République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــي والبـحـــــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de maintenance en génie industrielle

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique
Spécialité : maintenance en électromécanique

Thème

Analyse et optimisation des zones de recouvrements des joints de collés

Présenté et soutenu publiquement par :

Amrani Hadia Zineb

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. Anes Moulai Khatir	MCA	IMSI	**Président**
Mr. Youcef Bouizem	MCB	IMSI	**Encadrant**
Mr. Anis Tarfaya	MCB	IMSI	**Examinateur**
Bachir Bachir Bouiadjra	MCA	IMSI	**Co-encadrant**

Année 2024/2025


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciement

وأنا لها وإن من قال أنا لها نالها أبت رُغمًا عنها أتيتُ بها. نلتها وعانقت اليوم مجدًا عظيمًا، فعلتها بعد أن كانت كانت دروبًا قاسية، وطرقًا .مستحيلة "خسرت بها الكثير، ولكنّي "وصلت

الحمد لله حُبًا وشُكرًا وامتنانًا، الحمد لله الذي بفضله أدركتُ أسمى الغايات، أنظر إلى نفسي ونجاحي كما ينظر أحدهم إلى معجزته، إلى حلمٍ طال انتظاره، يتحقّق إلى .بفضل الله ويُصبح واقعًا أفتخر به العزيز الذي حملتُ اسمه فخرًا، يُردد اسمي عاليًا في عنان السماء، حاملًا شرف لقبه، ...وبكل اعتزاز أنا لهذا الرجل ابنة

إلى من كلّله الله بالهيبة والوقار، إلى من غرس في روحي مكارم الأخلاق، داعمي الأول إلى من) في مسيرتي وسندي... (والدي كانت الداعمة الأولى والأبدية، ملاكي الطاهر، من كان وجودها يمدّني بالسعي دون ملل، إلى التي ظلت دعواتها تضم اسمي دائمًا، القلب الحنون، معلمتي ، ها)أمّي ومحبوبتي وملهمتي(...الأولى

أنا اليوم أهديك علمًا وشهادةً تخليتِ عنها في سبيل رعايتي وتعليمي، ممتنّة لأن أهديكم .الله اصطفاكِ من البشر أمًا لي هذا الإنجاز، الذي لولاكم لم يكن، أهديكم مراحلي وإنجازاتي كلها، فالفضل والثناء للمولى، ثم لكفاحكم لأجلي، وعطائكم الذي إلى خيرة أيامي وصفوتها، .يُضمّد تعبي

إلى من مُدّت لي أياديهم وقت ضعفي وآمنوا بقدرتي، إلى ضلعي الثابت وأمان أيامي... (إخواني وأخواتي). إلى الذين يُبهجهم نجاحي، ولكل من كان عونًا وسندًا في هذا الطريق، لأصدقاء ورفقاء السنين ولا يفوتني .وأصحاب الشدائد والأزمات أن أتقدم بخالص الشكر والتقدير لمشرف مذكرتي الأستاذ الفاضل بشير بويجرة، الذي لم يبخل عليّ بتوجيهه وإرشاده ودعمه طوال فترة البحث، فله مني جزيل الامتنان والاحترام، على ما بذله من جهد .ومساندة في مسيرتي العلمية

وأخيرًا... الشكر موصول لنفسي على الصبر والعزيمة والإصرار، والتي كانت أهلًا للمصاعب، ها أنا أختم كل ما مررت به بفخر ونجاح، الحمد لله من قبل ومن بعد، راجيةً من الله تعالى أن ينفعني بما علّمني، وأن يعلّمني ما أجهل، ويجعله حُجّةً لي لا .عليّ

Table des matières

CHAPITRE 1 3
1.1 Introduction 4
1.2 Historique sur le collage 7
1.3 Avantages et désavantages du collage structural 8
1.4 Différent type du collage 9
1.4.1 Colles à séchage par évaporation 10
1.4.2 Colles thermoplastique 10
1.4.3 Colles contact 11
1.4.4 Colles auto-adhésives (PSA) 11
1.4.5 Colles polyuréthane 12
1.4.6 Colles à basse de résine époxy 12
1.4.7 Colles anaérobiques 13
1.4.8 Colles cyanoacrylates 13
1.4.9 colles à base polymères silylés 14
1.4.10 colles silicone 14
1.5 Définition de l'adhérence 14
1.6 Les tests de rupture 16
1.6.1 Mécanisme d'adhésion directe 18
CHAPITRE 2 20
2.1 Introduction 21
2.2 Historique de l'optimisation numérique 21
2.2.1 Origines Antiques et Précurseurs 21
2.2.2 XVIIIe et XIXe siècles : Fondements Mathématiques 21
2.2.3 XXe siècle : Formalisation et Applications Industrielles 21
2.2.4 Fin du XXe siècle et Début du XXIe siècle : Expansion et Diversification 22
2.2.5 Époque Moderne : Intelligence Artificielle et Apprentissage Automatique 22
2.2.6 Avenir de l'Optimisation Numérique 22
2.3 Domaine d'application de l'optimisation numérique 23
2.4 L'optimisation numérique dans le domaine de CND 25
2.5 Les logiciels appliquées dans le domaine de l'optimisation numérique 26
2.6 Conclusion 33
CHAPITRE 3 35

3.1 Introduction 36
3.2 Définition d'ABAQUS 36
3.3 Module 37
3.3.1 Module PART 37
3.3.2 Module PROPERTY 39
3.3.3 module ASSEMBLY 43
3.3.4 Module STEP 45
3.3.5 Module Interaction 45
3.3.6 Module LOAD 48
3.3.7 Module MESH 49
3.3.8 Module JOB .....**Error! Bookmark not defined.**
3.3.9 Module Visualization .....**Error! Bookmark not defined.**
CHAPITRE 4 53
4.1 Anayse des contraintes de cisaillement d'un collage a simple joint du recouvrement 54
4.1.1 Mécanismes fondamentaux des contraintes adhésives.....54
4.1.2 Analyse des contraintes de cisaillement d'un collage a simple joint du recouvrement avec biseautage extérieur 60
4.1.3 Analyse des contraintes de cisaillement d'un collage a simple joint du recouvrement avec biseautage intérieur 73
CHAPITRE 5 87
5.1 Introduction sur l'optimisation numérique appliquée sur les résultats des simulations numériques 88
5.1.1 Analyse et optimisation des résultats des simulations numériques 89
5.1.2 Analyse et optimisation selon les diagrammes des contours 93

Table des figures

figure 1.1- les quatre types de rupture 15
figure 1.2- différents modes de sollicitation 16
figure 1.3- le plus fréquemment employés. 17
Figure 2.1 :Matlab.[35] 27
Figure 2.2 :Python.[37] 27
Figure 3.3 :GAMS. 28
Figure 2.4 :AMPL 28
Figure 2.5 :CPLEX.[38] 29
Figure 2.6 :GUROBI. 29
Figure 2.7 :LINDO. 30
Figure 2.8 :KNITRO. 30
Figure 2.9 :COIN-OR. 31
Figure 2.10 :Excel Solver. 31
Figure 2.11 :MODDE5 33
Figure 3.1. Les 2 plaques avec colle à réaliser. 37
Figure 3.2. Désignation de la plaque. 38
Figure 3.4. Désignation de l'épaisseur 38
Figure 3.3 Création de la plaque 38
Figure 3.5 Confirmation de l'extrusion. 38
Figure3.6 Créé la 2eme pièce. 39
Figure 3.7 Désignation de l'épaisseur. 39
Figure 3.8. Confirmation de l'extrusion avec le décollement 39
Figure 3.9. Le module property. 40
Figure3.11.Définition les propriétés du matériau de colle. 41
Figure 3.10.Définition les propriétés du matériau des plaques. 41
Figure 3.12.Définition la section de la plaque. 42
Figure 3. 13 Sélection de la section pour les plaques. 42
Figure 3.14 Sélection de la section pour la colle. 42
Figure 3.16. Choix de section 43
Figure 3.17. Affectation la section 43
Figure 3.15. Sélection la pièce entière 43
Figure 3.18. La création de l'instance 44

Figure 3.19. La sélection de la colle pour traduire. 44
Figure3.20. Placer la colle au-dessus de plaque 1. 44
Figure 3.21. Placer la plaque 2 au-dessus de colle. 44
Figure 3.22. Assemblage de Modules. 44
Figure3.23. Création de step. 45
Figure.3.24. Création de la contrainte. 46
Figure.3.25 .Choisir le maître surface (plaque1). 46
Figure 3.26. Choisir l'esclave surface (la colle) 47
Figure 3.27. La modification de contrainte (t1). 47
Figure 3.28. La modification de contrainte (t2). 47
Figure 3.29. Création de l'encastrement. 48
Figure 3.30. La sélection de la face de traction. 48
Figure 3.31. Affectation de champ Magnitude. 49
Figure 3.32.Module MESH. 49
Figure 3.33. Affectation la taille des éléments. 50
Figure 3.34. Affectation le nombre des éléments de maillage. 50
Figure 3.35. Confirmation de maillage. 50
Figure 3.36. Fenêtre de la vérification de maillage. 51
Figure3.37. L'analyse de (errors and warnings). 51
Figure 3.38. Création de job. 51
Figure3.39. L'affichage de message de la réussite. 52
Figure3.40. Visualisation les résultats. 52
Figure3.41Collage avec biseautêment extérieur 52
Figure3.42Collage avec biseautêment extérieur 52
Figure 4.1 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm 56
Figure 4.2 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm 57
Figure 4.3 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm 57
Figure 4.4 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm 59
Figure 4.5 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm 60

Figure 4.6 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm.....60

Figure 4.7 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=3 longueur du biseautage extérieur.....63

Figure4.8 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=3 longueur du biseautage extérieur.....63

Figure 4.9 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=3 longueur du biseautage extérieur.....64

Figure 4.10 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=6 longueur du biseautage extérieur.....64

Figure 4.11 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=6 longueur du biseautage extérieur.....65

Figure 4.12 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=6 longueur du biseautage extérieur.....65

Figure 4.13 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=9 longueur du biseautage extérieur.....66

Figure 4.14 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=9 longueur du biseautage extérieur.....66

Figure 4.15 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=9 longueur du biseautage extérieur.....67

Figure 4.16 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=3 longueur du biseautage extérieur 69

Figure 4.17 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=3 longueur du biseautage extérieur 70

Figure4.18 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=3 longueur du biseautage extérieur 70

Figure4.19 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=6 longueur du biseautage extérieur 71

Figure 4.20 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=6 longueur du biseautage extérieur 71

Figure 4.21 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=6 longueur du biseautage extérieur 72

Figure 4.22 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=9 longueur du biseautage extérieur 72

Figure 4.23 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=9 longueur du biseautage extérieur 73

Figure 4.24 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=9 longueur du biseautage extérieur 73

Figure 4.25 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=3 longueur du biseautage intérieur.....76

Figure 4.26 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=3 longueur du biseautage intérieur.....76

Figure 4.27 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=3 longueur du biseautage intérieur.....77

Figure 4.28 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=6 longueur du biseautage intérieur.....77

Figure 4.29 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=6 longueur du biseautage intérieur.....78

Figure 4.30 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=6 longueur du biseautage intérieur.....78

Figure 4.31 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=9 longueur du biseautage intérieur.....79

Figure 4.32 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=9 longueur du biseautage intérieur.....79

Figure 4.33 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=9 longueur du biseautage intérieur.....80

Figure 4.34 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=3 longueur du biseautage intérieur.....82

Figure 4.35 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=3 longueur du biseautage intérieur.....82

Figure 4.36 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=3 longueur du biseautage intérieur.....83

Figure 4.37 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=6 longueur du biseautage intérieur.....83

Figure 4.38 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=6 longueur du biseautage intérieur.....84

Figure 4.39 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=6 longueur du biseautage intérieur.....84

Figure 4.40 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=9 longueur du biseautage intérieur.....85

Figure 4.41 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=9 longueur du biseautage intérieur.....85

Figure 4.42 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=9 longueur du biseautage intérieur.....86

Figure 5.1 Diagramme des contours de la contrainte de cisaillement max du l'adhésif illustrant l'interaction entre l'épaisseur de l'adhésif et la longueur du recouvrement.....96

Figure 5.2 Diagramme des contours de la contrainte de pelage max du l'adhésif illustrant l'interaction entre l'épaisseur de l'adhésif et la longueur du recouvrement 97

Introduction général:

L'introduction générale du mémoire intitulé "Analyse et optimisation des zones de recouvrements des joints collés" met en avant l'importance croissante du collage structural dans les domaines industriels modernes, notamment dans l'aéronautique, l'automobile et la construction. Elle souligne que cette méthode d'assemblage offre des avantages significatifs par rapport aux techniques traditionnelles telles que le rivetage ou le soudage, notamment :

- Une réduction du poids des structures,

- Une bonne résistance à la fatigue,

- La possibilité d'assembler des matériaux hétérogènes,

- Une atténuation des chocs et des vibrations,

- Une facilité d'application sur des formes complexes.Le mémoire se concentre plus particulièrement sur l'analyse des contraintes, notamment celles de cisaillement et de pelage dans les joints collés à simple recouvrement, ainsi que sur leur optimisation numérique. L'objectif est de comprendre comment les paramètres géométriques (longueur de recouvrement, épaisseur de l'adhésif) influencent la résistance et la durabilité des assemblages collés.

Il est également mentionné que les avancées scientifiques et technologiques depuis le milieu du XXe siècle ont permis de développer des adhésifs synthétiques performants, capables de répondre aux exigences des industries modernes.

Enfin, ce travail s'appuie sur des simulations numériques réalisées avec le logiciel ABAQUS, outil largement utilisé pour modéliser les comportements mécaniques non linéaires des matériaux. L'étude inclut une analyse détaillée des contraintes dans différents modèles de collage, avec ou sans biseautage, afin d'identifier les configurations les plus optimales en termes de résistance et de fiabilité.

CHAPITRE 1

Généralité sur les techniques du collage

1.1 Introduction :

Depuis longtemps, l'homme réalise des assemblages par collage pour créer des objets utilitaires ou décoratifs. Au cours de l'histoire, l'adhésif a subi diverses transformations jusqu'à la conception aujourd'hui de résines synthétiques, qui sont largement employées dans de nombreux processus de fabrication.

Ces résines offrent, entre autres, la possibilité de rassembler des matériaux qui jusqu'alors ne pouvaient pas être colles.

A partir du milieu du vingtième siècle, les avancées dans le domaine des sciences des matér

iaux et la constante nécessité de disposer de structures plus performantes, plus légères, plus résistantes et plus fiables, ont motivé le développement de nouvelles méthodes d'assemblage structural.

L'assemblage par collage semble être une technique prometteuse avec des avantages comme la réduction du poids, la possibilité de unir différents matériaux, une bonne résistance à la fatigue, l'atténuation du choc et la facilite pour rassembler les formes les plus complexes.

Les collages sont de plus en plus employés dans l'industrie, aussi bien pour les liaisons entre pièces métalliques qu'entre pièces composites.

Les assemblages collés sont parfois plus intéressants que les méthodes classiques car les concentrations de contraintes dues aux trous et les éléments de liaison, comme rivets et vis, n'y sont pas présentes.

Les tensions sur les extrémités sont aussi réduites car la colle remplit tout l'espace entre les deux éléments rassemblés, ce qui favorise la répartition des efforts.

Dans l'industrie aérospatiale, l'utilisation de plaques de matériaux composites collées a structures métalliques, afin de renforcer ou de réparer ces structures, est déjà reconnue comme une technique efficace.

Dans l'industrie automobile, quatre à cinq kilogrammes de colle interviennent actuellement dans l'assemblage des différents éléments d'une voiture de tourisme et il faut s'attendre à voir croître cette masse de colle.

L'utilisation d'adhésifs présente pourtant quelques inconvénients comme la faible résistance à la température et l'absorption de l'eau.

Les composants collés peuvent aussi présenter des défauts qui réduisent la qualité de l'assemblage comme les porosités et les espaces vides.

Une bonne qualité d'adhésion est garantie par les essais avec lesquels on est capable de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'assemblage ou bien de détecter les défauts à l'intérieur de la couche de colle.

Il existe deux types d'essais : les premiers provoquent la rupture de l´éprouvette, les deuxièmes sont des contrôles non destructifs.

Les essais destructifs les plus fréquemment utilisés consistent á mesurer la force nécessaire pour faire propager une fissure dans l'interface collée.

Selon le mode de sollicitation, on peut envisager divers types d'essais destructifs.

Les plus utilisés sont les essais DBC (Double Cantilever Beam), ENF (End Notched Flexure) et MMF (Mixte Mode Flexure).

Parmi les tests non destructifs, les principaux mis en œuvre en vue de détecter des défauts de collage sont les méthodes ultrasonores, l'interférométrie holographique et la thermographie infrarouge.

Les mécanismes d'adhésion, de même que les mécanismes de vieillissement dans les collages, restent encore mal connus. Le manque d'outils numériques fiables et efficaces pour la prédiction de la capacité de charge de ce type d'assemblage limite encore son application.

Pour essayer de comprendre ces mécanismes, il existe beaucoup de modèles qui permettent d'expliquer certains des comportements observés, mais nous sommes encore loin de voir paraître une théorie unifiées de l'adhésion et du collage.

La rupture d'un joint collé est le résultat de l´évolution et de l'interaction de plusieurs processus complexes de dégradation dans la couche de colle.

Ces processus commencent par l'énucléation et l'augmentation de microcavités, qui amènent progressivement à la perte de l'adhésion et au développement de fissures macroscopiques.

La simulation de ces mécanismes de dégradation a et analysée à partir de deux approches différentes.

La première est basée sur des méthodes qui utilisent directement la mécanique élastique linéaire de la rupture.

La position et la longueur de la fissure initiale doivent ici être définies.

Dans ce cadre, on part du postulat suivant:

Le matériau est uniformément élastique, même à la tête de la fissure ou des tensions infinies sont analytiquement obtenues.

Cette approche n'est jamais complète pour des vrais matériaux dans lesquels il y a toujours une zone en état de progressif endommagement localisée à la tête de la fissure.

Notamment pour des joints collés, cette zone doit être considérée comme longue, et son influence sur le comportement général de la structure ne peut pas être négligée.

Plus grande est la zone, plus stable est la propagation de la fissure.

La deuxième approche s'appuie sur les formulations basées sur l'endommagement.

Ces méthodes sont très intéressantes pour des calculs pratiques car les efforts de rupture peuvent être obtenus sans utilisation d'un critère de fracture.

En outre, dans une description avec endommagement, le comportement de la fracture est d'une certaine façon contenu dans le modèle constitutif, dans la mesure où un domaine formé par un matériau complètement endommagé constitue une fente.

Les modèles d'interface, qui peuvent être considérés comme une généralisation du concept de fissure fictive de Hillerborg, sont aussi dans cette catégorie.

La principale idée dans les modèles d'interface est que le processus de dégradation, qui apparaît dans les structures formées par assemblage d'éléments individuels, peut être décrit à une échelle intermédiaire:

La méso-échelle. Cette approche, qui a été développée principalement pour la simulation

de la dégradation des matériaux composites, considère que la séparation entre les plis se développe à l'intérieur d'une couche mince de matériel fibreux : les interfaces inter-laminaires. Largement traitées dans la littérature, les interfaces sont définies comme des surfaces d'épaisseur nulle, capables d'assurer la continuité des efforts et des déplacements entre les éléments adjacents.

L'introduction de ces composants méso scopiques permet la simulation effective de l'amorçage et de la propagation de la fissure.

La difficulté, en utilisant ce type de modèle, est justement l'identification des paramètres de l'interface.

Une interface isolée n'existe pas physiquement et ne peut pas être testée.

La réalisation d'essais sur une couche de colle, par exemple, peut donner les caractéristiques physiques de cette colle, mais ces caractéristiques ne sont pas les paramètres utilisés dans un modèle d'interface.

L'interface ne peut pas être décrite en dehors du cadre de l'assemblage étudié.

Les paramètres d'interface sont valables uniquement pour la colle, le matériau et les traitements de surface pour lesquels ils ont été identifiés.

Les essais sur les structures collées sont donc indispensables.

1.2 Historique sur le collage :

Le collage est l'une des premières techniques d'assemblage d'une structure utilisée par l'homme.

Ce dernier s'est en effet servi très tôt des produits d'origine végétale, animale et minérale tels que la gomme arabique, le latex, les farines de céréales, le goudron etc... Pour concevoir de la colle.

Dès la plus haute antiquité, la cire d'abeille fut par exemple utilisée pour les sceaux.

Cette technique permettait de fermer un pli et de graver, par moulage, une signature attestant l'identité de l'expéditeur.

Au début du XXe siècle, d'autres techniques d'application de colles naturelles se développent comme l'empaquetage et l'étiquetage.

Jusqu'alors, les industriels restaient toujours dépendants plus ou moins directement des produits naturels.

Cette situation change brutalement avec la fabrication des résines synthétiques et le développement de la chimie des macromolécules.

La notion de colle structurale apparaît dans les années 1940.

Les études entreprises sur les collages caoutchouc-métal et bois-métal et la mise au point des polyuréthanes et des colles phénoliques impulsent le développement des techniques de collage métal-métal.

Ces colles, qui permettent une très grande résistance, commencent à être utilisées dans la construction des avions.

Les résines époxy (permettant d'effectuer des collages sous faible pression) et les polymères silicones (utilisés soit pour coller, soit pour jouer un simple rôle de joints d'étanchéité et/ou de dilatation thermique) sont découverts à la même époque.

C'est après la Deuxième Guerre mondiale que le collage empirique devient véritablement une science.

Les laboratoires de recherche et de développement commencent à étudier les lois du collage, le vieillissement et la durée de vie des assemblages collés.

Diverses théories et modèles sont proposés pour comprendre les mécanismes du collage, pour déterminer les principaux paramètres actifs ainsi que leurs importances respectives selon les conditions de réalisation de l'assemblage souhaité.

Les domaines d'application sont d`es lors de plus en plus vastes, ils ne sont plus cantonnés a l'aérospatial et a l'industrie.

Les médecins et dentistes sont en effet intéressés par ces techniques de collages.

Des colles biocompatibles ont été mises au point pour résoudre des problèmes de fixation en chirurgie et en odontologie.

Par exemple, en orthopédie dento-faciale, les verrous sont collés sur la face externes des dents pour modifier la denture en cas de malocclusion et d'esthétisme ingrat.

1.3 Avantages et désavantages du collage structural :

L'assemblage par collage présente de nombreux avantages par rapport aux techniques traditionnelles employées en aéronautique comme le rivetage ou le soudage. Elle est tout d'abord très rapide à mettre en œuvre, d'autant plus que son application est souvent automatisée.

Elle s'adapte lorsqu'il faut assembler des matériaux différents, fragiles ou minces. L'assemblage entre les matériaux est continu ce qui permet de répartir uniformément les efforts et d'éviter les concentrations de contraintes.

Il en résulte une résistance mécanique supérieure à celle produite par le rivetage par exemple. Elle ne nécessite pas d'échauffement local important, comme pour le soudage, et ainsi ne modifie pas les propriétés des matériaux à assembler.

Le gain de poids est importants, les adhésifs absorbent une partie des vibrations et apportent une isolation aussi bien thermique, phonique qu'électrique.

Répartition homogène des contraintes *:* Les techniques d'assemblage qui font intervenir des connecteurs traditionnels de type rivets, vis,…, modifient, voire détruisent les substrats et induisent des concentrations de contraintes locales qui sont préjudiciables pour la tenue des pièces dans le temps.

L'assemblage par collage forme un joint qui assure généralement une bonne continuité des efforts et une meilleure répartition des contraintes.

Gain de poids : La suppression des pièces d'assemblage traditionnelles permet également un abaissement de poids non négligeable.

Dans le domaine aéronautique par exemple, les assemblages collés permettent d'alléger de 20% le poids des avions.

Assemblage de matériaux très minces : Il permet d'assembler des matériaux minces, qui ne pourraient pas être assemblés par rivets ou vis par exemple ou des matériaux de nature trop différentes (impossibles à souder) tels que l'aluminium sur le titane, métaux sur les plastiques,… .

Atténuation des vibrations : Cette méthode d'assemblage a des propriétés antivibratoires donc insonorisantes si l'épaisseur du joint est suffisante (par exemple, collage de raidisseurs de capot et de portes en construction automobile).

Design : Du point de vue esthétique, l'assemblage est peu visible et on peut obtenir des pièces à l'aspect lisse, sans sur épaisseurs.

Mais cette technique connait aussi des désavantages :

- les surfaces doivent être parfaitement propres,

- les traitements de surfaces mécaniques ou chimiques sont souvent nécessaires pour, respectivement, modifier la rugosité pour augmenter les surfaces de contact et augmenter les énergies libres de surface,

- le manque de moyens fiables de contrôle non-destructif.

1.4 Différent type du collage :

Il existe une multitude de colle, et la technique du collage n'est pas récente, puisque l'on colle depuis l'antiquité.
Depuis les « colles » ancestrales : bitumes, cires etc.
Jusqu'aux colles les plus modernes : de plus en plus impliquées dans les procédés industriels, le monde du collage est en constante évolution.

Il est possible de classer les colles selon de nombreux critères en fonction par exemple de :

- ✓ Leur origine : « naturelle » ou « synthétique ».
- ✓ Leur usage : colle à bois, colles de freinage.
- ✓ Leur composition : vinylique, acrylique.
- ✓ Leur méthode de prise.

Nous proposerons une vision plus transversale et simplificatrice :

Une colle sera chaude ou froide, réactive ou non réactive.

La colle sera dite chaude si de manière extemporanée à sa dépose sur le premier support, un conditionnement thermique a permis de l'amener à sa fluidité optimum afin d'assurer un bon pouvoir mouillant gage d'une bonne adhésion.

Il en est ainsi des résines thermo fusibles « Hotmelt » mais aussi des gélatines etc.

La colle sera froide si son usage ne réclame pas d'opération de réchauffement particulier pour sa dépose.

Etant entendu que toutes les colles correctement conditionnées se conservent et s'utilisent à la température ambiante.

Il en est ainsi des colles blanches en solutions ou dispersions, des cyanoacrylates des polyuréthanes etc.

La prise de la colle (cohésion) se fait totalement ou partiellement par le biais de réactions chimiques vraies, que l'on nomme réaction de polymérisation et/ou de réticulation.

Les interactions entre les molécules de résines sont fortes. La cohésion du joint est élevée.

La tenue du collage l'est aussi, l'évolution est le plus souvent irréversible.

La prise de la colle se manifeste par le rapprochement des molécules de résine l'une de l'autre, leur interpénétration physique et l'apparition de forces d'attraction faibles.

Les interactions entre les molécules de résine sont faibles, La cohésion du joint est faible à modeste, Le collage est souvent réversible.

1.4.1 Colles à séchage par évaporation :

1.4.1.1 Technologie utilisée

Ces colles sont constituées de polymères dissous dans un solvant (Polychloroprène, Polyuréthane) ou dispersés dans l'eau (colle blanche vinylique).

(Composition à base d'acétate de polyvinyle, de cellulose, de caséine, d'alcool polyvinylique ou de polyvinylpyrrolidone).

1.4.1.2 Procédé de collage

Le procédé de collage est obtenu par évaporation de solvant ou d'eau ou par coalescence d'un polymère en dispersion à base d'eau : lorsque l'eau ou le solvant est évaporé, les molécules de polymère se rapprochent de plus en plus jusqu'à former un film de colle continu.

1.4.1.3 Applications

Selon la composition chimique de la colle, l'adhérence à différents matériaux se fera à un degré plus ou moins important. Ces colles sont généralement utilisées pour des supports à base de cellulose (papier, carton et bois) ou pour des applications ménagères.

1.4.2 Colles thermoplastique :

1.4.2.1 Technologie utilisée

Ces colles sans solvant sont fabriquées à base de matériaux thermoplastiques. Un matériau thermoplastique est un polymère qui se liquéfie sous l'effet de la chaleur et qui se solidifie en refroidissant

1.4.2.2 Procédé de collage

La colle thermoplastique est chauffée et appliquée à l'état liquide à l'aide d'un pistolet à colle ou d'une buse de collage. La prise se fait en quelques secondes par refroidissement.

1.4.2.3 Applications

Les colles thermoplastiques sont utilisées dans les emballages, la reliure, l'industrie textile et de la chaussure, les meubles, l'automobile et la fabrication de composants électroniques.

1.4.3 Colles contact :

1.4.3.1 Technologie utilisée

Ces colles sont constituées de caoutchouc naturel et de polychloropropène (Néoprène).

1.4.3.2 Procédé de collage

Ces colles doivent être appliquées sur les deux surfaces à joindre. Laisser les sécher un certain temps avant de les appliquer l'une contre l'autre. Une fois les deux surfaces jointes, la prise est très rapide, et il n'est donc généralement pas nécessaire d'appliquer une pression prolongée. Des serres jointes sont donc inutiles.

1.4.3.3 Applications

Les colles de contact sont utilisées dans l'industrie du meuble et de la chaussure.

1.4.4 Colles auto-adhésives (PSA) :

1.4.4.1 Technologie utilisée

Le terme auto-adhésif est couramment utilisé pour désigner une catégorie bien précise de colles à base de matériaux élastomères tels que les copolymères en bloc de styrène qui, à l'état sec, conservent leurs propriétés adhésives à température ambiante ou à basse température.

1.4.4.2 Procédé de collage

Ces colles forment une zone d'adhérence lorsqu'une pression est appliquée afin de lier la colle au support.

1.4.4.3 Applications

Les colles auto-adhésives sont conçues pour des applications permanentes ou temporaires et certaines PSA haute performance à application permanente présentent des valeurs d'adhérence élevées. Elles sont utilisées, entre autres, pour les rubans auto-adhésifs, les étiquettes, les blocs note, les garnitures d'automobiles.

1.4.5 Colles polyuréthane :

1.4.5.1 Technologie utilisée

Les colles polyuréthane sont basées sur la chimie des Polyisocyanates et Polyéther / Polyols polyesteriques.

Elles existent en structure mono ou bi-composants.

1.4.5.2 Procédé de collage

Les colles mono composant (PU1K) réagissent à l'humidité de l'air et peuvent être appliquées à température ambiante (PUR) ou à température élevée comme pour les colles thermoplastiques (HMPUR). Les colles bi-composantes (PU2K) doivent être mélangées selon des proportions précises avant utilisation.

1.4.5.3 Applications

Ces colles sont utilisées dans l'assemblage industriel, les emballages souples et le collage des pare-brise.

1.4.6 Colles à basse de résine époxy :

1.4.6.1 Technologie utilisée

Les colles époxy représentent une part importante dans la catégorie des colles appelées "colles structurelles". Comme pour les colles polyuréthane, elles sont disponibles en structure mono ou bi-composants.

1.4.6.2 Procédé de collage

Les colles époxy mono-composantes doivent être durcies à température élevée alors que les colles époxy bi-composantes offrent une adhérence à température ambiante. Elles peuvent être rendues souples ou rigides, transparentes ou opaques/colorées, à prise rapide ou à prise extrêmement lente.

1.4.6.3 Applications

Ces colles hautes performance sont utilisées dans diverses applications, comme les transports, les clubs de golf, les skis, les snowboards, ou des applications ménagères - nécessitant des zones d'adhésion de forte résistance.

1.4.7 Colles anaérobiques :

1.4.7.1 Technologie utilisée

Les colles anaérobies basées sur la chimie des diacrylates sont des colles mono-composantes qui durcissent rapidement pour former une surface d'adhésion résistante entre deux surfaces ne pouvant présenter aucune inclusion d'air.

1.4.7.2 Procédé de collage

L'oxygène est un inhibiteur pour les colles anaérobies. En présence d'oxygène dans l'air, le produit ne réagit pas et reste à l'état liquide. Les deux conditions suivantes sont nécessaires pour un durcissement correct :

•Contact avec une surface métallique.

• Absence d'oxygène ou d'air.

1.4.7.3 Applications

Ces colles sont recommandées pour une utilisation sur des surfaces métalliques, pour le freinage d'écrous et de boulons.

1.4.8 Colles cyanoacrylates :

1.4.8.1 Technologie utilisée

Les colles au cyanoacrylate sont des colles acrylate mono-composant souvent appelées “Super glues”.

1.4.8.2 Procédé de collage

Les colles au cyanoacrylate durcissent instantanément lorsqu'elles sont en contact avec des surfaces de jointement par une réaction avec l'humidité de surface (polymérisation anionique).

1.4.8.3 Applications

Ces colles sont utilisées dans les colles industrielles et domestiques, dans les colles vétérinaires et dans les applications médicales.

1.4.9 colles à base polymères silylés :

1.4.9.1 Technologie utilisée

Les mastics et les colles silylés durcis-sables à l'humidité sont le résultat des développements récents des dernières années. Les colles et les mastics en sylane modifié basés sur les SMP (polymère en silane modifié) sont conçus comme des structures mono-composantes.

1.4.9.2 Procédé de collage

Les colles SMP doivent être appliquées entre 5°C et 30°C et la prise demande 10 à 30 minutes par réaction avec l'humidité de l'air.

1.4.9.3 Applications

De par leur structure chimique, ces types de polymères offrent une bonne résistance aux intempéries et au vieillissement ainsi qu'une capacité d'adhésion sur quasiment tous les supports, sans avoir recours à des primaires. Ces colles se distinguent surtout dans les cas où des joints de construction élastiques sont nécessaires.

1.4.10 colles silicone :

1.4.10.1 Technologie utilisée

Les colles au silicone sont basées sur la chimie des poly-siloxanes, ce qui offre une grande souplesse même à des températures peu élevées et qui présentent une bonne résistance à l'humidité et à la température. Elles existent en structure mono ou bi-composants.

1.4.10.2 Procédé de collage

Les deux types de structure durcissent par polycondensation amorcée par l'humidité pour les structures mono-composant et par réaction d'un ester d'acide silicique avec du poly-siloxanes pour les structures bi-composants.

1.4.10.3 Applications

Les colles au silicone offrent des joints résistants à l'humidité sur des supports en verre et en céramique et sont, par conséquent, principalement utilisées pour les joints d'étanchéité dans les installations sanitaires.

1.5 Définition de l’adhérence

L’adhérence constitue une propriété de l’assemblage collé. Dans le cas d’une rupture inter faciale, elle peut être assimilée à l’énergie nécessaire pour séparer les deux parties d’un assemblage. Elle tient compte du travail à fournir pour rompre les liaisons inter faciales, du travail nécessaire pour déformer les substrats et l’adhésif ainsi que de l’énergie dissipée au cours du travail mécanique.

L'une des grandeurs physiques retenue pour traduire l'adhérence est le taux de restitution d'énergie, noté G en hommage au physicien Gibbs. Selon Roche [1], plusieurs facteurs sont susceptibles d'affecter l'adhérence. Ces facteurs concernent les propriétés physico-chimiques du substrat (nature chimique, rugosité, etc) ainsi que de la couche générée à sa surface à la suite de traitements (nature chimique, rugosité, épaisseur...), et de l'adhésif polymère (nature chimique de la résine, du durcisseur, viscosité...). Les conditions de mise en œuvre de la résine ainsi que les conditions d'essai et de vieillissement de l'assemblage sont également à prendre en compte.

Un assemblage collé est constitué de trois zones : le substrat, l'adhésif et l'interface

substrat/adhésif. La détermination de l'adhérence passe obligatoirement par la rupture de l'assemblage, une rupture qui doit être nécessairement localisée à cette interface. Dans le cas contraire, c'est la cohésion du substrat ou de l'adhésif qui est mesurée. Néanmoins, la rupture dans l'un des matériaux peut renseigner sur le niveau d'adhérence, à condition que la résistance de l'assemblage soit égale à la résistance propre de l'élément le moins résistant de l'assemblage. La Figure 2.35 représente les quatre types de rupture qu'il est possible de rencontrer.

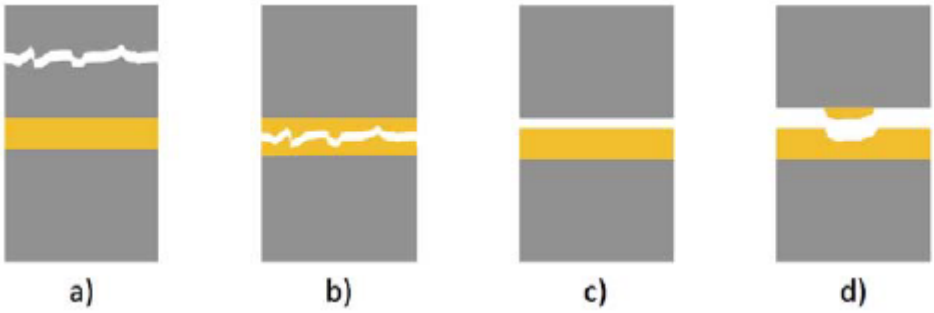


figure 1.1- les quatre types de rupture

Lorsque le substrat est plus fragile que l'adhésif et que l'interface entre les deux est forte alors la rupture a lieu dans le substrat, (Figure 2.35a). La rupture est alorsqualifiée de cohésive dans le substrat. D'un point de vue technologie, elle constitue le cas de figure idéal, à condition toutefois, que la sollicitation du test mécanique soit comparable pour le substrat, l'adhésif et l'interface.
A l'inverse, quand l'adhésif constitue la zone de faiblesse, mais que l'interface avec le substrat reste forte, la rupture est cohésive dans l'adhésif. La rupture dans ce dernier est également considérée comme représentative d'un « bon » collage. L'énergie mesurée dans cette configuration ne dérive pas forcément des propriétés intrinsèques de l'adhésif.
Bien que théoriquement l'énergie de rupture devrait être constante quand la fracture est localisée au sein de l'adhésif, Cognard [2] a démontré qu'elle peut s'accroître avec le traitement de surface. Il relie cette augmentation à la transmission dans l'adhésif de la force appliquée au substrat, qui est fonction de la densité de points d'ancrage à l'interface et de la quantité de chaînes qu'ils entraînent lorsqu'ils sont contraints.
La Figure 2.35c représente l'unique configuration dans laquelle l'adhérence peut être mesurée. Il s'agit de la rupture interfaciale, ou adhésive. L'interface substrat/adhésif devient la zone vulnérable de l'assemblage. Pourtant, il n'est pas évident que ce type de rupture soit le reflet d'un mauvais

collage. En effet, plusieurs facteurs sont susceptibles de déplacer la zone de la fracture sans nécessairement changer la résistance à la rupture.
Ces facteurs comprennent la rugosité, la composition de l'adhésif ainsi que la vitesse de sollicitation. Sener et Delannay [3], lors d'un essai de pelagesur un assemblage acier/époxyde, ont constaté le passage d'une rupture inter faciale, aux basses vitesses, à une rupture cohésive avec l'accélération de la sollicitation.
Enfin, la rupture peut se manifester simultanément dans l'adhésif (ou le substrat) et à l'interface substrat/adhésif, comme décrit sur la Figure 2.35d. La rupture est dite mixte.

1.6 Les tests de rupture

De multiples éléments influent sur l'adhérence d'un joint collé. Les caractéristiques physico-chimiques superficielles des adhérés, les propriétés rhéologiques et le protocole de réticulation des adhésifs, ainsi que les conditions de sollicitation de l'assemblage sont autant de paramètres qui peuvent gouverner l'énergie de rupture des assemblages et sont propres à chaque essai mécanique. Cette variété de facteurs amène donc à un large panel de tests mécaniques destructifs. Allen [4] n'a recensé pas moins de 300 essais d'adhérence différents. Les plus couramment utilisés sont en général normalisés et font l'objet de nombreux travaux [4].
Malgré cette diversité, ces essais mécaniques peuvent être classés suivant trois grandes classes selon le mode de sollicitation qu'ils privilégient. Ces différents modes de sollicitation sont exposés dans la Figure 2.36.

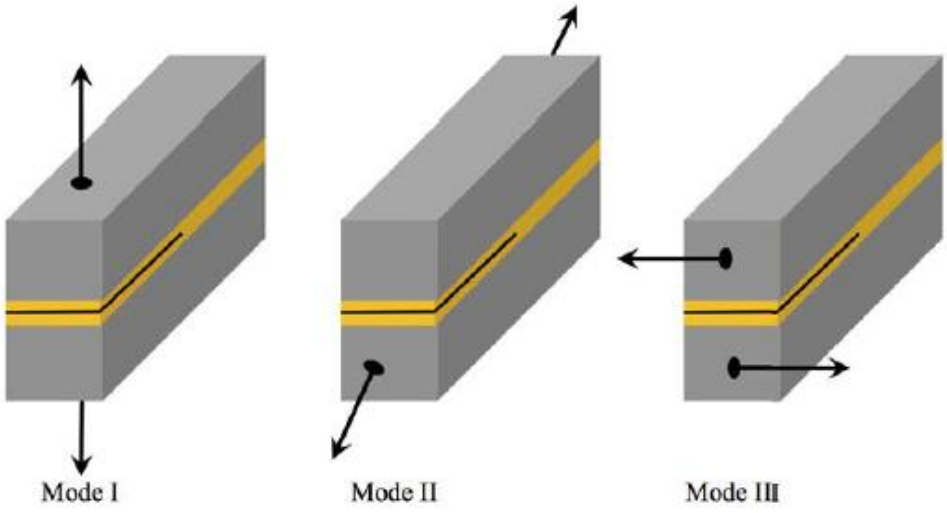


figure 2.2- différents modes de sollicitation

Dans le mode I, également appelé mode d'ouverture, les contraintes sont perpendiculairesau front de fissure ainsi qu'à l'interface. En ce qui concerne le mode II, ou mode de glissement droit, les contraintes restent perpendiculaires au front de fissure tandis qu'elles deviennent parallèles à l'interface. Enfin, pour le mode III, ou mode de glissement vis, les contraintes sont parallèles au front de fissure et à l'interface.

Le choix du mode de sollicitation est fonction des matériaux, du type d'informationrecherché et surtout de la représentativité du comportement vis-à-vis d'une configuration en service [5]. Par exemple, certains tests seront réservés à la caractérisation substrat/adhésif spécifique, alors que d'autres se focaliseront plutôt sur les conditions d'utilisation. Parmi les 300 essais d'adhérence inventoriés par Allen, la Figure 2.37 regroupe ceux qui sont le plus fréquemment employés.

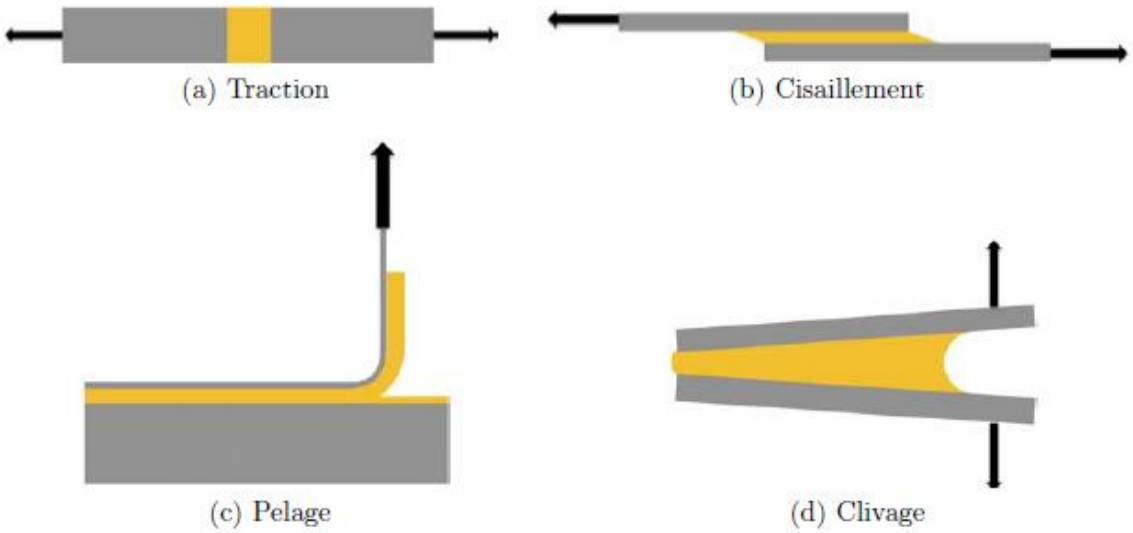


figure 3.3- le plus fréquemment employés

Le test en traction (Figure 2.37a) s'adresse surtout aux matériaux rigides. La sollicitation principale s'effectue suivant le premier mode.

Une expérience de cisaillement (Figure 2.37b) sollicite l'assemblage majoritairement suivant le mode II. L'influence du mode I ne doit pas être ignorée, puisqu'elle peut agir sur la rupture sous certaines conditions. Sa simplicité de mise en œuvre, ainsi qu'une résistance supérieure de l'assemblage lorsqu'il est sollicité en mode II et III, en font le test le plus employé et représentatif des conditions réelles d'utilisation. Il s'adresse essentiellement aux matériaux rigides.

L'essai de pelage (Figure 2.37c) doit posséder au moins un substrat de flexible. Ilconsiste à arracher une fine couche d'adhésif. La force de pelage pourrait être assimilée à la mesure directe de l'énergie de rupture. A nuancer cependant, puisqu'elle varie avec l'angle de pelage. Il convient alors de considérer la déformation de la partie pelée [6]. La sollicitation prépondérante est également le mode d'ouverture I. Cet essai constitue une méthode de choix quant à l'évaluation de l'adhérence de matériaux tels que les rubans adhésifs.

Le clivage (Figure 2.37d) consiste à propager une fissure au sein du joint collé dans le cas d'une adhérence entre deux substrats rigides. La sollicitation peut se faire soit en imposant une charge constante : le Double Cantilever Beam (DCB), soit en imposant un déplacement constant : clivage en coin ou Wedge Test.

L'ensemble de ces tests permettent d'évaluer l'adhérence d'un assemblage collé.

Néanmoins, le clivage en coin paraît être la technique la mieux adaptée, car il permet de suivre le niveau d'adhérence en fonction du temps.

1.6.1 Mécanisme d'adhésion directe :

En physique l'adhésion est l'ensemble des phénomènes physico-chimique qui se produisent lorsque l'on met en contact intime deux matériaux, dans le but de créer une résistance mécanique à la séparation. L'adhésion intervient dans des multiples domaines. Elle est soit directe, soit Médée par un matériau intermédiaire L'adhésion directe entre matériaux est rare. Elle a lieu uniquement pour des matériaux très lisse et extrêmement propres (mica ou silicium par exemple), que l'on provient à mettre en contact intimes c'est-à-dire a des distances de l'ordre de la taille atomique (nanomètre) les différents mécanismes qui donnent lieu a une adhésion directe entre matériaux sont :

1.6.1.1 La théorie mécanique :

La théorie de l'ancrage mécanique, initiée par Mac Bain dès 1926, est la plus ancienne des théories de l'adhésion. Ce modèle considère que l'origine de l'adhésion provient d'un ancrage physique du revêtement dans les aspérités présentes à la surface du substrat. Il en résulte un accrochage mécanique entre les deux surfaces. Ce mécanisme n'est donc applicable que lorsqu'il existe un contact intime entre les deux matériaux et que le revêtement (la colle, la peinture...) mouille bien la surface du substrat afin de pouvoir pénétrer les anfractuosités de sa surface. Mais l'adhésion sur des surfaces parfaitement lisses suppose d'autres théories [7].

1.6.1.2 La théorie électrique :

La théorie électrique a été développée par Deryagin. À la surface de couches d'oxydes à caractère ionique, les hétérogénéités chimiques et les défauts de surface aboutissent à la formation de charges électrostatiques. Le système revêtement/substrat est alors assimilé à un condensateur plan dont les armatures seraient les deux couches électriques formées au contact des deux surfaces [8].

1.6.1.3 La théorie de la diffusion :

La théorie de la diffusion a été proposée par Voyuskii. Elle s'applique aux matériaux polymères compatibles (c'est-à-dire lorsqu'au moins un monomère est soluble dans l'autre monomère), en particulier à l'auto adhésion, lors du contact de deux matériaux de même nature, comme le caoutchouc. Dans cette théorie, l'adhésion résulte de l'inter diffusion des molécules ou des chaînes d'un des pré-polymères dans l'autre. L'interface entre les deux matériaux disparaît au profit d'une interphase, dont les propriétés physico-chimiques varient continûment, depuis les propriétés du premier matériau jusqu'à celles du second. Cette adhésion est contrôlée par les phénomènes de diffusion, c'est pourquoi elle implique la compatibilité des matériaux[9].

1.6.1.4 La théorie thermodynamique :

Cette théorie, aussi appelée théorie du mouillage, a été initiée par Sharpe et Schonhorn. Selon cette théorie, l'adhésion est attribuée aux forces intermoléculaires (liaisons chimiques de type Van der Waals), existant à l'interface. Ces liaisons intermoléculaires sont faibles et non dirigées. Elles ont un champ d'action de l'ordre des distances intermoléculaires. De ce fait, pour qu'elles s'établissent, il est nécessaire de créer un bon contact entre les deux surfaces [10].

1.6.1.5 La théorie des couches de faible cohésion :

Bikerman a constaté la présence de couches de faible cohésion lors de l'analyse des zones de rupture des joints collés, mais cette théorie est souvent appelée théorie de l'adhésion par abus de langage. Les forces interfaciales sont toujours plus fortes que la force de cohésion d'une des nombreuses couches composant l'assemblage. Il s'ensuit que la rupture aura toujours lieu dans la couche dont la force de cohésion est la plus faible, appelée couche de faible cohésion. La composition de cette couche peut varier. Les causes de cette variation sont nombreuses [11].

1.6.1.6 La théorie chimique :

La théorie chimique a été proposée par Buchan et Rae. L'adhésion est basée ici sur la formation de liaisons chimiques iono-covalentes. Ces liaisons sont parmi les plus fortes (jusqu'à 1000 $kJ.mol^{-1}$): elles assurent aux assemblages collés une résistance à la rupture importante et une meilleure durabilité, contrairement aux liaisons type Van der Waals[12]. La distance d'interaction entre atomes (0,15 à 0,24 nm) impose ainsi un contact intime entre les deux matériaux et donc, là encore, un bon mouillage.

Conclusion :

Ce chapitre a permis d'exposer les fondamentaux du collage structural en ingénierie, en présentant ses origines, ses avantages et les différents types de colles utilisés selon les applications. Le collage apparaît comme une alternative prometteuse aux méthodes traditionnelles d'assemblage, notamment grâce à sa capacité à unir des matériaux hétérogènes, à réduire le poids et à répartir plus uniformément les contraintes mécaniques. Cette base théorique est essentielle pour comprendre l'intérêt de l'analyse mécanique approfondie des joints collés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 2

Généralités sur l'optimisation numérique

2.1 Introduction

L'optimisation numérique est une discipline qui vise à trouver la meilleure solution possible à un problème en minimisant ou maximisant une fonction objectif tout en respectant un ensemble de contraintes. Elle s'appuie sur des méthodes mathématiques et algorithmiques pour explorer un espace de recherche défini par des variables de décision, qui peuvent être continues, discrètes, ou mixtes. Les problèmes d'optimisation se classent en plusieurs catégories, comme l'optimisation linéaire, non linéaire, combinatoire, ou multi-objectifs, et sont résolus à l'aide de techniques variées, allant des méthodes déterministes (gradient, simplexe) aux approches stochastiques (algorithmes génétiques, recuit simulé). Appliquée dans des domaines tels que l'ingénierie, la finance, la logistique, la santé et l'environnement, l'optimisation numérique permet d'améliorer l'efficacité, de réduire les coûts et de prendre des décisions éclairées en trouvant des solutions optimales ou approchées à des problèmes complexes.[13]

2.2 Historique de l'optimisation numérique

L'optimisation numérique a une histoire riche et diversifiée, marquée par des avancées théoriques et pratiques qui ont façonné son développement au fil des siècles. Un aperçu des étapes clés de son évolution :

2.2.1 Origines Antiques et Précurseurs

- Antiquité : Les premiers concepts d'optimisation remontent à l'Antiquité, avec des problèmes géométriques comme la recherche de la plus courte distance (problème de la ligne droite) ou la maximisation de surfaces avec des contraintes données.
- XVIIe siècle : Les travaux de Pierre de Fermat et Isaac Newton sur le calcul différentiel ont posé les bases de l'optimisation en introduisant des méthodes pour trouver les minima et maxima de fonctions.

2.2.2 XVIIIe et XIXe siècles : Fondements Mathématiques

- Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) : A développé la méthode des multiplicateurs de Lagrange pour résoudre des problèmes d'optimisation sous contraintes.
- Carl Friedrich Gauss (1777-1855) : A introduit des méthodes numériques pour l'optimisation, notamment dans le contexte des moindres carrés, utilisées pour ajuster des modèles à des données.
- Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) : A proposé la méthode de descente de gradient, l'une des premières techniques itératives pour l'optimisation.

2.2.3 XXe siècle : Formalisation et Applications Industrielles

- Années 1940 : La Seconde Guerre mondiale a stimulé le développement de techniques d'optimisation pour des applications militaires et logistiques. La programmation linéaire a émergé comme un outil puissant pour résoudre des problèmes de planification et d'allocation de ressources.

- George Dantzig (1914-2005) : A développé l'algorithme du simplexe en 1947, une méthode révolutionnaire pour résoudre des problèmes de programmation linéaire.
- Années 1950-1960 : L'optimisation non linéaire a pris de l'importance avec des contributions majeures de John von Neumann, Leonid Kantorovich (prix Nobel d'économie en 1975), et d'autres. Les méthodes de programmation dynamique (Richard Bellman) et de gradient conjugué (Magnus Hestenes et Eduard Stiefel) ont également été développées.
- Années 1970-1980 : L'avènement des ordinateurs a permis de résoudre des problèmes d'optimisation plus complexes. Les méthodes de point intérieur (Narendra Karmarkar, 1984) ont offert une alternative efficace à l'algorithme du simplexe pour la programmation linéaire.

2.2.4 Fin du XXe siècle et Début du XXIe siècle : Expansion et Diversification

- Optimisation Combinatoire : Les problèmes de graphes, de planification et de routage ont conduit au développement d'algorithmes comme le recuit simulé (1983), les algorithmes génétiques (années 1970), et les colonies de fourmis (1990).
- Optimisation Stochastique : Les méthodes basées sur le hasard, comme les essaims de particules (1995) et l'optimisation par essaims de particules (PSO), ont émergé pour résoudre des problèmes complexes et non convexes.
- Optimisation Multi-Objectifs : Les techniques pour gérer plusieurs objectifs concurrents ont été développées, notamment les algorithmes évolutionnaires multi-objectifs (MOEA).

2.2.5 Époque Moderne : Intelligence Artificielle et Apprentissage Automatique

- Apprentissage Automatique : L'optimisation joue un rôle central dans l'entraînement des modèles d'apprentissage automatique, avec des méthodes comme la descente de gradient stochastique (SGD) et ses variantes (Adam, RMSprop).
- Optimisation Convexe : Les techniques d'optimisation convexe sont devenues essentielles pour résoudre des problèmes en traitement du signal, en vision par ordinateur et en robotique.
- Calcul Haute Performance : L'utilisation de supercalculateurs et de techniques parallèles a permis de résoudre des problèmes d'optimisation à très grande échelle.

2.2.6 Avenir de l'Optimisation Numérique

- Optimisation Quantique : Les ordinateurs quantiques promettent de révolutionner l'optimisation en résolvant des problèmes actuellement insolubles avec des méthodes classiques.
- Optimisation dans les Systèmes Autonomes : Les véhicules autonomes, les drones et les robots reposent sur des techniques d'optimisation pour la planification de trajectoires et la prise de décision en temps réel.
- Optimisation Durable : Les défis environnementaux et énergétiques nécessitent des approches d'optimisation pour minimiser l'impact écologique tout en maximisant l'efficacité.

L'optimisation numérique a évolué d'une simple recherche de solutions géométriques à une discipline complexe et multidisciplinaire, essentielle pour résoudre des problèmes modernes dans des domaines variés. Son histoire reflète l'interaction entre les avancées mathématiques, technologiques et pratiques, et elle continue de se développer avec l'émergence de nouvelles technologies et défis mondiaux.[14]

2.3 Domaine d'application de l'optimisation numérique

L'optimisation numérique est un outil puissant et polyvalent qui trouve des applications dans de nombreux domaines. Voici un aperçu des principaux domaines où elle est utilisée :

1) **Ingénierie et Conception**

- Conception de produits : Optimisation de la forme, de la taille et des matériaux pour maximiser la performance et minimiser les coûts (ex : ailes d'avion, carrosseries de voitures).
- Ingénierie structurelle : Conception de structures robustes et légères (ponts, bâtiments, etc.) en minimisant les contraintes et les coûts.
- Énergie : Optimisation des systèmes énergétiques (centrales électriques, réseaux de distribution) pour maximiser l'efficacité et réduire les émissions. [15]

2) **Logistique et Transport**

- Optimisation des routes : Planification des itinéraires pour minimiser les coûts de transport et les temps de livraison (ex : problème du voyageur de commerce).
- Gestion des stocks : Optimisation des niveaux de stock pour réduire les coûts tout en répondant à la demande.
- Planification des réseaux : Conception optimale des réseaux de transport (routier, ferroviaire, aérien).[16]

3) **Finance et Économie**

- Gestion de portefeuille : Optimisation des investissements pour maximiser les rendements tout en minimisant les risques.
- Pricing : Détermination des prix optimaux pour les produits et services.
- Planification budgétaire : Allocation optimale des ressources financières. [17]

4) **Santé et Biologie**

- Planification des traitements : Optimisation des doses de médicaments et des protocoles de traitement.
- Conception de médicaments : Optimisation des molécules pour maximiser l'efficacité thérapeutique.
- Analyse de données médicales : Identification de modèles et prédictions pour améliorer les diagnostics. [18]

5) **Environnement et Énergie**

- Gestion des ressources naturelles : Optimisation de l'utilisation de l'eau, des forêts et des sols.
- Énergies renouvelables : Optimisation de la production et de la distribution d'énergie solaire, éolienne, etc.
- Réduction des émissions : Minimisation des émissions de CO_2 dans les processus industriels. [19]

6) **Informatique et Technologie**

- Apprentissage automatique : Optimisation des modèles pour minimiser l'erreur de prédiction (ex : descente de gradient).
- Réseaux de communication : Optimisation du trafic et de la bande passante dans les réseaux informatiques.

- Conception de circuits : Placement et routage optimaux des composants électroniques. [20]

7) **Industrie et Production**

- Planification de production : Optimisation des calendriers de production pour minimiser les coûts et les délais.
- Contrôle de qualité : Minimisation des défauts dans les processus de fabrication.
- Gestion des chaînes d'approvisionnement : Optimisation des flux de matières premières et de produits finis. [21]

8) **Recherche Opérationnelle**

- Problèmes d'ordonnancement : Optimisation des emplois du temps (ex : emplois du temps des employés, planning des vols).
- Allocation des ressources : Attribution optimale des ressources limitées (ex : machines, main-d'œuvre).
- Problèmes de découpe et d'emballage : Minimisation des déchets dans la découpe de matériaux. [22]

9) **Robotique et Automatisation**

- Planification de trajectoires : Optimisation des mouvements des robots pour éviter les obstacles et minimiser l'énergie.
- Contrôle optimal : Optimisation des commandes pour les systèmes dynamiques (ex : drones, véhicules autonomes). [23]

10) **Marketing et Vente**

- Campagnes publicitaires : Optimisation des budgets publicitaires pour maximiser l'impact.
- Analyse de marché : Identification des segments de marché les plus rentables.
- Personnalisation : Optimisation des recommandations de produits pour les clients. [24]

11) **Sciences Physiques et Chimie**

- Simulations numériques : Optimisation des paramètres pour modéliser des phénomènes physiques ou chimiques.
- Conception de réacteurs : Optimisation des conditions de réaction pour maximiser le rendement. [25]

12) **Aérospatial et Défense**

- Conception d'aéronefs : Optimisation de la forme et des matériaux pour maximiser l'efficacité aérodynamique.
- Planification de missions : Optimisation des trajectoires de satellites ou de missiles. [26]

13) **Éducation et Recherche**

- Optimisation pédagogique : Planification des programmes d'études pour maximiser l'apprentissage.
- Recherche scientifique : Résolution de problèmes complexes dans divers domaines (mathématiques, physique, biologie, etc.).[27]

L'optimisation numérique est un outil transversal qui s'applique à presque tous les domaines où des

décisions doivent être prises sous contraintes. Elle permet d'améliorer l'efficacité, de réduire les coûts et de résoudre des problèmes complexes, ce qui en fait un pilier essentiel de la science moderne et de l'industrie

2.4 L'optimisation numérique dans le domaine de CND

L'optimisation numérique joue un rôle crucial dans le domaine du contrôle non destructif (CND), où l'objectif est d'inspecter et d'évaluer l'intégrité des matériaux et des structures sans les endommager. Voici comment l'optimisation numérique est appliquée dans ce domaine :

1) **Optimisation des Techniques d'Inspection**

- **Positionnement des capteurs :** L'optimisation est utilisée pour déterminer les positions optimales des capteurs (ultrasons, radiographie, etc.) afin de maximiser la couverture de la zone inspectée et de détecter les défauts avec précision.
- **Paramétrage des instruments :** Optimisation des paramètres des équipements (fréquence, intensité, angle d'incidence) pour améliorer la qualité des données collectées. [28]

2) **Traitement des Données et Reconstruction d'Images**

- **Reconstruction tomographique :** L'optimisation est utilisée pour reconstruire des images 3D à partir de données 2D (ex : tomographie par rayons X ou ultrasons). Des algorithmes comme la méthode des moindres carrés ou les techniques itératives sont employés pour minimiser les erreurs de reconstruction.
- **Filtrage des bruits :** Optimisation des filtres pour éliminer le bruit dans les signaux acquis, améliorant ainsi la détection des défauts. [29]

3) **Détection et Caractérisation des Défauts**

- **Identification des défauts :** L'optimisation est utilisée pour identifier la taille, la forme et la position des défauts dans les matériaux. Des méthodes comme les algorithmes génétiques ou les essaims de particules peuvent être utilisées pour explorer l'espace des solutions possibles.
- **Classification des défauts :** Optimisation des modèles de classification (apprentissage automatique) pour distinguer les types de défauts (fissures, porosités, inclusions, etc.).[30]

4) **Optimisation des Méthodes de Contrôle**

- **Méthodes ultrasonores :** Optimisation des trajectoires des ondes ultrasonores pour maximiser la détection des défauts dans des géométries complexes.
- **Courants de Foucault :** Optimisation des paramètres des courants de Foucault (fréquence, intensité) pour détecter des fissures ou des variations de conductivité.
- **Radiographie :** Optimisation des angles de prise de vue et des doses de rayonnement pour obtenir des images de haute qualité tout en minimisant l'exposition. [31]

5) **Conception de Capteurs et Dispositifs**

- **Optimisation des capteurs :** Conception de capteurs plus sensibles et efficaces en utilisant des techniques d'optimisation pour améliorer leur réponse aux défauts.
- **Dispositifs robotisés :** Optimisation des trajectoires et des mouvements des robots utilisés pour l'inspection automatisée, en particulier dans des environnements difficiles d'accès (ex : pipelines, centrales nucléaires). [32]

6) **Planification des Inspections**

- Optimisation des plans d'inspection : Détermination des zones critiques à inspecter en priorité, en fonction des risques et des contraintes opérationnelles.

- Minimisation des coûts et des temps : Optimisation des ressources (temps, main-d'œuvre, équipements) pour réaliser les inspections de manière efficace. [33]

7) **Modélisation et Simulation**

- Simulation des phénomènes physiques : Optimisation des modèles numériques pour simuler la propagation des ondes (ultrasons, ondes électromagnétiques) dans les matériaux et prédire la détection des défauts.

- Validation des modèles : Utilisation de techniques d'optimisation pour ajuster les modèles aux données expérimentales, améliorant ainsi leur précision. [34]

8) **Applications Spécifiques**

- Industrie aéronautique : Inspection des pièces critiques (turbines, ailes) pour détecter les microfissures ou les dommages dus à la fatigue.

- Industrie pétrolière et gazière : Inspection des pipelines et des réservoirs pour prévenir les fuites et les ruptures.

- Centrales nucléaires : Contrôle des cuves et des soudures pour assurer la sécurité des installations.

- Inspection des structures en béton ou en métal pour détecter les défauts internes.

Exemples d'Algorithmes et Méthodes Utilisés

-Algorithmes d'optimisation globale : Algorithmes génétiques, recuit simulé, essaims de particules.

- Méthodes d'optimisation locale: Descente de gradient, méthode de Newton.

- Apprentissage automatique : Réseaux de neurones, SVM (machines à vecteurs de support) pour la classification des défauts. [35]

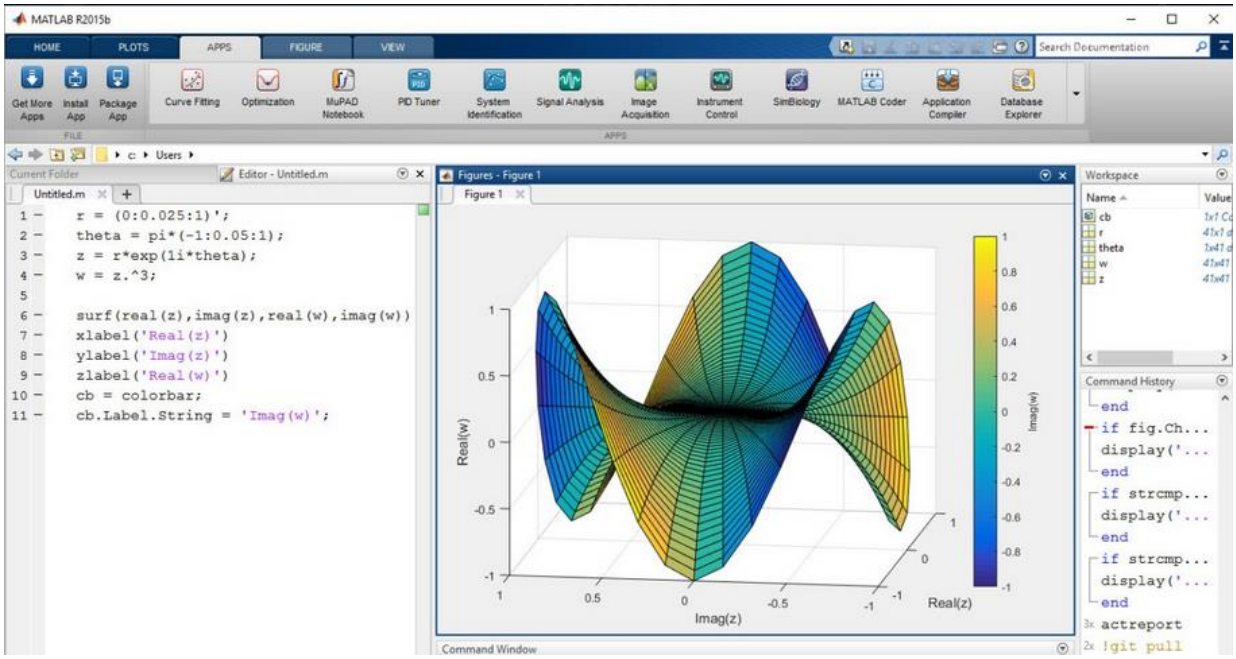
L'optimisation numérique est un outil essentiel dans le domaine du contrôle non destructif, permettant d'améliorer l'efficacité, la précision et la fiabilité des inspections. Elle contribue à la sécurité des infrastructures, à la réduction des coûts et à la prolongation de la durée de vie des matériaux et des structures. Avec l'avènement de techniques avancées comme l'apprentissage automatique et l'optimisation stochastique, les applications de l'optimisation numérique dans le CND continuent de se développer et de se perfectionner.

2.5 Les logiciels appliquées dans le domaine de l'optimisation numérique

Les logiciels d'optimisation numérique sont des outils essentiels pour résoudre des problèmes complexes dans divers domaines tels que l'ingénierie, la finance, la logistique, et bien d'autres. les logiciels les plus populaires et utilisés pour l'optimisation numérique :

1) **MATLAB :**

MATLAB est un environnement de calcul numérique largement utilisé qui inclut des outils pour l'optimisation. Il offre des fonctions pour l'optimisation linéaire, non linéaire, et en nombres entiers, ainsi que des algorithmes pour l'optimisation multi-objectifs.



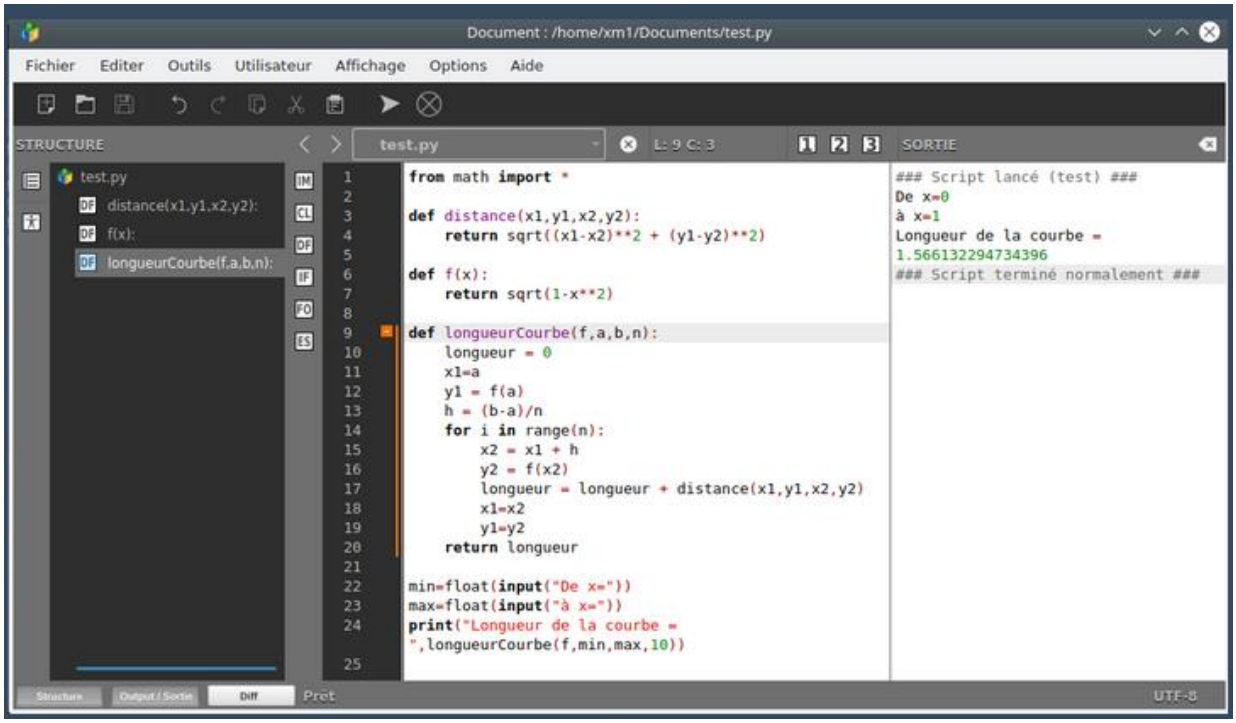

```
r = (0:0.025:1)';
theta = pi*(-1:0.05:1);
z = r*exp(1i*theta);
w = z.^3;

surf(real(z),imag(z),real(w),imag(w))
xlabel('Real(z)')
ylabel('Imag(z)')
zlabel('Real(w)')
cb = colorbar;
cb.Label.String = 'Imag(w)';
```

Figure 2.1 : Matlab [35]

2) **Python (avec des bibliothèques comme SciPy, CVXPY, PuLP) :**

Python est un langage de programmation très populaire qui dispose de plusieurs bibliothèques pour l'optimisation. SciPy propose des modules pour l'optimisation et la minimisation, CVXPY est spécialisé pour l'optimisation convexe, et PuLP est utilisé pour la programmation linéaire.




```
from math import *

def distance(x1,y1,x2,y2):
    return sqrt((x1-x2)**2 + (y1-y2)**2)

def f(x):
    return sqrt(1-x**2)

def longueurCourbe(f,a,b,n):
    longueur = 0
    x1=a
    y1 = f(a)
    h = (b-a)/n
    for i in range(n):
        x2 = x1 + h
        y2 = f(x2)
        longueur = longueur + distance(x1,y1,x2,y2)
        x1=x2
        y1=y2
    return longueur

min=float(input("De x="))
max=float(input("à x="))
print("Longueur de la courbe =
",longueurCourbe(f,min,max,10))
```

```
### Script lancé (test) ###
De x=0
à x=1
Longueur de la courbe =
1.566132294734396
### Script terminé normalement ###
```

Figure 2.2 : Python [37]

3) GAMS (General Algebraic Modeling System) :

GAMS est un système de modélisation de haut niveau pour l'optimisation mathématique. Il est

conçu pour modéliser et résoudre des problèmes d'optimisation linéaires, non linéaires, et mixtes en nombres entiers.

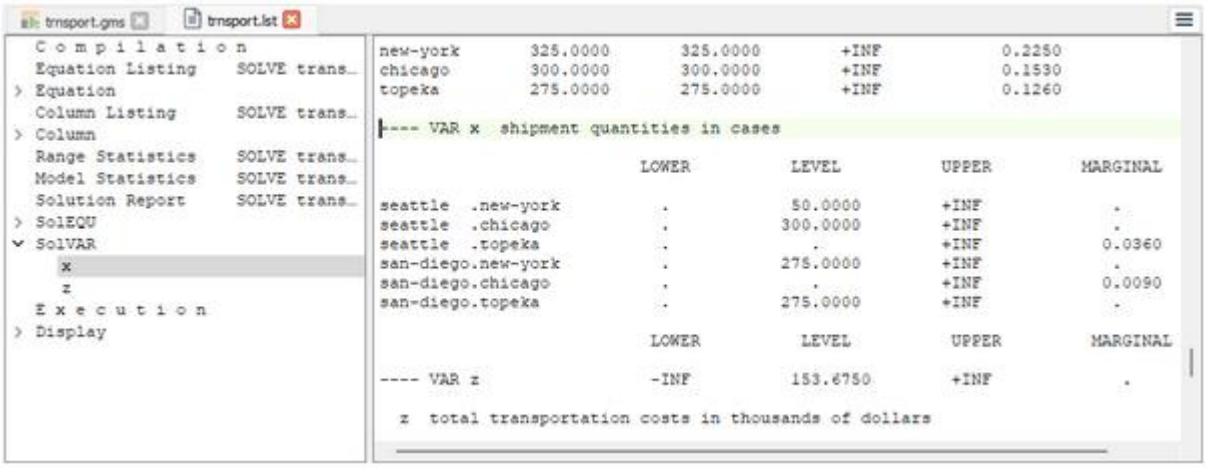


Figure 3.3 GAMS

4) **AMPL (A Mathematical Programming Language) :**

AMPL est un langage de modélisation pour l'optimisation qui permet de formuler des problèmes d'optimisation de manière concise et lisible. Il peut être utilisé avec divers solveurs pour résoudre des problèmes d'optimisation.

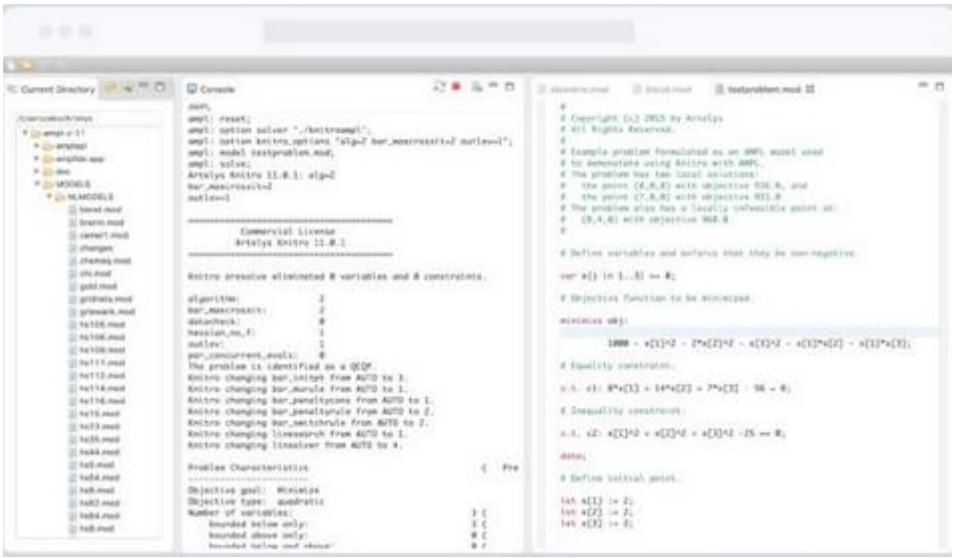


Figure 2.4 : AMPL

5) **CPLEX :**

Développé par IBM, CPLEX est un solveur d'optimisation performant pour les problèmes de programmation linéaire, quadratique, et en nombres entiers mixtes. Il est souvent utilisé dans des applications industrielles et de recherche.

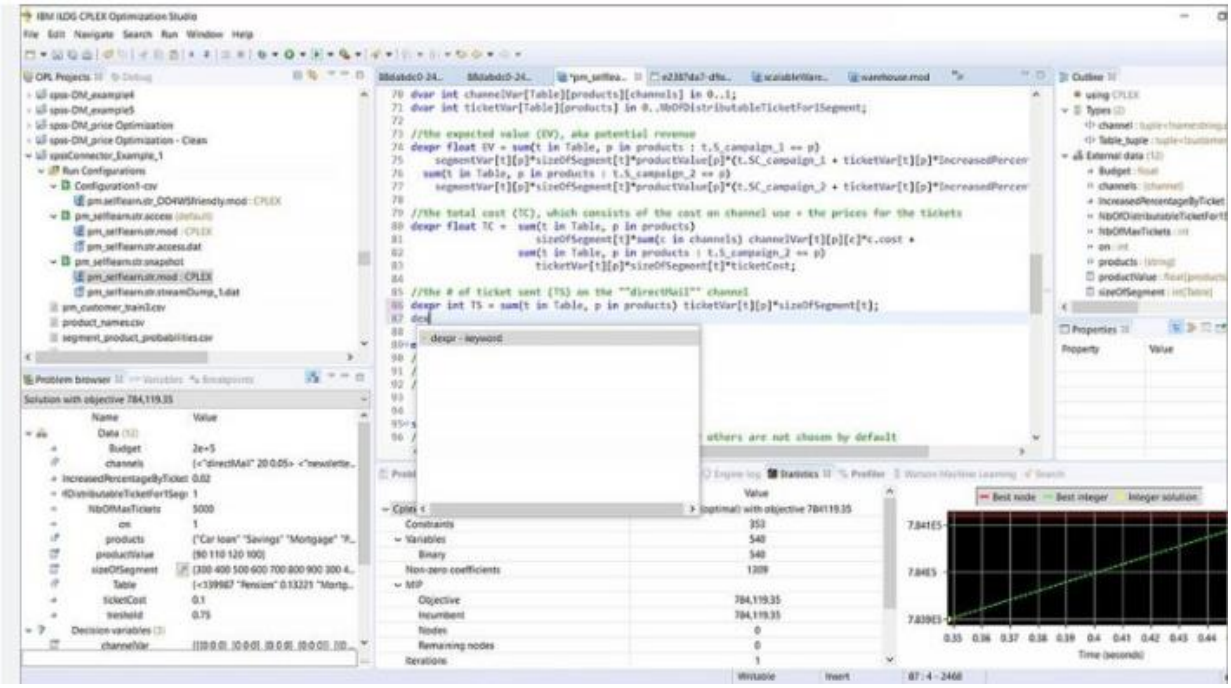


Figure 2.5 : CPLEX [38]

6) **Gurobi :**

Gurobi est un autre solveur d'optimisation puissant qui prend en charge la programmation linéaire, quadratique, et en nombres entiers mixtes. Il est connu pour sa rapidité et son efficacité.

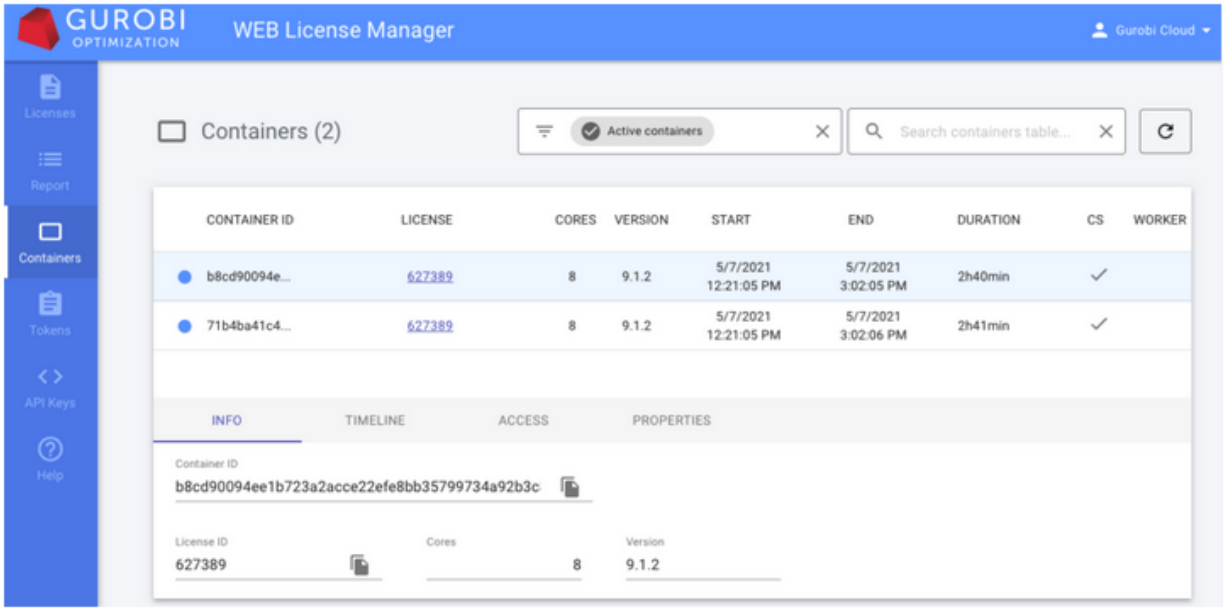


Figure 2.6 : GUROBI

7) **LINDO/LINGO :**

LINDO et LINGO sont des logiciels d'optimisation qui offrent des outils pour la programmation linéaire, non linéaire, et en nombres entiers. Ils sont utilisés dans l'éducation et l'industrie pour

résoudre des problèmes d'optimisation complexes.

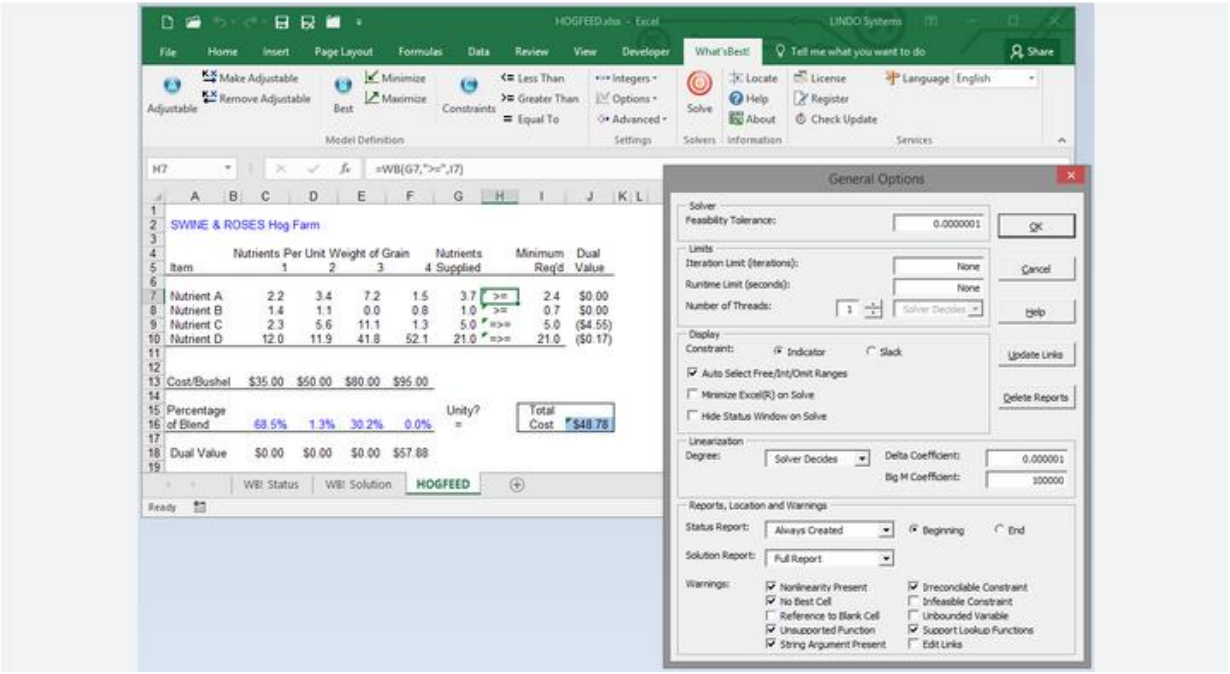


Figure 2.7 : LINDO

8) KNITRO :

KNITRO est un solveur d'optimisation non linéaire qui utilise des techniques avancées pour résoudre des problèmes d'optimisation continus et discrets. Il est souvent utilisé dans des applications nécessitant une grande précision.

```
julia> pTax4D = AmplModel("data/pTax4D")
Minimization problem data/pTax4D
nvar = 432, ncon = 46441 (1 linear)

julia> NCLSolve(pTax4D, outlev=0)
outer inner   NCL obj     ‖r‖       η       ‖∇L‖       ω       ρ  μ init     ‖y‖      ‖x‖  time
1    12 -1.34e+04 3.3e-02 1.0e-02 5.4e-03 1.0e-02 1.0e+02 1.0e-01 1.0e+00 7.2e+02  3.38
2    12 -1.31e+04 1.3e-02 1.0e-02 4.0e-03 1.0e-02 1.0e+03 1.0e-03 1.0e+00 7.2e+02  3.23
3    15 -1.30e+04 5.1e-03 1.0e-02 2.1e-04 1.0e-02 1.0e+04 1.0e-03 1.0e+00 7.1e+02  3.86
4    31 -1.30e+04 3.2e-03 1.0e-03 1.3e-05 1.0e-03 1.0e+04 1.0e-05 5.2e+01 7.0e+02  7.95
5    37 -1.30e+04 1.8e-03 1.0e-03 1.2e-05 1.0e-03 1.0e+05 1.0e-05 5.2e+01 7.0e+02  9.89
6    44 -1.29e+04 5.0e-04 1.0e-03 1.1e-06 1.0e-03 1.0e+06 1.0e-06 5.2e+01 7.0e+02 11.93
7    16 -1.29e+04 2.6e-04 1.0e-04 1.2e-05 1.0e-04 1.0e+06 1.0e-06 5.3e+02 7.0e+02  3.74
8    30 -1.29e+04 4.4e-05 1.0e-04 1.2e-07 1.0e-04 1.0e+07 1.0e-07 5.3e+02 7.0e+02  8.15
9     9 -1.29e+04 2.3e-05 1.0e-05 1.2e-07 1.0e-05 1.0e+07 1.0e-07 8.2e+02 7.0e+02  2.49
10   11 -1.29e+04 3.8e-06 1.0e-05 1.0e-08 1.0e-05 1.0e+08 1.0e-08 8.2e+02 7.0e+02  3.09
11    6 -1.29e+04 1.7e-07 1.0e-06 1.3e-08 1.0e-06 1.0e+08 1.0e-08 9.4e+02 7.0e+02  1.74
```

Figure 2.8 : KNITRO

9) COIN-OR :

COIN-OR est une suite de logiciels open source pour l'optimisation qui inclut plusieurs solveurs et outils pour la programmation linéaire, non linéaire, et en nombres entiers.

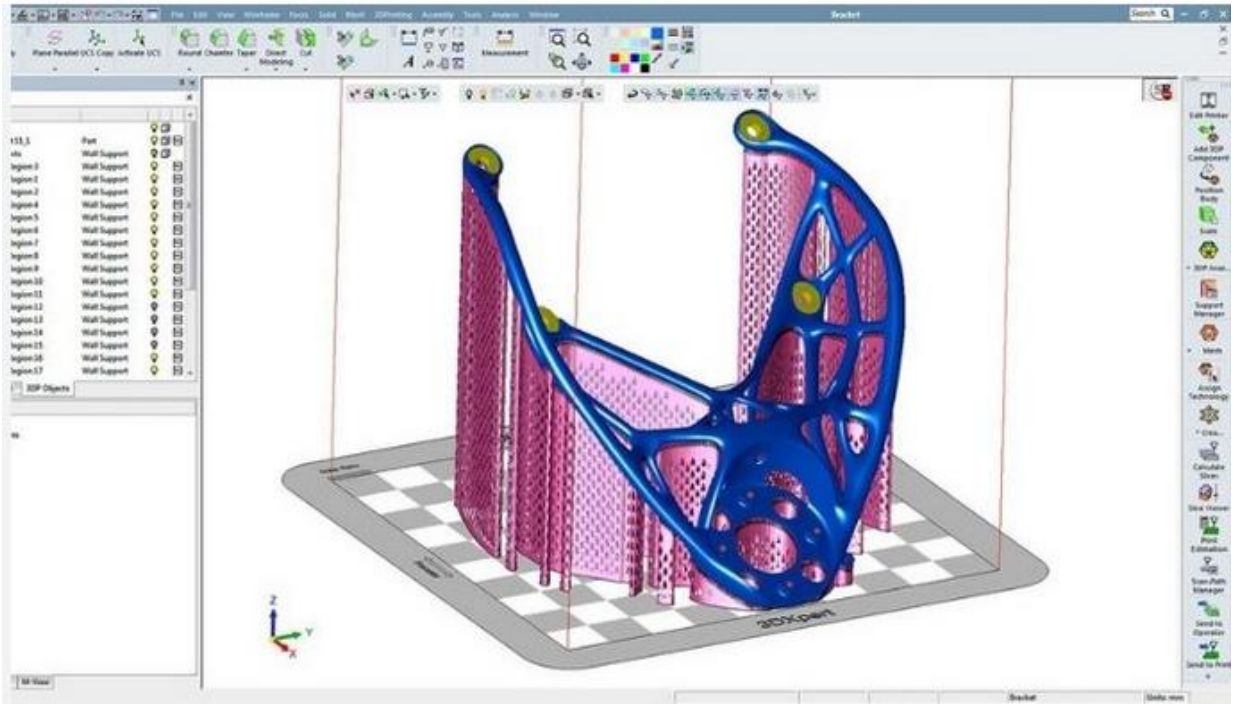


Figure 2.9 : COIN-OR

10) **Excel Solver :**

Pour des problèmes d'optimisation plus simples, Excel propose un outil intégré appelé Solver. Il permet de résoudre des problèmes de programmation linéaire et non linéaire directement dans une feuille de calcul.

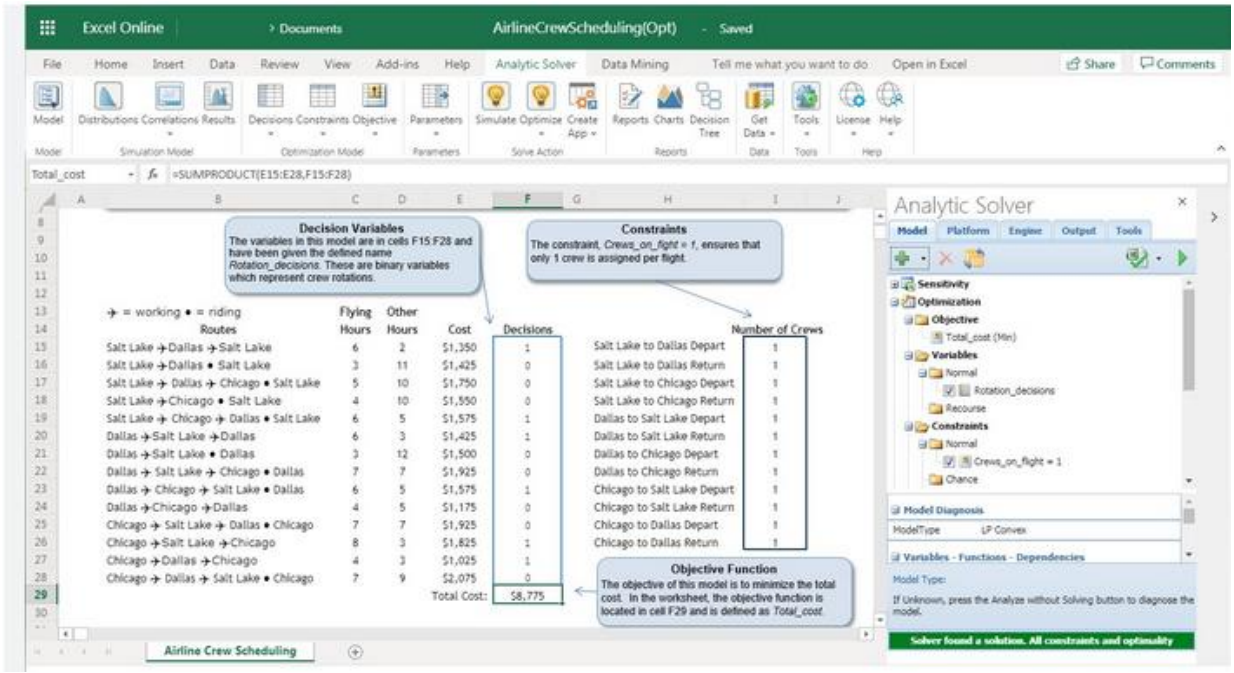


Figure 2.10 : Excel Solver

11) **MODDE (MODeling and DEsign) :**

est un logiciel spécialisé dans la conception d'expériences (DoE - Design of Experiments) et l'optimisation de processus. La version MODDE 5 est une évolution de ce logiciel, conçue pour aider les scientifiques, ingénieurs et chercheurs à planifier, analyser et interpréter des expériences de manière efficace.

Principales fonctionnalités de MODDE 5 :

1. **Conception d'expériences (DoE) :**

- Permet de créer des plans d'expériences optimisés (plans factoriels, plans de surface de réponse, mélanges, etc.).
- Facilite l'exploration systématique des facteurs influençant un processus ou un produit.

2. **Analyse statistique :**

- Offre des outils pour analyser les résultats des expériences.
- Inclut des modèles de régression linéaire et non linéaire pour identifier les relations entre les variables.

3. **Optimisation :**

- Aide à trouver les conditions optimales pour un processus ou un produit en utilisant des modèles prédictifs.
- Permet de visualiser les zones optimales grâce à des graphiques de surface de réponse.

4. **Visualisation des données :**

- Fournit des graphiques interactifs pour explorer les données (graphiques en 3D, diagrammes de contour, etc.).
- Facilite l'interprétation des résultats.

5. **Gestion de la qualité :**

- Inclut des outils pour évaluer la robustesse des processus et identifier les sources de variabilité.

6. **Interface conviviale :**

- Une interface intuitive qui permet aux utilisateurs de créer et d'analyser des expériences sans nécessiter une expertise approfondie en statistiques.

Domaines d'application :

MODDE 5 est utilisé dans divers secteurs, notamment :

- **Chimie et pharmacie** : optimisation de formulations, de réactions chimiques, etc.
- **Agroalimentaire** : amélioration de la qualité des produits.
- **Industrie manufacturière** : optimisation des processus de production.
- **Environnement** : étude des facteurs influençant des systèmes complexes.

Avantages de MODDE 5 :

- **Efficacité :** réduit le nombre d'expériences nécessaires pour obtenir des résultats significatifs.
- **Précision** : permet de modéliser et prédire les comportements des systèmes.
- **Flexibilité :** adapté à une large gamme de problèmes expérimentaux.

Alternatives :

Si MODDE 5 est un outil puissant, d'autres logiciels similaires incluent :

- **MP (de SAS)**

- Design-Expert (de Stat-Ease)
- Minitab
- R (avec des packages comme `DoE.base` ou `rsm`)

MODDE 5 est particulièrement apprécié pour sa simplicité d'utilisation et sa capacité à guider les utilisateurs à travers les étapes de la conception et de l'analyse d'expériences. Si vous travaillez dans un domaine où l'optimisation de processus est cruciale, MODDE 5 pourrait être un outil très utile.

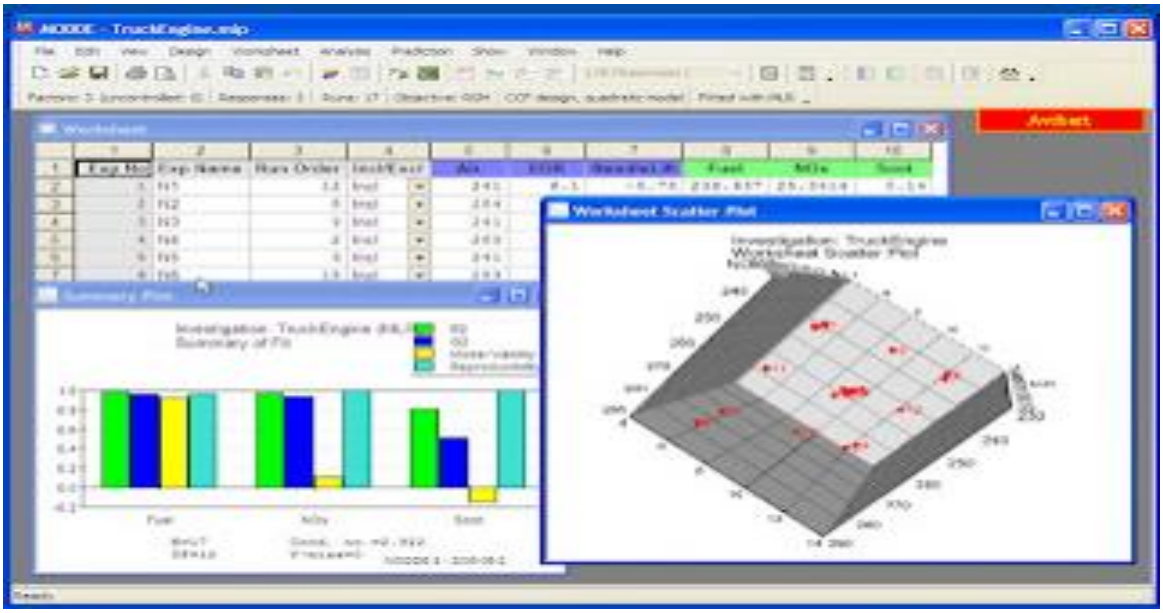


Figure 2.11 : MODDE5

Ces logiciels offrent une gamme de fonctionnalités et sont adaptés à différents types de problèmes d'optimisation. Le choix du logiciel dépend souvent de la complexité du problème, des préférences de l'utilisateur, et des ressources disponibles.

2.6 Conclusion :

L'optimisation numérique joue un rôle crucial dans le domaine du contrôle non destructif (CND), en permettant d'améliorer l'efficacité, la précision et la fiabilité des méthodes d'inspection. Grâce à des algorithmes avancés et des techniques de modélisation, l'optimisation numérique aide à résoudre des problèmes complexes liés à la détection de défauts, à la caractérisation des matériaux et à l'interprétation des données.

Les avantages de l'optimisation numérique dans le CND incluent :

1. **Amélioration de la précision** : Les méthodes numériques permettent de mieux localiser et quantifier les défauts, même dans des structures complexes.
2. **Réduction des coûts et du temps** : En automatisant les processus d'analyse et en optimisant les paramètres d'inspection, les ressources sont utilisées de manière plus efficace.
3. **Adaptabilité** : Les techniques d'optimisation peuvent être appliquées à une large gamme de méthodes CND (ultrasons, radiographie, courants de Foucault, etc.) et à divers matériaux.

4. **Simulation et prédiction** : Les modèles numériques permettent de simuler des scénarios d'inspection et de prédire les performances des méthodes CND avant leur mise en œuvre sur le terrain.

Cependant, des défis subsistent, tels que la nécessité de modèles mathématiques robustes, la gestion des incertitudes et la complexité des calculs pour des structures de grande taille ou hétérogènes. L'intégration de l'intelligence artificielle et du machine learning ouvre de nouvelles perspectives pour surmonter ces obstacles et améliorer encore les capacités de l'optimisation numérique dans le CND.[39]

En résumé, l'optimisation numérique est un outil indispensable pour moderniser et renforcer les techniques de contrôle non destructif, contribuant ainsi à la sécurité, à la qualité et à la durabilité des infrastructures industrielles.

Conclusion :

Ce chapitre a mis en lumière l'évolution historique, les domaines d'application et les outils liés à l'optimisation numérique. Il montre que cette discipline est devenue incontournable dans de nombreux secteurs industriels, notamment en lien avec le contrôle non destructif (CND).

L'optimisation numérique permet d'améliorer la précision, de réduire les coûts, et d'adapter les procédés à une large variété de cas complexes grâce à des modèles mathématiques et algorithmiques performants

CHAPITRE 3

Simulation numérique par ABAQUS

3.1 Introduction :

La méthode des éléments finis est largement utilisée pour l'analyse des problèmes en ingénierie. Au-delà de la simple résolution de ces problèmes, l'ingénierie implique également la modélisation des lois physiques sous forme d'équations aux dérivées partielles. Cette méthode se distingue par sa capacité à traiter des géométries complexes et des conditions aux limites variées, en divisant le domaine d'étude en éléments géométriques simples. Le maillage obtenu constitue alors une approximation de la solution du problème étudié. Toutefois, générer un maillage de qualité qui respecte les contours et les spécificités du domaine peut s'avérer chronophage pour l'utilisateur, nécessitant parfois des ajustements manuels afin de corriger des défauts tels que des éléments déformés ou de mauvaise qualité.

Par ailleurs, dans de nombreuses applications industrielles, les modèles de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) sont utilisés comme base. Ces modèles doivent souvent être simplifiés ou modifiés pour atteindre le niveau de précision requis pour la simulation. Cela peut nécessiter des itérations successives sur le modèle CAO afin d'éliminer ou d'ajuster des détails géométriques non pertinents. En conséquence, il est rarement possible de se contenter d'un unique maillage pour l'ensemble du processus de simulation : chaque modification du modèle exige une nouvelle phase de remaillage. Ce besoin devient encore plus crucial lorsque la forme ou la topologie du modèle évolue, comme c'est le cas lors de l'optimisation géométrique, de la propagation de fissures ou du déplacement de frontières.

Le remaillage peut cependant induire certains problèmes, notamment en ce qui concerne la fidélité des frontières de la solution, surtout lors du transfert de charges ou dans des situations où la diffusion numérique devient importante à proximité des bords. Ce chapitre présente ainsi une série de résultats numériques portant sur l'analyse de diverses répartitions de charges appliquées à une plaque rectangulaire renforcée par des raidisseurs métalliques [30].

3.2 Définition d'ABAQUS :

ABAQUS est un logiciel d'analyse par éléments finis développé par la société ABAQUS, Inc. Il regroupe trois modules principaux : **ABAQUS/Standard**, **ABAQUS/Explicit** et **ABAQUS/CAE**. Le module ABAQUS/Standard utilise un schéma d'intégration implicite et convient à une large gamme de problèmes, tandis que les modules ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE emploient des schémas explicites, adaptés notamment aux simulations dynamiques non linéaires ou quasi-statiques. ABAQUS/CAE, quant à lui, constitue l'environnement graphique dédié à la modélisation et à la visualisation des résultats.

Le cœur du logiciel est développé en **C++** et **Fortran**, tandis que **Python** est utilisé pour le scripting et la personnalisation. L'interface graphique repose sur le **FOX Toolkit**. ABAQUS est

largement adopté dans divers secteurs tels que l'industrie automobile, l'aéronautique, la recherche scientifique et le domaine académique.

À l'origine, ABAQUS a été conçu pour modéliser les comportements non linéaires des matériaux, proposant divers modèles comme celui des élastomères. En 2005, la société ABAQUS, Inc. a été rachetée par **Dassault Systèmes** et intégrée à sa plateforme **SIMULIA** [31].

3.3 Module :

ABAQUS est organisé en plusieurs modules, chacun jouant un rôle spécifique dans le processus de simulation. La réalisation complète d'un projet sous ABAQUS implique une progression séquentielle à travers ces différents modules. Dans ce qui suit, nous présenterons les principaux modules d'ABAQUS à travers un exemple concret.

Considérons le cas d'un assemblage collé entre deux plaques en acier. Il s'agit de deux plaques d'acier de section rectangulaire S=100×25 mm2S = 100 \times 25 \, \text{mm}^2S=100×25mm2 et d'épaisseur e=3 mme = 3 \, \text{mm}e=3mm, reliées par une couche de colle également de section rectangulaire S=100×12,5 mm2S = 100 \times 12{,}5 \, \text{mm}^2S=100×12,5mm2 et d'épaisseur e=0,2 mme = 0{,}2 \, \text{mm}e=0,2mm. Les deux plaques sont supposées élastiques, avec un module d'Young E=68800 MPa et un coefficient de Poisson ν=0,33. La colle est également considérée comme un matériau élastique, caractérisé par un module d'Young de E=2690 MPaet un coefficient de Poisson ν=0,3(voir Figure 1).

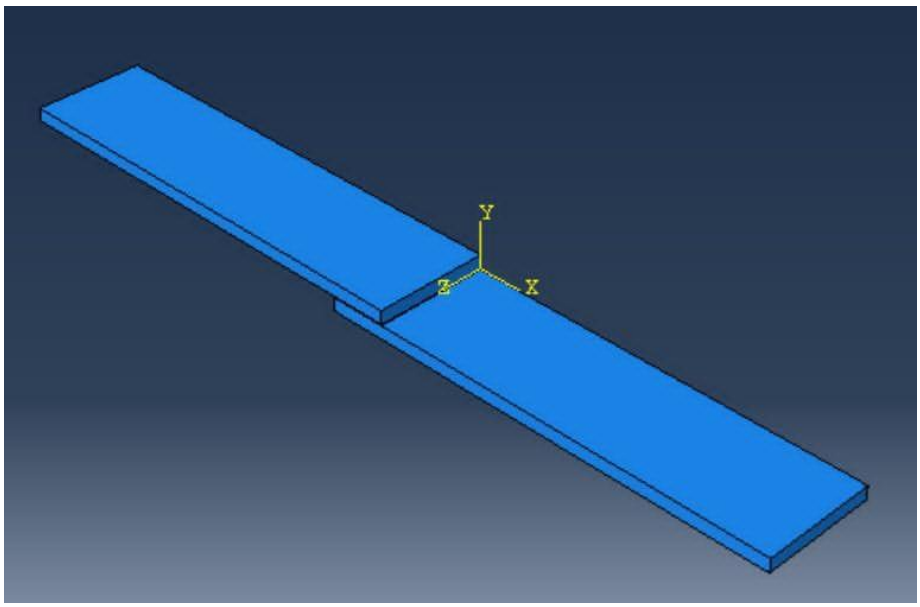


Figure 3.1. Les 2 plaques avec colle à réaliser

3.3.1 Module PART :

Le module PART dans ABAQUS permet de modéliser des pièces par extrusion ou révolution, tout en offrant la possibilité de créer et modifier des entités géométriques telles que des points, des

lignes ou des plans de référence. Ces entités peuvent représenter aussi bien des parties déformables que rigides. Pour illustrer son utilisation, prenons l'exemple de la création d'une plaque. Dans l'arbre du modèle, on commence par double-cliquer sur « Parts ». Dans la boîte de dialogue « Create Part », on nomme la pièce « plaque » et on sélectionne les options suivantes : 3D, Déformable, Solid, puis Extrusion. On définit la taille approximative à 200, puis on clique sur « Continue ». Dans la zone de dessin, on trace un rectangle de dimensions 100 x 25 mm, puis on valide en cliquant sur « Done ». Une nouvelle fenêtre, « Edit Base Extrusion », s'ouvre alors ; on y saisit la valeur 3 dans le champ « Depth » pour définir la profondeur de l'extrusion, puis on confirme avec « OK ». (Figure 2)

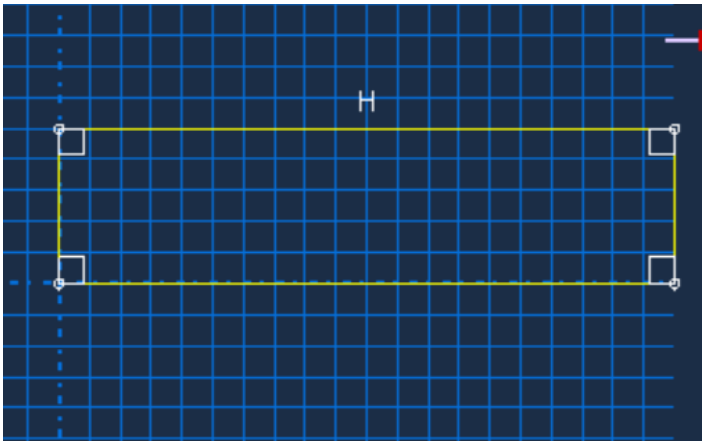


Figure 3.2. Désignation de la

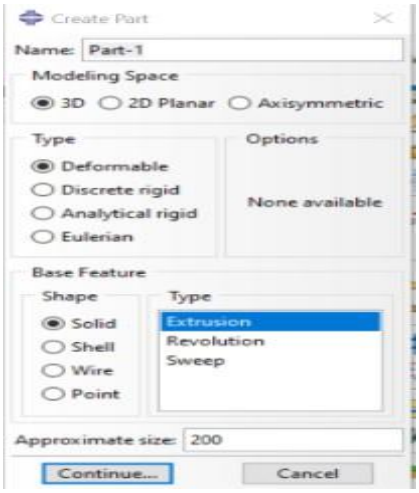
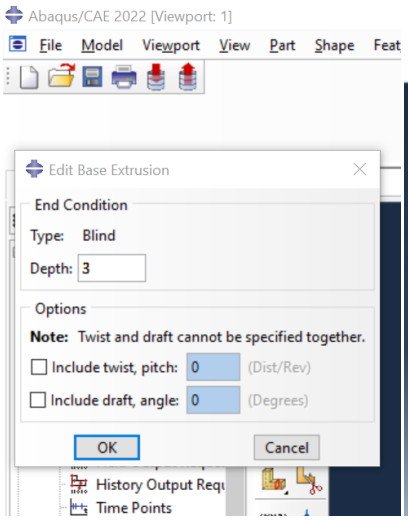


Figure 3.3 Création de la plaque



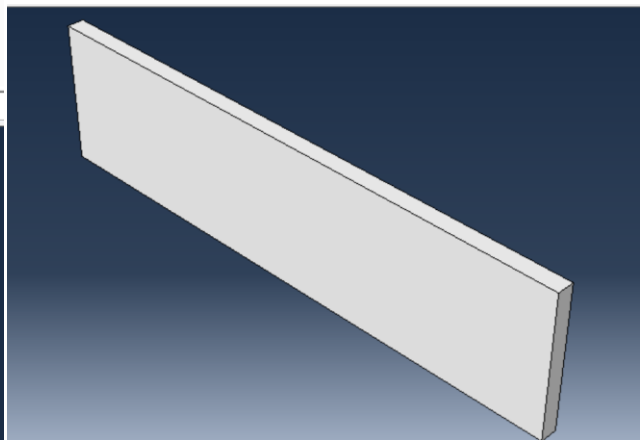


Figure 3.4. Désignation de l'épaisseur

Figure 3.5 Confirmation de l'extrusion

Après avoir créé cette première pièce, nous le copion pour générer une seconde pièce identique. Pour cela, nous sélectionnons la part créée, puis nous lançons l'opération de copie en la renommant « part-2 », et cliquons sur **OK** afin d'obtenir une deuxième pièce similaire à la première. (Figure. 6)

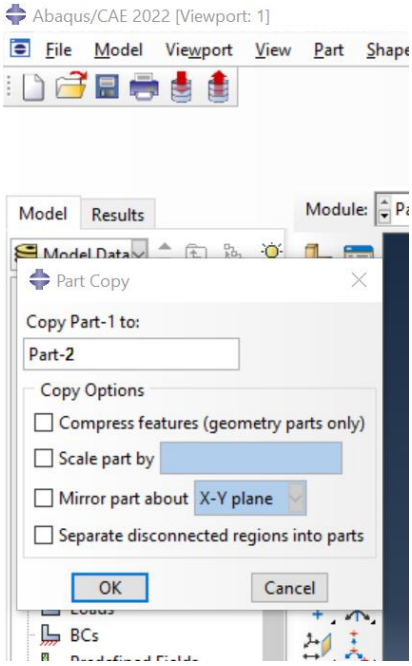


Figure3.6 Créé la 2eme pièce

Ensuite, on répète les mêmes étapes pour créer la couche de colle, en utilisant les mêmes dimensions de base (12.5 x 25 mm²), tout en modifiant l'épaisseur, que l'on fixe cette fois à **0.2mm** (voir Figure 7). Après avoir cliqué sur **OK**, on obtient ainsi la plaque représentant la colle. (Figure .8)

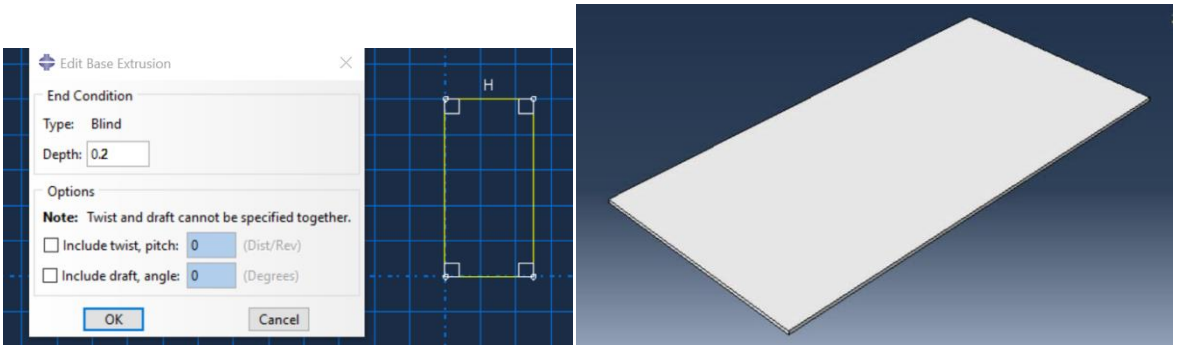


Figure 3.8. Confirmation de l'extrusion ' Désignation de l'épaisseur avec le décollement

3.3.2 Module PROPERTY :

Le module PROPERTY d'ABAQUS permet de définir les propriétés des matériaux utilisés dans les parties déformables du modèle, ainsi que, si nécessaire, la masse des corps rigides. En fonction du cas étudié, ce module permet d'introduire des propriétés élastiques, plastiques ou d'autres types spécifiques. Pour commencer, il suffit de cliquer sur l'icône de création d'un matériau (voir Figure 9). Il est recommandé d'attribuer un nom explicite à chaque matériau, afin de constituer une base de données claire et bien organisée pour le projet. Les propriétés élastiques sont ensuite définies via le chemin : **Mechanical > Elasticity > Elastic**, en précisant notamment le module d'Young et le coefficient de Poisson dans le cas d'un matériau isotrope. Les propriétés plastiques, quant à elles, sont définies par **Mechanical > Plasticity > Plastic**. Ce module permet également de

créer une section associée au matériau, puis d'assigner cette section à toutes les pièces ou composants concernés dans le mécanisme étudié.

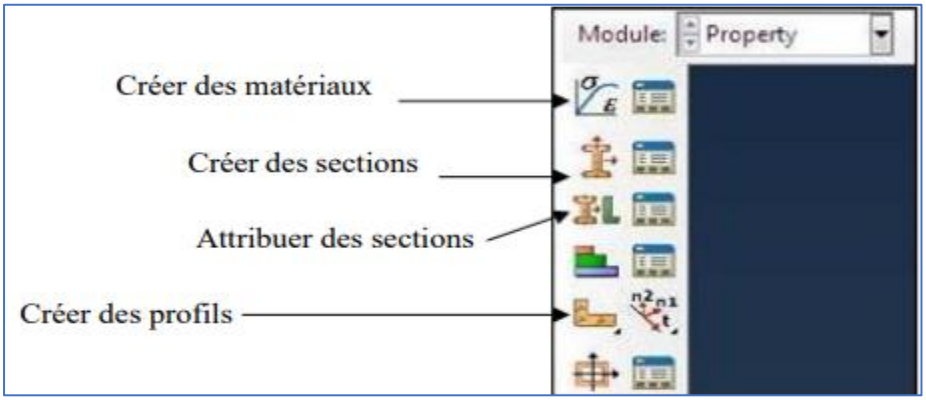


Figure 3.9. Le module property

Pour notre travaille :

Définition du matériau et de ses propriétés :

Dans le cadre de notre travail, la définition des matériaux et de leurs propriétés se fait en accédant à l'arbre du modèle. Il faut double-cliquer sur **Materials**, puis renommer le matériau en **acier** et ajouter, si souhaité, une description. Ensuite, on sélectionne l'onglet **Mechanical > Elasticity > Elastic**, puis on saisit les propriétés suivantes : un module d'Young **E = 68800 MPa** et un coefficient de Poisson de **0,33** (voir Figure 10). Après validation en cliquant sur **OK**, on répète les mêmes étapes pour définir le matériau de **la colle**, en lui attribuant un module d'Young **E = 2690 MPa** et un coefficient de Poisson de **0,3**. (Figure .11)

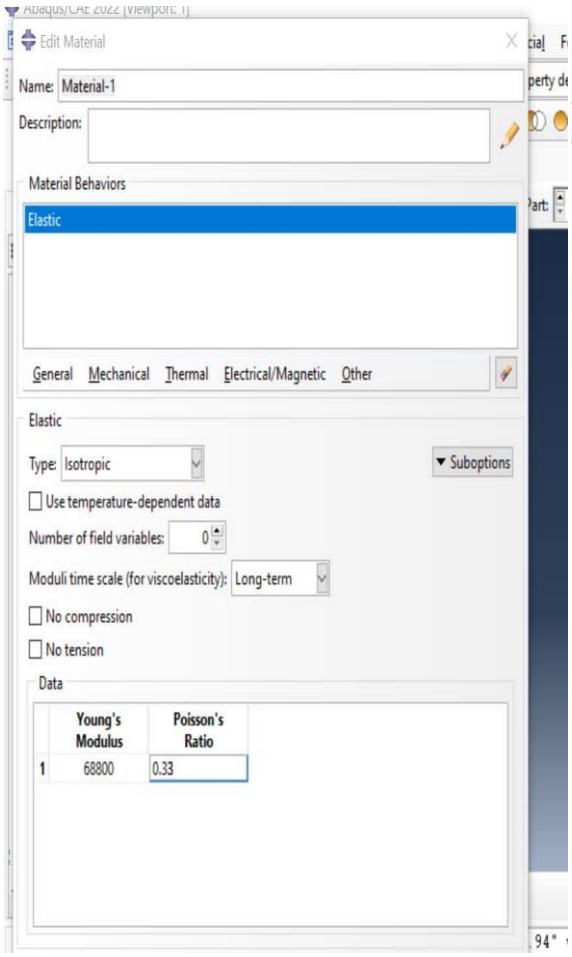


Figure 3.10.Définition les propriétés du matériau des plaques

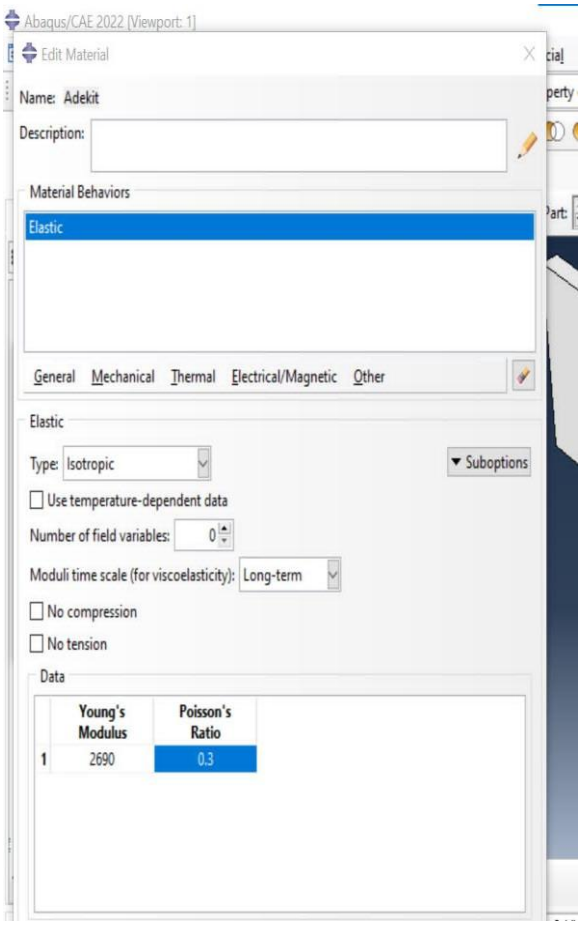


Figure3.11.Définition les propriétés du matériau de colle

Définition et affectation des propriétés de section:

Pour attribuer les propriétés de section aux différentes pièces, on commence par double-cliquer sur **Sections** dans l'arbre du modèle. Dans la boîte de dialogue **Create Section** qui s'ouvre, on procède à la création de deux sections pour les plaques, ainsi qu'une section spécifique pour la colle. On commence par renommer la première section, par exemple **Section_1**. Dans la liste **Category**, on choisit **Solid**, puis dans la liste **Type**, on sélectionne **Homogeneous** (voir Figure 12). En cliquant sur **Continue**, la boîte de dialogue **Edit Section** apparaît : on y conserve par défaut le matériau **acier** pour les deux plaques (Figure 13). On répète ensuite les mêmes étapes pour créer la section de la **colle**, en lui attribuant le matériau correspondant (Figure 14). Finalement, on valide chaque création de section en cliquant sur **OK**.

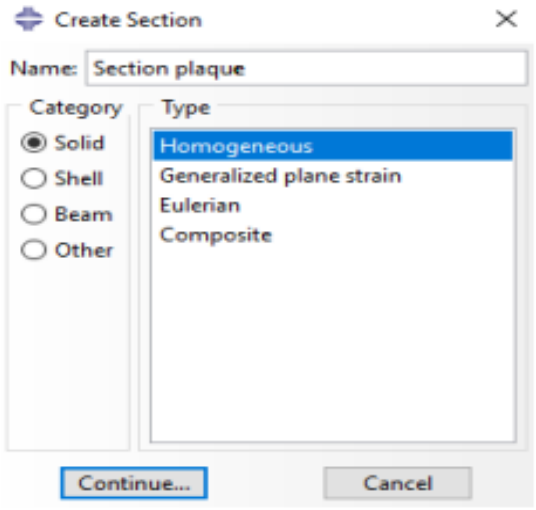


Figure 3.12.Définition la section de la plaque

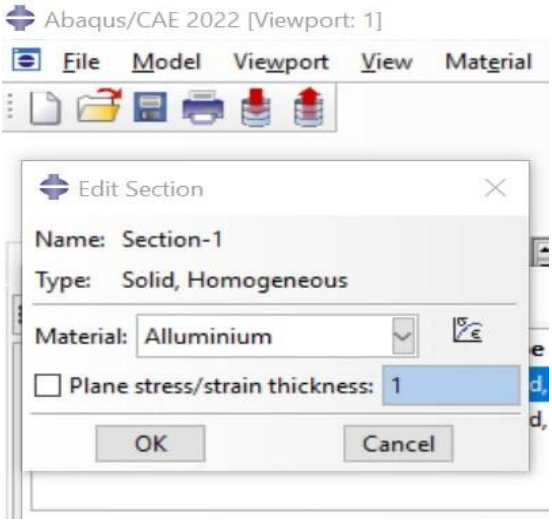


Figure 3. 13 Sélection de la section pour les plaques



Figure 3.14 Sélection de la section pour la colle

Affectation de la section à la structure :

Pour attribuer la section **Section_plaque** à la pièce, il faut double-cliquer sur **Section Assignments** dans la liste des attributs de la pièce. Ensuite, dans le **Viewport**, on sélectionne l'ensemble de la pièce, qui est alors mise en surbrillance par **ABAQUS/CAE** (voir Figure 3-13). Une fois la sélection terminée, on clique sur **Done**. La boîte de dialogue **Edit Section Assignment** s'ouvre ; on y valide la sélection par défaut de la section **Section_plaque**, puis on clique sur **OK** (Figure 3-14). ABAQUS/CAE assigne alors la section à la plaque et colore l'ensemble de la pièce en turquoise pour signaler cette affectation (Figure 3-15). Enfin, on termine l'opération en cliquant sur **Done**.

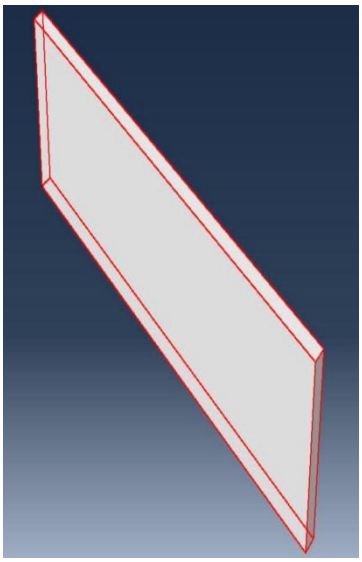


Figure 3.15. Sélection la pièce entière

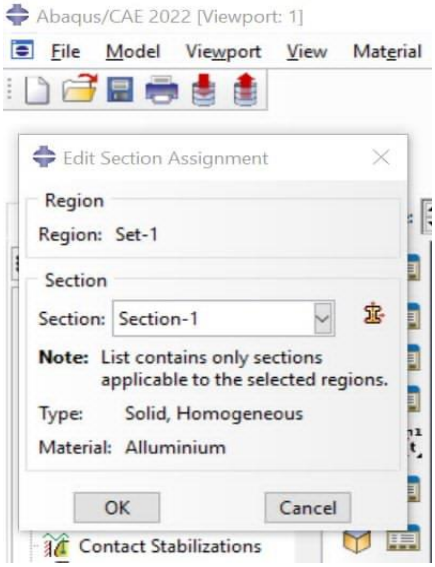


Figure 3.16. Choix de section

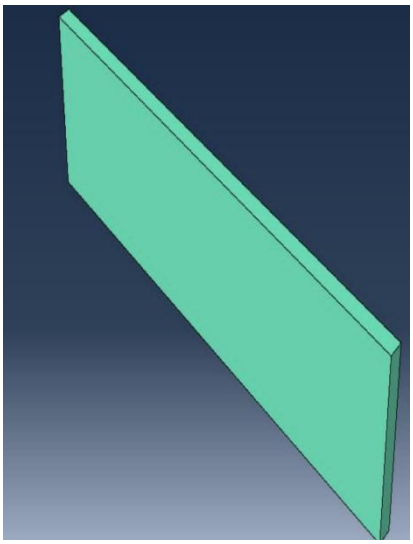


Figure 3.17. Affectation la section

3.3.3 module ASSEMBLY :

Ce module permet de créer des instances à partir des entités définies dans le module **Part**. Ces instances sont ensuite manipulées dans le cadre du modèle. En général, on utilise l'icône située en haut à gauche pour générer une instance en sélectionnant toutes les pièces créées précédemment. Il est également possible, si nécessaire, d'appliquer des mouvements à ces instances afin de les repositionner dans l'espace. Le module **ASSEMBLY** joue donc un rôle central en permettant l'assemblage des différentes pièces du projet, même si celui-ci ne comporte qu'une seule pièce (voir Figure 18).

Après la création des trois pièces (les deux plaques et la couche de colle), on procède à leur assemblage. On commence par cliquer sur l'icône **Translate Instance**, puis on sélectionne la colle et on clique sur **Done** (Figure 19). Ensuite, en sélectionnant un coin de la colle, on la positionne au-dessus de la première plaque, comme illustré dans la Figure 20. On répète ensuite la même opération pour la seconde plaque : on clique sur **Translate Instance**, on sélectionne la deuxième plaque, puis on choisit un coin pour la positionner au-dessus de la couche de colle (Figure 20). À la fin de ces étapes, on obtient un assemblage cohérent des trois pièces (Figure 21).

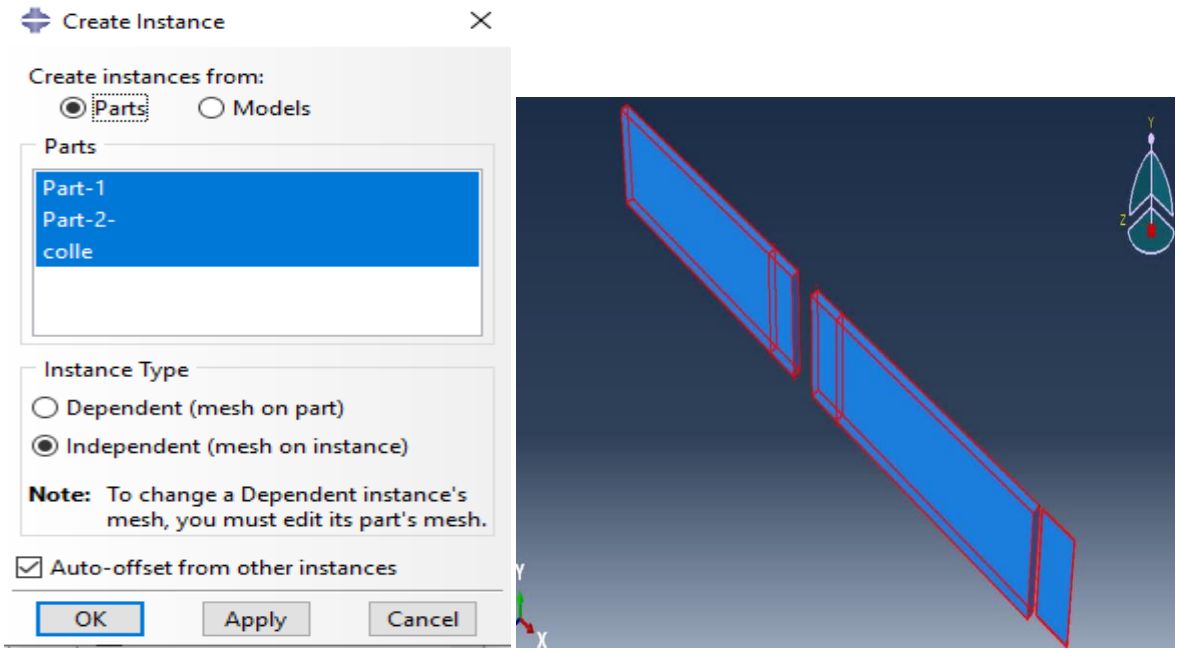


Figure 3.19. La sélection de la colle pour traduire n de l'instance

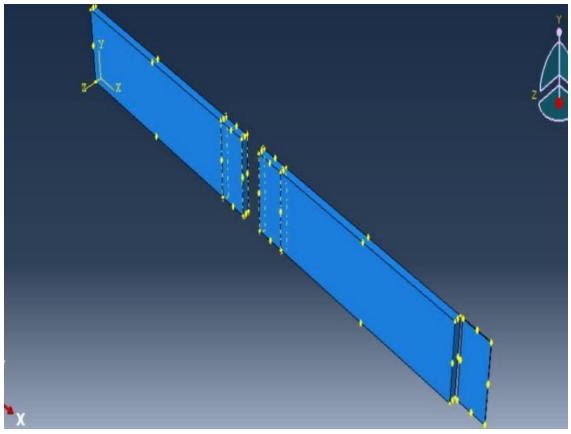


Figure3.20. Placer la colle au-dessus de plaque 1

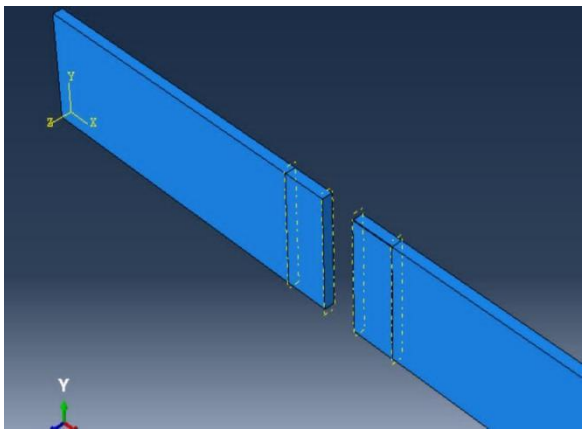


Figure 3.21. Placer la plaque 2 au-dessus de colle

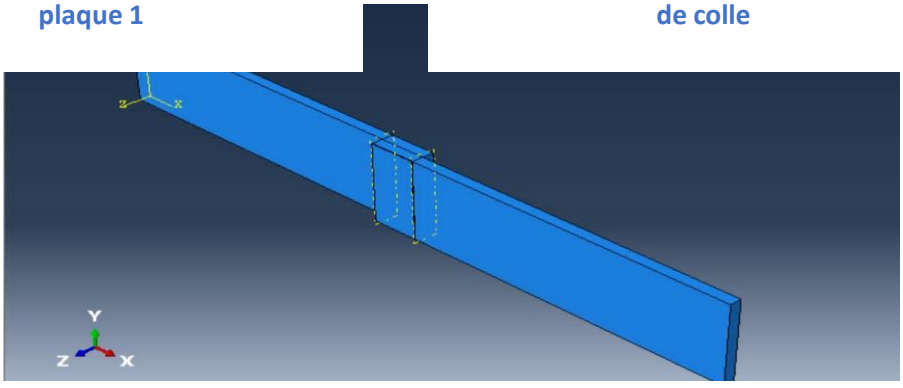


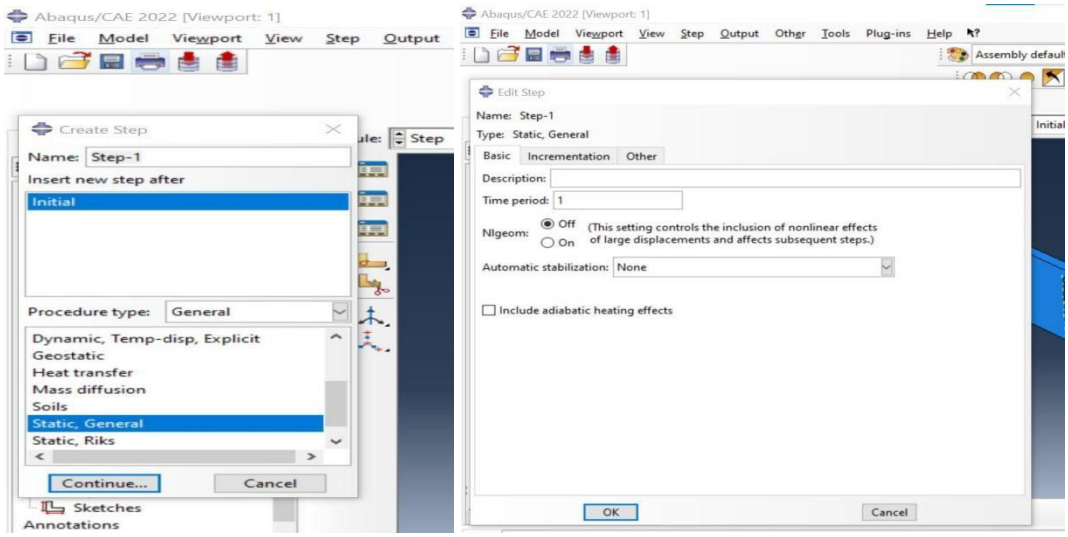
Figure 3.22. Assemblage de Modules

3.3.4 Module STEP :

Le module **STEP** dans ABAQUS permet de définir les différentes étapes de calcul nécessaires à l'analyse d'un modèle. En fonction du type d'étude, une analyse peut comporter une ou plusieurs étapes (steps). Le choix du type d'analyse peut être, par exemple, **statique général** pour les études statiques ou **dynamique explicite** pour les simulations de type impact ou crash.
Dans notre cas, l'objectif est de simuler la réponse statique de la pièce lorsqu'une charge répartie de **10, 15 et 20 MPa** est appliquée sur une seule face. Étant donné qu'il s'agit d'un chargement unique, un seul **Step** d'analyse est nécessaire. Cependant, l'analyse comprend deux étapes principales :

- La première, automatiquement générée par ABAQUS/CAE, permet de définir les conditions aux limites, notamment l'encastrement en termes de déplacement.
- La seconde consiste à appliquer une pression latérale croissante, **10, 15 et 20** une face de la pièce.

Pour créer cette étape d'analyse, il suffit de double-cliquer sur l'option **Steps**, puis de sélectionner **Static General** comme type de procédure. Ensuite, on accepte les valeurs par défaut des paramètres du Step. Une fois cette configuration terminée, il ne reste plus qu'à cliquer sur **OK** pour valider et fermer la boîte de dialogue **Edit Step**.



(a) (b)

Figure3.23. n de step

3.3.5 Module Interaction :

Le module **Interaction** d'ABAQUS permet de définir les interactions physiques entre les différentes parties d'un modèle, qu'elles soient de nature **mécanique**, **thermique**, ou autre. Ce module devient essentiel dès lors que plusieurs instances sont en contact ou interagissent entre elles. Il permet également de spécifier les **contraintes**, les **efforts appliqués**, ainsi que les **conditions aux limites**, qui peuvent varier d'une étape d'analyse (Step) à une autre.

Dans le cadre de notre travail, ce module est utilisé pour définir le contact entre les deux plaques et la couche adhésive (colle). Pour ce faire, nous procédons comme suit :

- Cliquer sur **Create Constraint** et nommer la contrainte **t1**, puis cliquer sur **Continue** (Figure 24).
- Sélectionner la **surface maîtresse**, à savoir la surface de la **plaque 1**, puis cliquer sur **Done** (Figure 25).
- Ensuite, sélectionner la **surface esclave**, ici la **colle** (Figure 26), et valider avec **OK**.
- Enfin, dans la boîte de dialogue **Edit Constraint**, confirmer la création de la liaison **tie1** en cliquant sur **OK** (Figure 27).

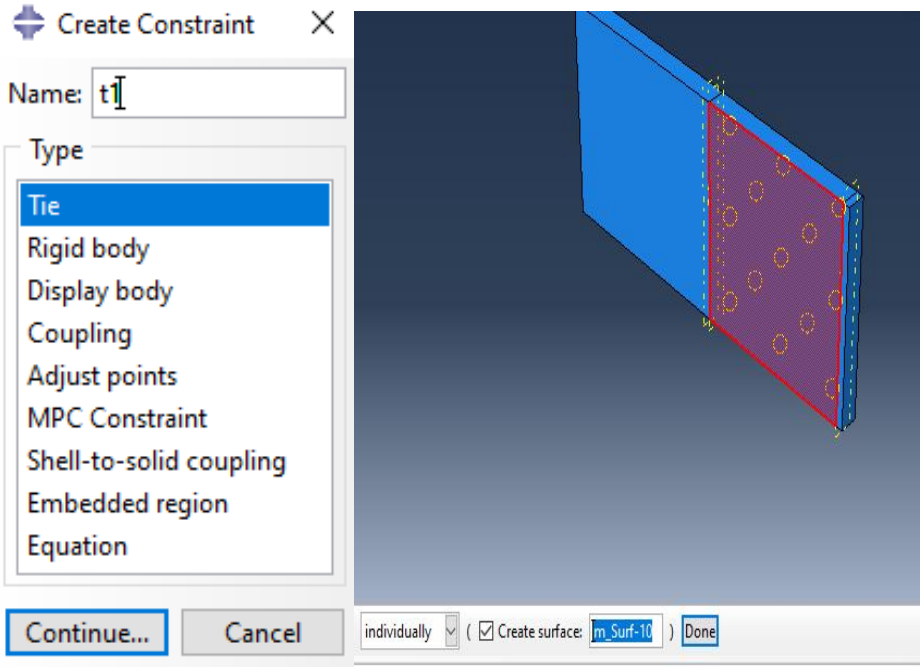


Figure.24. Création de la contrainte.

Figure.25 .Choisir le maître surface (plaque1)

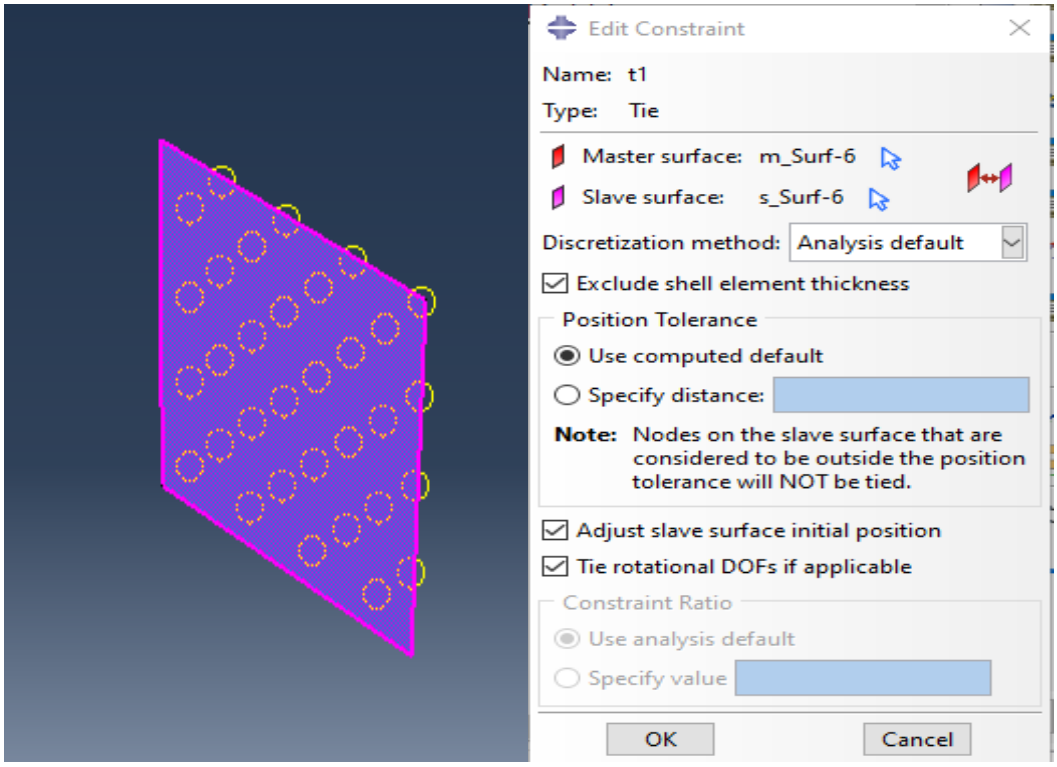


Figure 3.27. La modification de contrainte l'esclave surface (la colle)

Ensuite, faire la même chose pour créer une 2eme contrainte (tie2) lié à la deuxième plaque avec l'autre surface de la colle (Figure.28)

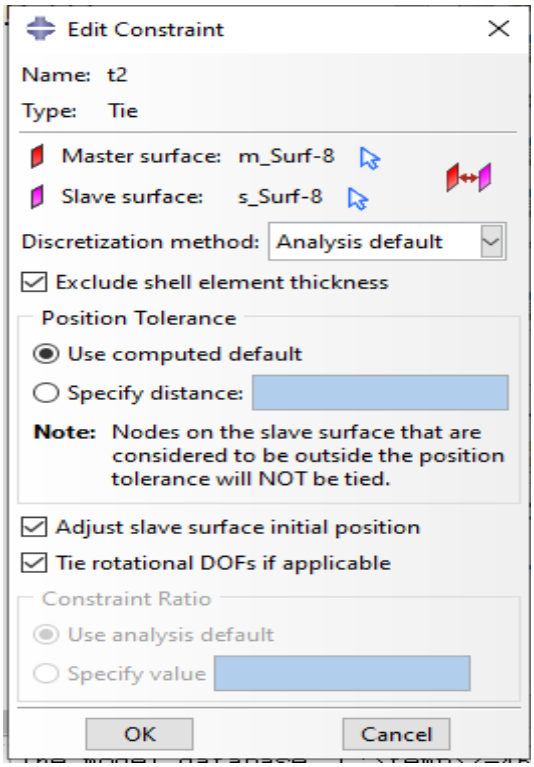


Figure 3.28. La modification de contrainte (t2)

3.3.6 Module LOAD :

Le module **LOAD** permet d'appliquer des charges mécaniques ou thermiques sur les différentes surfaces d'un modèle. Pour appliquer une pression sur les côtés des deux plaques, on procède comme suit :

On clique sur **Create Load**, puis dans la boîte de dialogue qui s'affiche, on sélectionne la**catégorie "Mechanical"**, puis le **type "Pressure"** dans la liste **Types for selected step**, avant de cliquer sur **Continue** (Figure 29).

Ensuite, on sélectionne les **deux surfaces** latérales des plaques sur lesquelles la pression doit être appliquée, puis on clique sur **DONE** pour valider la sélection (Figure 30).

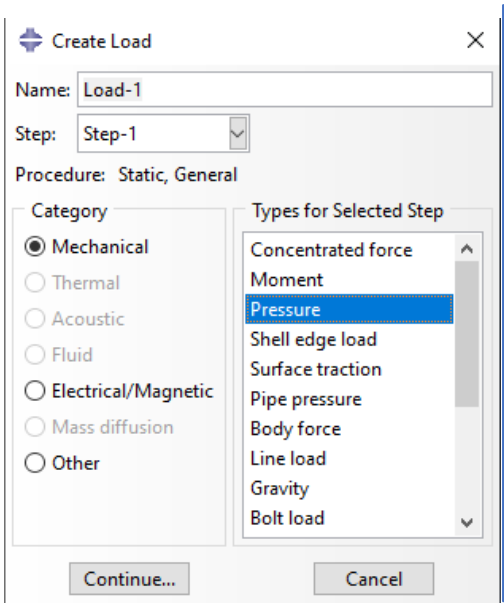


Figure 3.29. Création de l'encastrement

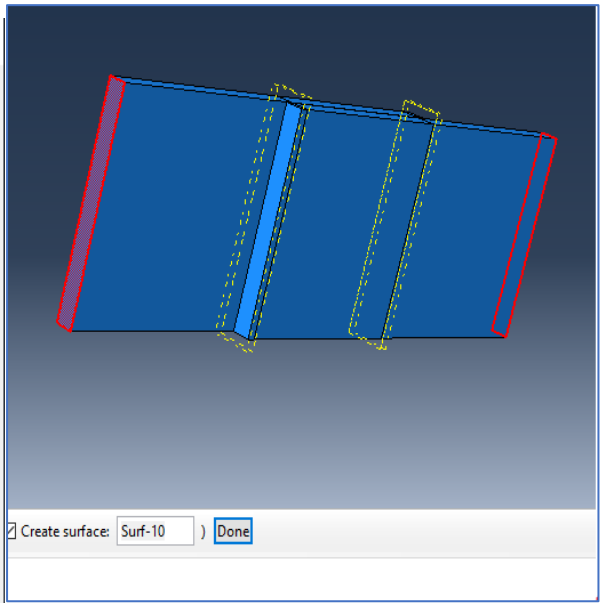
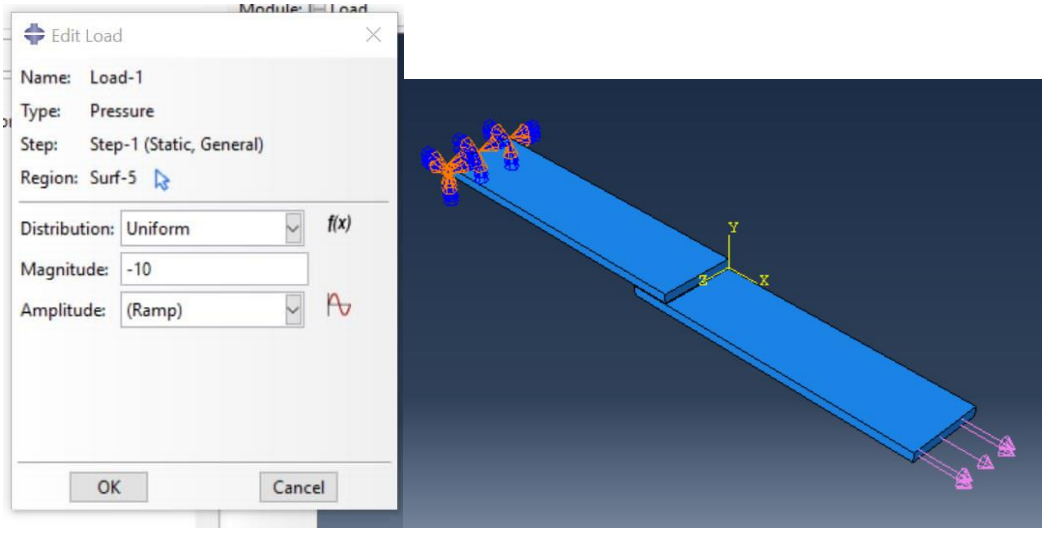


Figure 3.30. La sélection de la face de traction

La boîte de dialogue (Edit Load) s'affiche. On Remplir le champ Magnitude, avec la valeur (-10) et on cliquer sur OK (a) et (b) (Figure.31)



(a) (b)

Figure 3.31. Affectation de champ Magnitude

3.3.7 Module MESH :

. Le module **MESH** permet de générer le maillage d'une pièce ou d'un assemblage dans ABAQUS. Il fournit tous les outils nécessaires pour créer un maillage par éléments finis, qui peut être uniforme ou raffiné localement dans les zones d'intérêt, là où l'on anticipe des variations significatives des résultats. Il est essentiel que les éléments du maillage soient faiblement distordus et aussi proches que possible de formes régulières, afin de garantir la stabilité et la précision des calculs. Un maillage plus fin offre généralement des résultats plus précis. Différents types d'éléments peuvent être utilisés, tels que les **éléments hexaédriques** ou **tétraédriques**, en fonction de la géométrie de la pièce et des objectifs de l'analyse.

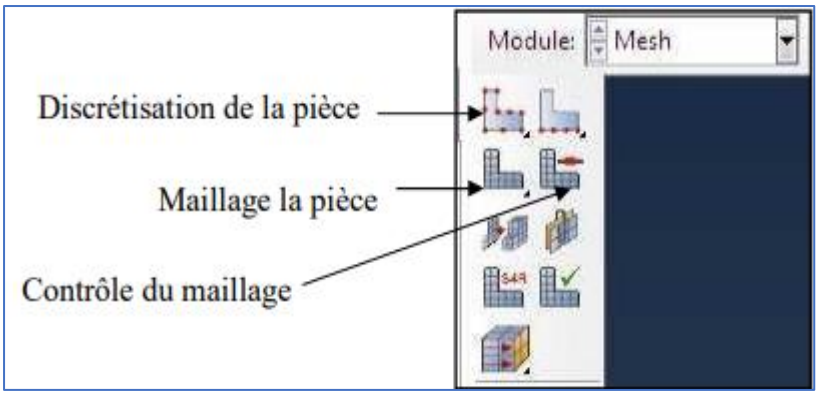


Figure 3.32.Module MESH

Pour notre piéce :

tout d'abord pour faire le bon maillage nous avons cliqué sur icon (Seed part instance) pour faire la discrétisation de la piéce >selectionez toute la piéce>DONE , changer la valeur de (Approximate global size=2) > cliquez sur OK (Figure.33)

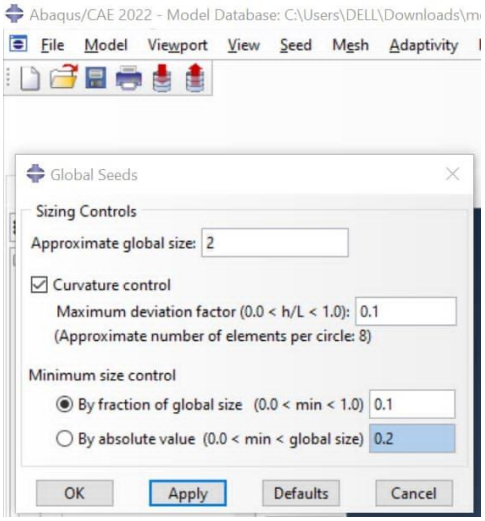


Figure 3.33. Affectation la taille des éléments

Ensuite, cliquez sur (Seededges) et on selectionnele périmètre de la colle > choisir (By number) > Mettre la valeur 20 dans (number of element) (Figure.34) et en fin, on cliquez sur (Mesh Part) pour confirmer le maillage (Figure.35)

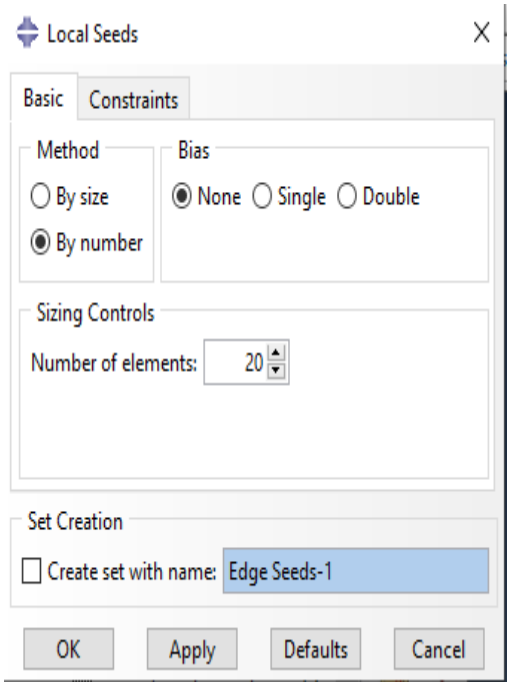


Figure 3.34. Affectation le

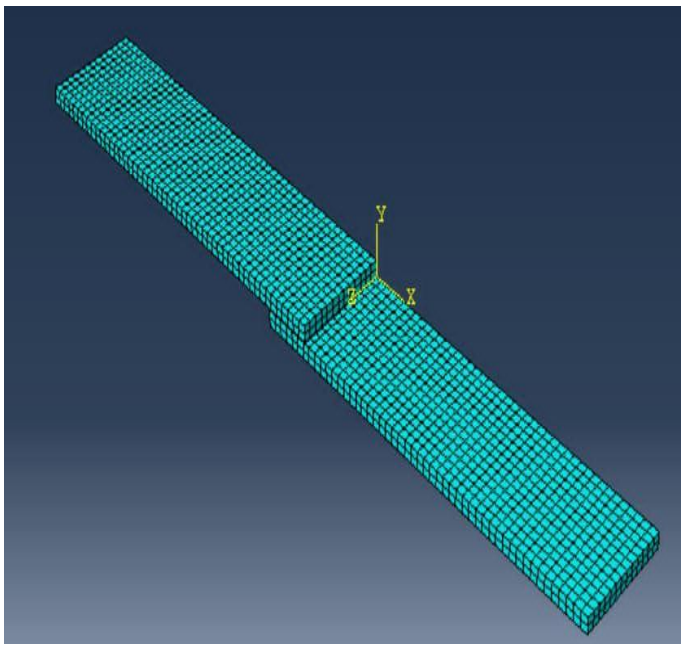


Figure 3.35. Confirmation de maillage

On peut vérifiez notre maillage par cliquez sur (VerifyMesh) >selectionner la piece> cliquez sur DONE, il apparaître la fenetre de vérification (VerifyMesh) (Figure.36) > appuie sur (Highlight) , il faut qu'il soit (errors 0 (0%) , warnings 0 (0%)) (Figure.37)

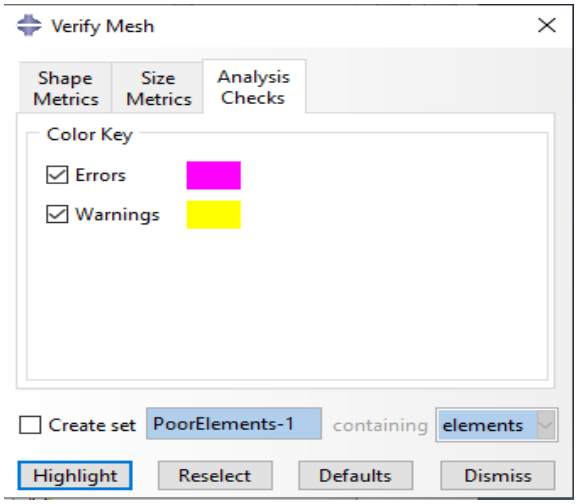


Figure 3.36. Fenêtre de la vérification de maillage

```
  Number of elements :  3000,   Analysis errors:  0 (0%),  Analysis warnings:  0 (0%)

Part instance: colle-1
  Number of elements :  100,   Analysis errors:  0 (0%),  Analysis warnings:  0 (0%)
```

Figure3.37. L'analyse de (errors and warnings)

3.3.8 Module JOB :

Le module **JOB** d'ABAQUS est utilisé pour lancer le calcul numérique et obtenir les résultats de l'analyse, notamment les contraintes, les déformations et les déplacements de la pièce ou du système modélisé. Pour créer un nouveau job, il suffit de double-cliquer sur l'option *Jobs*, de saisir un nom (par exemple "Job-1") dans la boîte de dialogue qui s'affiche, puis de cliquer sur **OK**. Une fois le job créé, on le sélectionne et on clique sur **Submit** pour lancer le calcul (voir Figure 38). À la fin de l'analyse, un message "Completed Successfully" apparaît en bas de la fenêtre *Viewport*, indiquant que l'exécution du job s'est déroulée sans erreur (Figure 39).

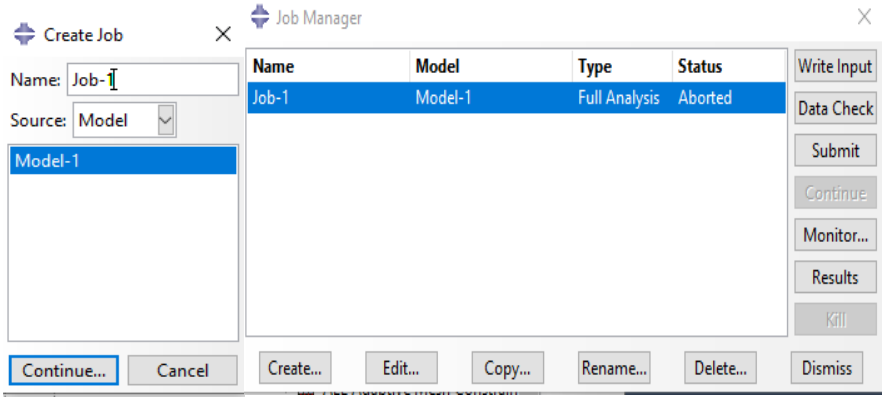


Figure 3.38. Création de job



Figure3.39. L'affichage de message de la réussite

3.9. Module Visualization :

Le module VISUALIZATION d'ABAQUS permet d'afficher et d'analyser les résultats issus des calculs effectués. Une fois le job terminé avec succès, ce module offre une interface graphique pour visualiser les différents champs de résultats tels que les contraintes, les déformations, les déplacements, ou encore les distributions de pression. L'utilisateur peut explorer ces données à travers différentes vues, coupes, animations ou représentations colorées facilitant l'interprétation du comportement mécanique du modèle simulé (Figure 40).

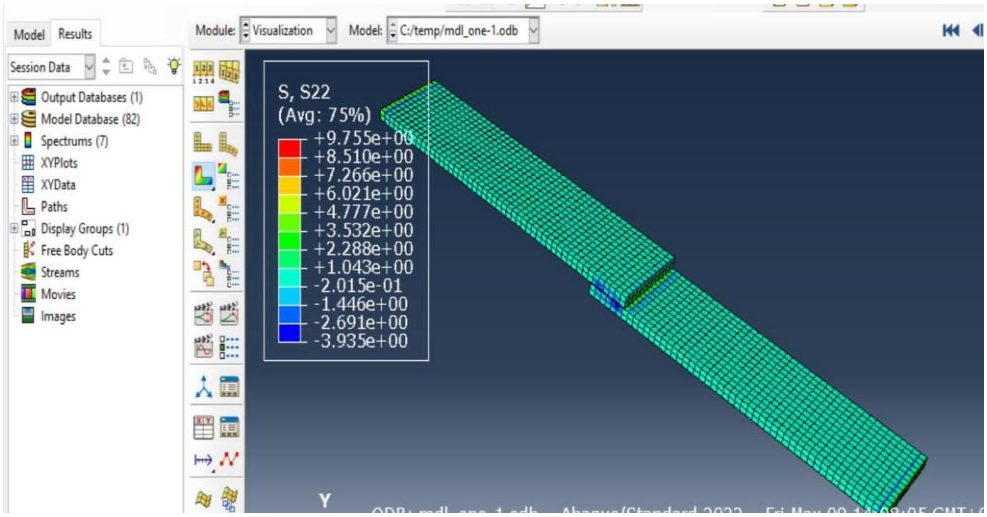


Figure3.40. Visualisation les résultats

Nous avons également réalisé deux autres modèles, à savoir les pièces de positionnement intérieur et extérieur

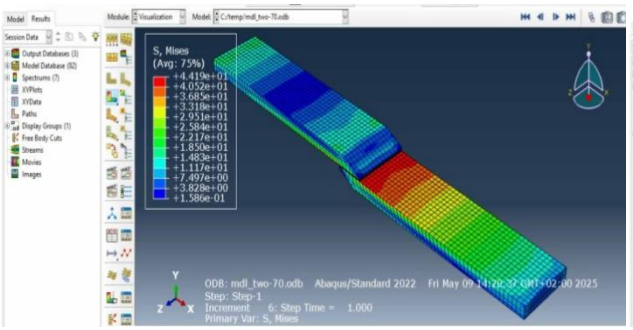


Figure3.41Collage avec biseautêment extérie

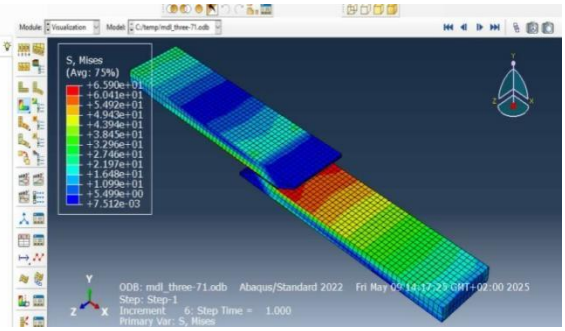


Figure3.42Collage avec biseautêment extérieur

CHAPITRE 4

Résultats et discussion

4.1 Anayse des contraintes de cisaillement d'un collage a simple joint du recouvrement :

L'analyse des contraintes de cisaillement dans les assemblages collés à simple recouvrement constitue un enjeu central pour la fiabilité des structures industrielles modernes. Ces joints, omniprésents dans les secteurs aéronautique, automobile et des énergies renouvelables, présentent une complexité mécanique liée à l'hétérogénéité des matériaux et à la concentration des efforts aux extrémités du recouvrement.

4.1.1 Mécanismes fondamentaux des contraintes adhésives

4.1.1.1 Répartition des contraintes :

- Le cisaillement pur induit une distribution théoriquement uniforme sur la surface collée, mais la réalité géométrique des assemblages génère systématiquement des concentrations aux extrémités.
- La flexion induite par l'excentricité des charges transforme partiellement le cisaillement en contraintes de pelage, pouvant atteindre 300% de la contrainte nominale.

Interactions matériaux:

- Le module de Young des substrats influence directement le gradient de contraintes : un rapport élevé entre rigidité des adhérents et souplesse de la colle accentue les pics de cisaillement.
- Les essais standardisés (ASTM D1002) sous-estiment souvent ces effets par leur configuration symétrique idéalisée.

4.1.1.2 Modélisation analytique historique

La théorie de Volkersen (1938) reste la référence pour décrire le profil parabolique des contraintes longitudinales

Approches numériques modernes

Les simulations éléments finis mettent en évidence :

- Une asymétrie marquée des contraintes sous chargement unilatéral
- Des facteurs de concentration atteignant 4.5 pour des rapports L/e > 50
- L'impact critique de l'épaisseur de la colle : réduire de 0.5 mm à 0.2 mm double les pics de cisaillement

4.1.1.3 Stratégies d'optimisation industrielle

Les solutions adoptées incluent :

- Géométries améliorées : joints biseautés réduisant de 40% les contraintes maximales
- Matériaux fonctionnels : adhésifs nanostructurés à gradient de module
- Contrôle process : techniques de cure UV permettant un durcissement différentiel

Les recherches actuelles s'orientent vers des modèles multi-échelles intégrant l'endommagement progressif et les effets environnementaux. L'absence de normes unifiées reste cependant un frein majeur au développement de méthodologies de dimensionnement prédictives. L'avenir de ces

assemblages passe par une synergie entre modélisation avancée, caractérisation expérimentale in situ et développement de colles adaptatives.

Les trois figures (1,2,3) illustrent l'influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la charge appliquée, pour trois épaisseurs d'adhésif différentes : 0,2 mm (Fig 1), 0,35 mm (Fig 2) et 0,5 mm (Fig 3).

- Relation charge/contrainte : Dans chaque figure, la contrainte de cisaillement maximale augmente linéairement avec la charge appliquée, quelle que soit la configuration.

- Évolution linéaire : Dans toutes les figures, la contrainte maximale de cisaillement augmente de façon linéaire avec la charge appliquée, ce qui traduit une réponse mécanique stable jusqu'à la rupture.

- Effet de la longueur de recouvrement :

- Pour une charge donnée, la contrainte maximale est toujours la plus élevée pour la plus petite longueur de recouvrement (12,5 mm), intermédiaire pour 33,75 mm, et la plus faible pour 42,5 mm.

- Par exemple, pour une charge de 20 MPa :

- Avec 0,2 mm d'adhésif (Fig 1), la contrainte maximale atteint environ 11,5 MPa pour 12,5 mm, 10 MPa pour 33,75 mm, et 9 MPa pour 42,5 mm.

- Avec 0,35 mm d'adhésif (Fig 2), les valeurs sont similaires mais légèrement inférieures.

- Avec 0,5 mm d'adhésif (Fig 3), la contrainte maximale est encore plus faible (environ 10,5 MPa pour 12,5 mm, 9 MPa pour 33,75 mm, et 8 MPa pour 42,5 mm).

- Effet de l'épaisseur de l'adhésif :

- Pour une même longueur de recouvrement et une même charge, la contrainte maximale diminue lorsque l'épaisseur de l'adhésif augmente.

- À 12,5 mm de recouvrement et 20 MPa de charge, la contrainte passe d'environ 11,5 MPa (0,2 mm) à 10,5 MPa (0,5 mm)

- Plus la contrainte maximale de cisaillement enregistrée est élevée, plus le risque de délaminage ou de décollement de la zone collée augmente.

- Les valeurs maximales observées (jusqu'à 11,5 MPa pour une faible longueur de recouvrement et une faible épaisseur d'adhésif) indiquent que l'assemblage approche la limite de résistance de l'adhésif : si la charge appliquée augmente encore, le risque de rupture devient critique.

- Les configurations avec recouvrement court et faible épaisseur d'adhésif sont donc les plus exposées à la rupture locale, surtout sous forte sollicitation.

- Effet de la longueur de recouvrement : Pour une charge donnée, la contrainte maximale est toujours plus élevée pour la plus petite longueur de recouvrement (12,5 mm, courbe noire), puis décroît pour les longueurs moyennes (33,75 mm, courbe rouge) et longues (42,5 mm, courbe verte).

- Effet de l'épaisseur de l'adhésif : À charge et longueur de recouvrement identiques, la contrainte maximale de cisaillement diminue légèrement lorsque l'épaisseur de l'adhésif augmente (la courbe noire de la Fig 1 est au-dessus de celle de la Fig 2, elle-même au-dessus de la Fig 3).

- Longueur de recouvrement : Plus la longueur de recouvrement est grande, plus la contrainte de cisaillement maximale diminue, car la charge est répartie sur une surface plus importante.

- Épaisseur de l'adhésif : Un joint plus épais répartit mieux les contraintes, mais la résistance locale au cisaillement diminue légèrement, car la zone d'adhésion devient plus souple.

- Pour une même charge appliquée, une faible longueur de recouvrement et une faible épaisseur d'adhésif conduisent à des contraintes de cisaillement maximales plus élevées, ce qui augmente le risque de rupture locale de l'assemblage.
- Pour améliorer la durabilité de l'assemblage, il est préférable d'augmenter la longueur de recouvrement et d'éviter une épaisseur d'adhésif trop faible, afin de mieux répartir les efforts et de limiter les concentrations de contraintes.

Ces résultats traduisent l'importance du dimensionnement géométrique dans la conception des assemblages collés pour optimiser la résistance et la fiabilité.

- Pour garantir la durabilité de l'assemblage, il est essentiel de surveiller la contrainte maximale de cisaillement : dépasser 10–12 MPa dans ces configurations augmente fortement le risque de décollement ou de délaminage.
- L'optimisation doit privilégier une longueur de recouvrement suffisante et une épaisseur d'adhésif adaptée, afin d'éviter de solliciter les assemblages au-delà de ces valeurs limites.

Résumé :

Les figures confirment qu'une contrainte maximale de cisaillement élevée (proche ou supérieure à 11–12 MPa selon la configuration) est synonyme de risque élevé de décollement ou de délaminage de la zone collée, et doit être strictement contrôlée lors de la conception et de l'utilisation des assemblages.

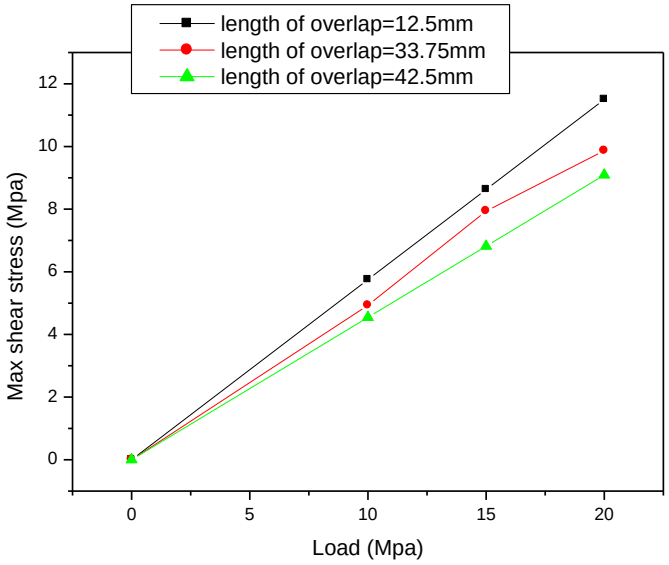


Figure 4.1 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm

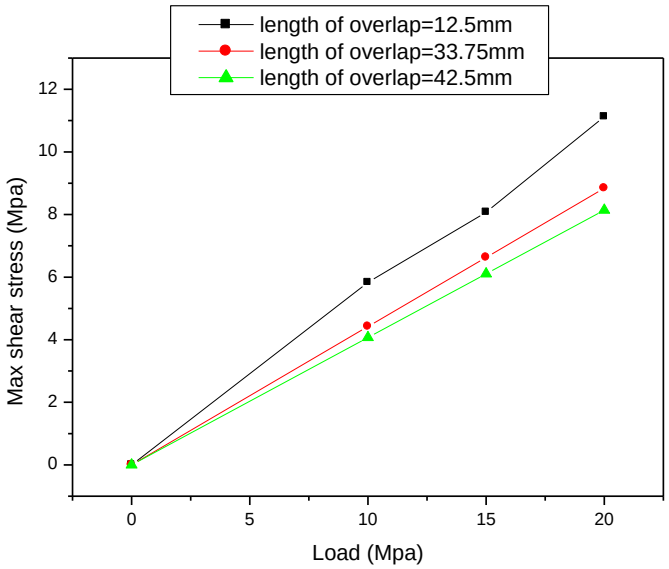


Figure 4.2 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm

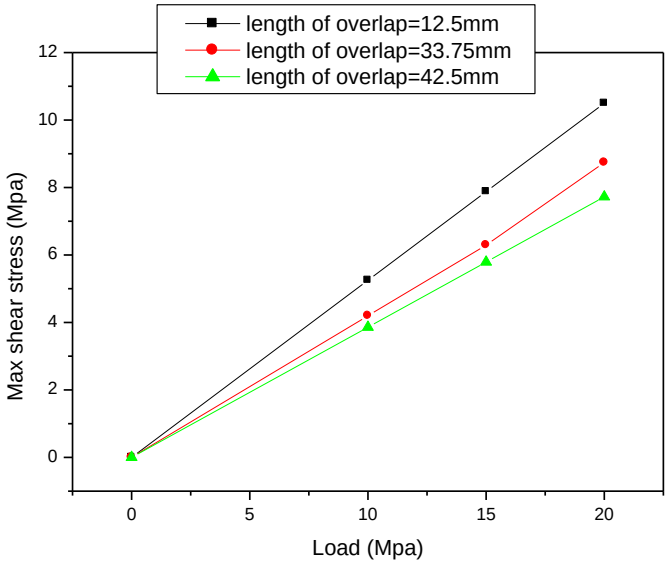


Figure 4.3 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm

Les trois figures montrent l'influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge appliquée, pour trois épaisseurs d'adhésif différentes :
- Fig 4 : épaisseur de l'adhésif = 0,2 mm - Fig 5 : épaisseur de l'adhésif = 0,35 mm - Fig 6 : épaisseur de l'adhésif = 0,5 mm

Chaque figure compare trois longueurs de recouvrement : 12,5 mm (carré noir), 33,75 mm (cercle rouge), 42,5 mm (triangle vert).

- Relation charge/contrainte : Dans tous les cas, la contrainte de pelage maximale augmente de façon linéaire avec la charge appliquée.
- Effet de la longueur de recouvrement : Pour une charge donnée, la contrainte de pelage maximale est toujours plus élevée pour la plus petite longueur de recouvrement (12,5 mm), puis diminue pour les longueurs moyennes (33,75 mm) et longues (42,5 mm).
- Effet de l'épaisseur de l'adhésif : Pour une même longueur de recouvrement et une même charge, la contrainte de pelage maximale diminue lorsque l'épaisseur de l'adhésif augmente : - À 0,2 mm (Fig 4), la contrainte maximale est la plus élevée.- À 0,35 mm (Fig 5), elle est intermédiaire.- À 0,5 mm (Fig 6), elle est la plus faible.

- Évolution linéaire : Dans chaque figure, la contrainte de pelage maximale augmente de façon linéaire avec la charge appliquée, quelle que soit la configuration.
- Effet de la longueur de recouvrement :
- Pour une charge donnée, la contrainte maximale de pelage est toujours la plus élevée pour la plus petite longueur de recouvrement (12,5 mm), intermédiaire pour 33,75 mm, et la plus faible pour 42,5 mm.
- À charge maximale (20 MPa) :
- Fig 4 (0,2 mm) : environ 22 MPa (12,5 mm), 19 MPa (33,75 mm), 17 MPa (42,5 mm).
- Fig 5 (0,35 mm) : environ 18 MPa (12,5 mm), 16 MPa (33,75 mm), 14 MPa (42,5 mm).
- Fig 6 (0,5 mm) : environ 16 MPa (12,5 mm), 13 MPa (33,75 mm), 12 MPa (42,5 mm).
- Effet de l'épaisseur de l'adhésif :
- Pour une même longueur de recouvrement et une même charge, la contrainte maximale de pelage diminue quand l'épaisseur de l'adhésif augmente.
- Exemple à 12,5 mm de recouvrement et 20 MPa de charge :
- 22 MPa (0,2 mm), 18 MPa (0,35 mm), 16 MPa (0,5 mm).

- Plus la contrainte maximale de pelage enregistrée est élevée, plus le risque de décollement ou de délaminage de la zone collée augmente.
- Les valeurs maximales observées (jusqu'à 22 MPa pour une faible longueur de recouvrement et une faible épaisseur d'adhésif) indiquent que l'assemblage approche la limite de résistance au pelage de l'adhésif : si la charge appliquée augmente encore, le risque de rupture devient critique.
- Les configurations avec recouvrement court et faible épaisseur d'adhésif sont donc les plus exposées à la rupture locale, surtout sous forte sollicitation.

- Longueur de recouvrement : Une longueur de recouvrement plus grande permet de mieux répartir les efforts de pelage sur une surface plus importante, ce qui réduit la contrainte maximale localisée.
- Épaisseur de l'adhésif : Un adhésif plus épais répartit mieux les contraintes, mais la résistance locale au pelage diminue légèrement, car le joint devient plus souple.

- Pour une même charge, une faible longueur de recouvrement et une faible épaisseur d'adhésif conduisent à des contraintes de pelage maximales plus élevées, ce qui augmente le risque de rupture locale.
- Pour améliorer la durabilité de l'assemblage, il est préférable d'augmenter la longueur de recouvrement et d'éviter une épaisseur d'adhésif trop faible, afin de limiter les concentrations de contraintes et le risque de défaillance.

Ces résultats confirment l'importance du dimensionnement géométrique pour optimiser la résistance au pelage des assemblages collés.

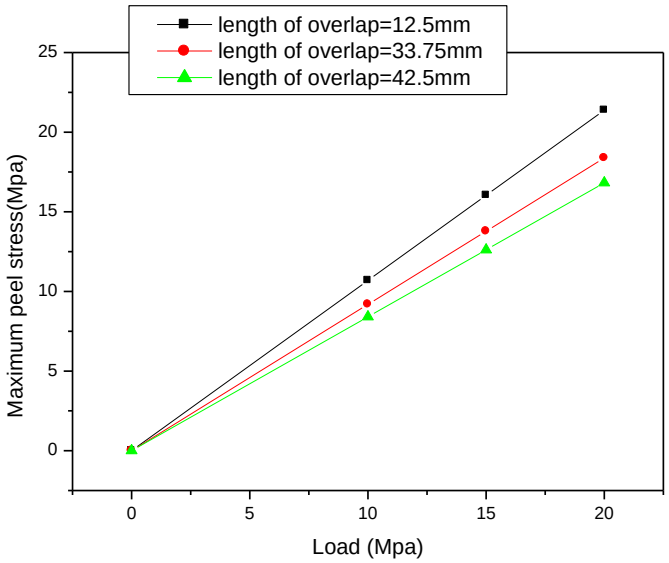


Figure 4.4 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm

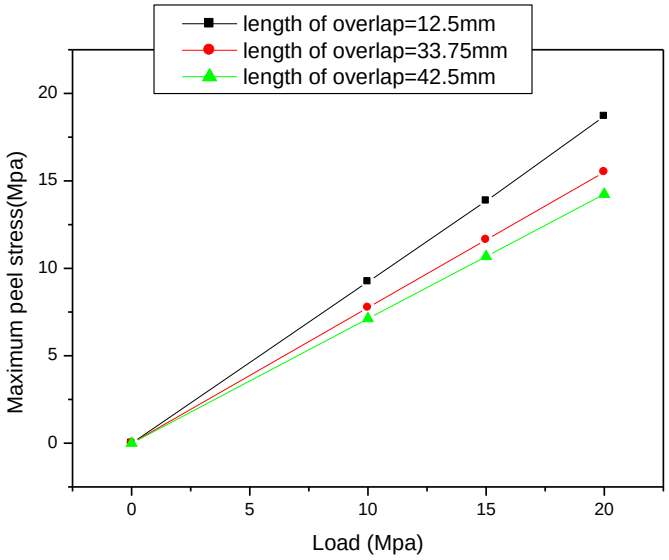


Figure 4.5 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm

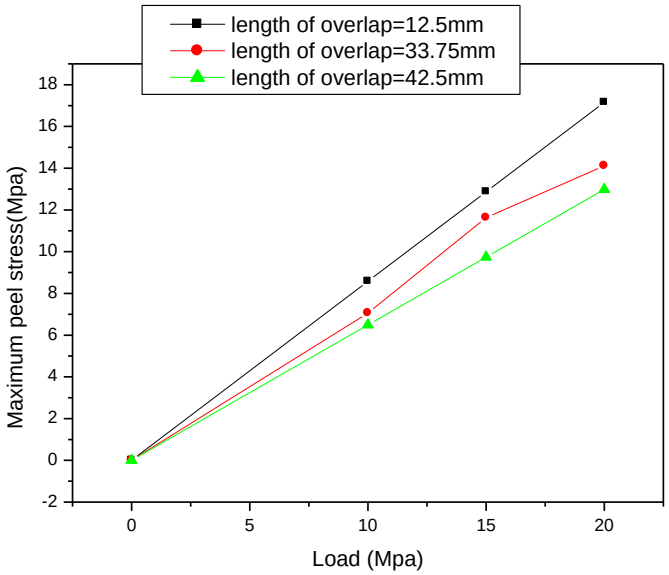


Figure 4.6 Influence de la longueur de recouvrement sur la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm

4.1.2 Analyse des contraintes de cisaillement d'un collage à simple joint du recouvrement avec biseautage extérieur :

Les figures 7 à 15 montrent la variation de la contrainte maximale de cisaillement dans la zone collée en fonction de la charge appliquée, pour différentes épaisseurs d'adhésif (0,2 mm, 0,35 mm, 0,5

mm), différentes longueurs de biseautage extérieur (a = 3, 6, 9 mm) et différents talons de substrat (0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm).

- Relation charge/contrainte : Dans toutes les figures, la contrainte maximale de cisaillement augmente de façon linéaire avec la charge appliquée.
- Effet du talon de substrat : Pour une charge donnée, la contrainte maximale de cisaillement est plus élevée pour un talon de substrat plus épais (courbe verte pour 1,5 mm > courbe rouge pour 1 mm > courbe noire pour 0,5 mm).
- Effet de l'épaisseur de l'adhésif : À biseautage et talon constants, plus l'épaisseur de l'adhésif augmente, plus la contrainte maximale de cisaillement diminue légèrement.
- Effet de la longueur du biseautage extérieur : Pour une même configuration, une longueur de biseautage plus grande (a = 9 mm) permet d'atteindre une contrainte maximale de cisaillement légèrement supérieure pour une charge donnée.

- Évolution linéaire : Dans toutes les figures, la contrainte maximale de cisaillement augmente de façon quasi linéaire avec la charge appliquée, ce qui reflète un comportement mécanique stable jusqu'à la rupture.
- Effet du talon de substrat : Pour chaque configuration, la contrainte maximale est toujours la plus élevée pour le talon de 1,5 mm (triangle vert), intermédiaire pour 1 mm (cercle rouge), et la plus faible pour 0,5 mm (carré noir).
- Par exemple, pour une charge de 20 MPa :
- Avec 0,2 mm d'adhésif et a = 9 mm (Fig 13), la contrainte maximale atteint environ 18,5 MPa (1,5 mm), 17 MPa (1 mm), 16 MPa (0,5 mm).
- Avec 0,5 mm d'adhésif et a = 9 mm (Fig 15), la contrainte maximale est d'environ 17 MPa (1,5 mm), 15,5 MPa (1 mm), 14,5 MPa (0,5 mm).
- Effet de l'épaisseur de l'adhésif : Pour une même charge et une même géométrie, la contrainte maximale est plus élevée lorsque l'épaisseur de l'adhésif est faible (par exemple, ~18,5 MPa pour 0,2 mm contre ~17 MPa pour 0,5 mm à charge maximale, voir Fig 13 et Fig 15).
- Effet de la longueur du biseautage extérieur : À épaisseur d'adhésif et talon constants, la contrainte maximale est légèrement plus élevée pour un biseautage extérieur plus long (a = 9 mm, Fig 13 à Fig 15) que pour a = 3 mm (Fig 7 à Fig 9).

- Plus la contrainte maximale de cisaillement enregistrée est élevée, plus le risque de délaminage ou de décollement de la zone collée augmente.
- Les valeurs maximales observées (jusqu'à 18,5 MPa pour d = 1,5 mm et faible épaisseur d'adhésif) indiquent que l'assemblage approche la limite de résistance de l'adhésif : si la charge appliquée augmente encore, le risque de rupture devient critique.
- Les configurations avec talon épais et faible épaisseur d'adhésif sont donc les plus exposées à la rupture locale, surtout sous forte sollicitation.

Explication mécanique

- Contrainte de cisaillement : Cette contrainte correspond à la force qui tend à faire glisser les deux substrats l'un par rapport à l'autre, parallèlement au plan de collage.
- Risque de délaminage : Lorsque la contrainte de cisaillement locale dépasse la résistance de l'adhésif, cela provoque l'initiation puis la propagation d'une fissure dans le joint, menant au délaminage ou au décollement de la zone collée.
- Influence des paramètres : Un talon de substrat plus épais limite la déformation locale et permet de supporter une contrainte plus élevée, mais augmente aussi le risque de décollement si la contrainte maximale dépasse la résistance de l'adhésif. Une épaisseur d'adhésif plus importante répartit mieux les contraintes et limite les pics locaux, réduisant ainsi le risque de rupture prématurée.

- Plus la contrainte de cisaillement maximale enregistrée est élevée, plus le risque de délaminage ou de décollement de la zone collée augmente.
- Il est donc crucial de surveiller cette contrainte lors de la conception et de l'analyse des assemblages collés, afin de garantir leur durabilité et d'éviter une rupture prématurée.
- L'optimisation géométrique (talon, épaisseur d'adhésif, longueur de biseautage) permet de mieux maîtriser la distribution des contraintes et de limiter le risque de défaillance.

- Pour garantir la durabilité de l'assemblage, il est essentiel de surveiller la contrainte maximale de cisaillement : dépasser 16–18,5 MPa dans ces configurations augmente fortement le risque de décollement ou de délaminage.
- L'optimisation doit privilégier une épaisseur d'adhésif adaptée et éviter de solliciter les assemblages au-delà de ces valeurs limites, surtout pour les talons de substrat épais et les grandes longueurs de biseautage.

En résumé, la maîtrise de la contrainte de cisaillement maximale est essentielle pour prévenir le délaminage et garantir la fiabilité des assemblages collés.

Les figures confirment qu'une contrainte maximale de cisaillement élevée (proche ou supérieure à 18 MPa selon la configuration) est synonyme de risque élevé de décollement ou de délaminage de la zone collée, et doit être strictement contrôlée lors de la conception et de l'utilisation des assemblages.

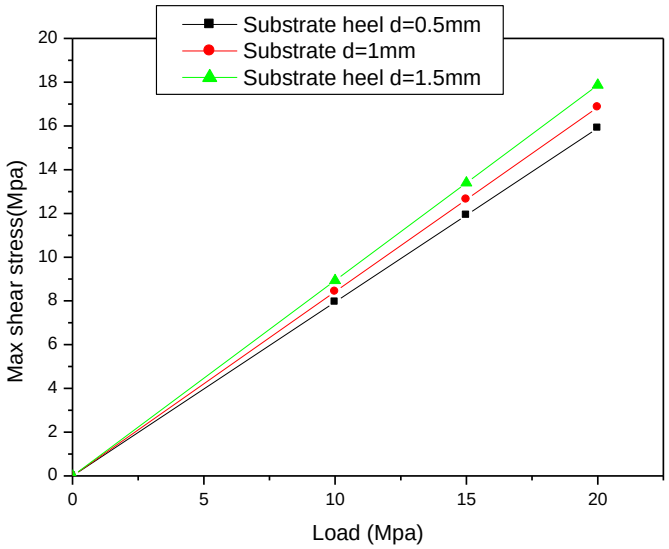


Figure 4.7 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=3 longueur du biseautage extérieur

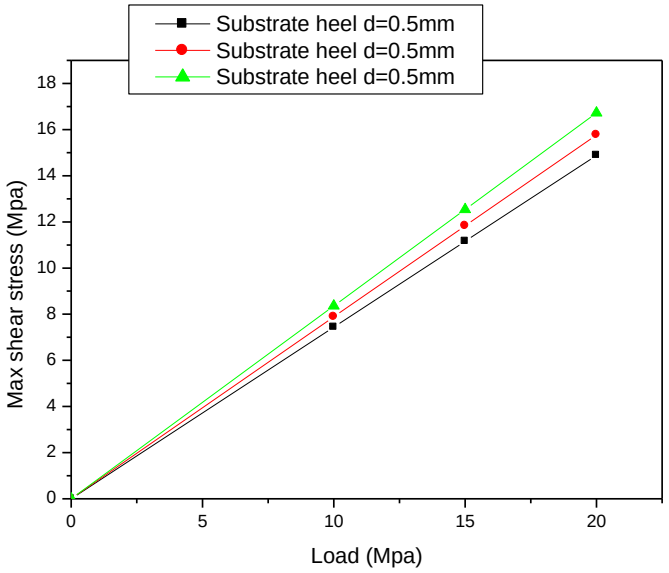


Figure4.8 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=3 longueur du biseautage extérieur

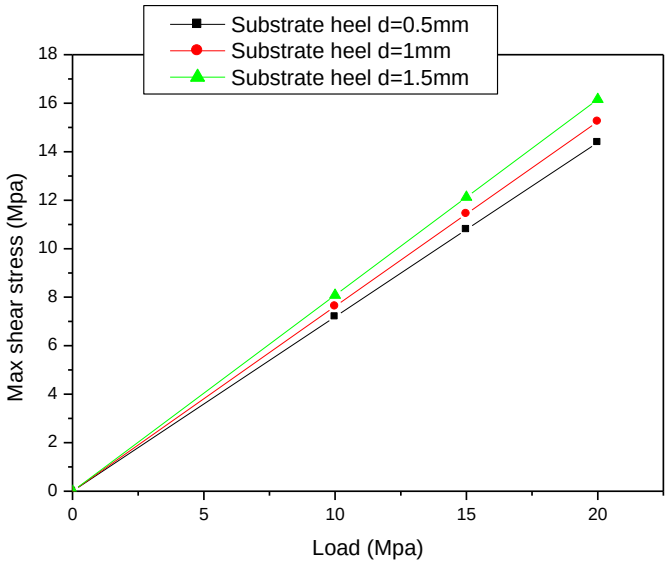


Figure 4.9 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=3 longueur du biseautage extérieur

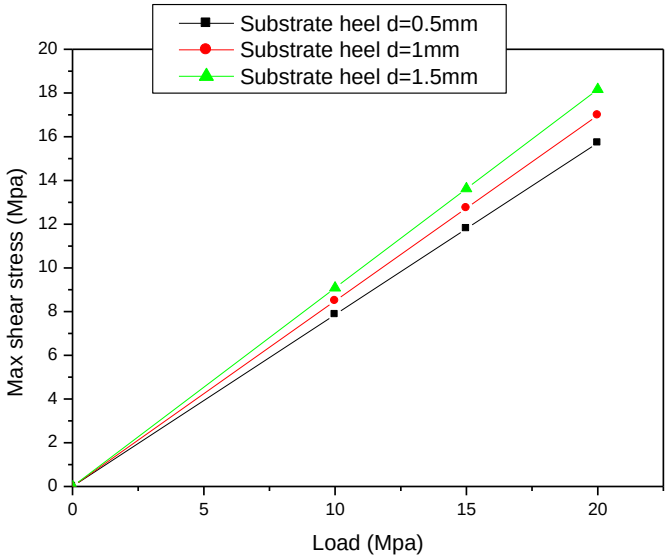


Figure 4.10 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=6 longueur du biseautage extérieur

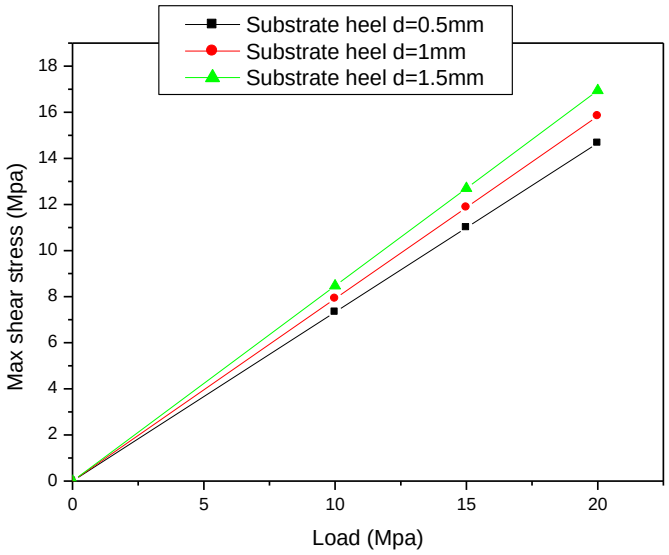


Figure 4.11 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=6 longueur du biseautage extérieur

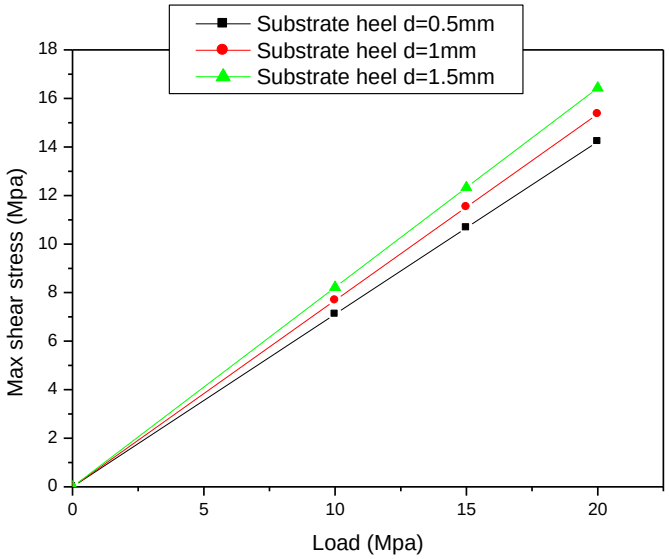


Figure 4.12 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=6 longueur du biseautage extérieur

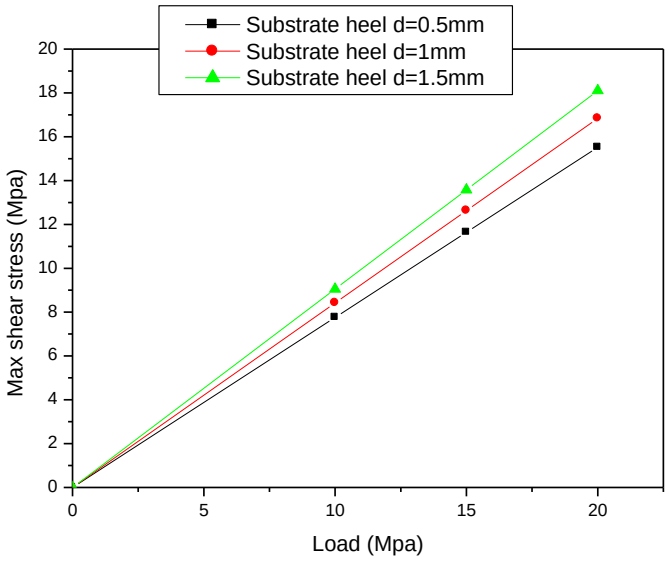


Figure 4.13 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=9 longueur du biseautage extérieur

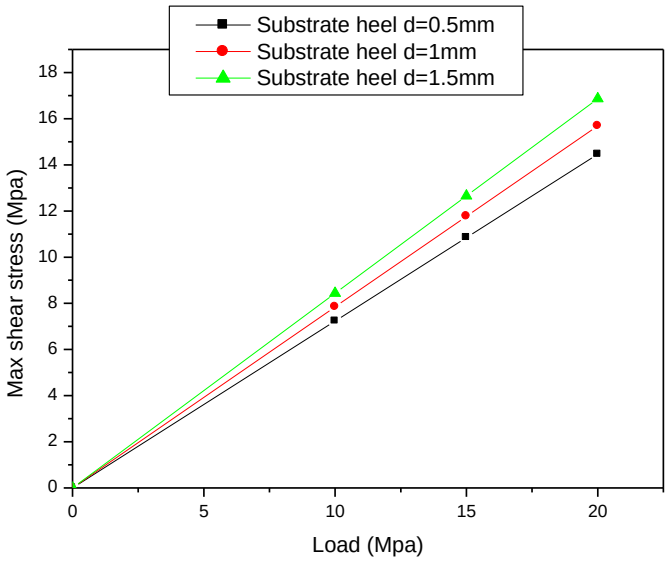


Figure 4.14 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=9 longueur du biseautage extérieur

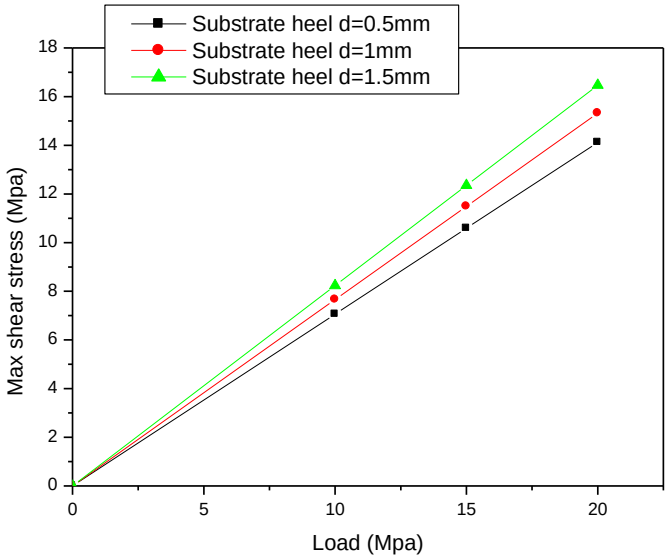


Figure 4.15 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=9 longueur du biseautage extérieur

Les figures 16 à 24 montrent la variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge appliquée, pour différentes épaisseurs d'adhésif et de talon de substrat, avec biseautage extérieur. On observe que :

- La contrainte de pelage maximale augmente de façon linéaire avec la charge appliquée, quel que soit le cas étudié.
- Pour une charge donnée, plus le talon de substrat est épais (1,5 mm), plus la contrainte de pelage maximale est élevée (courbe verte), suivie du talon de 1 mm (rouge), puis de 0,5 mm (noir).
- À épaisseur de talon et longueur de biseautage constantes, la contrainte maximale de pelage est plus élevée pour une épaisseur d'adhésif plus faible (0,2 mm), et diminue lorsque l'épaisseur d'adhésif augmente (jusqu'à 0,5 mm).

Risque de décollement de l'adhésif

La contrainte de pelage est un paramètre critique dans la durabilité des assemblages collés :
- Plus la contrainte de pelage maximale enregistrée est élevée, plus le risque de décollement ou de délaminage de la zone collée augmente.
- Lorsque la contrainte de pelage dépasse la résistance intrinsèque de l'adhésif ou l'adhésion au substrat, le front de pelage se propage, provoquant la rupture locale puis l'arrachement progressif de la colle.
- Les zones de concentration de contraintes (souvent aux extrémités du joint) sont les premières à présenter ce type de défaillance.

- Évolution linéaire : Dans toutes les figures, la contrainte de pelage maximale augmente linéairement avec la charge appliquée, ce qui traduit un comportement mécanique prévisible jusqu'à

la rupture.

- Effet du talon de substrat : Pour chaque configuration, la contrainte maximale est toujours la plus élevée pour le talon de 1,5 mm (triangle vert), intermédiaire pour 1 mm (cercle rouge), et la plus faible pour 0,5 mm (carré noir).
- Par exemple, à une charge de 20 MPa :
- Avec 0,2 mm d'adhésif et a = 9 mm (Fig 22), la contrainte maximale atteint environ 23 MPa (1,5 mm), 21 MPa (1 mm), 20 MPa (0,5 mm).
- Avec 0,5 mm d'adhésif et a = 9 mm (Fig 24), la contrainte maximale est d'environ 19 MPa (1,5 mm), 18 MPa (1 mm), 17 MPa (0,5 mm).
- Effet de l'épaisseur de l'adhésif : Pour une même charge et une même géométrie, la contrainte maximale est plus élevée lorsque l'épaisseur de l'adhésif est faible (par exemple, ~23 MPa pour 0,2 mm contre ~19 MPa pour 0,5 mm à charge maximale, voir Fig 22 et Fig 24).
- Effet de la longueur du biseautage extérieur : À épaisseur d'adhésif et talon constants, la contrainte maximale est légèrement plus élevée pour un biseautage extérieur plus long (a = 9 mm, Fig 22 à Fig 24) que pour a = 3 mm (Fig 16 à Fig 18).

- Plus la contrainte maximale de pelage enregistrée est élevée, plus le risque de décollement ou de délaminage de la zone collée augmente.
- Les valeurs maximales observées (jusqu'à 23 MPa pour d = 1,5 mm et faible épaisseur d'adhésif) indiquent que l'assemblage approche la limite de résistance au pelage de l'adhésif : si la charge appliquée augmente encore, le risque de rupture devient critique.
- Les configurations avec talon épais et faible épaisseur d'adhésif sont donc les plus exposées à la rupture locale, surtout sous forte sollicitation.

Explication mécanique

- Le pelage sollicite fortement l'interface adhésif/substrat : il tend à décoller l'adhésif perpendiculairement au plan de collage, ce qui est le mode de rupture le plus critique pour la plupart des colles.
- Lorsque la contrainte de pelage atteint la limite de l'adhésif, cela amorce la formation de fissures ou de fibrilles à l'interface, qui s'étendent jusqu'à la rupture complète du joint.

- Plus la contrainte de pelage maximale enregistrée est élevée, plus le risque de décollement de l'adhésif est important.
- Il est donc crucial de maîtriser ce paramètre lors de la conception et de l'analyse des assemblages collés, notamment en choisissant une épaisseur d'adhésif et un talon de substrat adaptés, et en limitant les charges de pelage en service.
- L'optimisation géométrique et le contrôle des sollicitations de pelage sont essentiels pour garantir la durabilité et la sécurité des assemblages collés.

- Pour garantir la durabilité de l'assemblage, il est essentiel de surveiller la contrainte maximale de pelage : dépasser 19–23 MPa dans ces configurations augmente fortement le risque de décollement ou de délaminage.

- L'optimisation doit privilégier une épaisseur d'adhésif adaptée et éviter de solliciter les assemblages au-delà de ces valeurs limites, surtout pour les talons de substrat épais et les grandes longueurs de biseautage.

Les figures confirment qu'une contrainte maximale de pelage élevée (proche ou supérieure à 23 MPa selon la configuration) est synonyme de risque élevé de décollement ou de délaminage de la zone collée, et doit être strictement contrôlée lors de la conception et de l'utilisation des assemblages.

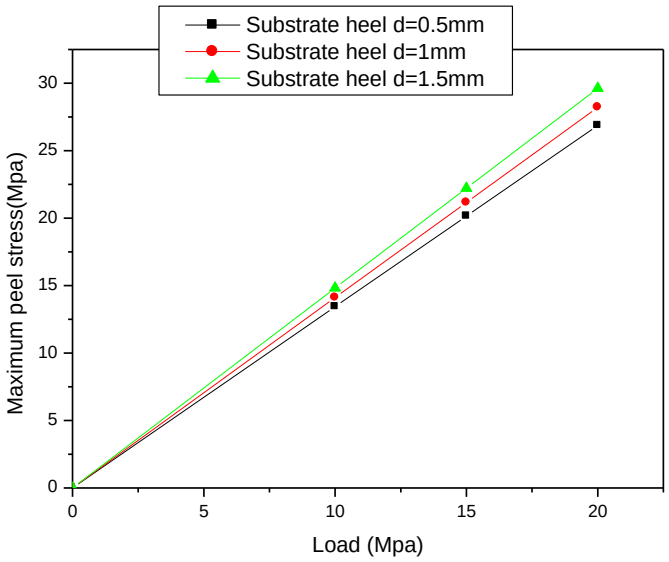


Figure 4.16 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=3 longueur du biseautage extérieur

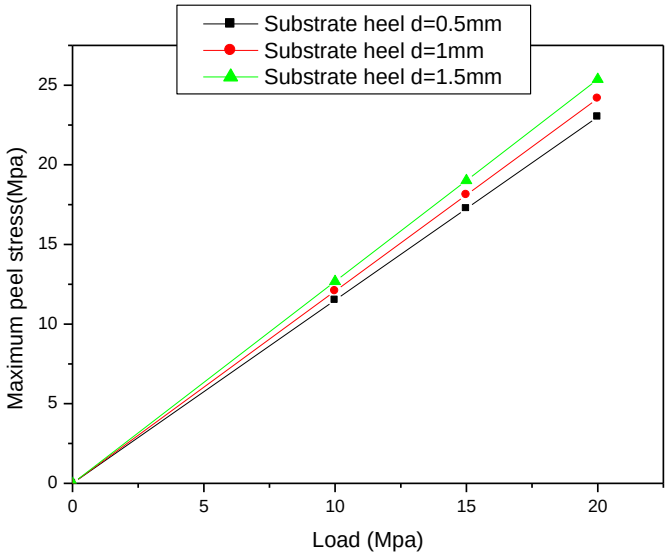


Figure 4.17 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=3 longueur du biseautage extérieur

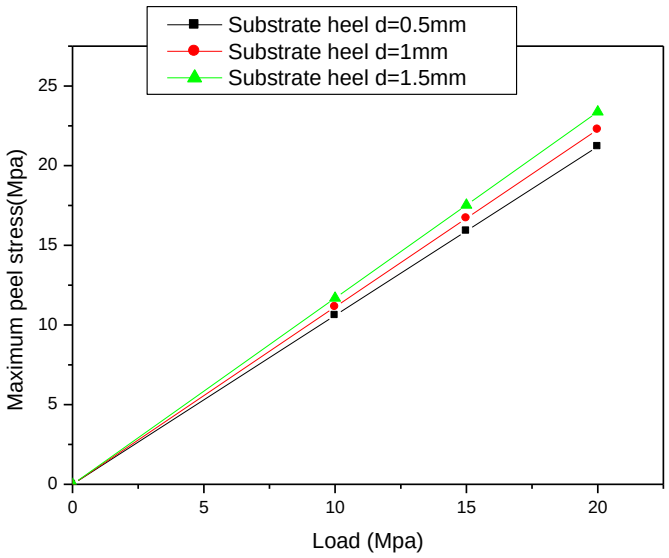


Figure4.18 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=3 longueur du biseautage extérieur

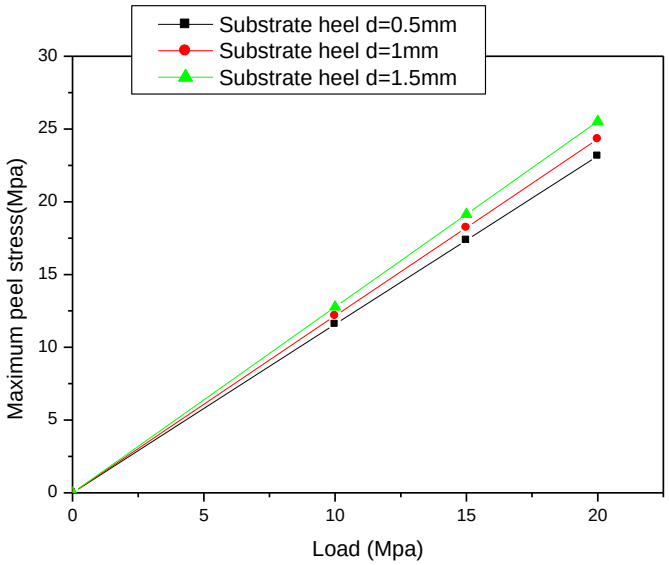


Figure4.19 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=6 longueur du biseautage extérieur

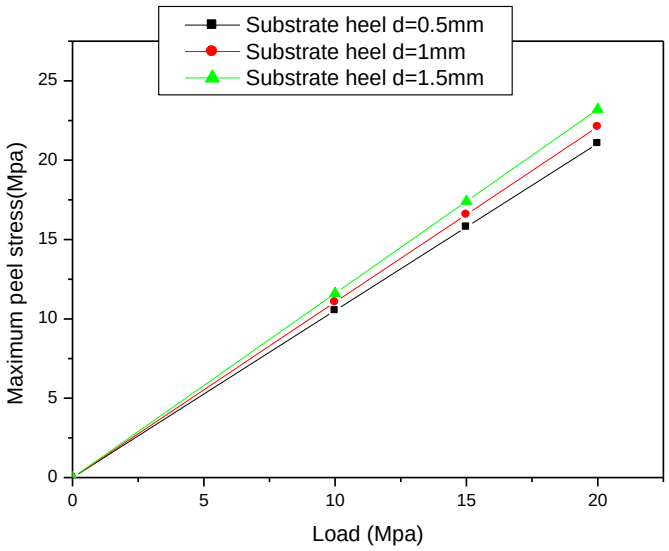


Figure 4.20 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=6 longueur du biseautage extérieur

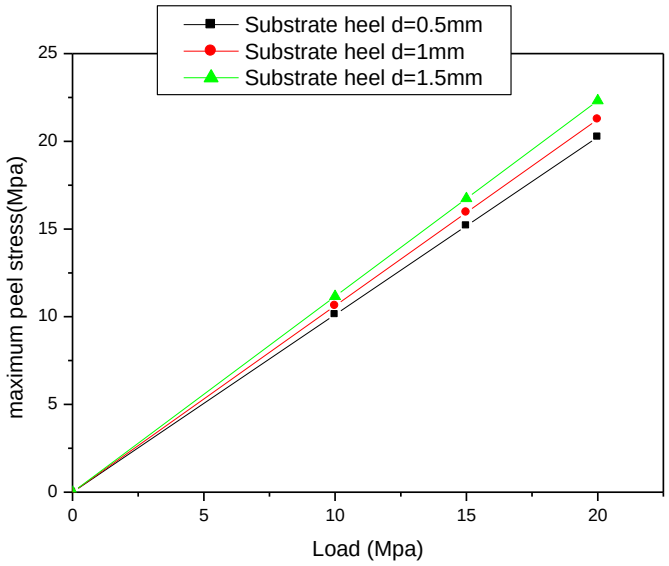


Figure 4.21 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=6 longueur du biseautage extérieur

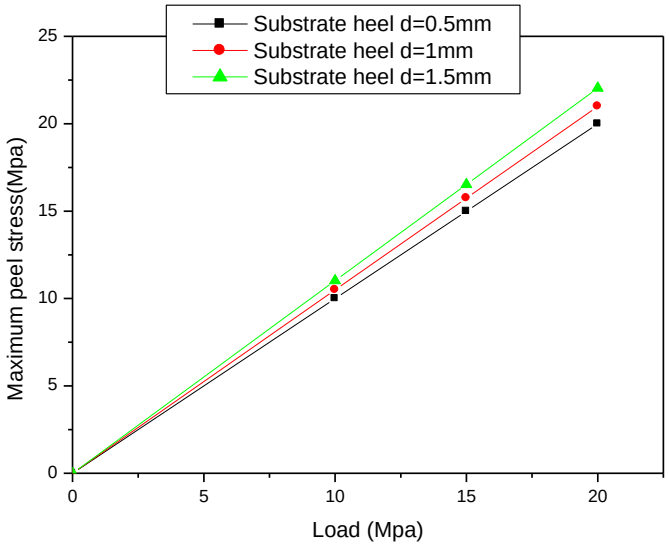


Figure 4.22 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=9 longueur du biseautage extérieur

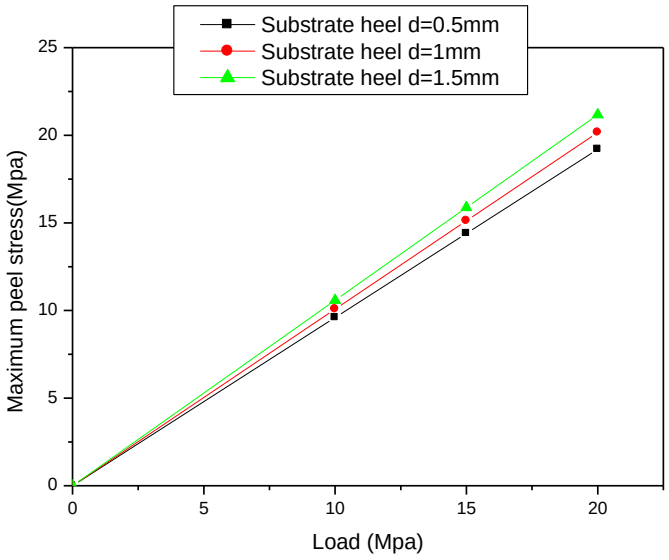


Figure 4.23 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=9 longueur du biseautage extérieur

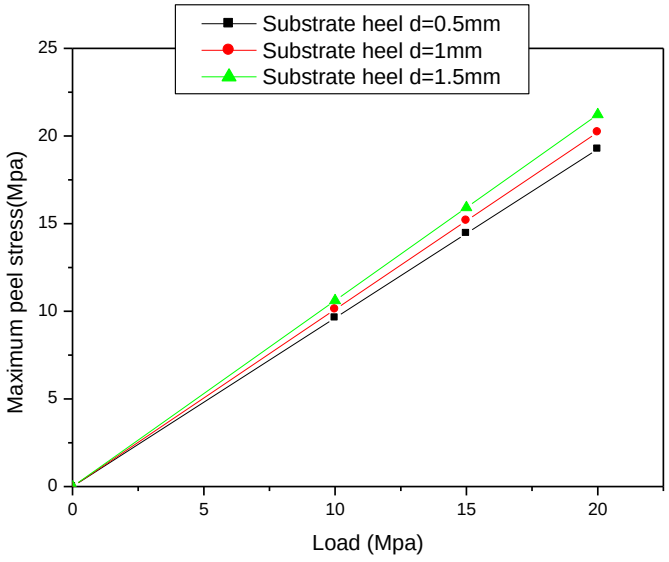


Figure 4.24 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=9 longueur du biseautage extérieur

4.1.3 Analyse des contraintes de cisaillement d'un collage à simple joint du recouvrement avec biseautage intérieur :

Les figures 25 à 33 montrent la variation de la contrainte maximale de cisaillement dans la zone collée en fonction de la charge appliquée, pour différentes épaisseurs d'adhésif (0,2 mm, 0,35 mm, 0,5 mm), différentes longueurs de biseautage intérieur (a = 3, 6, 9 mm) et différents talons de substrat (0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm).

4.1.3.1 Tendances observées

Relation charge/contrainte : Dans toutes les figures, la contrainte maximale de cisaillement augmente de façon linéaire avec la charge appliquée, confirmant que plus la charge augmente, plus le risque de délaminage ne s'accroît.

Effet du talon de substrat : Pour une charge donnée, la contrainte maximale de cisaillement est plus élevée pour un talon de substrat plus épais (courbe verte pour 1,5 mm > courbe rouge pour 1 mm > courbe noire pour 0,5 mm).

Effet de l'épaisseur de l'adhésif : À biseautage et talon constants, plus l'épaisseur de l'adhésif augmente, plus la contrainte maximale de cisaillement diminue légèrement (par exemple, Fig 25 à 0,2 mm montre des contraintes plus élevées que Fig 27 à 0,5 mm).

Effet de la longueur du biseautage intérieur : Pour une même configuration, une longueur de biseautage plus grande (a = 9 mm) permet d'atteindre une contrainte maximale de cisaillement légèrement supérieure pour une charge donnée.

Explication mécanique selon les recommandations

- **Contrainte de cisaillement critique :** Cette contrainte correspond à la force qui tend à faire glisser les deux substrats l'un par rapport à l'autre, parallèlement au plan de collage. Plus cette contrainte maximale est élevée, plus le risque de délaminage ou de décollement de la zone collée augmente.
- **Risque de délaminage :** Lorsque la contrainte de cisaillement locale dépasse la résistance de l'adhésif, cela provoque l'initiation puis la propagation d'une fissure dans le joint, menant au délaminage ou au décollement de la zone collée.
- **Influence des paramètres géométriques :** Un talon de substrat plus épais limite la déformation locale mais augmente aussi le risque de décollement si la contrainte maximale dépasse la résistance de l'adhésif. Une épaisseur d'adhésif plus importante répartit mieux les contraintes et limite les pics locaux, réduisant ainsi le risque de rupture prématurée.

Application des recommandations

Surveillance critique : Il est crucial de surveiller cette contrainte lors de la conception et de l'analyse des assemblages collés, afin de garantir leur durabilité et d'éviter une rupture prématurée.

- **Évolution linéaire :** Dans toutes les figures, la contrainte maximale de cisaillement augmente linéairement avec la charge appliquée, indiquant un comportement mécanique prévisible jusqu'à la rupture.
- Effet du talon de substrat : Pour chaque configuration, la contrainte maximale est toujours la plus élevée pour le talon de 1,5 mm (triangle vert), intermédiaire pour 1 mm (cercle rouge), et la plus faible pour 0,5 mm (carré noir).

- **Par exemple**, pour une charge de 20 MPa :
- Avec une épaisseur d'adhésif de 0,2 mm et a = 9 mm (Fig. 31), la contrainte maximale atteint environ 19 MPa (1,5 mm), 17,5 MPa (1 mm), 16 MPa (0,5 mm).
- Avec une épaisseur d'adhésif de 0,5 mm et a = 9 mm (Fig. 33), la contrainte maximale est d'environ 18 MPa (1,5 mm), 16,5 MPA (1 mm), 15 MPA (0,5 mm).
- **Effet de l'épaisseur de l'adhésif :** Pour une même charge et une même géométrie, la contrainte maximale est plus élevée lorsque l'épaisseur de l'adhésif est faible (par exemple, ~19 MPa pour 0,2 mm contre ~18 MPa pour 0,5 mm à charge maximale, voir Fig 31 et Fig 33).
- **Effet de la longueur du biseautage intérieur :** À épaisseur d'adhésif et talon constants, la contrainte maximale est légèrement plus élevée pour un biseautage intérieur plus long (a = 9 mm, Fig 31 à Fig 33) que pour a = 3 mm (Fig 25 à Fig 27).

Interprétation des risques selon les valeurs

- Plus la contrainte maximale de cisaillement enregistrée est élevée, plus le risque de délaminage ou de décollement de la zone collée augmente.
- Les valeurs maximales observées (jusqu'à 19 MPa pour d = 1,5 mm et faible épaisseur d'adhésif) indiquent que l'assemblage approche la limite de résistance de l'adhésif : si la charge appliquée augmente encore, le risque de rupture devient critique.
- Les configurations avec talon épais et faible épaisseur d'adhésif sont donc les plus exposées à la rupture locale, surtout sous forte sollicitation.

Si la contrainte atteint la limite de résistance de l'adhésif, le risque de rupture ou de délaminage devient important, comme le montrent clairement les figures où les contraintes maximales peuvent atteindre 18-19 MPa pour les configurations les plus sollicitées.

Optimisation géométrique : Le choix du talon, de l'épaisseur d'adhésif et de la longueur de biseautage intérieur permet de mieux maîtriser la distribution des contraintes et de limiter le risque de défaillance.
Plus la contrainte de cisaillement maximale enregistrée est élevée, plus le risque de délaminage ou de décollement de la zone collée augmente. Les figures 25 à 33 confirment cette règle fondamentale : l'augmentation linéaire de la contrainte avec la charge impose une surveillance rigoureuse pour éviter de dépasser la résistance limite de l'adhésif et garantir la fiabilité des assemblages collés.

- Pour garantir la durabilité de l'assemblage, il est essentiel de surveiller la contrainte maximale de cisaillement : dépasser 16–19 MPa dans ces configurations augmente fortement le risque de décollement ou de délaminage.
- L'optimisation doit privilégier une épaisseur d'adhésif adaptée et éviter de solliciter les assemblages au-delà de ces valeurs limites, surtout pour les talons de substrat épais et les grandes longueurs de biseautage.

En résumé, la maîtrise de la contrainte de cisaillement maximale est essentielle pour prévenir le délaminage et garantir la fiabilité des assemblages collés.

Les figures confirment qu'une contrainte maximale de cisaillement élevée (proche ou supérieure à 19 MPa selon la configuration) est synonyme de risque élevé de décollement ou de délaminage de la zone collée, et doit être strictement contrôlée lors de la conception et de l'utilisation des assemblages.

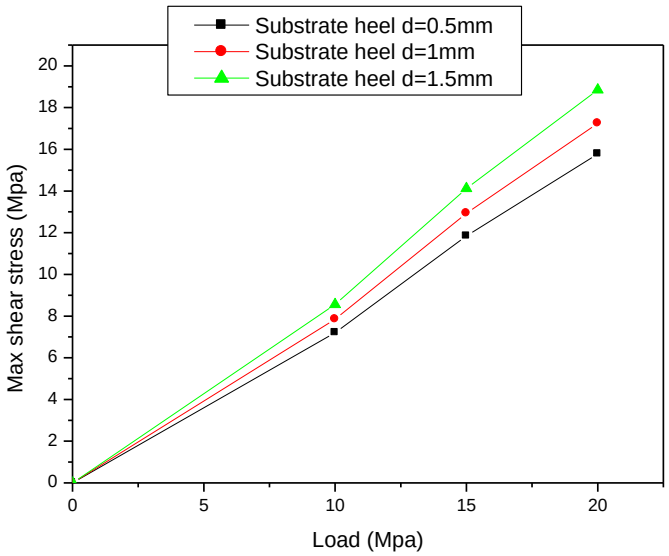


Figure 4.25 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=3 longueur du biseautage intérieur

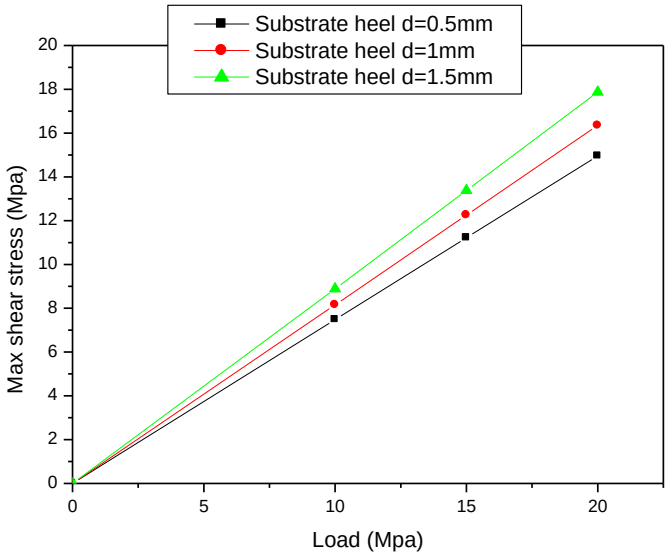


Figure 4.26 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=3 longueur du biseautage intérieur

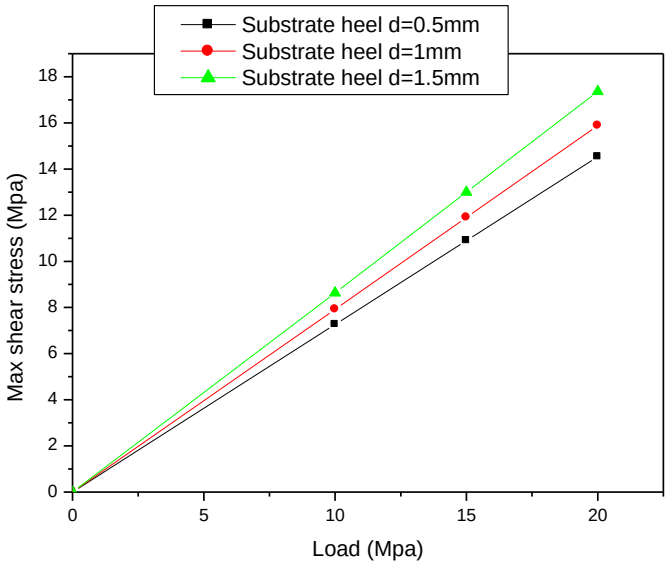


Figure 4.27 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=3 longueur du biseautage intérieur

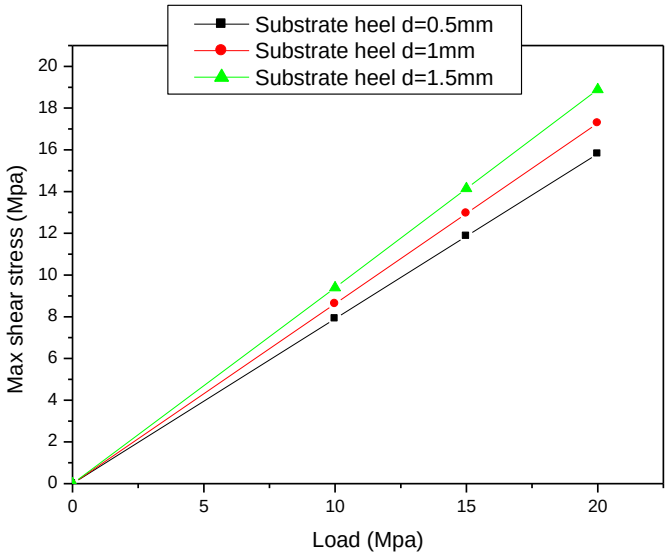


Figure 4.28 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=6 longueur du biseautage intérieur

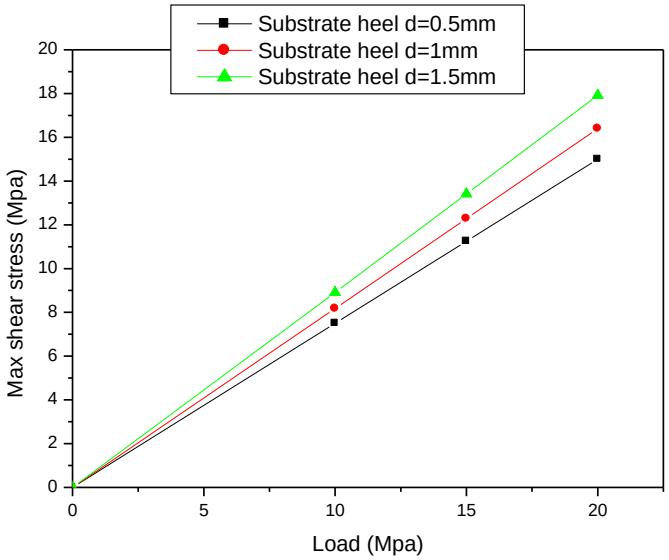


Figure 4.29 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=6 longueur du biseautage intérieur

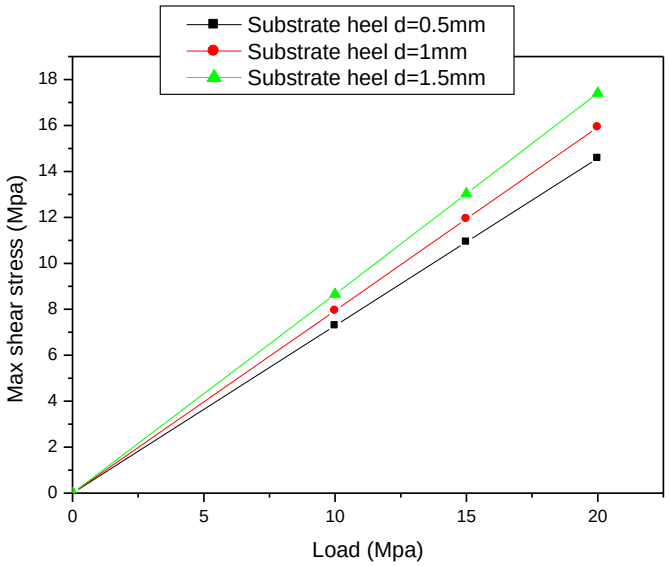


Figure 4.30 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=6 longueur du biseautage intérieur

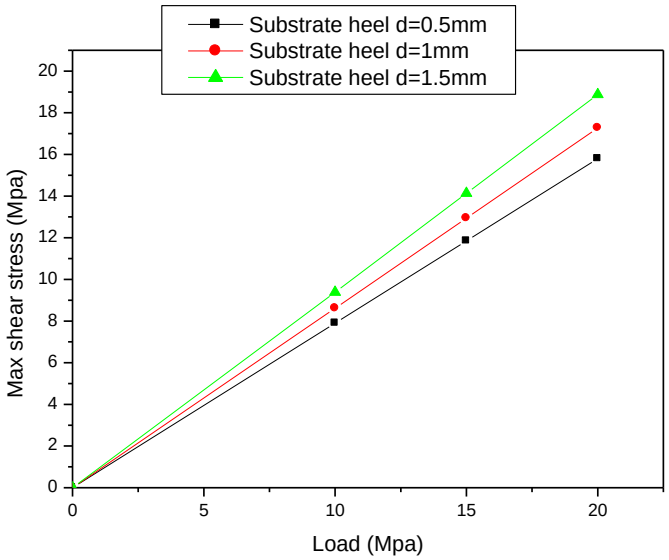


Figure 4.31 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=9 longueur du biseautage intérieur

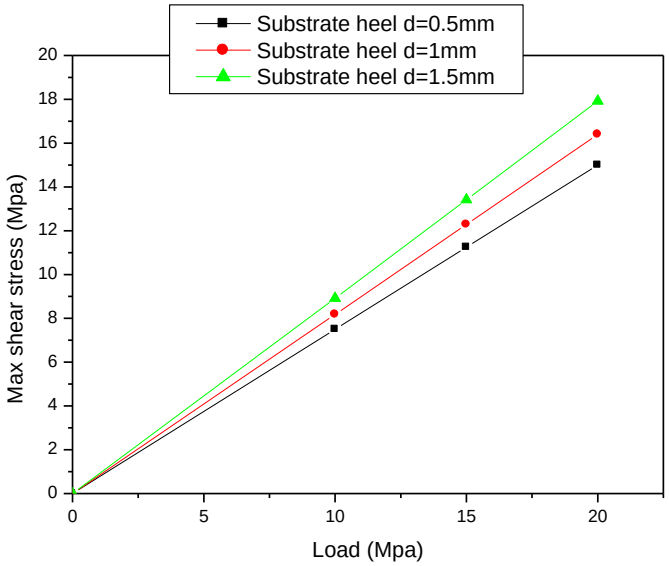


Figure 4.32 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=9 longueur du biseautage intérieur

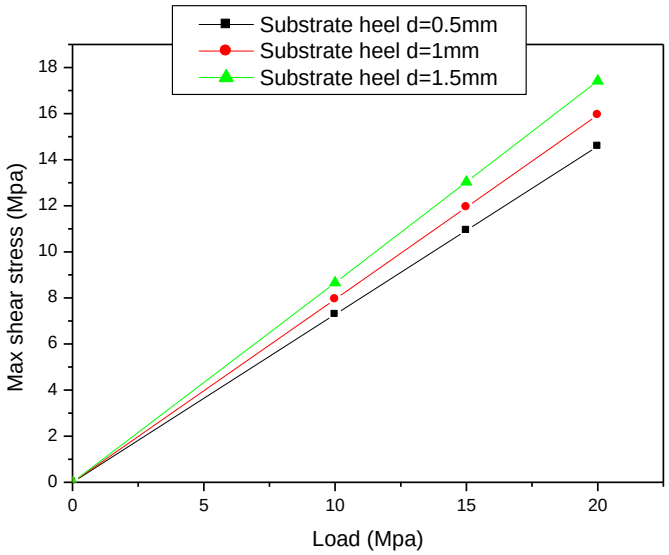


Figure 4.33 Variation de la contrainte maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=9 longueur du biseautage intérieur

Les figures 34 à 42 présentent la variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge appliquée, pour différentes épaisseurs de talon de substrat (0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm), différentes épaisseurs d'adhésif (0,2 mm, 0,35 mm, 0,5 mm) et différentes longueurs de biseautage intérieur (a = 3, 6, 9 mm).

- Relation charge/contrainte : Dans toutes les figures, la contrainte de pelage maximale augmente de façon linéaire avec la charge appliquée, quel que soit le cas étudié.
- Effet du talon de substrat : Pour une charge donnée, la contrainte de pelage maximale est toujours plus élevée pour un talon de substrat plus épais (1,5 mm > 1 mm > 0,5 mm).
- Effet de l'épaisseur de l'adhésif : Pour une même longueur de biseautage et un même talon, la contrainte maximale de pelage diminue lorsque l'épaisseur de l'adhésif augmente :
- À 0,2 mm (figures 34, 37, 40), la contrainte maximale est la plus élevée. - À 0,35 mm (figures 35, 38, 41), elle est intermédiaire. - À 0,5 mm (figures 36, 39, 42), elle est la plus faible.
- Effet de la longueur du biseautage intérieur (a) : Pour une même configuration, la contrainte maximale de pelage augmente avec la longueur du biseautage intérieur (a = 3, 6, 9 mm).

Explication mécanique

- La contrainte de pelage correspond à une sollicitation perpendiculaire ou inclinée à la zone collée, concentrant les efforts sur une extrémité du joint.
- Lorsque la contrainte de pelage maximale augmente (par exemple sous l'effet d'une charge croissante ou d'un talon plus épais), elle sollicite fortement l'interface adhésif/substrat. Si cette contrainte dépasse la résistance au pelage de l'adhésif, le front de pelage progresse, provoquant la rupture locale puis le décollement de la zone collée.
- Zones critiques : Le risque de décollement est particulièrement élevé aux extrémités du joint, là où

les contraintes de pelage sont les plus concentrées.
- Durabilité : Un niveau élevé de contrainte de pelage réduit la durabilité de l'assemblage collé, surtout si l'adhésif ou la préparation de surface ne sont pas optimisés.

- À une charge de 20 MPa :
- Fig 40 (0,2 mm, a = 9 mm) : la contrainte maximale atteint environ 33 MPa (1,5 mm), 29 MPa (1 mm), 26 MPa (0,5 mm).
- Fig 41 (0,35 mm, a = 9 mm) : environ 27 MPa (1,5 mm), 25 MPa (1 mm), 22 MPa (0,5 mm).
- Fig 42 (0,5 mm, a = 9 mm) : environ 25 MPa (1,5 mm), 22 MPa (1 mm), 20 MPa (0,5 mm).
- Pour a = 3 mm (Fig 34 à Fig 36), les valeurs maximales sont plus faibles :
- Par exemple, Fig 34 (0,2 mm, a = 3 mm) : environ 30 MPa (1 mm), 27 MPa (0,5 mm), 25 MPa (1,5 mm).

Interprétation des risques selon les valeurs

- Plus la contrainte de pelage maximale enregistrée est élevée, plus le risque de décollement ou de délaminage de la zone collée augmente.
- Les valeurs maximales observées (jusqu'à 33 MPa pour d = 1,5 mm, faible épaisseur d'adhésif et a = 9 mm) indiquent que l'assemblage approche la limite de résistance au pelage de l'adhésif : si la charge appliquée augmente encore, le risque de rupture devient critique.
- Les configurations avec talon épais, faible épaisseur d'adhésif et grande longueur de biseautage sont donc les plus exposées à la rupture locale, surtout sous forte sollicitation.

- Décollement progressif : Sous pelage, des phénomènes comme la cavitation et la formation de fibrilles à l'interface peuvent initier la rupture, qui se propage ensuite dans le joint adhésif.
- Plus la contrainte de pelage maximale enregistrée dans l'assemblage est élevée, plus le risque de décollement de l'adhésif est important.

- Il est essentiel de surveiller et de limiter la contrainte de pelage lors de la conception et de l'analyse des assemblages collés pour garantir leur durabilité et éviter une rupture prématurée.
- Maîtriser la contrainte de pelage est un facteur clé pour prévenir le décollement et assurer la fiabilité des assemblages collés.

- Pour garantir la durabilité de l'assemblage, il est essentiel de surveiller la contrainte maximale de pelage : dépasser 25–33 MPa dans ces configurations augmente fortement le risque de décollement ou de délaminage.
- L'optimisation doit privilégier une épaisseur d'adhésif adaptée, une longueur de biseautage appropriée et éviter de solliciter les assemblages au-delà de ces valeurs limites, surtout pour les talons de substrat épais.

En résumé : Les figures confirment que l'augmentation de la contrainte de pelage maximale, notamment avec un talon de substrat plus épais ou une faible épaisseur d'adhésif, accroît significativement le risque de décollement de la zone collée.

Les figures confirment qu'une contrainte maximale de pelage élevée (proche ou supérieure à 25–33 MPa selon la configuration) est synonyme de risque élevé de décollement ou de délaminage de la zone collée, et doit être strictement contrôlée lors de la conception et de l'utilisation des assemblages.

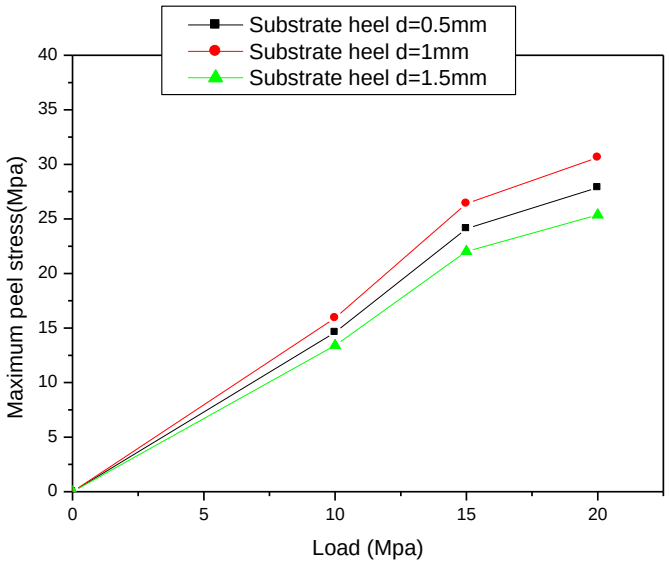


Figure 4.34 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=3 longueur du biseautage intérieur

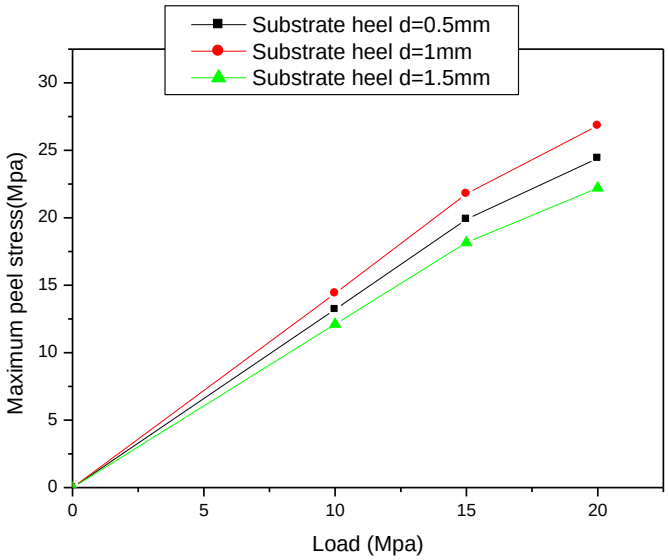


Figure 4.35 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=3 longueur du biseautage intérieur

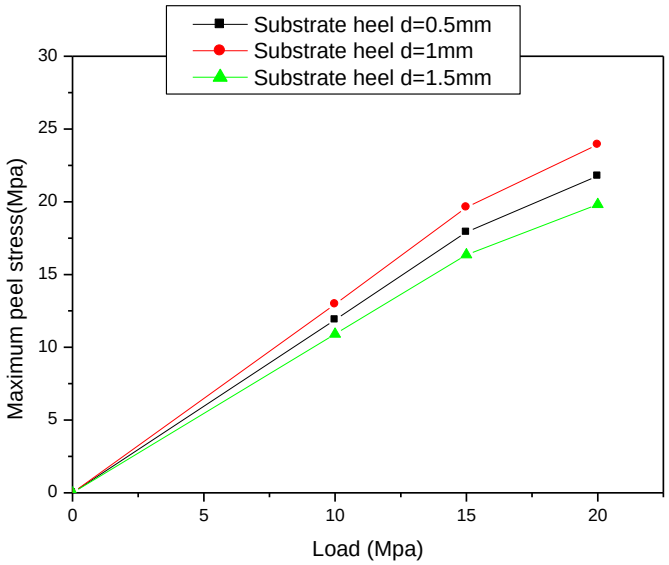


Figure 4.36 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=3 longueur du biseautage intérieur

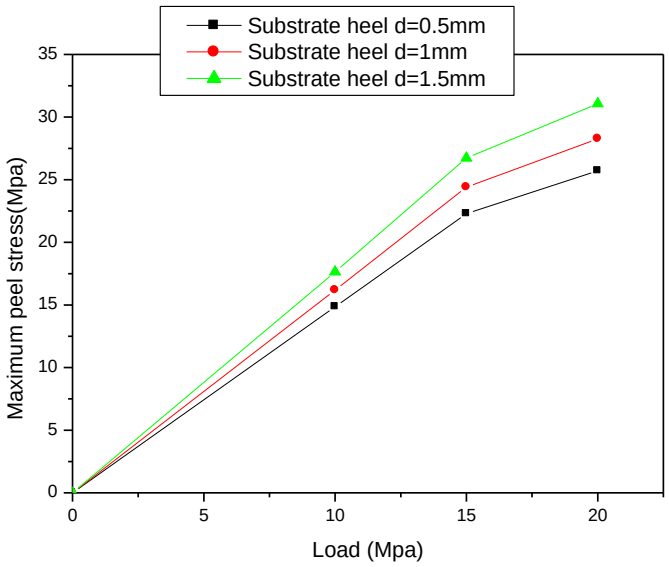


Figure 4.37 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=6 longueur du biseautage intérieur

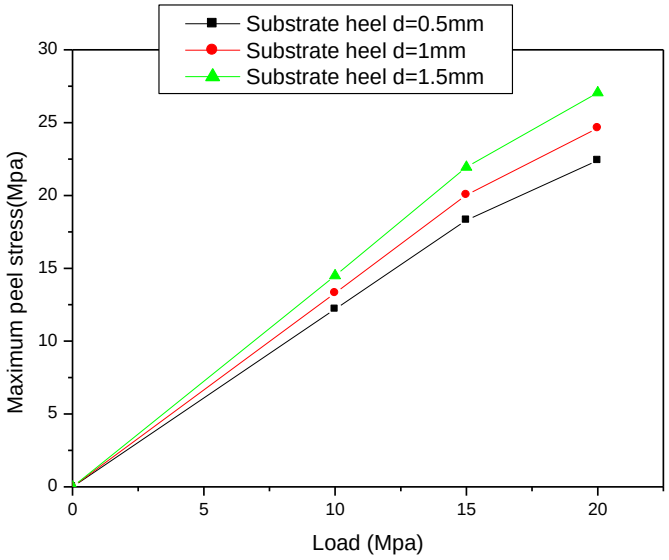


Figure 4.38 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=6 longueur du biseautage intérieur

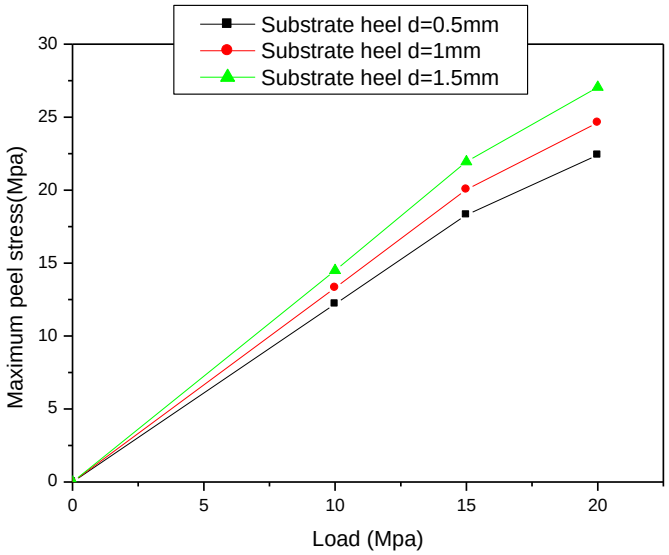


Figure 4.39 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=6 longueur du biseautage intérieur

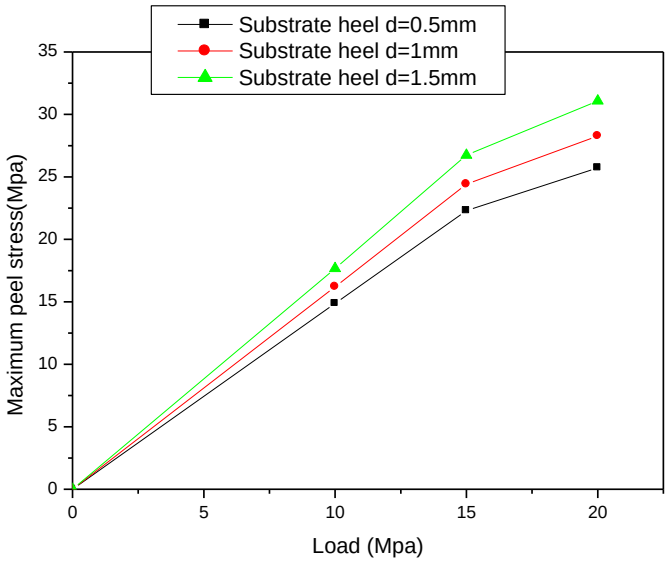


Figure 4.40 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.2mm et a=9 longueur du biseautage intérieur

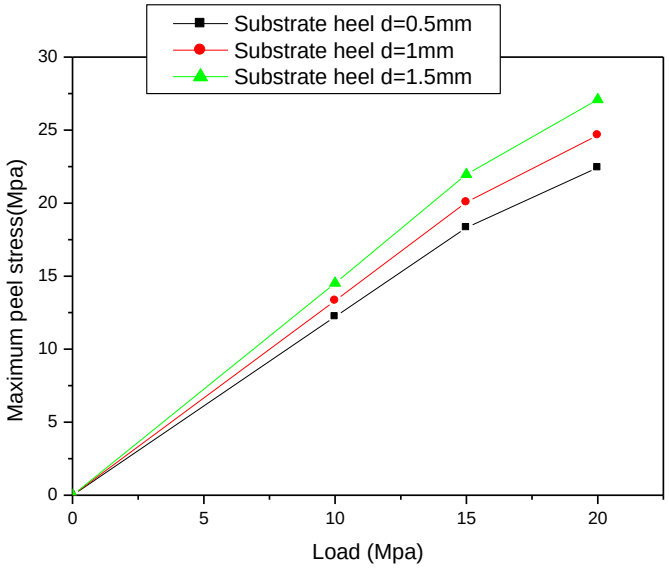


Figure 4.41 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.35mm et a=9 longueur du biseautage intérieur

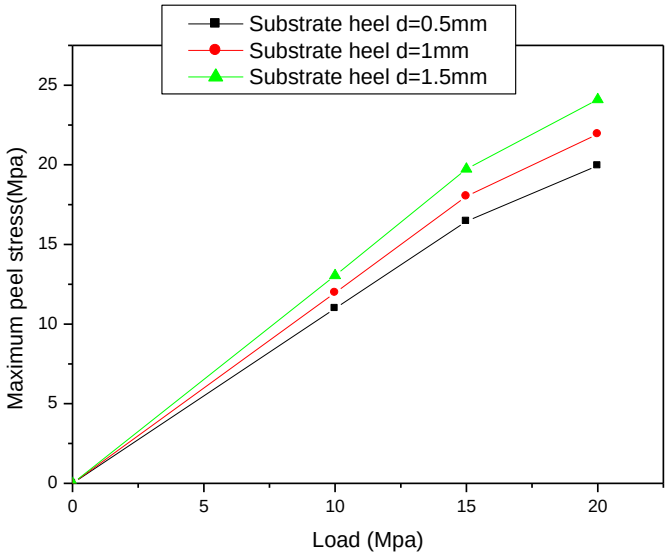


Figure 4.42 Variation de la contrainte de pelage maximale en fonction de la charge pour différents talons de substrat avec une épaisseur de l'adhésif =0.5mm et a=9 longueur du biseautage intérieur

Conclusion :

Les résultats issus des simulations ont confirmé l'influence majeure des paramètres géométriques (épaisseur de l'adhésif, longueur de recouvrement, talon du substrat) sur la répartition des contraintes de cisaillement et de pelage. Il a été démontré que certaines configurations favorisent la réduction des pics de contraintes, ce qui améliore la tenue mécanique du joint collé. Cette analyse approfondie constitue un préalable nécessaire à l'étape d'optimisation abordée dans le chapitre suivant

CHAPITRE 5

Optimisation numérique

5.1 Introduction sur l'optimisation numérique appliquée sur les résultats des simulations numériques :

L'optimisation numérique appliquée aux résultats des simulations numériques constitue aujourd'hui une étape essentielle dans l'ingénierie, la recherche scientifique et l'industrie. Elle intervient généralement après la modélisation mathématique d'un phénomène physique, la résolution numérique des équations associées et l'obtention de résultats de simulation. L'objectif principal de l'optimisation numérique est alors de modifier certains paramètres du système simulé afin d'améliorer ses performances selon des critères définis, comme la minimisation des coûts, la maximisation de l'efficacité ou l'optimisation de la robustesse.

La simulation numérique permet de représenter virtuellement des phénomènes complexes en s'appuyant sur des modèles mathématiques et des méthodes de calcul avancées, telles que la méthode des éléments finis. Cette approche offre la possibilité de prédire le comportement d'un système sans recourir à des prototypes physiques, ce qui réduit considérablement les coûts et les délais de développement. Cependant, une fois les résultats de simulation obtenus, il reste à déterminer comment ajuster les paramètres du modèle pour atteindre les performances optimales recherchées.

L'optimisation numérique consiste à rechercher, à l'aide d'algorithmes informatiques, la configuration optimale d'un système simulé en modifiant ses variables de décision tout en respectant les contraintes imposées. Cette démarche s'appuie sur la définition d'une fonction objectif à maximiser ou à minimiser (par exemple, le poids, le coût, la résistance, etc.) et sur l'exploration de l'espace des solutions possibles.

Dans le contexte des simulations numériques, l'optimisation peut prendre différentes formes :

- Optimisation basée sur la simulation : l'optimiseur interagit avec le modèle de simulation, modifie les paramètres, exécute des itérations et évalue la fonction objectif à chaque étape.
- Optimisation multidisciplinaire : elle s'applique à des systèmes complexes nécessitant la prise en compte de plusieurs disciplines ou phénomènes physiques couplés.
- Optimisation hybride : elle combine différentes techniques (algorithmes génétiques, méthodes de gradient, programmation linéaire) pour tirer parti des avantages de chacune selon la nature du problème.

Intérêts et bénéfices

L'application de l'optimisation numérique aux résultats des simulations numériques présente de nombreux avantages :

- Amélioration des performances : elle permet d'atteindre, voire de dépasser, les objectifs de conception initiaux en affinant les paramètres du modèle.
- Réduction des coûts et du temps de développement : en limitant le recours aux prototypes physiques et aux essais réels, l'optimisation accélère le processus de conception et diminue les dépenses associées.
- Prise en compte des contraintes réelles : l'optimisation numérique intègre facilement les contraintes techniques, économiques ou réglementaires du problème étudié.
- Innovation et robustesse : elle favorise l'exploration de solutions innovantes et la conception de produits plus fiables et adaptés aux besoins réels.

En résumé, l'optimisation numérique appliquée aux résultats des simulations numériques s'impose comme un outil incontournable pour la conception, l'amélioration et la validation de systèmes complexes. Elle permet non seulement d'identifier la meilleure configuration possible selon des critères précis, mais aussi de renforcer la compétitivité et la capacité d'innovation des entreprises et des laboratoires de recherche.

5.1.1 Analyse et optimisation des résultats des simulations numériques :

La simulation numérique est un outil essentiel pour comprendre, concevoir et optimiser des systèmes complexes. Son analyse et son optimisation reposent sur une combinaison de méthodes statistiques, de validation rigoureuse et d'améliorations algorithmiques. Voici les principaux aspects à considérer :

5.1.1.1 Analyse des résultats de simulation

A. Incertitudes et propagation des erreurs

- La méthode de Monte Carlo est privilégiée pour quantifier les incertitudes, avec un million d'itérations recommandé pour stabiliser les résultats tout en limitant les erreurs numériques.
- L'écart type relatif (coefficient de variation) permet d'évaluer la dispersion des résultats, crucial pour les décisions techniques.

B. Validation et métriques

- Les simulations doivent être confrontées à des données expérimentales, en évitant de réutiliser les mêmes jeux de données pour le calibrage et la validation.
- Des métriques quantitatives (comme la régression linéaire ou les méthodes bayésiennes) mesurent objectivement les écarts entre prédictions et observations, en intégrant les incertitudes des deux sources.

C. Estimation des erreurs numériques

- Les erreurs de discrétisation (liées au maillage) sont contrôlées via des tests de convergence et du raffinement adaptatif.
- Des solutions analytiques de référence sont utilisées pour vérifier l'implémentation des algorithmes.

5.1.1.2 Optimisation des simulations

A. Réduction des coûts computationnels

- Maillage adaptatif : Des estimateurs d'erreur guident le remaillage local pour concentrer les calculs sur les zones critiques.
- Calcul parallèle : L'exploitation d'architectures HPC (High Performance Computing) accélère les temps de résolution.
- Réduction de modèle: Des techniques comme la POD (Proper Orthogonal Decomposition) simplifient les systèmes complexes sans perte de précision significative.

B. Méthodes d'optimisation avancées

- Algorithmes hybrides : Combinaison d'algorithmes génétiques (exploration globale) et de méthodes basées sur le gradient (convergence rapide).

- IA et apprentissage automatique : Des réseaux neuronaux prédisent les comportements du système, réduisant le nombre de simulations nécessaires.
- Plans d'expériences : L'analyse de sensibilité identifie les paramètres influents pour cibler les optimisations.

C. Outils logiciels

- Des plateformes comme Simio intègrent des fonctionnalités d'optimisation en temps réel, permettant des ajustements dynamiques basés sur les données.
- Les solutions de couplage multiphysique (ex : Abaqus, COMSOL) optimisent simultanément plusieurs aspects (thermique, mécanique, fluide).

5.1.1.3 Enjeux industriels

- **Fiabilité :** Une simulation non validée peut conduire à des décisions erronées, notamment dans les domaines critiques comme l'aéronautique.
- **Économie :** L'optimisation réduit jusqu'à 30 % les coûts de conception en limitant les prototypes physiques.

Ces méthodes transforment la simulation numérique en un outil prédictif robuste, indispensable pour l'innovation industrielle. Leur mise en œuvre requiert cependant une expertise interdisciplinaire, alliant modélisation mathématique, informatique et connaissance du phénomène physique étudié.

Table1 les valeurs obtenues à partir du logiciel Abaqus

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	length of overlab	thickness of adhesive	maximum shear stress	Max peel stress
1	1	N1	11	Incl	12,5	0,2	11,5	21,38
2	2	N2	2	Incl	42,5	0,2	9,088	16,82
3	3	N3	10	Incl	12,5	0,5	10,5	17,16
4	4	N4	3	Incl	42,5	0,5	7,722	12,98
5	5	N5	1	Incl	12,5	0,35	11,125	18,692
6	6	N6	6	Incl	42,5	0,35	8,141	14,24
7	7	N7	8	Incl	27,5	0,2	10,02	20,03
8	8	N8	4	Incl	27,5	0,5	9,4	14,8
9	9	N9	5	Incl	27,5	0,35	9,6	15,1
10	10	N10	7	Incl	27,5	0,35	9,6	15,1
11	11	N11	9	Incl	27,5	0,35	9,6	15,1

- Ce tableau présente les résultats bruts issus de simulations numériques réalisées sous Abaqus. Il s'agit probablement de valeurs de contraintes maximales (cisaillement ou pelage) pour différentes configurations (longueur de recouvrement, épaisseur d'adhésif).
- Ces données servent de référence pour la validation des modèles mathématiques et l'optimisation ultérieure.

<

Table2 Les valeurs optimales obtenues à partir du logiciel modde5

	Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
1	length of overlab	Free		12,5	42,5
2	thickness of adhesive	Free		0,2	0,5

	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	maximum shear stress	Minimize	1		7,57139	7,94339
2	Max peel stress	Minimize	1		12,5928	13,4755

Iteration: 5000 Iteration slider:

	1	2	3	4	5	6
	length of overlab	thickness of adhesive	maximum shear stress	Max peel stress	iter	log(D)
1	42,4996	0,4995	7,7587	13,0319	5000	-0,6012
2	42,4996	0,4997	7,7583	13,0325	3818	-0,6014
3	42,4998	0,4961	7,7682	13,0162	2680	-0,5935
4	42,5	0,5	7,7574	13,0341	1162	-0,6021
5	42,4995	0,4985	7,7617	13,0269	4103	-0,5991
6	42,5	0,5	7,7574	13,0341	1162	-0,6021
7	42,4985	0,4998	7,7582	13,0331	1810	-0,6012
8	42,4971	0,5	7,7578	13,0341	2085	-0,6012

- Ce tableau regroupe les valeurs optimisées des paramètres (longueur, épaisseur) permettant de minimiser ou maximiser la contrainte étudiée, selon les critères fixés.
- Les résultats sont issus d'un processus d'optimisation numérique, utilisant des modèles ajustés sur les simulations initiales.

Ce tableau présente les résultats d'une optimisation numérique réalisée avec le logiciel modde5, visant à minimiser simultanément deux contraintes mécaniques dans un assemblage adhésif :

- Maximum shear stress (contrainte de cisaillement maximale)
- Max peel stress (contrainte de pelage maximale)

Explications des paramètres

- length of overlap : longueur de recouvrement de l'assemblage, variant de 12,5 à 42,5 (unité non précisée, probablement mm)
- thickness of adhesive : épaisseur de l'adhésif, variant de 0,2 à 0,5 (probablement mm)
- maximum shear stress : valeur obtenue pour la contrainte de cisaillement maximale (colonne3)
- Max peel stress : valeur obtenue pour la contrainte de pelage maximale (colonne 4)
- iter : nombre d'itérations de l'algorithme d'optimisation pour atteindre la solution
- log(D) : critère de desirability logarithmique, indicateur de la qualité de la solution (plus proche de zéro, meilleure est la desirability)

Analyse des résultats

- Tendance générale

- Les solutions optimales sont toutes obtenues pour la longueur de recouvrement maximale (environ 42,5) et l'épaisseur maximale (environ 0,5).
- Cela confirme que pour minimiser les contraintes maximales, il faut augmenter autant que possible ces deux paramètres dans les limites fixées.

- Valeurs minimales atteintes

- La contrainte de cisaillement minimale obtenue est d'environ 7,7574.
- La contrainte de pelage minimale obtenue est d'environ 13,0341.

- Stabilité de l'optimisation

- Les différentes lignes du tableau montrent des variations très faibles autour des valeurs optimales, ce qui indique une convergence stable de l'algorithme.

- Le critère log(D) reste quasiment constant, ce qui confirme la robustesse de la solution trouvée.

Ce tableau montre que l'optimisation numérique recommande d'utiliser la longueur de recouvrement et l'épaisseur d'adhésif maximales autorisées pour minimiser les contraintes critiques dans l'assemblage. Les résultats sont cohérents et démontrent que, dans la plage étudiée, l'augmentation de ces deux paramètres améliore significativement la tenue mécanique de l'assemblage adhésif.

Table3 liste des coefficients pour la contrainte de cisaillement max

	1	2	3	4	5
1	**maximum shear stress**	**Coeff. SC**	**Std. Err.**	**P**	**Conf. int(±)**
2	**Constant**	9,60852	0,0909405	1,44009e-009	0,23377
3	**len**	-1,36233	0,0723725	7,7931e-006	0,18604
4	**thi**	-0,497667	0,0723725	0,00099491	0,18604
5	**len*len**	0,011684	0,111379	0,920531	0,286309
6	**thi*thi**	0,0886855	0,111379	0,462	0,286309
7	**len*thi**	-0,0915003	0,0886378	0,349257	0,227851
8					
9	N = 11	Q2 =	0,870	Cond. no. =	3,0822
10	DF = 5	R2 =	0,988	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	0,976	RSD =	0,1773
12				Conf. lev. =	0,95

- Ce tableau liste les coefficients du modèle mathématique prédictif pour la contrainte de cisaillement maximale, en fonction de la longueur de recouvrement et de l'épaisseur de l'adhésif

- Les signes des coefficients indiquent l'influence de chaque paramètre : une augmentation de la longueur ou de l'épaisseur tend à réduire la contrainte maximale, mais des termes quadratiques et d'interaction modulent cet effet.

Le modèle mathématique proposé est :

$$\sigma max=9.60852-1.36233*len-0.497667*thi+0.011684*len2+0.0886855*thi2-0.0915003*len*thi$$

Ou :

len : la longueur du recouvrement

thi : l'épaisseur du l'adhésif

Table4 liste des coefficients pour la contrainte de cisaillement max du pelage

	1	2	3	4	5
1	Max peel stress	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	15,457	0,347844	1,08954e-007	0,894165
3	len	-2,19867	0,276822	0,00050985	0,711596
4	thi	-2,215	0,276822	0,000492467	0,711596
5	len*len	0,473367	0,426021	0,317064	1,09512
6	thi*thi	1,42237	0,426021	0,020581	1,09512
7	len*thi	0,0949994	0,339037	0,790545	0,871524
8					
9	N = 11	Q2 =	0,745	Cond. no. =	3,0822
10	DF = 5	R2 =	0,966	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	0,932	RSD =	0,6781
12				Conf. lev. =	0,95

- Ce tableau donne les coefficients du modèle pour la contrainte de pelage maximale
- L'effet des paramètres est non linéaire, et l'interaction entre longueur et épaisseur est prise en compte.

Le modèle mathématique proposé est :

$$\sigma peel=15.457-2.19867*len-2.215*thi+0.473367*len2+1.42237*thi2+0.0949994*len*thi$$

Ou :

len : la longueur

thi : l'épaisseur

5.1.2 Analyse et optimisation selon les diagrammes des contours :

L'analyse et l'optimisation à l'aide des diagrammes de contours sont des approches puissantes pour visualiser, comprendre et améliorer les résultats issus de simulations numériques, notamment dans les domaines de la mécanique, de la thermique, ou de l'optimisation de procédés.

5.1.2.1 Diagrammes de contours : principe et utilisation

- Un diagramme de contours (ou graphique de contour) représente en 2D les lignes reliant les points où la variable étudiée (ex. température, pression, vitesse, rendement) prend la même valeur.
- Ces diagrammes sont particulièrement utiles pour visualiser la réponse d'un système ou d'un modèle en fonction de deux variables continues, permettant d'identifier rapidement les zones de performance optimale ou critique.
- Ils sont générés à partir de modèles ajustés (par exemple, régression linéaire, modèles de simulation) et servent à explorer l'effet combiné de deux paramètres sur la réponse étudiée.

5.1.2.2 Analyse via les contours

- Les contours permettent d'identifier les zones où la fonction objectif (par exemple, rendement, coût, perte) est maximale, minimale ou présente des points col (selles).
- L'analyse de la forme et de la courbure des contours renseigne sur la stabilité et la sensibilité de la

solution optimale : des contours resserrés indiquent une forte variation de la réponse, tandis que des contours espacés signalent une faible sensibilité.
- La nature du point stationnaire (optimum local, global, ou point col) peut être déterminée par l'analyse de la matrice Hessienne du modèle de réponse, mais aussi visuellement par la forme des contours autour du point critique.

5.1.2.3 Optimisation à partir des contours

- Les diagrammes de contours servent à guider l'optimisation en localisant visuellement les zones de valeurs optimales pour les paramètres étudiés.
- En pratique, on ajuste un modèle (souvent quadratique) reliant la réponse aux variables, puis on utilise les contours pour prédire et tester les points optimaux.
- Les méthodes graphiques (diagrammes de contours) sont souvent combinées à des méthodes analytiques (résolution des dérivées partielles, calcul des valeurs propres de la Hessienne) pour confirmer la nature de l'optimum et affiner la recherche.
- L'utilisation de plans d'expériences et d'algorithmes d'optimisation (ex. GPS-PSO, plans d'expériences) permet de réduire le nombre de simulations nécessaires tout en explorant efficacement l'espace des paramètres.

Exemple

Un analyste souhaite optimiser le rendement d'un procédé en fonction de la température et de la pression. Après avoir simulé différents couples de valeurs, il trace un diagramme de contours du rendement. Il repère visuellement la zone où les contours indiquent un maximum, puis affine la recherche autour de cette zone pour déterminer précisément les conditions optimales.

Avantages

- Visualisation intuitive des interactions entre variables
- Identification rapide des zones optimales ou à risque
- Réduction du nombre de simulations nécessaires grâce à une exploration ciblée de l'espace des paramètres
- Appui à la validation et à l'interprétation des résultats de simulation

L'utilisation des diagrammes de contours en analyse et optimisation permet d'exploiter pleinement les résultats des simulations numériques, en facilitant la prise de décision et en orientant efficacement les démarches d'optimisation.

La figure présentée est un diagramme de contours représentant la contrainte de cisaillement maximale (maximum shear stress) dans un assemblage adhésif, en fonction de deux paramètres

- Axe horizontal (x) : longueur de recouvrement (length of overlap)
- Axe vertical (y) : épaisseur de l'adhésif (thickness of adhesive)

Les différentes couleurs et les lignes de contour indiquent les niveaux de contrainte de cisaillement maximale, avec les valeurs chiffrées inscrites sur chaque courbe.

5.1.2.4 Analyse des tendances

- Diminution de la contrainte avec l'augmentation des paramètres

On observe que la contrainte de cisaillement maximale diminue lorsque la longueur de recouvrement augmente et/ou lorsque l'épaisseur de l'adhésif augmente.

- Les valeurs passent d'environ 11,09 (en bas à gauche, faible longueur et faible épaisseur) à 7,76 (en haut à droite, grande longueur et grande épaisseur).

- Zones critiques

Les zones rouges et orange (en bas à gauche) correspondent aux combinaisons où la contrainte maximale est la plus élevée, donc les plus critiques pour la tenue mécanique de l'assemblage.

- Zones favorables

Les zones bleues (en haut à droite) indiquent les configurations où la contrainte maximale est la plus faible, donc plus sûres pour l'assemblage.

5.1.2.5 Optimisation

Pour réduire la contrainte de cisaillement maximale et améliorer la fiabilité de l'assemblage, il est préférable d'augmenter la longueur de recouvrement et/ou l'épaisseur de l'adhésif, dans la mesure du possible.

- Effet combiné

L'effet n'est pas strictement linéaire : l'augmentation simultanée des deux paramètres a un effet plus marqué sur la diminution de la contrainte que l'augmentation d'un seul.

Ce diagramme permet d'identifier rapidement les combinaisons de longueur et d'épaisseur qui minimisent la contrainte de cisaillement maximale dans l'adhésif, guidant ainsi les choix de conception pour un assemblage plus robuste et fiable.

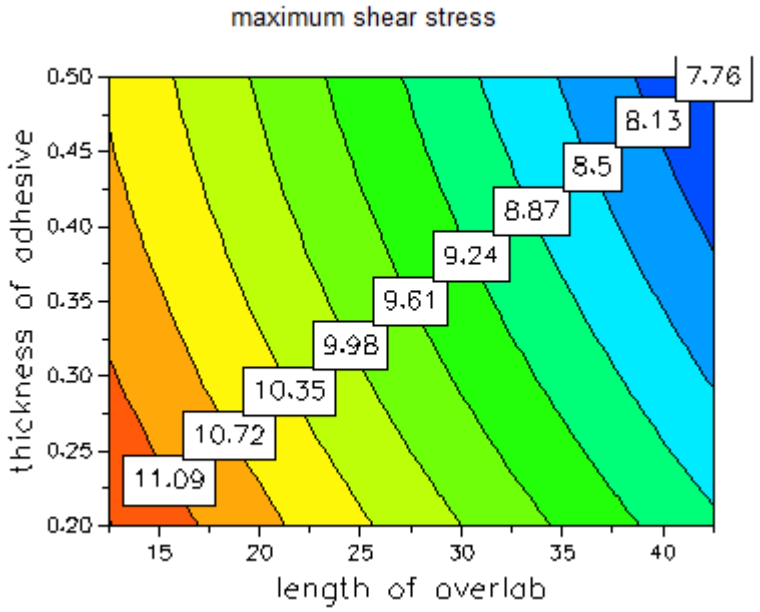


Figure 5.1 Diagramme des contours de la contrainte de cisaillement max du l'adhésif illustrant l'interaction entre l'épaisseur de l'adhésif et la longueur du recouvrement

La figure représente un diagramme de contours montrant la contrainte de pelage maximale (« Max peel stress ») dans un assemblage adhésif, en fonction de deux paramètres principaux :

- Axe horizontal (x) : longueur de recouvrement (length of overlap)
- Axe vertical (y) : épaisseur de l'adhésif (thickness of adhesive)

- Contours et couleurs

Chaque courbe de niveau (contour) relie les points où la contrainte de pelage maximale est identique. Les valeurs sont indiquées sur les courbes (par exemple : 20.00, 19.17, 18.26, 16.5, 15.61, 14.72, 13.83).

- Les couleurs chaudes (jaune, orange) correspondent à des contraintes de pelage maximales élevées.
- Les couleurs froides (vert, bleu) indiquent des contraintes plus faibles.

- Tendances observées

- Lorsque la longueur de recouvrement augmente (vers la droite), la contrainte de pelage maximale diminue.
- Lorsque l'épaisseur de l'adhésif augmente (vers le haut), la contrainte de pelage maximale diminue également.
- Les zones en bas à gauche (faible longueur et faible épaisseur) présentent les contraintes maximales les plus élevées, ce qui indique un risque accru de défaillance par pelage dans ces configurations.
- À l'inverse, les zones en haut à droite (grande longueur, grande épaisseur) présentent les contraintes les plus faibles, donc des configurations plus sûres pour l'assemblage.

Interprétation technique

- Optimisation

Pour minimiser la contrainte de pelage maximale dans l'adhésif, il est recommandé d'augmenter à la fois la longueur de recouvrement et l'épaisseur de l'adhésif, dans la mesure du possible.

- Effet combiné

L'effet de la longueur de recouvrement et de l'épaisseur n'est pas strictement additif, comme le montrent les courbes non linéaires : l'interaction entre ces deux paramètres influence fortement la contrainte maximale.

Ce diagramme permet d'identifier rapidement les combinaisons de longueur de recouvrement et d'épaisseur d'adhésif qui minimisent la contrainte de pelage maximale. Il constitue un outil précieux pour guider la conception d'assemblages adhésifs plus robustes, en évitant les configurations à risque et en privilégiant les zones où la contrainte est la plus faible.

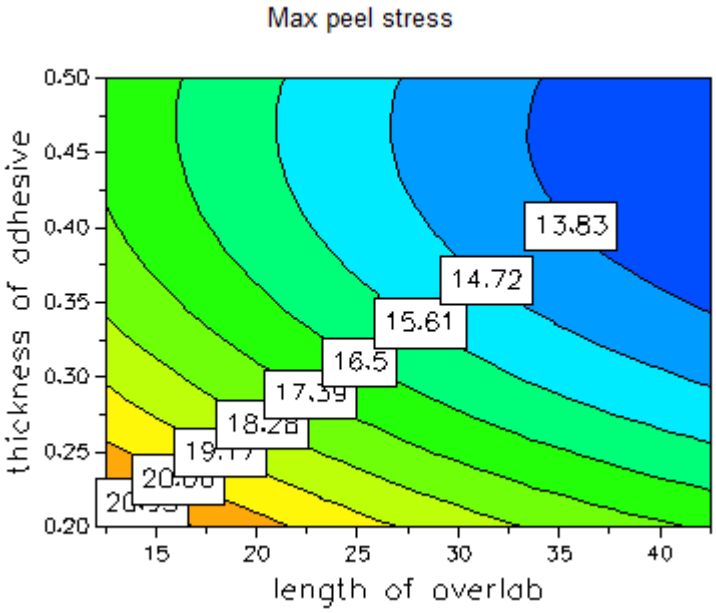


Figure 5.2 Diagramme des contours de la contrainte de pelage max du l'adhésif illustrant l'interaction entre l'épaisseur de l'adhésif et la longueur du recouvrement

Conclusion :

L'ensemble du travail met en lumière le rôle central de l'optimisation numérique appliquée aux résultats de simulations numériques dans l'ingénierie moderne. Les points clés qui se dégagent de l'analyse et des résultats présentés :

- La simulation numérique permet de modéliser et de prédire le comportement de systèmes complexes sans recourir à des prototypes physiques, réduisant ainsi les coûts et les délais de développement tout en améliorant la compréhension des phénomènes étudiés.

- L'optimisation numérique intervient après la simulation pour ajuster les paramètres du système (par exemple, la longueur de recouvrement et l'épaisseur d'un adhésif) afin d'atteindre des objectifs précis, tels que la minimisation des contraintes mécaniques critiques. Cette démarche s'appuie sur des algorithmes avancés, des modèles mathématiques prédictifs et des outils logiciels spécialisés.

- L'analyse des résultats repose sur des méthodes statistiques rigoureuses, la validation par confrontation aux données expérimentales, et l'estimation des incertitudes et des erreurs numériques. Cette approche garantit la robustesse et la fiabilité des solutions obtenues.

- L'optimisation basée sur simulation permet d'identifier rapidement les configurations optimales à l'aide de diagrammes de contours, qui offrent une visualisation intuitive de l'influence des paramètres sur la performance du système. Dans le cas étudié, l'augmentation simultanée de la longueur de recouvrement et de l'épaisseur de l'adhésif conduit à une réduction significative des contraintes de cisaillement et de pelage maximales, améliorant la tenue mécanique de l'assemblage.

- Les modèles mathématiques ajustés (présentés sous forme de coefficients dans les tableaux) permettent de prédire efficacement les réponses du système et de guider l'optimisation en limitant le nombre de simulations nécessaires.

- Les bénéfices industriels sont majeurs : amélioration des performances, réduction des coûts et du temps de développement, prise en compte des contraintes réelles, et renforcement de l'innovation et de la robustesse des produits.

En résumé, l'optimisation numérique appliquée aux simulations numériques s'impose comme un outil indispensable pour la conception et l'amélioration de systèmes techniques. Elle permet de dépasser les objectifs de conception initiaux, d'explorer efficacement l'espace des solutions, et d'aboutir à des choix robustes, fiables et économiquement avantageux, tout en s'appuyant sur une démarche scientifique rigoureuse et des outils performants.

Conclusion général:

Ce mémoire présente une étude approfondie sur les assemblages collés à simple recouvrement, en mettant l'accent sur l'analyse des contraintes mécaniques (cisaillement et pelage) ainsi que sur leur optimisation numérique à l'aide du logiciel Abaqus.

Synthèse des résultats principaux :

1. Influence des paramètres géométriques :
- Longueur de recouvrement : Une longueur plus grande permet une meilleure répartition des contraintes, ce qui réduit les pics de cisaillement et de pelage.
- Épaisseur de l'adhésif : Une épaisseur accrue améliore la répartition des contraintes, mais rend le joint plus souple, ce qui peut réduire légèrement sa résistance locale.
- Talon de substrat : Un talon plus épais augmente la rigidité locale, mais accroît aussi le risque de décollement si les contraintes maximales dépassent la limite de résistance de l'adhésif.

2. Risques de rupture :
- Les contraintes de cisaillement supérieures à 10–12 MPa augmentent fortement le risque de délaminage ou de décollement.
- Les contraintes de pelage supérieures à 25–33 MPa selon la configuration conduisent à une rupture critique du joint collé.
- Les configurations avec faible épaisseur d'adhésif et talon épais sont les plus exposées à ces risques.

3. Optimisation numérique :
- L'utilisation du logiciel modde5 a permis d'identifier les configurations optimales pour minimiser les contraintes critiques :
- Longueur de recouvrement maximale (~42,5 mm).
- Épaisseur d'adhésif maximale (~0,5 mm).
- Ces configurations assurent une meilleure tenue mécanique et une plus grande durabilité de l'assemblage collé.

4. Modélisation numérique via Abaqus :
- Le logiciel ABAQUS s'est montré efficace pour modéliser les comportements non linéaires des matériaux adhésifs.
- Des simulations ont été réalisées avec différentes géométries (biseautage intérieur/extérieur), permettant de valider les modèles théoriques et les stratégies d'optimisation.

Applications industrielles et perspectives :

- L'assemblage par collage offre de nombreux avantages dans les industries aéronautique, automobile et de construction, notamment une réduction du poids, une meilleure répartition des contraintes, et une bonne résistance à la fatigue.

- Cependant, il nécessite une conception rigoureuse pour éviter les ruptures prématurées dues aux concentrations de contraintes.
- Les travaux futurs pourraient explorer l'utilisation de nouveaux matériaux adhésifs nanostructurés, ou des stratégies de collage multi-joints, pour encore améliorer la performance des assemblages.

En conclusion :

Ce mémoire montre l'importance cruciale de l'analyse mécanique fine et de l'optimisation des paramètres géométriques dans la conception des assemblages collés. Grâce à des outils numériques avancés comme ABAQUS et modde5, il est possible de prédire et d'améliorer significativement la résistance, la fiabilité et la durée de vie des structures assemblées par collage, tout en répondant aux exigences croissantes des industries modernes.

Référence:

[1] ROCHE, Jean. *Adhésion et énergie de surface dans les assemblages collés*.
[2] - Cognard, J. (2005). Adhésion et Adhésifs : Théorie et Applications. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
[3] - **SENER, M. ; DELANNAY, F.** *Effet de la rugosité interfaciale sur l'adhésion dans les assemblages collés* // *Revue Internationale d'Adhésion et de Technologie* , vol. 12, no 3, 2004, p. 201-215.
[4] - ALLEN, K. W. (2001). *The Science and Technology of Adhesives – A Review of Test Methods and Failure Criteria. International Journal of Adhesion and Technology,* 15(4), 231–245.
[5]- Grabovac, I., & Whittaker, D. (2009). "Applications of bonded composites in naval ships". Composite Structures, 88(1), 138-146.
[6] - Breitzman, T., et al. (2012). "Optimization of composite patch repairs for damaged structures". Journal of Aircraft, 49(3), 712-720.
[7] - Ridha, M., et al. (2015). "Finite element analysis of stepped composite repairs". Composite Part B: Engineering, 75, 1-10.
[8]- Kinloch, A. J. (1987). *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. Springer.
[9]- Adams, R. D., et al. (1997). Structural Adhesive Joints in Engineering. Elsevier.
[10]- Da Silva, L. F. M., et al. (2018). Handbook of Adhesion Technology. Springer.
[11]- ASTM International. Standards for Adhésive Setting* (ex : ASTM D3165 pour les essais de cisaillement).
[12]- Buchan, D., & Rae, K. J. (1997). *Adhésion chimique et formation de liaisons interfaciales dans les assemblages collés. Journal de Physico-Chimie des Interfaces et des Matériaux,* 8(2), 145–158.
[13] Analyse dynamique des plaques orthotropes par simulation ... https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/34651/1/Analyse%20dynamique%20des%20plaques%20orthotropes%20par%20simulation%20num%C3%A9rique%20en%20utilise%20logicel%20ANSYS%20et%20ABAQUS_compressed.pdf
[14] Contrôle des ondes de flexion dans les plaques https://pastel.hal.science/tel-01074740/document
[15] [tel-00667560, v1] Comportement de composites sous choc induit ... https://dp-pimm.s3.ensam.eu/public/Documents/2018-11/Th%C3%A8se%20Elise%20GAY.pdf
[16] THÈSE - université 8 Mai 1945 Guelma https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/4118/1/%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%B0%D9%83%D8%B1%D8%A9.pdf
[17] Optimisation de transducteurs piézoélectriques pour la génération d ... https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/8172
[18] MÉTHODES D'INSPECTION NON DESTRUCTIVE PAR ... - UQTR https://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/6648/1/000671506.pdf
[19] Résolution numérique [Optimisation numérique] https://nte.mines albi.fr/Optimisation/fr/co/OSC_ResolutionNumerique.html
[20] Optimisation (mathématiques) - Wikipédia https://fr.wikipedia.org/wiki/Optimisation_(math%C3%A9matiques)
[21] Introduction à l'Optimisation Numérique https://www.math.univ-

toulouse.fr/~rondep/CoursTD/polyMIC3.pdf
[22] Chapitre Algorithmes d'optimisation https://univ-biskra.dz/sites/kenouche/my_folder/phy/chapitre2.pdf
[23] Chapitre 2 Les Fondements de l'optimisation sans contraintes https://elearning-facsc.univ-annaba.dz/pluginfile.php/33261/mod_resource/content/1/Chapitre_2.pdf
[24] Optimisation numérique et science des données - LJLL https://www.ljll.fr/trelat/enseignement/optimisation/cours_optim.pdf
[25] Principes de détection des défauts. Différentes techniques du CND https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/cnd-methodes-globales-et-volumiques-42585210/controle-non-destructif-cnd-r1400/principes-de-detection-des-defauts-differentes-techniques-du-cnd-r1400niv10002.html
[26] Détection des défauts des matériaux composites https://www.screeningeagle.com/fr/solutions/other-testing/composite-flaw-detection
[27] Inspection visuelle de défauts dans les pièces : méthodes, difficultés ... https://www.olympus-ims.com/fr/insight/visual-inspection-of-part-defects-methods-challenges-and-opportunities/
[28] Défauts de matériaux composites - Eddy fi https://www.eddyfi.com/fr/application/defauts-de-materiaux-composites
[29] Le Contrôle Non Destructif ou CND - Définition - Plastiform https://www.plastiform.info/controle-dimension/controle-non-destructif-cnd/
[30] Modélisation des ondes: Physique, Mathématiques - StudySmarter https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/mathematiques-pour-lingenierie/modelisation-des-ondes/
[31] Modelling and simulation of extreme wave heights around agatti ... https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2022.991768/full
[32] Découvrez la simulation numérique et ses applications - Cfet https://cfet.fr/decouvrez-la-simulation-numerique-et-ses-applications/
[33] Modeling and Simulation of a Wave Energy Converter: Multibody ... https://www.mdpi.com/1996-1073/15/24/9358
[34] Modélisation des phénomènes de propagation d'ondes https://www.math.u-bordeaux.fr/~abachelo/Abboud-Terrasse.pdf
[35] Méthodes d'intelligence artificielle appliquées au diagnostic de ... https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/35183/1/BASSA-BENLAMNOUAR.pdf
[36] Détection de défauts temps réel sur des objets à géométrie complexe https://www.iieta.org/download/file/fid/38545
[37] Détection et localisation des défauts des capteurs https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/1287/1/memoire_detection_et_localisation_des_defaut_%20des%20capteurs.pdf
[38] Chapitre Algorithmes d'optimisation https://www.univ-biskra.dz/sites/SM/my_folder/c1.pdf
[39] Comment améliorer la détection des défauts de fabrication - Creaform https://www.creaform3d.com/blog/fr/comment-ameliorer-la-detection-des-defauts-de-fabrication/