assemblages hybrides (boulonnés-collés) des structures composites. L'objectif est l'optimisation des facteurs et leurs interactions les plus influents par l'adoption de nouvelles approches et outils d'analyses performants permettant d'améliorer la compréhension du comportement des joints hybrides.

Pour atteindre l'objectif visé, et après des recherches bibliographiques et un état de l'art dressé au sujet de la question, nous avons d'une part développé des modèles numériques d'un assemblage hybride à recouvrement simple soumis à un effort de traction à l'aide de la Méthode des Eléments Finis (MEF) utilisant le code de calcul Abaqus ensuite comparer les résultats pour valider le modèle. D'autre part, nous avons identifié, utilisé et dans certains cas, développé des algorithmes (algorithme génétique sur Matlab et plans d'expériences sur Moode).

En conclusion, et d'après les résultats trouvés, nous affirmons que les méthodes développées permettent de constater que le module de young des statifiés est plus influent par rapport à l'épaisseur de l'adhésif.

En perspective, après avoir vu que le comportement des fixations dans les assemblages boulonnés n'est pas assez connu, et qu'en particulier, la raideur des fixations, paramètre préalable à tout dimensionnement, doit être étudiée afin de pouvoir notamment utiliser de manière précise les modèles analytiques des assemblages HBC. Une étude paramétrée pourrait être utile afin de donner la relation entre la raideur des fixations et les paramètres géométriques et mécaniques mis en jeu.

Au niveau de l'approche analytique, la première étape pourrait consister à coder le modèle plan non équilibré car presque tous les études publiés se basaient sur les assemblages équilibrés c'est-à-dire avec des épaisseurs constantes des substrats et adhésif. Par ailleurs, la prise en compte de comportements inélastiques de l'adhésif pourrait être utile. L'effet de la viscosité des adhésifs sur le comportement mécanique pourrait être exploré. D'autre part, avoir une épaisseur constante d'adhésif le long du recouvrement semble être difficilement réalisable. C'est pourquoi, il serait

intéressant d'étudier et de modéliser l'influence des variations de l'épaisseur d'adhésif des assemblages hybrides.

La question du montage des fixations précontraintes n'a pas été abordée. Il serait pourtant intéressant d'étudier les effets du préserrage des fixations sur le comportement mécanique.

Les adhésifs étant des polymères, il serait nécessaire d'étudier l'influence du vieillissement humide et thermique sur le comportement mécanique des assemblages hybrides. En particulier, nous pourrions envisager de mesurer l'impact du vieillissement sur la température de transition vitreuse de l'adhésif, afin de pouvoir en modéliser l'effet sur la tenue statique et en fatigue d'assemblages hybrides testés à température.

Références

- [Bro70] C.G. Broyden, The convergence of a class of double-rank minimization algorithms, *Journal of the Institute of Mathematics and Its Applications* 6, pp.222-231, 1970.
- [Chan (2001)] Computer aided geometric topology and shape design Within axiomatic design framework. Second International Conference on Axiomatic Design. Cambridge, MA.
- [Dro97] J. Drosbeke, M. Lejeune, G. Saporta, Analyse statistique des données spatiales, Editions TECHNIP, M. Lejeune, 1997.
- [Fu et Mallick (2001) [FU01] Fu M., Mallick P.K. (2001) *Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites*, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 21, pp. 145-159
- [Fle63] R. Fletcher, M.J.D. Powell, A Rapidly Convergent Descent Method for Minimization, *Computer Journal* 6, pp.163-168, 1963.,
- [Fle64], R. Fletcher, C.M. Reeves, Function Minimization By Conjugate Gradient, *Computer Journal* 7, pp.149-154, 1964.
- [Fis25] R. Fisher, Statistical Methods for Research Worker, Olivier and Boyd, 1925.
- [Frc09] François-Xavier Irisarri. Stratégies de calcul pour l'optimisation multiobjectif des structures composites. Mécanique [physics.med-ph]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009. Français. fftel00514120f
- [Ganji (2007)] Parametric study of load transfer in two-bolted single lap hybrid (bonded/bolted) shear joints Academic Department : Department of Mechanical Engineering. Mémoire de maitrise, Wichita State University.
- [Gou03, Chapitre 4] J. Goupy, Introduction aux plans d'expériences, Dunod, 2003.
- [Go189] D.E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, Machine Learning, Addison-Wesley Publishing company, 1989.
- [Han06] A. Hana, Study and evaluation of fretting critical slip conditions by applying the
- [HAR85] Hart-Smith L.J. (1985) *Bonded-Bolted Composite Joints*, Journal of Aircraft, Vol. 22, N° 11, pp. 993-1000
- [Hol62], H.J. Holland, Outline for a logical theory of adaptative systems, *journal of the association of computing machinery* 9, pp.297-314, 1962.

- [Hol75] H.J. Holland, *Adaptation in natural and artificial system*, Ann Harbor, The University of Michigan Press, 1975..
- [Imanaka et al, 1995] Fatigue Strength of Adhesive/ Rivet Combined Lap Joints. *Adhesion* 93, 5th International Conference of the Adhesives-Section of the Polymer-Industry-Division of the Institute-of-Materials. vol. 49, pp. 197{209.
- [Kelly, 2005]. Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. *Composite Structures*, vol. 69, pp. 35{43.
- [Kelly, 2006] Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. *Composite Structures*, vol. 72, pp. 119{129.
- [Kumar et al. (1989)]. Adding Additional Load Paths in a Bonded/Bolted Hybrid Joint. *Journal of Aircraft*, vol. 45, pp. 1593-1598.
- [Kov07]. J. Kovach, Development of a d-optimal robust design model for restricted experiments, *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice* 14(2), pp.117-128, 2007.
- [Kweon et al, 2006] of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding. *Composite Structures*, vol. 75, pp. 192-198.
- [Lee et al. (2010)] Lees J.M., Makarov G. (2004) *Mechanical/bonded joints for advanced composite structures*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures & Buildings 157, Issue SB1, pp. 91-97
- [Lees et Makarov, 2004] *Axiomatic design and fabrication of composite structures : application in robots, machine tools, and automobiles*. Oxford University Press,
- [Lin et Jen, 1999] The Strength of Bolted and Bonded Single-Lapped Composite Joints in Tension. *Journal of Composite Materials*, vol. 33, pp. 640-666.
- [LUN66], Lunsford L.R. (1966) *Stress Analysis of Bonded Joints*, Applied Polymer Symposia, N° 3, pp. 57-73
- [McCarthy(2005)] Three-dimensional _finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints : Part II--effects of bolt-hole clearance. *Composite Structures*, vol. 71, pp. 159-175.

- [Min98]. M. Minkowycz, W.J. Sparrow, G.E. Schneider, R.H. Pletcher, Handbook of Heat Transfert, Wisley&Sons, 1998.
- [Moroni et al, 2010]. Experimental analysis and comparison of the strength of simple and hybrid structural joints. International Journal of Adhesionand Adhesives, vol. 30, pp. 367-379.
- [Paroissien, 2006] PAROISSIEN, E. (2006). Contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés) - Application aux jonctions aéronautiques. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III.
- [Pol69]) E. Polak, G. Ribière, Note sur la converge de méthode de directions conjuguées, *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle* 3, pp.35-43, 1969.
- [Pil05] M. Pillet, Plan d'expériences par la méthode Taguchi, Les Edition d'Organisation, 2005.
- [Rec73] I. Rechenberg, *Evolutionstrategie: OptimierungstechnischerSystemenach Prinzipien der biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog, 1973.
- [Sch81]. H.-P. Schwefel, *Numerical Optimization of Computer Models*, JohnWiley& Sons, 1981.
- [Shivashankar et Vijayarangan, 2005] A Numerical Approach on Load Sharing Analysis and Optimization of Bolted Joint E_iciency. *Academic Open Internet Journal*, vol. 15.
- SIMPSON, T. W., MAURERY, T. M., KORTE, J. J. et MISTREE, F. (2001).
- [Tan93] [Tan93] : B. Tang, Orthogonal array-based latinhypercubes, *Journal of the American statistical association* 88, pp.1392-1397, 1993.
- [Tag78] [Tag78] : G. Taguchi, Off-line and on-line quality control systems, *In Proceedings of International Conferences on Quality Control* , 1978.
- [Tag87] [Tag87] : G. Taguchi, *Orthogonal arrays and linear graph*, American Supplier Institute Press, 1987.

REFERENCES

[VOL38] Volkersen O. (1938) *Die Nietkraftverteilung in Zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*, Luftfahrtforschung, Vol. 15, pp. 41-47

[Wang (2010)] The Effects of Adding Attachments in Conventional Composite Hybrid Joints on Tensile Strength. Rapport technique, Purdue University.

[Wu 98] Wu P.S, Sun C.T., "Modeling bearing failure initiation in pin-contact of composite laminates", *Mechanics of Materials* 29, pp. 325-335, 1998

[YAM85], Yamaguchi Y., Amano S. (1985) *Mechanical behaviour of a combined joint composed of mechanical fastening and adhesive bonding*, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 5, N° 4, pp. 193-199

ANNEXES

```
%application de l'optimisation par algorithme génétique
%le but est de minimiser dl en variant la charges f
f=[1250;2500;3750;5000;6250;7500;8750;10000;11250;12500;13750;15000]
%les variables sont e et Es
0.3<e<0.7
7000<Es<134000
GA=250
es=5
beta=sqrt(2*GA/(e*es*Es))
b=38
l=76
n=2
phi=9.52
GB=4285.7
cu=70000
k=(GA*(b*l-n*(pi/4)*phi^2))/e*cu
alpha=beta*l/2*tanh(beta*l)
%fonction objective
%=====
dl=f*e*alpha/(GA*(b*l-n*(pi/4)*phi^2)+k*GB*n*(pi/4)*phi^2)*

function dl=merabbi(xl,xu)
%le but est de minimiser dl en variant la charges f
%=====
%chaque fois tu change f et tu vas avoir les résultats
%=====
f=[1250;2500;3750;5000;6250;7500;8750;10000;11250;12500;13750;15000]
for ii1=0.25:0.25:1
for ii2=40000:1000:210000
for ii3=2:0.5:10
for ii4=100:50:1400
%GA=250
%e=0.7
%E=7000
beta=sqrt(2*ii4/ii1*ii3*ii2)
b=100
l=76
n=2
phi=9.52
GB=4285.7
cu=70000
k=(ii4*(b*l-n*(pi/4)*phi^2))/ii1*cu
alpha=beta*l/2*tanh(beta*l)
dl=f*ii1*alpha/(ii4*(b*l-n*(pi/4)*phi^2)+k*GB*n*(pi/4)*phi^2)
end
end
end
end
%5<es<10
%76<l<100
options=optimoptions(@ga); % Default GA options
options.TolFun=1e-10; % Resolution
options.Generations=50; % Number of generations
options.PopulationSize=100; % Population size
options.CrossoverFraction=0.4; % Cross-over fraction
options.PlotFcns=@gaplotbestindiv% Ploting function as best fitness
```

```
options.Display='iter'; % Iteration display

fitnessfcn = @merabbi;% Fitness
nvars=4; % Number of variables
A=[]; b=[]; % Linear inequality constraints
Aeq=[];beq=[]; % Equality constraints
xl=[0.25 40000 2 100]; xu=[1 210000 10 1400]; % Lower and upper bounds
nonlcon=[]; % Non-linearity constraints
[x,fval]=ga(fitnessfcn,nvars,A,b,Aeq,beq,xl,xu,nonlcon,options);% Optimization
command
disp('x*'); disp(x); % x*: Optimal x
disp('f(x*)');
```