الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'Enseignement Supérieure et de la recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن احمد
Université d 'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance – Fiabilité - Qualité

Thème

étude numérique et l'optimisation des jointes des assemblages coller

Présenté et soutenu publiquement par :

Blel Raaboub

abdelhakimi manal

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
HAROUZ KELTOUM	MCB	Université d'Oran 2	Président
BACHIR BOUIADJRA BACHIR	MCB.	Université d'Oran 2	Encadreur
Tarfaya Anis	MCB	Université d'Oran 2	Examinateur

2023-2024

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié l’efficacité de l’adhésion des plaques. Afin d'étudier la rigidité et l'efficacité des plaques collées, nous avons réalisé des simulations numériques sur les modèles proposés. Pour cette raison, nous avons modifié plusieurs facteurs, en nous concentrant sur le changement des matériaux utilisés dans les plaques et l'adhésif, afin de choisir la composition idéale.

Abstract

In this work, we studied the effectiveness of the adhesion of the sheets. In order to study the stiffness and efficiency of the bonded sheets, we carried out numerical simulations on the proposed models. For this reason, we modified several factors, focusing on changing the materials used in the plates and the adhesive, in order to choose the ideal composition.

الملخص:

في هذا العمل قمنا بدراسة فعالية الإلصاق الخاص بالصفائح. و من أجل دراسة صلابة و فعالية الصفائح الملصقة قمنا بمحكات رقمية للنماذج المنجزة. لأجل هذا قمنا بتغيير عدة عوامل حيث ركزنا على تغيير المواد المستعملة في الصفائح و اللاصق و هذا من أجل إختيار التوليفة المثالية

Remerciement

Nous tenons avant tout à exprimer notre gratitude à notre encadrant **Mr Bachir Bachir Bouiajra** pour ses conseils avisés ainsi que pour sa présence et son soutien tout au long de ce travail. Votre expérience et votre patience ont été nécessaires pour mener à bien cette thèse.

Abdelhakimi Manal

Je tiens à adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont Aidé dans la réalisation de ce mémoire tout d'abord, je remercie du fond du cœur Je souhaite exprimer ma plus profonde gratitude à mon ange dans vie, **ma mère tasfaout dawya**, dont les prières ont été la raison de ma réussite
Maman, ton amour et ton soutien indéfectible ont été essentiels tout au long de mon parcours. Ton encouragement constant et ta présence réconfortante m ont donné la force de persévérer même dans les moments les plus difficiles. Tes précieux conseils et ton dévouement sans faille m'ont permis de surmonter chaque obstacle rencontré, Merci pour ton amour inconditionnel, ta patience et ta Compréhension. Ce mémoire est le reflet de tes sacrifices et de ta foi en moi.
À celui dont je porte le nom, **mon père, Mohammed**
Papa, ta présence rassurante, ton amour et tes sacrifices, Tes
Encouragements constants et ta sagesse m'ont guidé et m'ont
Permis de surmonter de nombreux obstacles. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi. Cette mémoire est le fruit de tes efforts autant que des miens.
A ma tante **tasfaout Fatiha**, qui était pour moi comme une deuxième mère dont le soutien inébranlable et les encouragements constants ont été des piliers tout au long de ces années d'études. Vos conseils m'ont donné la force et la motivation nécessaires pour aller de l'avant
A **mes sœurs** et **mon frère** Grâce à votre soutien précieux, j'ai pu surmonter les défis avec confiance et persévérance.
A mon frère **Aziz** et sa **petite famille** pour m'avoir si généreusement hébergé chez vous. Votre hospitalité et votre gentillesse m'ont profondément touché.
A mon binôme **blel raboub** remercier du fond du cœur pour votre incroyable dévouement et votre travail acharné tout au long de notre mémoire. Je sais que la dernière période n'a pas été facile et nous avons pu traverser cette période avec succès. Malgré les temps difficiles, nous parvenons à maintenir le cap avec une attitude positive et une volonté inébranlable. Je suis très reconnaissant de vous avoir comme partenaire. Votre dévouement et votre soutien ont été essentiels à chaque étape, et je suis fier de ce que nous avons accompli ensemble. Merci pour cette collaboration exceptionnelle et d'avoir rendu cette aventure si inoubliable et enrichissante.
A mon Ami **Yasser** ,Même si notre amitié est récente, tu m'as énormément soutenu pendant que j'écrivais ma mémoire. Merci infiniment pour ton aide. À mon tour de te

souhaiter beaucoup de force et de succès pour les années à venir. Je suis sûr que tu feras un excellent travail sur ta propre mémoire.
Encore merci et courage pour la suite
Enfin, Je me dois un merci sincère. Face aux défis, j'ai creusé profondément, repoussé les limites et refusé d'être vaincue. J'ai lutté contre le doute, accepté l'inconfort et en suis ressortie plus forte que jamais. J'ai fait preuve de résilience, de courage et d'une détermination inébranlable à réussir. Merci à moi d'avoir cru en mes rêves, d'avoir lutté contre les échecs et de ne jamais me contenter de moins que le meilleur. J'ai prouvé que je suis capable d'atteindre la grandeur et je ne cesserai pas d'avancer. Ce voyage a été brut, intense et transformateur, et je suis fière de que je suis devenue Avec un amour-propre féroce et une détermination implacable
À tous, je vous adresse mes remerciements les plus sincères.

Blel Raaboub

Mon Dieu, ma nuit n'est douce qu'en te remerciant, et ma journée n'est douce qu'en t'obéissant.. Et les moments ne sont doux qu'en te souvenant, et l'au-delà n'est doux qu'en t'obéissant.

Celui qui dit : « Je suis à elle » l'aura… et je suis à elle. Et si elle refuse, contre sa volonté, je l'amènerai.

A celui qui a décoré mon nom des plus beaux titres, à celui qui m'a soutenu sans limites et m'a donné gratuitement, à celui qui m'a appris que le monde est un combat et que son arme est le savoir et le savoir, mon premier soutien sur mon chemin, ma force et mon refuge après Dieu, ma fierté et mon orgueil : **mon père.**

À celle à qui Dieu a placé le paradis sous ses pieds, dont le cœur m'a embrassé entre ses mains et m'a facilité l'adversité par son soutien, au cœur compatissant et à la bougie qui était
Pour moi dans les nuits noires, le secret de ma force et de ma réussite est mon paradis : **ma mère.**

Aux anges avec lesquels Dieu m'a béni et a renforcé mes côtes pour que je puisse connaître à travers eux le goût de la belle vie, ces anges qui ont changé les concepts d'amour, d'amitié et de soutien dans ma vie : **mes sœurs**.

A celui qui m'a soutenu et soutenu depuis le début de mon parcours universitaire, et qui a été un refuge pour résoudre tous mes problèmes sans me lasser ni me lasser. Il était comme mon père et ma deuxième famille : **Ahaimad Mastafa et sa femme (Najla).**

À mon collègue qui partage avec moi ces recherches, à celui avec qui j'ai vécu les deux plus belles années à l'institut et qui m'a soulagé de la fatigue et des rigueurs des études : **Abdel Hakimi Manal.**

À tous mes amis bien-aimés, chacun en son nom, qui m'ont soulagé de l'épreuve de cinq ans, vous avez donc été pour moi votre meilleur ami et votre meilleur soutien.

En fin de compte, je me remercie pour ma patience, ma détermination et ma persévérance, en espérant que Dieu Tout-Puissant me bénéficiera de ce qu'il m'a appris, m'apprendra ce que je ne connais pas et fera de lui une excuse pour moi.

Sommaire

Résumé

Remerciement

Sommaire3

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale ……01

Chapitre 01 : La technique d'assemblage collé ……02

1. Introduction ……03

2. Historique du collage ……04

2.1. *Le précurseur du collage : "Le papier peint" de Braque :*

2.2. L'évolution du collage vers le Pop Art au cours de la seconde moitié du XXe siècle : ……06

2.3. Collages dans le monde animal ……08

2.3. Le collage au XX^{e} siècle ……10

3. Colles et adhésifs ……12

3.1. Définition ……12

3.1.1. Colles ……12

3.1.2. adhésifs ……12

3.2. MECANISMES DU COLLAGE ……12

3.2.1. L'ancrage mécanique ……12

3.2.2. Théorie thermodynamique *(ou théorie du mouillage)* ……13

3.2.3. Le modèle électrostatique ……15

3.2.4. La liaison chimique ……15

3.1.5. L'inter-diffusion. ……16

3.1.6. Principe des couches de faible cohésion. ……16

3.3. Les différents types de colle. ……18

3.3.1. Les adhésifs naturels. ……19

3.3.1.1. Les colle d'origine végétale. ……19

3.3.1.1.1. Parmi les gommes naturelles. ……20

3.3.1.2. Les colles d'origine animale……20
3.3.1.3. Les adhésifs d'origine synthétique……21
3.3.1.3.1. Les polymères adhésifs à application physique…21
3.3.1.3.2. Les AMOP liquides……21
3.3.1.4. Les Adhésifs à Mise en Œuvre Chimique……22
4. Traitement de surface avant collage……22
4.1. Traitements chimiques……22
4.1.1. Le dégraissage……23
4.1.1.1. Le dégraissage aux solvants ……23
4.1.1.1.1. Le dégraissage par saponification……23
4.1.1.1.2. Le dégraissage par émulsification……23
4.1.2. Le décapage……23
4.1.3. Les conversions……24
4.2. Les traitements mécaniques……24
4.2.1. Abrasion légère……24
4.2.2. Abrasion par projection de particules……25
4.3. Les traitements physiques……25
4.3.1. Le flammage……25
4.3.2. Les traitements Corona……25
4.3.3. Le traitement par plasma……26
5. Domain d'utilisation de collage……26
5.1. En médecine……26
5.1.1. Les adhésifs à base de fibrine……26
5.1.2. Adhésifs au collagène……26
5.1.3. Adhésifs à base de gélatine……27
5.1.3.1. Adhésifs à base de chitosane……27
5.1.3.2. Adhésifs à base de sulfate de chondroïtine……27
5.1.4. Adhésifs synthétiques……27
5.1.4.1. Adhésifs cyanoacrylates……27

5.1.4.2. Adhésifs à base de polyéthylène glycol PEG……27
5.1.4.3. Adhésifs à base d'uréthane……27
5.1.5. Adhésifs biomimétiques……28
5.2. le domaine de la construction……28
5.2.1. Collages préfabriqués……28
5.2.2. Collages structuraux à hautes performances……28
5.3. dans l'industrie automobile……28
5.3.1. Assemblage des panneaux de carrosserie……29
5.3.2. Fixation de composants électroniques et mécaniques……29
5.3.3. Fixation de vitres……29
5.3.4. Collage des composants électroniques et mécaniques……29
5.3.5. *Réparation et rénovation*……29
5.4. Le domaine électronique……29
5.4.1. Collage de composants électroniques……29
5.4.2. Collage de données ou de signaux……29
5.4.3. Collage de circuits intégrés……29
5.4.4. Collage d'éléments décoratifs……30
5.4.5. Collage de fils électriques……30
6. Les avantages est les inconvénients du collage……30
6.1. Les avantages ……30
6.2. les inconvénients……32
7. conclusion……33
Chapitre 02 : l'optimisation numérique……35
1.Introduction……36
2.Historique de l'optimisation numérique……37
3. les méthodes de l'optimisation numérique……39
3.1. La Méthode de Gradient (descente) ……39
3.1. Méthodes de l'algorithme de la ligne d'arrêt……40
3.1. La programmation par contraintes……40

3.1. Méthode basée sur les barrières……41

3.1. Méthodes stochastiques……41

3.1. Méthodes évolutives……42

4. L'optimisation numérique des joints collés……43

4.1. la modélisation mathématique……43

4.1.1. Définition des paramètres du modèle……43

4.1.2. Choix de l'approche de modélisation……43

4.1.3. Développement des équations ……43

4.1.4. Exemple de modèle……44

4.1.5. Validation du modèle……44

4.2. Maximisation de la résistance mécanique du joint……44

4.3. Définition des contraintes……45

4.4. Sélection de la méthode d'optimisation……46

4.5. Résolution de l'optimisation……47

5. Généralité sur logiciel d'expérience (MODDE) ……49

5.1. L'objectif de logiciel d'expérience (MODDE) ……50

5.2.Fonctionnalités et capacités de MODDE 5 pour l'Analyse Statique et l'Optimisation……50

5.2.1. Analyse multivariée……50

5.2.2. Conception de procédés……50

5.2.3. Optimisation……51

5.2.4. Validation de processus……51

5.2.5. Visualisation et modélisation……52

5.2.6. Intégration avec d'autres systèmes……52

6. Logiciel ABAQUS……52

6.1. Définition……52

6.2. Description des possibilités d'ABAQUS……53

6.2.1. Les unités……54

6.2.2. Les principales fonctionnalités et capacités d'Abaqus……54

6.2.2.1. Analyse structurale……54

6.2.2.2. L'analyse dynamique……55

6.2.2.3. Analyse de durabilité……55

6.2.2.4. Analyse cinématique et cinétique……55

6.2.2.5. Modélisation des matériaux……55

7. Conclusion……56

Chapitre 03 : la méthode des éléments finis……57

1.Introduction……58

2.Historique……58

3.Définition……59

4. Principe de la méthode des éléments finis……60

5. Caractéristique d'un élément finis……61

5.1. Attributs d'un élément fini ……61

5.2. Matériau……61

5.3. Nœuds……61

5.4. Degrés de liberté……61

5.5. Forces nodales……61

6. Représentation des éléments finis……61

6.1. Les éléments unidimensionnels……61

6.2. Les éléments bidimensionnels……61

6.3. Les éléments tridimensionnels……61

6.4. Les éléments axisymétriques……62

7. Choix des éléments finis……63

8. Qualité d'un élément fini……63

9. Rôle crucial de méthode des éléments finis dans l'optimisation des structures…63

9.1. Modélisation précise……63

9.2. Analyse des performances……64

9.3. Conception Optimisée……65

9.4. Réduction du poids et du coût……65

9.5. Amélioration de la durée de vie et de la fiabilité……65

9.6. Test et validation……65

9.7. Innovation et développement de nouveaux matériaux……65

10. L'utilisation omniprésente des éléments finis dans le paysage scientifique et ingénierie……65

10.1. Ingénierie structurale……65

10.2. Electromagnétisme……65

10.3. Mécanique des fluides……66

10.4. Acoustique……66

10.5. Géologie et géophysique……66

10.6. Biomédecine……66

10.7. Sciences environnementales……67

10.8. Design et optimisation……67

10.9. Industrie aérospatiale……67

10.10. Énergie renouvelable……67

11. Conclusion……67

Chapitre 04 : résultats et discussions……68

1. introduction……69

2. Module……70

3.1. Module PART……71

3.2. Module PROPERTY……73

3.3. Module ASSEMBLY……76

3.4. Module STEP……77

3.5. Module Interaction……78

3.6. Module LOAD……80

3.7. Module MESH……82

3.8. Module JOB……84

3.9. Module Visualization……85

4. Les résultats de simulation……86

4.1 Première expérience……86

4.1.1 Simulation de première expérience……86

4.1.2 Les résultats de simulation…….87

4.2. Deuxième expérience……90

4.2.1 Simulation de deuxième expérience……90

4.2.2 Les résultats de simulation……92

5.Analyse des contraintes adhésives……93

6. Conclusion générale ……101

Référence bibliographique

Liste des figures

Figure1. Les déférentes catégories d'assemblages

Figure2. Un collage – ou "papier collé" – de Georges Braque

Figure3. Pablo Picasso, Nature morte à la chaise cannée, 1912

Figure4. Modenschau" (défilé de mode), collage de l'artiste allemande Hannah Höch, 1935

Figure5. "Signes" de Robert Rauschenberg

Figure 6. Photocollage de David Hockney datant de 1986

Figure 7. Les êtres imaginaires de Johanna Goodman

Figure 8. Photomosaïque de la série Endless Summer de CharisTsevis.

Figure 9. Collages de l'artiste kényane WangechiMutu

Figure10. Colonie de balanes collées sur une coquille de moule .

Figure11. Éléments de faucilles trouvés sur le site Mehrgarth dans la plaine de Kachi au Béloutchistan vieux de 5300 ans

Figure12. Fabrication d'un pneumatique en 1905 dans l'usine Metzeler située près de Munich

Figure13. Vitrage de la Pyramide du Louvre jointoyé avec une mastic silicone

Figure14. Modèle de l'ancrage mécanique. La colle doit mouiller parfaitement la surface du solide (a) afin d'éviter le piégeage (b) de bulles d'air

Figure15. Équilibre d'une goutte sur un substrat. γ_{SL}, γ_{SV} et γ_{LV}, représentent respectivement les énergies inter-faciales solide - liquide, solide - vapeur du liquide et liquide - vapeur. À l'équilibre, la goutte prend la forme qui minimise l'énergie du système et l'angle θ traduit cet équilibre

Figure16. Mouillage des substrats

Figure17. Mouillage des substrats encollés

Figure18. Représentation schématique du modèle électrostatique

Figure19. Interdiffusion macromoléculaire

Figure20. Couche de faible cohésion du modèle du Bikerman.

Figure21. Décomposition de la procédure de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion

Figure22. Schéma de présentation d'un assemblage par collage

Figure23. Classification des adhésifs par origine

Figure24. partie incriminée de la façade de l'Opéra Bastille à Paris (a) et vue agrandie du filet de protection (b)
Figure25. principe du plus court chemin
Figure26. Illustration de logarithme de gardien

Figure27. Le MODDE d'expérience (MODDE 5.0)

Figure28. Types d'éléments
Figure29. Maillages

Figure30. Types des éléments finis

Figure31. Centre d'usinage vertical

Figure32. Obtenir les équations algébriques pour chaque élement

Figure34. Les 2 modèles à réaliser

Figure35. désignation de la plaque

Figure36. Création de la plaque

Figure37. Désignation de l'épaisseur

Figure38. Confirmation de l'extrusio.

Figure39.: part copy plaque 1

Figure40. Confirmation de l'extrusion

Figure41. Désignation de la plaque

Figure42. Création de la plaque

Figure43. Désignation de l'épaisseur

Figure44. Confirmation de l'extrusion.

Figure45. Le module property.

Figure46. Définition les propriétés du matériau.

Figure47. Sélection de la section.

Figure48. Définition la section de la plaque.

Figure49. Sélection la pièce entière.

Figure50. Choix de section.

Figure51. Affectation la section.

Figure52. Sélection la pièce entière.

Figure53. Choix de section.

Figure54. Affectation la section.

Figure55. Sélection la pièce entière.

Figure56. Choix de section.

Figure57. Affecation la section.

Figure58. Module ASSEMBLY.

Figure59. Créer une instance.

Figure60. Création de step.

Figure61. Create display groupe.

Figure62. Create display groupe (elements).

Figure63. Creat contraint T1 et .Choisir le maître surface (plaque1) de la plaque.

Figure64. La modification de contrainte (t1).et. Choisir le maître surface (la colle).

Figure65. Creat contraint T1 .

Figure66. Choisir l'esclave surface (la plaque 2) puis La modification de contrainte (t2).

Figure67. Résultat d'interaction.

Figure68. Création de l'encastrement.

Figure69. Sélection la face à encastrée.

Figure70. Affectation de l'encastrement.

Figure71. Création de l'encastrement.

Figure72. Sélection la face de traction.

Figure73. Affectation de champ Magnitude.

Figure74. Module MESH.

Figure75.

Figure76. Affectation la taille des éléments.

Figure77. Affectation le nombre des éléments.

Figure78. Confirmation de maillage.

Figure79. La première création de job.

Figure80. La deuxième création de job.

Figure81. Affichage le message de réussite**.**

Figure82. Visualisation les résultats Modele 01.

Figure83. Visualisation les résultats Modele 02.

Figure84. Table des données (entrées).

Figure85. Table des données (sorties).

Figure86. Table des données (entrées-sorties) de 17 cas.

Figure87. Diagramme pour coefficient de l'optimisation de cisaillement.

Figure88. Diagramme pour coefficient de l'optimisation de pelage.

Figure89. Paramétres des données (entrées).

Figure90. Choix d'optimisation maximiser les sorties.

Figure91. Résultat de maximisation.

Figure92. Table d'extraction de la formule de l'optimisation du cisaillement collage a simple recouvrement.

Figure93. Table d'extraction de la formule de l'optimisation du pelage du collage a simple recouvrement.

Figure94. Table des données (entrées).

Figure95. Table des données (sorties).

Figure96. Table des données (entrées-sorties) de 17 cas.

Figure97. Diagramme pour coefficient de l'optimisation de cisaillement.

Figure98. Diagramme pour coefficient de l'optimisation de pelage.

Figure99. Choix des propriétés des entrées.

Figure100. Choix d'optimisation (maximiser).

Figure101. Résultat de maximisation des entrées.

Figure102. Table d’extraction de la formule de l’optimisation du cisaillement collage bord à bord avec couvre joint.

Figure103. Table d’extraction de la formule de l’optimisation du pelage collage bord à bord avec couvre joint.

I.1. Introduction Générale :

L'industrie doit faire face au remplacement des structures ou des composants présentant des plaques colées diverses. En raison des contraintes de sécurité qui amènent à utiliser les plaques dans de bonnes conditions de fiabilité, maîtrisées aussi longtemps que possible, des inspections sont périodiquement mises en place pour détecter les défauts ou les dommages. Cependant le coût pour changer des parties importantes de la structure ou de grands composants, tels que la voilure, est très souvent rédhibitoire. Elle doit donc parfois mettre les plaques concernées par cette défaillance hors service et retarder sa réparation. Dans ce cas en utilise l'optimisation pour prévoir des points optimale.

Dans le premier chapitre je vais vous présenter les techniques d'assemblages collé.

Le deuxième chapitre je vous présenter la théorie d'optimisation numérique.

Dans un troisième chapitre en parle sur la méthode des éléments finis.

Le quatrième chapitre est une étude numérique et simulation avec logiciel ABAQUS d'un essai de traction plus une optimisation numérique par logiciel Modde 5.

CHAPITRE 01

La technique d’assemblage collé

1. Introduction :

L'assemblage, entrepris dès la Préhistoire, consiste en l'opération élémentaire de faire en sorte que deux objets soient rendus solidaires. Cela implique la réalisation de formes stables obtenues par la réunion appropriée de plusieurs autres formes réalisées indépendamment et par des procédés qui peuvent être différents Les différentes technologies d'assemblage peuvent être distinguées en fonction de leur possibilité de démontrabilité ou non, un assemblage temporaire étant également considéré comme un

Assemblage démontable tandis qu'un assemblage non démontable étant composé d'au moins deux

Eléments ne pouvant être séparés sans détérioration de l'un de ses deux éléments. On peut dénombrer plusieurs types d'assemblages tel que

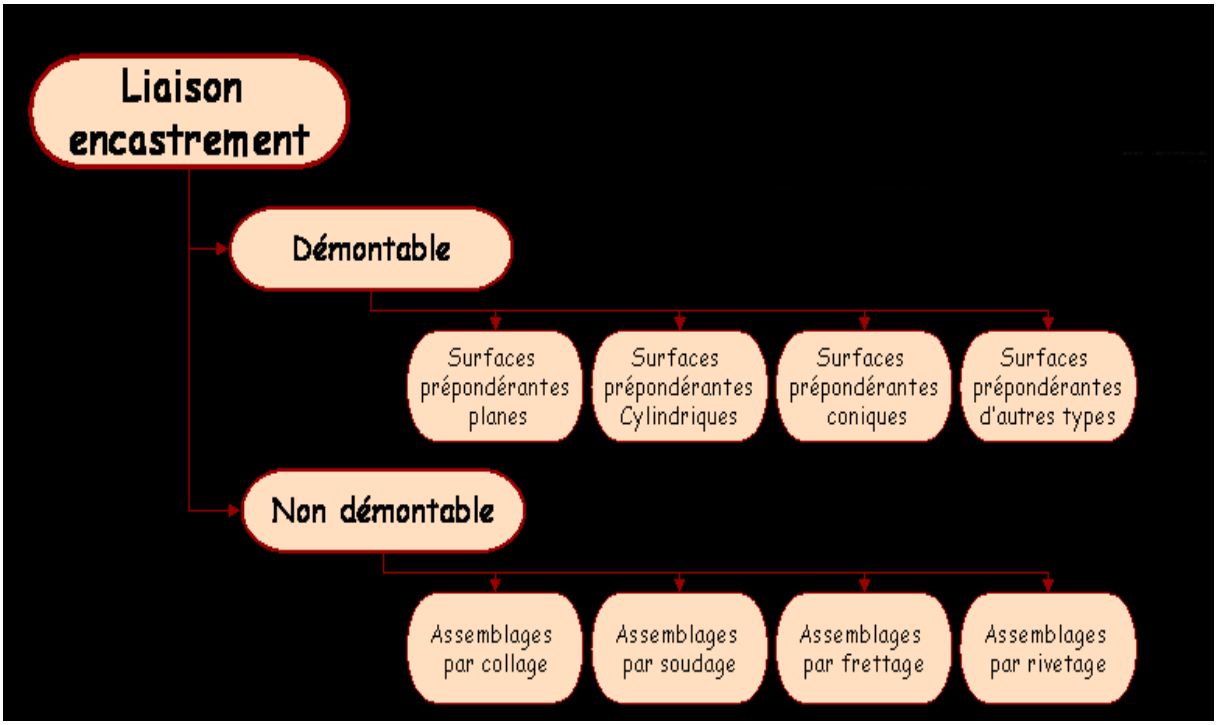


Figure1. Les déférentes catégories d'assemblages.

L'assemblage par adhésion :Les colles, un élément essentiel dans l'évolution des techniques d'assemblage, ont une longue histoire remontant à divers matériaux. De nos jours, elles sont employées pour fusionner des surfaces, garantir des joints étanches, et même pour lier des particules ou des fibres dans la fabrication de matériaux composites. Il convient également de mentionner la soudure, souvent confondue avec le collage, qui initialement se limitait aux métaux mais a graduellement remplacé les rivets et boulons dans certaines applications. En ce qui concerne le collage, l'assemblage par adhésion directe entre matériaux se produit rarement, sauf lorsque les surfaces à assembler sont totalement lisses et propres, offrant un contact intime à très faible distance. Cette méthode n'est donc pas adaptée pour des matériaux présentant une surface rugueuse, où la zone de contact serait significativement réduite. L'application d'une colle (ou adhésif) entre les deux matériaux crée un film assurant un contact intermédiaire et intime, facilitant ainsi l'assemblage de surfaces plus complexes.

2. Historique du collage :

2.1. Le précurseur du collage : "Le papier peint" de Braque :

Le collage est un style artistique relativement moderne, attribué à Georges Braque et Pablo Picasso au début du XXe siècle. Certains prétendent que la première collection d'art était la « Nature morte BACH » de Georges Braque, créée en 1912

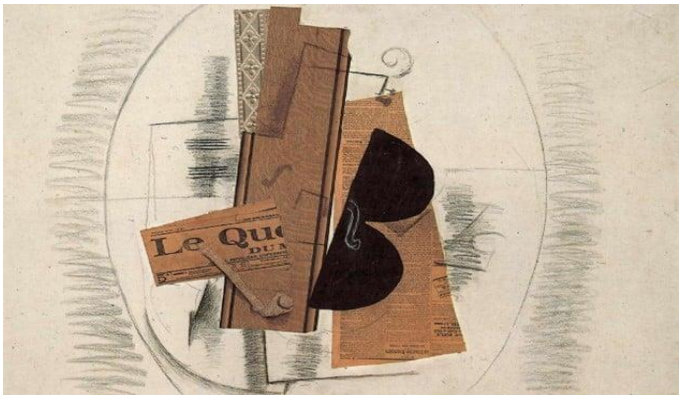


Figure 1 :Un collage – ou "papier collé" – de Georges Braque.

et inspirée d'un magasin de papiers peints d'Avignon. Cette nouvelle forme d'art, connue à l'époque sous le nom de « collage de papier », marque un tournant radical dans le collage.

Pablo Picasso a également repoussé les limites du collage en utilisant plusieurs couches de papier et en incorporant dans ses œuvres des éléments de la culture de masse tels que des partitions de musique et des journaux. Cette utilisation d’éléments de la vie quotidienne a inspiré de nombreux autres peintres d’avant-garde à expérimenter le collage, créant ainsi un impact considérable sur le monde de l’art.

Figure2Pablo Picasso, Nature morte à la chaise cannée, 1912.

Le collage est un processus créatif puissant qui a été utilisé par les peintres surréalistes. En février 1938, les artistes surréalistes André Breton, Jacqueline Lamba et Yves Tanguy ont joué au jeu du cadavre exquis, un processus créatif ludique où les artistes ajoutent chacun un mot ou un découpage à une phrase ou une image sans voir ce que les autres ont ajouté. Le collage a également été utilisé à des fins de provocation politique par des artistes avant-gardistes, telle que l'artiste allemande Hannah Höch, une des rares femmes dadaïstes, qui a produit des œuvres remarquables en utilisant cette technique.

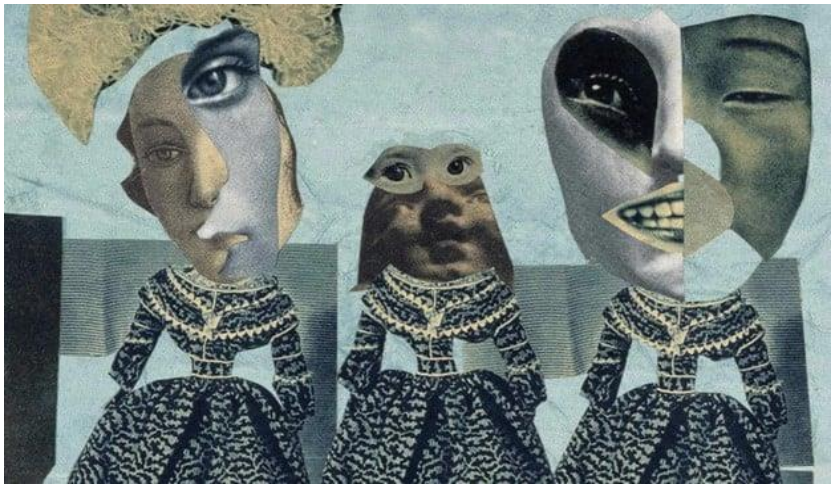


Figure 3 :"Modenschau" (défilé de mode), collage de l'artiste

2.2. L'évolution du collage vers le Pop Art au cours de la seconde moitié du XXe siècle :

Après la Seconde Guerre mondiale, le collage a connu une nouvelle renaissance, attirant l'attention des artistes du mouvement Pop Art. Ce courant artistique se caractérisait par l'utilisation d'images et d'objets du quotidien, et le collage s'est avéré un outil idéal pour explorer cette esthétique. Le peintre américain Robert Rauschenberg s'est distingué par son approche novatrice. Il collectait des objets fascinants dans les rues de New York, les intégrant ensuite dans ses créations en atelier.

Figure4 : "Signes" de Robert Rauschenberg

Dans les années 80, David Hockney, figure majeure du Pop Art britannique, a été l'un des pionniers du collage photographique. En découpant et superposant des images, il a créé des œuvres emblématiques.

Figure 5 ;Photocollage de David Hockney datant de 1986

Le collage a également conquis le domaine cinématographique, devenant une technique unique. Les animations en collage de Terry Gilliam pour les Monty Python, avec leur humour absurde et surréaliste, en sont un exemple frappant.

L'innovation s'est poursuivie avec des artistes comme Lorenzo Petrantoni, dont les collages typographiques explorent les jeux de mots et les messages subliminaux, et Johanna Goodman, qui a créé des robes excentriques à partir de collages d'images de paysages, de rochers et même de trains.

Figure 6: Les êtres imaginaires de Johanna Goodman Goodman

En Grèce, CharisTsevis a utilisé des images et publicités des années 50 et 60 pour créer des œuvres empreintes de nostalgie, souvent sous forme de photomosaïques. Julien Pacaud a quant à lui produit des collages numériques hypnotiques, mélangeant images rétro, art géométrique et paysages surréalistes. Deborah Stevenson a apporté une touche d'humour à la technique en combinant des œuvres d'art célèbres avec des fragments d'images quotidiennes et commerciales.

Figure 7 : Photomosaïque de la série EndlessSummer de CharisTsevis.

Enfin, l'artiste contemporaine kényane WangechiMutu utilise le collage pour créer des visages de femmes mystérieux, combinant des signes, des langues et des désirs contrastés. Ses œuvres explorent de manière captivante l'identité culturelle, la mode, la politique et l'histoire coloniale.

Figure 8 :Collages de l'artiste kényane WangechiMutu.

Le collage, loin d'être une technique statique, s'est constamment réinventé au fil du temps, s'adaptant aux nouvelles technologies et aux mouvements artistiques, et continuant à inspirer les artistes contemporains.

2.3.Collages dans le monde animal

Avant l'apparition des humains, certains animaux développaient des techniques d'adhésion avancées pour assurer leur survie.

Par exemple, les araignées recouvrent des fils spécifiques dans leurs toiles pour attraper les insectes, tandis que les moules utilisent une protéine spéciale appelée byssus pour s'attacher aux rochers dans l'environnement aquatique salé.

on retrouve parmi les invertébrés marins adeptes du collage, les balanes Ces petits crustacés pyramidaux d'à peine 2-3 millimètres de hauteur se fixent sur les coquilles de moules et d'huîtres, les rochers et, au grand dam des plaisanciers, sur la coque des bateaux. Leur secret ? Un ciment issu de la polymérisation d'éléments moléculaires produite par une enzyme, la phénol-oxydase, sécrétée par des glandes spécialisées.

Ces exemples nous montrent que le collage n'est pas une création exclusivement humaine, mais plutôt une compétence qui existe dans la nature depuis des temps immémoriaux, utilisée pour assurer la survie et l'adaptation à l'environnement.

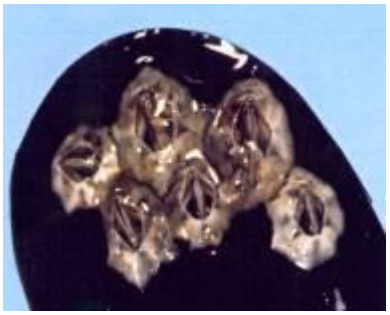


Figure 9 :Colonie de balanes collées sur une coquille de moule

Il y a environ 3500 ans avant le début de l'ère chrétienne, dans des régions telles que la Cisjordanie et la Basse Égypte, les premières traces de l'utilisation par l'Homme de substances visqueuses et plastiques pour conférer aux matériaux naturels des propriétés adhésives ont été observées. Des outils semblables à des faucilles, fabriqués en bois et munis d'éclats de silex maintenus par du bitume, ont été découverts. Dans les environnements désertiques, le sel a souvent endommagé les manches en bois, laissant parfois uniquement les éclats de silex collés au bitume. Heureusement, dans les zones sablonneuses, des empreintes de manches ont été préservées, permettant ainsi d'identifier ces éléments comme des parties de faucilles.

Figure 10 :Éléments de faucilles trouvés sur le site Mehrgarth dans la plaine de Kachi au Béloutchistan vieux de 5300 ans.

Au Proche-Orient, le bitume a été la première colle utilisée par l'homme depuis des temps immémoriaux, provenant de sources minérales et fossiles, telles que le pétrole, affleurant dans les bassins sédimentaires. En Occident, la première colle semble avoir été la bétuline, également connue sous le nom de brai de bouleau. Ce dernier est obtenu en calcinant à l'étouffée l'écorce de l'arbre, une méthode qui perdure encore de nos jours en Finlande. Des analyses récentes, notamment par chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse, effectuées sur des agrégats sombres et informes découverts sur le site paléolithique de Königsaue en Allemagne, ont révélé la présence de brai de bouleau. Il est probablement utilisé pour mancher des pointes de flèches, réparer des poteries endommagées et les rendre imperméables aux liquides.

À Auvernier, près du lac de Neuchâtel en Suisse, dans le site de la culture de Cortaillod, une lame de silex d'environ 3700 ans avant notre ère a été découverte. Elle était utilisée dans un couteau à moissonner, avec la lame coincée dans une rainure du manche en bois d'if. Pour assurer la fixation, les artisans de l'époque ont utilisé de la bétuline, obtenue par calcination de l'écorce de bouleau. Cela démontre une ingéniosité ancienne dans l'utilisation de matériaux locaux pour créer des outils fonctionnels.

2.4.Le collage au XX^{e} siècle

L'article aborde l'évolution des colles au fil du temps. Au début du 20e siècle, la gélatine extraite en 1900 fut utilisée dans le collage du papier et du carton pour la reliure. L'industrie du contreplaqué a adopté le silicate de soude en 1910. Dans les années 1920, les colles industrielles à base de caoutchouc naturel, appelées "dissolutions," ont émergé, principalement utilisées dans la fabrication de pneumatiques par collage par contact.

Figure 11 : Fabrication d'un pneumatique en 1905 dans l'usine Metzeler située près de Munich.

En 1930.La révolution dans le domaine des adhésifs est venue suite à la fabrication de résines synthétiques et au développement de la chimie des macromolécules.

. après un ans , Du Pont de Nemours a industrialisé le polychloroprène (Néoprène®), une colle de luxe. Les silicones ont ensuite été introduites dans les années 1930, avec des applications industrielles aux États-Unisdès 1937. Ils sont devenus des choix privilégiés pour le collage des matériaux à base de silice, utilisés notamment dans le secteur du bâtiment.

Dans les années 1940, le collage métal-métal a émergé avec le développement des polyuréthanes et des polyisocyanates. Cela a conduit à la création de colles structurales, révolutionnant l'industrie. Après la Seconde Guerre mondiale, le collage est passé d'une pratique empirique à une science avec l'étude des mécanismes d'adhésion, du vieillissement et de la durée de vie des assemblages collés. De nouveaux produits, tels que les cyanoacrylates, ont vu le jour.

Figure 12 : Vitrage de la Pyramide du Louvre jointoyé avec un mastic silicone.

Dans les années 1950, les colles anaérobies, comme celles développées par Loctite®, ont été introduites pour le blocage des vis, la fixation, et l'étanchéité. Les années 1960 ont vu le développement des polyimides, résistants à des températures élevées, utilisés notamment pour les boucliers thermiques des sondes spatiales. Des colles biocompatibles ont également été développées dans les années 1960 pour des applications médicales, comme la fixation de prothèses en chirurgie orthopédique et en orthodontie.

3.Colles et adhésifs :

3.1. Définition :

3.1.1. Une colle :

est en effet un produit chimique conçu spécifiquement pour assembler deux matériaux. Liquideou solide Elle est généralement appliquée à l'état liquide sur les surfaces des matériaux à assembler, où elle adhère grâce à divers mécanismes physico-chimiques. Une différence existeentre les termes "adhésion" et "adhérence". En effet, on peut définir l'adhésion concerne la formation de l'interface entre les matériaux, tandis que l'adhérence mesure la résistance à la rupture de l'assemblage.

Les colles, qu'elles soient traditionnelles comme celles à base d'amidon, de dextrines ou d'origine animale (caséine), ou qu'elles soient synthétiques classiques telles que les colles vinyliques, à base de caoutchouc ou de latex, sont désignées comme telles.

L'adhésion et la cohésion finale. Ces deux propriétés des colles et adhésifs sont cruciaux pour déterminer l'efficacité et la performance d'un joint collé.

3.1.2. L'adhésion :

L'adhésion est une liaison interfaciale. Les forces de liaisons peuvent résulter de diverses interactions physiques et chimiques,. L'adhésion dépend de la nature de l'adhésif, de la nature des substrats (plus ou moins faciles à coller selon l'énergie de surface) et du temps (montée en performance de l'adhésif)Le phénomène d'adhésion fait intervenir plusieurs facteurs.Il ya Les cas les colles et adhésifs sont des substances initialement pâteuses ou liquides qui sont appliquées sur les surfaces à assembler. Pour créer une liaison forte. L'adhésif doit alors s'Dans tous accrocher sur ces matériaux, nécessitant de mouiller les surfaces

3.2.MECANISMES DU COLLAGE :

3.2.1. L'ancrage mécanique :

La théorie de l'ancrage mécanique, est la théorie de l'adhésion la plus ancienne développée par J.W. McBain et D.G. Hopkins (1925), .Elle considèrent que la présence d'aspérités et l'origine de l'adhésion.

Et cette existence d'aspérités présentes à la surface du substrat, permet un ancrage physique et mécanique entre les deux surfaces polymères, Une fois que la colle liquide pénètre parcapillarité dans les pores et entre les aspérités des surfaces en contact, elle se solidifie et forme un ancrage mécanique (figure). On peut expliquer la forte adhésion observée et l'augmentation simultanée du nombre de liaisons inter-faciales par l'augmentation de la surface réelle de contact (a) et de la résistance au cisaillement du joint dans le plan de l'interface. Il est nécessaire, comme on le sait maintenant, que la colle "mouille" de manière optimale les surfaces à regrouper. Il est primordial d'éviter de capturer des bulles d'air (b), qui sont des points de départ de fissures susceptibles de détériorer l'assemblage lié.

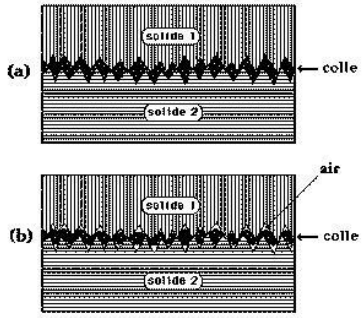


Figure 13 : Modèle de l'ancrage mécanique. La colle doit mouiller parfaitement la surface du solide (a) afin d'éviter le piégeage (b) de bulles d'air.

3.2.

Sharpe et Schonborn (1963), proposer la théorie thermodynamique que indique que, l'adhésion est attribuée aux forces intermoléculaires existant à l'interface. Cette théorie s'appuie en effet sur la formation de liaisons physiques à faible distance et faiblement énergétiques, de type Van der Waals. Pour que le phénomène d'absorption se réalise, le phénomène de mouillage est nécessaire. Il représente la

Capacité d'un matériau à s'étaler à la surface d'un autre. Cette théorie est ainsi importante à considérer puisque dans la plupart des cas, les colles étant mises en œuvre à l'état liquide, il faut étudier leur capacité d'étalement sur le substrat. Le phénomène demouillage traduit ainsil'aptitude de l'adhésif, dans le cadre du collage, à créer des liaisons Van der Waals de l'ordre d'une dizaine de kJ/mole.

Le mouillage correspond à la diffusion d'une goutte de liquide sur une surface solide. L'angle de contact θ entre la goutte et la surface solide est responsable de cela et est influencé par l'équilibre des énergies interfaciales entre le solide et le liquide. Cet équilibre est exprimé par l'équation de Thomas Young γ_{SL} ($\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV}\cos\theta$)), où γSL est l'énergie interfaciale entre le solide et le liquide, γLV est l'énergie interfaciale entre le liquide et sa vapeur, et γSV est l'énergie interfaciale entre le solide et la vapeur du liquide. Un mouillage idéal est défini par θ = 0.

Il est essentiel que la goutte de liquide s'étale de manière adéquate (θ petit) afin d'obtenir une adhésion adéquate dans un assemblage, ce qui suppose une tension superficielle du liquide inférieure

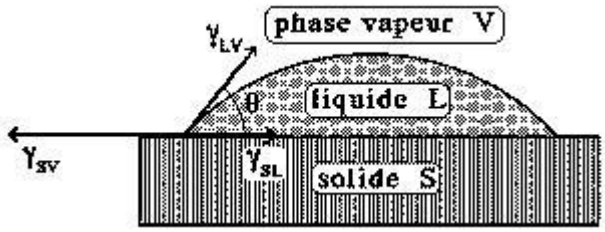


Figure 14 :Équilibre d'une goutte sur un substrat. γ_{SL}, γ_{SV} et γ_{LV}, représentent respectivement les énergies inter-faciales solide - liquide, solide - vapeur du liquide et liquide - vapeur. À l'équilibre, la goutte prend la forme qui minimise l'énergie du système et l'angle θ traduit cet

Chaque liquide mouille plus ou moins un solide donné et on a toujours θ > 0° et θ < 180°(figure 15). La mouillabilité dépend donc à la fois de la nature de la colle et des substrats (figure 16)

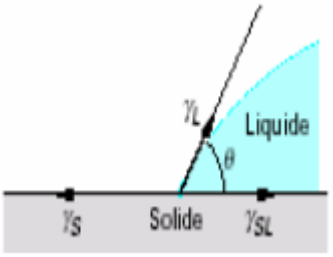


Figure 15: Mouillage des substrats

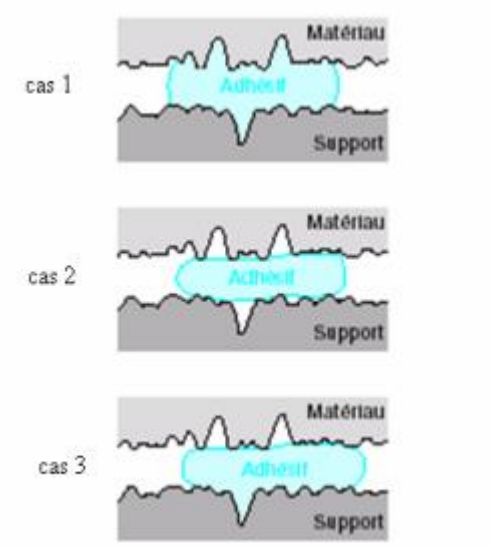


Figure 16 : Mouillage des substrats encollés

Il est donc important de noter que si un solide A est capable de mouiller, à l'état fondu, un solide B, le solide B, à l'état fondu, ne mouille pas le solide A. C'est justement ce qu'on voit quand on veut faire un assemblage entre une résine époxyde et le polyéthylène. Après avoir été déposé sur une surface de résine époxy, le polyéthylène fondu assure une adhésion solide. Par contre, l'adhésion n'est pas produite lorsque la résine époxyde (γ_B = 44 mJ.m^{-2}) est polymérisée sur une surface de polyéthylène (γ_A = 31 mJ.m^{-2}).

3.2.3. Le modèle électrostatique :

À partir de 1948, Deryagin et Krotova, de l'École russe, ont développé le modèle électrostatique (figure) pour des matériaux de natures différentes, chronologiquement, à la suite de l'observation d'émissions d'électrons rapides lorsqu'un contact est rompu sous vide. La théorie est basée sur le mouvement de charges électriques lors du contact, ce qui conduit habituellement à la formation d'une double couche électrique àl'interface, à l'instar des deux plaques d'un condensateur plan. (1/2)L'énergie de séparation est représentée par ρ2h/ε, où ρ représente la densité superficielle de charge, h représente la distance entre les deux plans du condensateur et ε représente le constant diélectrique du milieu. Le calcul de la distance h est établi par la loi de Paschen qui lie le potentiel de décharge électrique à la pression du gaz dans lequel se produit cette décharge. Ce modèle, est applicable qu'à des solides incompatibles, comme les assemblages verre-polymère et métal-polymère car il basé sur les attractions électrostatiques

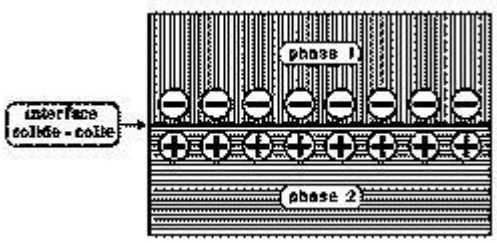


Figure 17 :. Représentation schématique du modèle électrostatique.

3.2.4. La liaison chimique :

Lorsqu'il y a des réactions chimiques à l'interface, ce qui crée des liaisons solides comme des liaisons covalentes ou ioniques, cela renforce considérablement l'assemblage et le rend contraint à la rupture. On retrouve fréquemment ce processus, qui se produit en utilisant des primaires d'adhésion tels que les silanes, sous le nom de modèle chimique d'adhésion.On peut prendre l'exemple des

pneumatiques dans le domaine de l'automobile : les fils d'acier utilisés dans la carcasse et la bande de roulement des pneus sont fréquemment recouverts de laiton.
La formation de composés tels que des sulfures et des polysulfures de cuivre est responsable de l'adhérence de ces fils d'acier au caoutchouc du pneu. Le cuivre présent dans le laiton et le soufre utilisés dans la vulcanisation du caoutchouc constituent ces composés. L'adhérence entre les matériaux est renforcée par ces réactions chimiques, ce qui contribue à leur résistance à la rupture**.**

3.2.5. L'inter-diffusion :

L'idée générale du modèle de l'inter-diffusion est que, dans les assemblages polymère-polymère, les chaînes macromoléculaires des deux matériaux en contact diffusent à travers l'interface, réalisant ainsi la cohésion de l'ensemble. Ce modèle, proposé par Voyustkii de l'École russe dans les années 1950, l'idée ici est que les chaînesmacromoléculaires des matériaux en contact (colle et substrat àchaque bord du joint), vont diffuser à l'interface selon un mécanisme, appelé reptation, cetteinter diffusion assure la cohésion de l'assemblage grâce à la formation d'une interphase entrela colle et substrat (Figure I-3).s'intéresse principalement aux interactions chimiques entre les polymères, qu'ils soient de même nature ou de natures chimiques différentes.

L'inter diffusion se produit lorsque les atomes ou les molécules des deux surfaces en contact se mélangent et diffusent les uns dans les autres. Ce processus peut créer des liaisons entre les deux surfaces, renforçant ainsi l'adhérence entre elles. Cependant, il est important de noter que l'inter diffusion seule ne suffit pas toujours à assurer une adhérence forte et durable, mais elle peut contribuer au processus global de collage entre les matériaux.

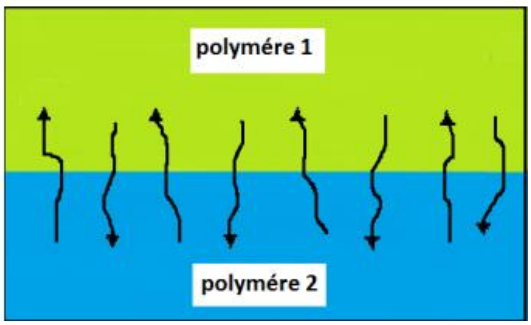


Figure 18 : Inter diffusion

3.2.6.Principe des couches de faible cohésion :

Jacob Bikerman a bouleversé le monde de la science des matériaux en proposant une théorie révolutionnaire sur la rupture des assemblages. Contrairement aux idées

reçues, il a suggéré que la rupture ne se produisait pas nécessairement au sein de l'interface entre deux matériaux, mais plutôt dans une couche adjacente appelée interphase. Cette zone de transition, caractérisée par une faible cohésion due à des imperfections et des discontinuités, est le point faible de l'assemblage.

Cette théorie permet de se placer à une échelle très fine car elle décrit l'interface en termes d'interactions moléculaire

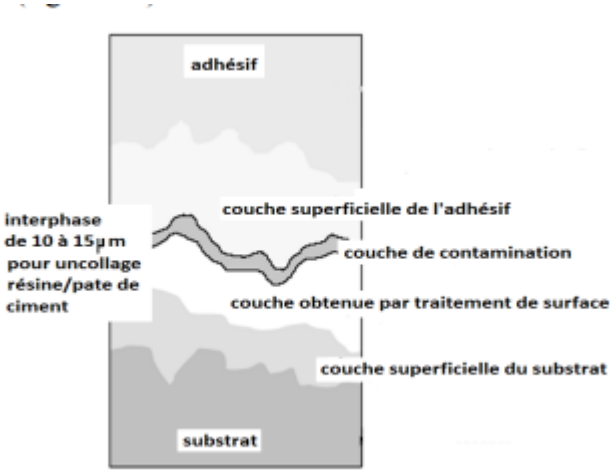


*Figure 19 :*Couche de faible cohésion
du modèle du Bikerman

Cependant, on peut considérer que les processus de collage se déroulent en plusieurs grandes étapes où ces différents mécanismes d'adhésion interviennent :

- Les substrats entrent en contact avec la colle.
- Des liaisons, plus ou moins fortes et de portées variables, se forment, maintenant la cohésion de l'assemblage

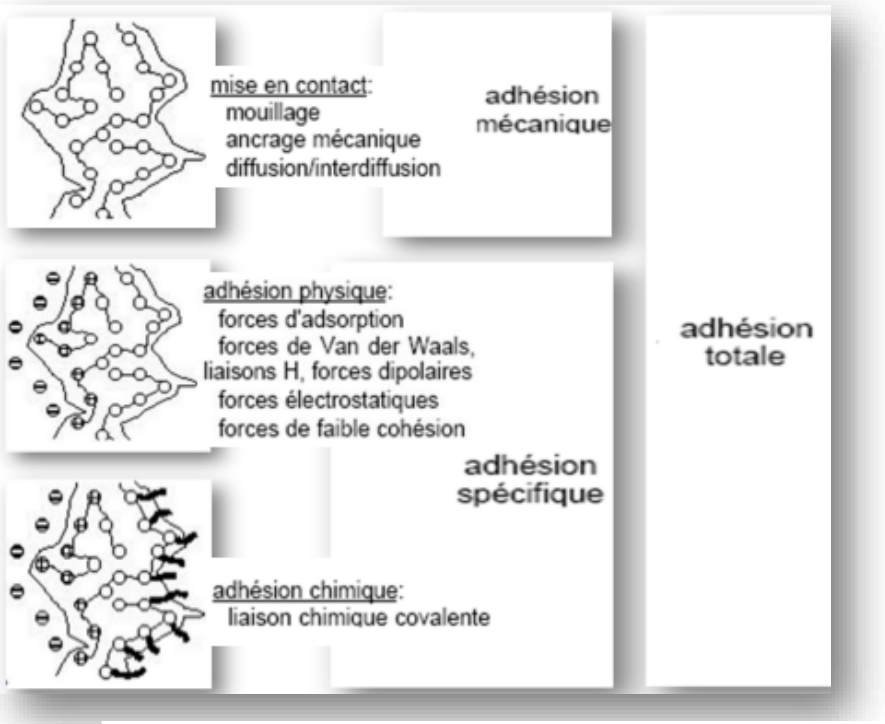


*Figure 20 :*Décomposition de la procédure de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion.

3.3. Les différents types de colle :

Un adhésif, est une substance qui permet de fixer deux surfaces identiques ou différentes, en contact en créant des liaisons durables entre elles. . L'élément clé de l'assemblage étant la zone d'interface ou d'interphase ou encore le joint dans le cadre décollage où s'exercent les interactions entre l'adhésif et le substrat ou adhérent surface du matériau assembler Les adhésifs ou colles utilisés pour maintenir des objets ensemble et assurer l'étanchéité, peuvent être classés selon la nature chimique de leur composant principal, selon les paires de matériaux à coller entre eux ou encore selon les mécanismes ou techniques utilisés.

Comme l'a proposé Eduardo SchindelBidinelli en 1992, les adhésifs doivent être classés selon deux catégories : ceux qui utilisent uniquement des mécanismes physiques et ceux pour lesquels une réaction chimique est nécessaire. Concernant les procédés physiques, citons à titre d'exemples les trois principaux procédés utilisés : évaporation d'un solvant, aqueux ou organique, application d'une force sur l'assemblage afin d'augmenter l'intimité de contact entre les deux surfaces à coller et chauffage de l'adhésif. dans le but de le ramollir ou de le faire fondre, puis refroidissement lent ou rapide, selon le cas, afin de le durcir

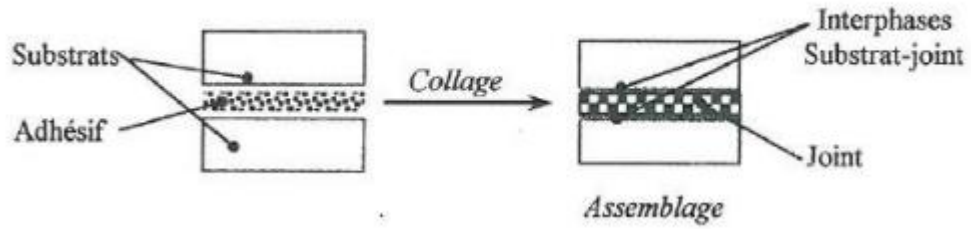


Figure 21 : Schéma de présentation d'un assemblage par collage

Les adhésifs peuvent être classés de différentes manières, selon leur origine, selon leur sourceFamille chimique ou selon son domained'application. Cependant, une approche systématiqueCela inclut la prise en compte des propriétés des composants des colles

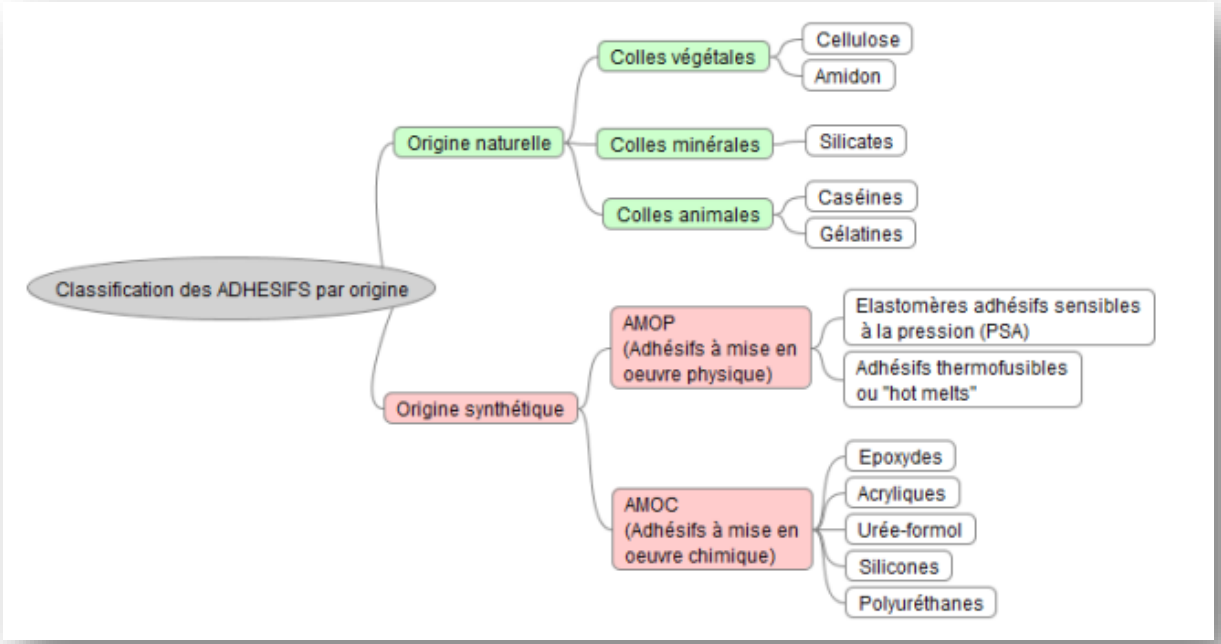


*Figure 22 :*Classification des adhésifs par origine

3.3.1. Les adhésifs naturels :

3.3.1.1.Lescolle d'origine végétale :

Les colles végétales sont obtenues à partir de cinq types de produits : gomme, latex, amidon, Dextrine et colophane

3.3.1.1.1. Parmi les gommes naturelles, produites par certains arbres, la seule étant utilisée comme adhésif est la gomme arabique. Il s'agit d'un polyholoside, un produit dérivé du glucose, dont la principale application reste l'enduction de papiers destinés à être collés par mouillage (timbres, enveloppes

- **Le latex,** issu de l'heveaBrasiliensis, est une émulsion aqueuse de caoutchouc à laquelle est ajoutée del'ammoniaque lors de la récolte afin d'éviter les attaques bactériennes et la coagulation. Utilisés notamment pour la fabricatioles pansements auto-adhésifs, le collage du papier, du carton
- **Les colles à base d'amidon** (ou amylacées)L'amidon, polymère naturel, ne possède pas à l'état naturel de propriétés adhésivesutiliséspour la fabrication de colles sont issus de tubercules de pommes de terre, du maïs,.
- **Les colles à base de dextrine :** La dextrine désigne des produits de dépolymérisation de l'amidon qui sont obtenus par grillage par voiesèche en présence d'acide. Les colles à base de dextrine trouvent des applications dans l'industrie dupapier (fabrication d'étiquettes, papiers gommés, etc.).

Deux types de dextrine peuvent être distingués :

Les dextrines blanches :

Les colles à base de dextrine blanche, assez peu solubles dans l'eau froide, donnent à chaud des Ce type de colle est utilisé notamment pour les sacs en papier et l'étiquetage,tel que l'étiquetage de bouteilles, sui requiert des produits s'enlevant rapidement à l'eau.

Les dextrines jaunes qui sont obtenues avec une attaque plus importante et une dose d'acidemoins élevée. utilisées notamment comme colle de remouillage pour les enveloppes.

Les colophanes :

Résine naturelle obtenue par scarification de certains arbres résineux tels que le pinLes colophanes sont lescomposants principaux d'adhésifs pour le collage de matériaux tels que les revêtements de sols (tapis,moquettes, etc.).

3.3.1.2. Les colles d'origine animale :

Les adhésifs d'origine animale peuvent provenir de composés dérivés de la peau, des os, du poisson et de la caséine.organiques dérivées d'hydrolyse du collagène.

Les colles à base de collagène et de gélatines

Les colles d'origine animale sont des protéines issues de l'hydrolyse de collagène, principale protéine Elles sont utilisées surtout dans l'industrie du bois (ébénisterie) et du papier (reliure, contrecollage, etc.) mais aussi pour la fabrication de bandutocollants

Les colles à base de poisson

Les colles à base de poisson est un type d'adhésif traditionnel obtenu à partir des peaux de poisson et sont à base de collagènes. Elles disposent d'une bonne solubilité à l'eau Elles offrent de bonnespropriétés mécaniques avec des substrats tels que le papier, le métal, le verre, etc.

Les colles à base de caséine

Les colles à base de caséine, protéine isolée par acidification du lait à l'aide d'acide chlorhydrique,Très utilisés dans les industries du bois, de papier, de l'emballage et du textile, ces colles d'origine animale ont quasiment disparues de l'industrie en raison de leur faible stabilité et de leur prix élevé

3.3.1.3. Les adhésifs d'origine synthétique :

Il y a en générale deux grandes catégories

3.3.1.3.1. Les polymères adhésifs à application physique (AMOP) : sont des polymères appliqués sous forme liquide, également appelés adhésifs non réactifs, s'appuient sur des phénomènes physiques, tels que l'évaporation du solvant ou le refroidissement, pour réaliser l'adhésion.. Cela limite la cohésion de l'adhésif mais permet également de les enlever et les AMOP peuvent se présenter initialement sous forme liquide ou solide

3.3.1.3.2. Les AMOP liquides : les colles solubilisées dans l'eau, les émulsions, les colles à solvant En phase liquide, il faut que le polymère possède des groupements chimiques permettant de fortes interactions avec le solvant qui le solubilise.

Les AMOP liquides peuvent être :

i. Des solutions aqueuses souvent de produits d'origine naturelle
ii. Des solutions organiques d'adhésifs à base d'élastomères (caoutchouc naturel, néoprène) et adhésifs vinyliques, acryliques et de type polyuréthane
iii. Des dispersions et émulsions•

Les AMOP solides comprennent les colles thermo fusibles et les adhésifs sensibles à la pression. Les propriétés mécaniques des polymères thermoplastiques varient en fonction de la température et de leur structure à l'état solide (amorphe ou semi-cristallin). Il est possible de distinguer deux types d'AMOP en phase solide.

- ❖ Les élastomères adhésifs sensibles à la pression (PSA) dont la température de transition vitreuse (Tg) est inférieure à la température d'utilisation
- ❖ Les adhésifs thermo fusibles ou « hot melts » qui, sont mis en œuvre à une température supérieure à leur température de fusion.

3.3.1.4. Les Adhésifs à Mise en Œuvre Chimique (AMOC) :

Les adhésifs à mise en œuvre chimique (AMOC) constituent une catégorie particulière d'adhésifs spécialement conçus pour les applications structurelles. Ils se caractérisent par la formation d'un réseau tridimensionnel permanent à l'issue d'une réaction chimique qui se produit lors du collage.

Le caractère tridimensionnel permanent formé par les AMOC empêche effectivement leur retrait et leur recyclage. Ce réseau est créé par la polymérisation de molécules précurseurs, aboutissant à une structure fortement cohésive et permanente qui présente d'excellentes propriétés thermiques et mécaniques.

4.Traitement de surface avant collage :

Dans le domaine industriel, la réussite d'un collage et l'obtention de la résistance attendue ne se résument pas uniquement au choix de la colle adéquate. En effet, la qualité de l'adhérence sur le support et la réaction de polymérisation nécessaire à la prise de la colle dépendent fortement de la préparation des surfaces à assembler. Or Les surfaces des matériaux sont généralement recouvertes de diverses impuretés Effectivement, une préparation minutieuse des surfaces à coller est primordiale pour garantir un collage optimal. En effet, la qualité de l'accrochage de la colle dépend directement de l'état des supports. Pour que la polymérisation, processus chimique responsable de la prise de la colle, s'effectue correctement, il est essentiel que l'adhésif soit appliqué sur une surface propre, stable et solide. une surface bien préparée assurera des liaisons solides et durables ; en particulier lorsque des environnements d'utilisation difficiles sont présents

4.1. Traitements chimiques :

Les traitements de surface les plus utilisés pour la préparation des surfaces sont les traitements chimiques. ont 3 fonctions principales : le dégraissage, le décapage et Les conversions Un traitement chimique comprend les étapes suivantes :

la pré-gravure, l'étape de gravure ou satinage et l'étape de neutralisation. La pré-gravure prépare le substrat en modifiant son énergie de surface et en favorisant l'adhérence. L'étape de gravure crée une rugosité de surface et augmente la tension superficielle, facilitant ainsi l'adhésion du revêtement. Enfin, l'étape de neutralisation vise à éliminer ou à réduire les résidus des bains précédents.

4.1.1. Le dégraissage :

Lorsqu'il s'agit de coller des matériaux tels que le métal, le plastique ou le verre. Le dégraissage chimique s'impose comme une étape clé dans le domaine du traitement de surface. Son rôle consiste à débarrasser les surfaces métalliques de toute trace de graisse, de poussière et d'autres contaminants qui forment une couche indésirable susceptible d'altérer l'adhésion des traitements ultérieurs.. Il ya trois types de dégraissage chimique le dégraissage à solvant, le dégraissage par saponification, et le dégraissage par émulsifiassions

4 .1.1.1. Le dégraissage aux solvants :

est une méthode courante qui utilise des dérivés d'hydrocarbures ou de chlore pour éliminer les contaminants des surfaces avant le collage, en fonction de la nature des contaminants et du substrat.

4.1.1.1.1. Le dégraissage par saponification :

Une réaction chimique appelée saponification est utilisée pour transformer les graisses en glycérine et en savon, qui peuvent être éliminés par rinçage.

4 .1.1.1.2. Le dégraissage par émulsification

Son principe repose sur l'utilisation de produits de type "sels de sodium", tels que les silicates et les tétra borates, qui favorisent la formation de microgouttelettes de graisse en suspension dans l'eau , Permet d'éliminer efficacement les saletés sans attaquer le métal

le temps de traitement d'une dizaine de minutes à une température de 90°C

.4 .1.2. Le décapage :

C'est un peu comme un gommage pour les métaux. On s'en débarrasse de la couche d'oxyde terne et inesthétique pour retrouver une surface propre et brillante. On effectue un traitement acide sur le fer et ses alliages et un traitement à base d'acide nitrique ou sulfurique dans le cas des aciers inoxydables. Le décapage chimique du cuivre et de ses alliages s'avère plus délicat que pour d'autres métaux en raison de la nature réactive du cuivre. Un collage immédiat est nécessaire après ce traitement. , il est réalisé à base de chlorure ferrique dans l'acide chlorhydrique ou nitrique, ou à base de permanganate d'ammonium ou encore de mélange sulfochromique. Il doit alors être suivi immédiatement par le collage. Dans le cas des alliages d'aluminium, on peut également compléter le décapage chimique par un décapage électrochimique.

En effet, le décapage chimique ne se limite pas à un simple nettoyage; il offre l'avantage de reformer une couche d'oxyde sur la surface métallique. Cette nouvelle couche d'oxyde, aux propriétés spécifiques , a un épaisseur dépend de sa rugosité, et elle joue un rôle crucial dans la performance et la protection du métal.

4.1.3. Les conversions :

La conversion est la dernière étape de la préparation de la surface avant le collage .Ce n'est pas toujours nécessaire de procéder à cette opération et parfois, un simple dégraissage peut suffire. Le processus de conversion implique la création d'une nouvelle surface sur un substrat, que ce soit en modifiant localement la surface existante ou en déposant une couche qui se superpose à la surface initiale. Les transformations chimiques sont essentiellement liées aux métaux. La phosphatation,, l'oxydation, etc. sont les méthodes les plus couramment employées.

. Le traitement de conversion a pour fonction première de protéger le métal de la corrosion et d'augmenter la durabilité de l'interface et de l'adhésion. Il peut également favoriser l'accroche de l'adhésif en augmentant la rugosité et la réactivité de la surface D'une manière générale.

4.2. Les traitements mécaniques :

Pour optimiser l'adhérence, en particulier pour le collage, on peut recourir à des traitements mécaniques de surface. Ces techniques, principalement utilisées sur les composites thermodurcissables (polyester, époxy), visent à augmenter la surface de contact. On peut ainsi réaliser un simple dépolissage pour une rugosité modérée, aller vers l'abrasion pour une texture plus marquée, ou employer un sablage contrôlé avec des médias plastiques pour éviter d'endommager le matériau. La préparation mécanique est plutôt utilisée pour les composites à matrice thermodurcissable tels que les polyesters, ou les résines époxy et est précédée d'un dégraissage. Le traitement, qui peut parfois être un simple dépolissage peut être réalisé par abrasion. Le sablage peut être réalisé avec des médias plastiques.

le traitement mécaniques n'atteint pas les couches profondes et n'altère pas la solidité du matériau. Ces traitements améliorent l'accroche des colles et autres revêtements, nettoient la surface et peuvent même favoriser une liaison chimique plus forte. Cependant, ils modifient l'aspect esthétique de la pièce, ne conviennent pas aux structures fines ou complexes, et nécessitent un nettoyage supplémentaire pour éliminer les poussières créées..

4.2.1. Les différents types de traitements mécaniques :

4.2.1.1. Abrasion légère :

Les traitements par abrasion impliquent le frottement contrôlé d'un papier abrasif à granulométrie spécifique sur la surface d'un matériau, soit manuellement, soit via un système automatisé. Le contact et le frottement des particules abrasives surla surface du matériau permettent ainsi de modifier sa topographie.

4.2.1.2. Abrasion par projection de particules :

L'abrasion par projection de particules, aussi appelée sablage, vise à projeter des particules abrasives de taille spécifique sur une surface afin de la modifier et de créer des rugosités qui augmentent la surface spécifique.

4.3. Les traitements physiques :

Les traitements physico-chimiques tels que le plasma, la décharge corona et le flammage ont deux effets principaux sur les matériaux polymères. Tout d'abord, ils provoquent une oxydation des liaisons chimiques en surface, ce qui peut altérer les propriétés de surface dumatériau. Ensuite, ces traitements augmentent la rugosité de la surface, ce qui peut être bénéfique pour certaines applications.

Ces méthodes présentent l'avantage de ne pas nécessiter de post-traitements, car elles n'induisent généralement pas de résidus ni d'impuretés sur la surface traitée.Bien que ces traitements soient souvent peu sélectifs du point de vue chimique, leur forte réactivité permet de réaliser des modifications de surface de courte duréeet enrégime dynamique. Cela signifie qu'ils peuvent être adaptés à une variété de matériaux et de conditions de traitement, offrant ainsi une flexibilité dans l'optimisation des propriétés de surface des polymères pour différentes applications.

4.3.1. Le flammage :

Le flammage, également appelé flammage, est une technique de traitement de surface qui consiste à exposer un matériau, notamment des polymères, à une flamme oxydante produite par la combustion d'un hydrocarbure. Cette technologie s'appuie sur la température élevée atteinte lors des flammes (environ 1 500 °C en conditions adiabatiques) pour dissocier les molécules d'oxygène (O_2) et d'azote (N_2) présentes dans l'air. Cette dissociation crée des radicaux libres très actifs. Ces radicaux libres jouent un rôle crucial dans la modification de surface induite par la flamme

D'une part, le flammage 'augmenter l'énergie de surface et donc la mouillabilité, et d'autre part, ce procédé vise à modifier la surface du matériau pour améliorer ses propriétés d'adhésion.

4.3.2. Les traitements Corona :

Le traitement par décharge couronne est une méthode utilisée principalement sur des surfaces planes et dans des lignes de production à haute cadence, adaptée aux matériaux minces et flexibles. Il consiste à appliquer une tension électrique entre des électrodes, ce qui crée une décharge plasma et des photons UV. Cette décharge provoque une oxydation de la surface du polymère, formant des groupements polaires tels que des alcools, des cétones, des carbonyles et des acides carboxyliques. Ces changements améliorent la mouillabilité de la surface, favorisant ainsi l'adhérence et la compatibilité avec d'autres matériaux ou revêtements. Bien

que rapide et peu coûteux, ce traitement présente des limites pour les pièces de forme complexe et sa durabilité est limitée.

4.3.3. Le traitement par plasma :

Le traitement par plasma, également appelé plasma froid, est un processus qui utilise un gaz ionisé pour réagir avec la surface d'un polymère. Ce type de plasma est obtenu sous vide partiel par ionisation du gaz résiduel, créant ainsi un environnement composé de photons, d'électrons, d'ions et d'atomes activés, tous très réactifs. Lorsque le gaz contient de l'oxygène ou de l'azote, ces atomes réagissent instantanément avec la surface du polymère pour créer des sites actifs.

plasma est Un gaz, généralement de l'air, de l'oxygène ou de l'argon, est ionisé à l'aide d'une source d'énergie externe, comme une décharge électrique à haute fréquence permettant de casser la neutralité électrique des atomes qui le constitue. Ce fluide constitué de particules à l'état gazeux et chargées est alors propulsé à haute vitesse sur les pièces à préparer à l'aide de torches plasma Le plasma est qualifié de froid lorsque la température moyenne des gaz reste proche de la température ambiante, bien que la température électronique puisse être plus élevée. Cela signifie que l'équilibre thermodynamique n'est pas réalisé, ce qui le qualifie de plasma "hors équilibre". En revanche, lorsqu'un équilibre thermique est atteint, on parle de plasma thermique ou de plasma chaud.

5.Domain d'utilisation de collage :

5.1. En médecine :

L'intégration de divers adhésifs en médecine a eu un impact significatif sur les soins et les résultats des patients.

5.1.1. Les adhésifs à base de fibrine :

Sont fabriqués à partir de plasma humain ou animal, sont biodégradables, faciles à utiliser et peuvent être stockés à température ambiante ou au réfrigérateur

Les adhésifs à base de fibrine sont largement utilisés dans plusieurs domaines médicaux :

- Chirurgie cardiaque pour atteindre l'hémostase et sceller les greffes vasculaires.
- Chirurgie vasculaire pour traiter la dissection aortique et sceller les fuites vasculaires.
- Neurochirurgie pour fermer la dure-mère et réparer les fuites de liquide céphalorachidien.

5.1.2. Adhésifs au collagène :

Un autre groupe d'adhésifs naturels est constitué des adhésifs à base de collagène. Le collagène possède des propriétés d'adsorption des produits de coagulation qui font adhérer l'adhésif à la plaie en induisant l'adhésion plaquettaire et en activant les facteurs de coagulation.Les adhésifs à base de collagène peuvent également être utilisés dansla chirurgie thoracique, la chirurgie orthopédique pour aider à contrôler les saignements et favoriser la cicatrisation des tissus.

5.1.3. Adhésifs à base de gélatine :

La gélatine elle-même est un dérivé du collagène largement utilisé

5.1.3.1. Adhésifs à base de chitosane :

Le chitosane est un polysaccharide produit commercialement par désacétylation de la chitine,qui est un élément structurel présent dans l'exosquelette des crustacés (par exemple les crabes etcrevette)

Cet adhésif tissulaire peut convenir à la fermeture des plaies cutanéeset dans les situations nécessitant une hémostase urgente, les adhésifs à base de chitosane peuvent égalementfermer efficacement les plaies sclérales.

5.1.3.2. Adhésifs à base de sulfate de chondroïtine :

Le sulfate de chondroïtine est un glycosaminoglycane composé d'une chaîne de sucres

Des études in vitro et in vivo ont confirmé que l'adhésif stimulait la production de matrice extracellulaire et la régénération tissulaire.

L'adhésif peut également être utile et constituer une alternative aux sutures utilisées en ophtalmologie.

5.1.4.Adhésifs synthétiques :

5.1.4.1. Adhésifs cyanoacrylates :

Sont idéaux pour les applications médicales et dentaires, en particulier comme adhésifs de liaison tissulaire et matériaux d'étanchéité.

5.1.4.2. Adhésifs à base de polyéthylène glycol PEG :

Ce groupe d'adhésifs tissulaires est constitué de polyéthylène glycol(PEG) linéaire ou ramifié molécules qui peuvent être réticulées chimiquement ou sous lumière ultraviolette

Il a été démontré que cet adhésif est utile en chirurgie thoracique pour empêcher les fuites d'air des lignes de suture

5.1.4.3. Adhésifs à base d'uréthane :

Ces adhésifs sont synthétisés sous forme de pré polymères, de sorte qu'ils ont la capacité de réagir avec les groupes aminés des protéines qui sont présents dans l'environnement biologique et favorisent utilisés dans une variété d'applications, notamment : Suture cutanée et fermeture de plaies, Offrent une alternative aux sutures et aux agrafes traditionnelles.

5.1.5. Adhésifs biomimétiques :

Apprendre de la nature pour créer de meilleures solutions chirurgicales Adhésifs biomimétiques, où les scientifiques développent de nouveaux adhésifs médicaux inspirés de la nature. Comme les palourdes Geckos, adhésifs hybrides : une étude a créé un adhésif en imitant à la fois la structure du pied de gecko et les protéines adhésives des palourdes. Ce matériau hybride a montré une forte adhérence dans des conditions humides. Ces adhésifs pourraient potentiellement être utilisés pour Agissant comme agent hémostatique dans les pansementsImplantation de dispositifs médicaux

5.2. le domaine de la construction :

Le collage est largement utilisé dans le domaine de la construction, avec différentes applications classées en plusieurs types selon leur mise en œuvre et leurs exigences de durabilité.

Les collages de revêtements décoratifs font partie des techniques de revêtement les plus anciennes et les plus simples. Leur simplicité de mise en œuvre et leur large gamme d'applications les rendent très populaires pour la décoration et la rénovation d'intérieurs. Tell que Papiers peints, revêtements de sols plastiques, moquettes, placage de stratifiés décoratifs

Ciments-colles et colles pour carrelages: Apparus il y a environ 35 ans, les ciments-colles et les colles pour carrelages ont remplacé la pose traditionnelle au ciment. Ils sont utilisés pour fixer des carrelages,

5.2.1. Collages préfabriqués: De nombreux éléments de second œuvre dans la construction sont préfabriqués en usine, tels que les portes, les fenêtres, les panneaux extérieurs ou intérieurs,

5.2.2. Collages structuraux à hautes performances: Ces collages, sont utilisés pour des applications où les résistances mécaniques des collages sont comparables à celles des matériaux de structure eux-mêmes. Ils incluent le collage d'éléments en béton

5.3. Dans l'industrie automobile :

Le collage joue un rôle essentiel dans l'industrie automobile en offrant des solutions d'assemblage innovantes, légères et durables, contribuant ainsi à la fabrication de

véhicules plus sûrs, plus performants et plus efficaces.Exemples d'applications du collage dans l'industrie automobile :

5.3.1. Assemblage des panneaux de carrosserie : Le collage est utilisé pour lier les panneaux de carrosserie extérieurs, tels que les portes, les capots et les coffres, au châssis de la voiture.

5.3.2. Fixation de composants électroniques et mécaniques : Les adhésifs sont utilisés pour fixer les composants électroniques et mécaniques dans les véhicules, tels que les capteurs, les faisceaux de câbles, les modules de contrôle et les supports de batterie.

5.3.3. Fixation de vitres : Les pare-brise, les vitres latérales et les lunettes arrière sont souvent collés à la carrosserie à l'aide d'adhésifsspécialement conçus. Cette méthode offre une liaison robuste et étanche, essentielle pour assurer la sécurité des occupants du véhicule et la résistance aux vibrations.

5.3.4. Collage des composants électroniques et mécaniques : Les composants électroniques et mécaniques, tels que les capteurs, les faisceaux de câbles et les supports de batterie, sont souvent collés dans les véhicules pour assurer leur fixation sécurisée et leur intégration harmonieuse dans l'ensemble du véhicule.

5.3.5. Réparation et rénovation: Le collage est également utilisé dans la réparation et la rénovation des véhicules endommagés. Les adhésifs spéciaux peuvent être utilisés pour fixer des éléments endommagés, remplacer des pièces défectueuses ou renforcer la structure après une collision.

5.4. Le domaine électronique :

Le collage est devenu une alternative répandue aux méthodes classiques de réparation mécanique telles que le rivetage, le soudage et le vissage. Il est largement utilisé à travers le monde, aussi bien pour assembler de gros composants sur des cartes de circuits imprimés que pour des assemblages structurels. Avec la demande croissante de miniaturisation et de polyvalence dans le domaine électronique, le choix du collage peut répondre efficacement à cette demande.

5.4.1. Collage de composants électroniques: souvent réalisée dans la fabrication de produits électroniques tels que , les ordinateurs,

5.4.2. Collage de données ou de signaux : le collage peut désigner le processus de combinaison de plusieurs flux de données ou de signaux en un seul, par exemple, dans le multiplexage

5.4.3. Collage de circuits intégrés : Dans le processus de fabrication des circuits intégrés (puces électroniques), l'étape de collage est cruciale pour assembler les différentes couches de matériaux semi-conducteurs qui

Composent les circuits complexes. Cette étape permet de créer des structures tridimensionnelles à partir de couches bidimensionnelles

5.4.4. Collage d'éléments décoratifs: Le collage peut également être utilisé pour ajouter des éléments décoratifs à des appareils électroniques, tels que des logos ou des motifs.

5.4.5. Collage de fils électriques: Le collage peut être utilisé pour fixer des fils électriques à un circuit imprimé ou à d'autres composants électroniques. utilisée pour réparer des circuits endommagés ou pour créer des connexions temporaires.

6. Les avantages est les inconvénients du collage :

L'art du collage, qu'il soit artistique ou industriel, Le collage offre de nombreuses possibilités, que ce soit dans le domaine de l'art visuel où les artistes fusionnent des textures et des médiums variés pour créer des créations originales, ou dans le secteur industriel où les ingénieurs assemblent des pièces de matériaux divers pour créer des structures complexes. En raison de ses nombreux avantages, le collage est souvent utilisé comme alternative à de nombreux procédés d'assemblage traditionnels tels que le vissage, le rivetage, le boulonnage, l'agrafage, le soudage, le sertissage et la couture Si le lien offre de nombreux avantages, il présente quelques inconvénients qu'il faut connaître pour ne pas en exiger plus qu'il ne puisse.

6.1.Les avantages :

1. Les colles améliorent l'apparence.Les colles assurent une fixation invisible des surfaces, évitant ainsi l'utilisation de fixations visibles comme les vis ou les écrous. Elles permettent également d'économiser du temps et des coûts en évitant le polissage des marques de soudure.
2. Le collage industriel offre la possibilité d'assembler différents types et épaisseurs, d'objets, permettant ainsi une grande flexibilité. De plus, il assure une esthétique de qualité avec des joints invisibles, sans aucune trace de colle visible.
3. Il est notablement plus léger, avec peu de différence de poids entre les objets assemblés et leurs composants individuels.
4. Le collage industriel offre une étanchéité élevée tout en assurant une isolation électronique des matériaux assemblés. De plus, il réduit considérablement le risque de détérioration des matériaux sur lesquels il est appliqué, ce qui en fait la solution privilégiée pour l'assemblage de matériaux fragiles et cassants.
5. une méthode simple et propre, évite l'utilisation de fixations telles que vis ou clous, réduisant ainsi le poids de la structure.
6. Le collage industriel assure une répartition efficace des contraintes, ce qui se traduit par une meilleure résistance aux chocs, aux vibrations et à la fatigue des assemblages. Contrairement à certaines méthodes d'assemblage

mécaniques comme le boulonnage ou le rivetage, où les contraintes sont concentrées sur des points spécifiques, l'effort est réparti sur toute la surface d'assemblage.

7. Le collage industriel préserve l'intégrité des pièces en évitant tout processus de perçage ou d'altération de la surface des matériaux assemblés.
8. La conservation des performances est assurée par les assemblages collés, qui démontrent une durabilité exceptionnelle même après plus de 30 ans de service, résistant efficacement à la fatigue, aux agressions chimiques et aux variations des conditions environnementales extérieures.
9. Protection contre la corrosion: fournissent une barrière efficace contre les phénomènes d'électrolyse, réduisant ainsi considérablement le risque de corrosion des matériaux métalliques. Par exemple, dans le secteur du bâtiment, les façades métalliques rivetées induisent une continuité électrique qui, en présence d'humidité, favorise le processus d'oxydation. En revanche, les assemblages collés offrent une alternative qui prévient ces dommages structurels en rompant cette continuité électrique et en protégeant les surfaces métalliques de la corrosion.
10. Les colles agissent en adhérant et en unissant simultanément les surfaces qu'elles relient. Leur application permet de créer une barrière efficace contre l'eau, l'humidité, les impuretés et autres éléments environnementaux indésirables. Grâce à leurs propriétés adhésives, elles éliminent le besoin d'une fixation mécanique distincte.

11. L'incorporation de colles et de rubans adhésifs dans les processus de fabrication peut induire des gains d'efficacité significatifs en éliminant les étapes superflues, en réduisant les taux d'échec et les temps d'assemblage. Ces matériaux permettent d'accroître la vitesse opérationnelle, de minimiser les coûts et les heures de travail, tout en simplifiant les opérations de manière technique.
12. Les films de colle ont la capacité de modifier les vibrations en les absorbant ou en les amplifiant selon les besoins, tout en offrant une isolation électrique, thermique et phonique.
13. La substitution des rivets, boulons et vis par des raidisseurs de tôles collés, ainsi que l'intégration de panneaux-sandwichs, ont abouti à une réduction de la masse des structures aéronautiques (tels que la carlingue, les ailes, les gouvernails, les ailerons, les planchers et les nacelles des moteurs) d'environ 30 à 40 %, sans compromettre leur résistance. Ces gains sont obtenus indépendamment de l'utilisation des composites renforcés de fibres.
14. Le collage offre la possibilité d'assembler différents matériaux tels que le métal sur du plastique ou du composite, le métal sur de la mousse isolante pour former des sandwichs, ou encore le métal sur du verre, des combinaisons qui seraient autrement impossibles. Cette technique élargit

considérablement les options de conception pour les matériaux composites, permettant des assemblages variés et complémentaires qui renforcent mutuellement leurs propriétés. Ainsi, les designers bénéficient d'une liberté totale dans leurs conceptions.

6.2. Les inconvénients.

Venons-en maintenant aux inconvénients. Ils sont nombreux et importants:

1. Résistancea la chaleur souvent limitée
2. Durabilité en milieux sévères parfois moyenne
3. Traitement de la surface avant collage
4. Faible résistance au pelage
5. Démontage difficile
6. Temps de prise parfois long
7. Les surfaces des solides doivent être préparées pour être collées, ce qui signifie que des traitements mécaniques et physico-chimiques doivent être appliqués à ces surfaces. Ces opérations, généralement coûteuses mais indispensables, visent à éliminer les impuretés, augmenter l'énergie de surface, accroître l'accrochage mécanique et favoriser le mouillage de la colle.
8. Le choix du produit adhésif dépend de plusieurs critères, incluant la nature des matériaux à coller, les conditions environnementales de l'assemblage, la forme et la viscosité de l'adhésif, ses propriétés de mouillabilité, sa facilité d'application et les temps de solidification, y compris le temps de séchage de la colle.
9. Les différentes colles existantes peuvent ne pas résister aux contraintes mécaniques appliquées, à la chaleur, au froid ou encore aux chocs thermiques, ou encore présenter un mauvais comportement face à certaines radiations. De plus, certaines colles, bien qu'elles soient techniquement parfaites pour l'utilisation envisagée, peuvent être considérées comme trop onéreuses en raison de la grande superficie à encoller. Par conséquent, il n'existe pas de colle universelle capable d'allier toutes ces qualités à la fois. La compétence dans l'art de coller consiste à trouver le bon compromis.La capacité de la colle à accommoder les écarts de dilatation thermique des matériaux assemblés est souvent omise par les architectes et les maîtres d'ouvrage. C'est pourquoi, dans certains cas, comme pour la façade de l'Opéra Bastille à Paris, un filet de protection est installé afin d'éviter que les dalles en marbre du parement, en se décollant, ne tombent sur les passants.

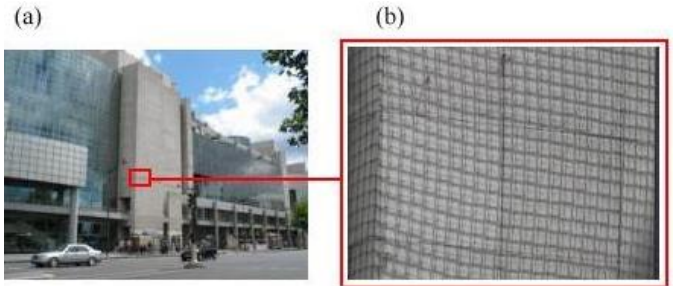


Figure23 : partie incriminée de la façade de l'Opéra Bastille à Paris (a) et vue agrandie du filet de protection (b).

7. CONCLUSION :

Dans cette partie une présentation du collage par rapport à d'autres techniques d'assemblage, les caractéristiques rhéologiques des adhésifs et les différents traitements nécessaires à un collage résistant au cours du temps. Il a été également mentionné que le choix de la colle doit prendre en compte la compatibilité avec les surfaces à assembler, qui peuvent être de natures différentes.

En outre, il est montre que La technique d’assemblage par collage joue actuellement un rôle prépondérant dansde nombreux domaines tels que l’industrie automobile, la construction, le médecine. L’approche multi matériaux présentée dans ce chapitre a pour but de dresser un état des connaissances actuelles sur les procédés d’études etdimensionnement des assemblages collés de toutes sortes mais aussi de soulignerl’importancedes différents paramètres intervenant dans la qualité d’un collage dès sonélaboration jusqu’à son utilisation.et on ajoute les avantagesdu collage et leur *inconvénients.*

En résumé, l'idée générale est que le collage est une méthode d'assemblage complexe qui nécessite une approche pluridisciplinaire pour garantir des résultats optimaux en termes de performances et de durabilité.

CHAPITRE 02

L’optimisation numérique

1. Introduction :

Le domaine de l'optimisation est crucial dans de nombreux domaines tels que l'ingénierie, les sciences de gestion, l'informatique, l'économie, et bien d'autres. L'optimisation vise à trouver la meilleure solution parmi un ensemble de choix disponibles en utilisant des techniques mathématiques et algorithmiques. Nous allons vous expliquer les techniques d'optimisation en général. Nous présenterons les concepts de base, les différentes approches et méthodes pour résoudre les problèmes d'optimisation.

L'étude des techniques d'optimisation est essentielle pour les professionnels et les chercheurs qui cherchent à résoudre des problèmes complexes et à prendre des décisions éclairées. En comprenant les différentes méthodes d'optimisation, on peut déterminer la méthode la plus appropriée en fonction du contexte du problème, des contraintes et des objectifs spécifiques.

Ce chapitre donnera un aperçu des principales techniques d'l'optimisation telles que Les étapes de processus d'optimisation numérique des joints collés, les méthodes d'l'optimisation numérique, aussi on vas parlez sur les l'logiciels d'analyse et d'optimisation.

2. Historique de l'optimisation numérique :

L'optimisation numérique est une branche des mathématiques et de l'informatique consiste à modéliser, à analyser et à trouver la meilleure solution analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à minimiser ou maximiser une fonction sur un ensemble, en utilisant des méthodes et des algorithmes spécifiques.

L'histoire de l'optimisation numérique remonte à plusieurs siècles, mais ses premiers problèmes ont été formulés par Euclide, au IIIe siècle notre ère, dans son ouvrage historique Éléments. Trois siècles plus tard Héron d'Alexandrie énonce le《 principe du plus court chemin 》dans le contexte de l'optique **[22].** (voir la figure).

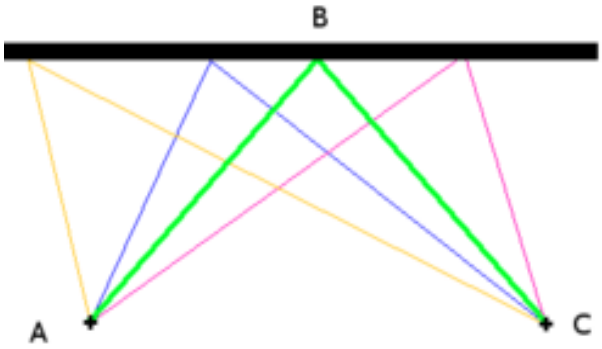


Figure 25 .principe du plus court chemin

Le plus court chemin pour aller de A à C en passant par un point de la droite est obtenu lorsque l'angle d'incidence est égal à l'angle réfléchi (sur la figure, il s'agit du chemin vert passant par B).

Au XVIe, l'apparition du calcul différentiel sous l'égide de Newton et de Leibnitz entraîne l'invention de techniques d'optimisation, ou du moins en fait ressentir la nécessité. **[23].**

A la fin du XIXe siècle et du début du XXe siècle les travaux des trois mathématiciens Lagrange, Euler et Gauss ont contribué au développement de méthodes pour résoudre des problèmes d'optimisation mathématiques

à travers :

- Méthode Lagrange : où il a développé la méthode du multiplicateur de Lagrange pour résoudre des problèmes d'optimisation avec contraintes, cela se fait en introduisant des multiplicateurs de Lagrange pour transformer le problème contraint de maximisation ou de minimisation en un problème sans

contrainte afin qu'il puisse être résolu à l'aide de dérivées partielles. Par exemple, pour maximiser une fonction f(x, y) sous la contrainte g(x, y) = c, on forme la fonction Lagrangienne L(x, y, λ) = f(x, y) - λ (g(x, y) - c) et on résout les équations ∇L = 0 pour trouver les points stationnaires. **[24].**

- Méthode d'Euler : Leonhard Euler à contribuer au développement de méthodes de calcul des variances pour résoudre des problèmes d'optimisation en trouvant des fonctions qui réduisent ou augmentent une certaine quantité par exemple, pour minimiser l'intégrale d'une fonction f(x, y, y') le long d'une trajectoire y(x) avec des conditions aux limites fixées, on applique le principe de moindre action pour trouver la trajectoire optimale.
- Méthode de Gauss : Pour résoudre les problèmes d'optimisation, Goss a développé la méthode des moindres carrés pour ajuster les modèles mathématiques aux données expérimentales, en ajustant une fonction mathématique à un groupe de manière à minimiser les erreurs quadratiques. **[25].**

Au cours des années 1940 et 1950, le domaine de l'optimisation numérique a connu des développements majeurs, puisque les premières méthodes d'optimisation mathématique ont été développées par des chercheurs. En 1947, George Dantzig a développé un algorithme simplexe permettant de minimiser une fonction dans un ensemble défini par l'inégalité **[26].** En conséquence, il a contribué de manière significative. Khan et Wilkes ont également grandement contribué à l'amélioration des méthodes de descente de gradient, qui sont largement utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation non linéaire, et ils ont également joué un rôle dans le développement de techniques d'optimisation convexes. Tout cela a permis de proposer des algorithmes plus efficaces et plus rapides pour atteindre la solution optimale.

Plus tard dans les années 1960, des chercheurs tels que Dantzig Ford et Fulkerson ont développé des algorithmes pour résoudre des problèmes d'optimisation linéaire tels que :

- Le problème de l'assignation hongroise, qui consiste à trouver l'allocation optimale des tâches aux matériaux afin de minimiser ou maximiser une fonction de coût donnée. Il est souvent utilisé dans les domaines de la logistique et de la planification de la production. **[27]. [28].**

- Le problème Max-flow-Cut est considéré comme l'un des problèmes classiques de la théorie et de l'optimisation des graphes. **[29].**

Les années 1970-1980 Les travaux de Powell et Fletcher ont contribué à l'émergence de plusieurs méthodes de résolution de problèmes d'optimisation linéaire, notamment:

- La méthode des séries de gradients, également appelée méthode de Fletcher-Powell, est une méthode itérative qui utilise les gradients de la fonction objet pour atteindre le minimum. Ils combinent les directions des gradients afin d'optimiser le sens de descente pour créer une itération. **[30].**
- La méthode de descente dans la direction de Newton est l'une des méthodes les plus scientifiques permettant d'utiliser la méthode de Newton pour trouver la direction de descente de manière optimale afin de créer une itération. Cette méthode peut converger plus rapidement vers le minimum local, mais il faut utiliser les hessiennes de la fonction objet, ce qui peut être plus pratique en termes de calcul.

Enfin dans les années 1990 - 2000, on a assisté à un rétrécissement aléatoire, multi-objectif, convexe et non linéaire.

De nos jours l'optimisation et plus généralement la recherche opérationnelle, reste un domaine fécond de la recherche en mathématiques qui bénéficie d'importants financements provenant aussi bien du domaine public que du domaine privé, et dont les retombées

S'appliquent dans tous les domaines d'activité humaine se prêtant à la modélisation mathématique.

3. Les méthodes de l'optimisation numérique :

L'optimisation numérique est l'un des domaines de la recherche numérique et des sciences de la décision qui vise à trouver les meilleures solutions à des problèmes complexes à l'aide de méthodes algorithmiques. Il existe différentes méthodes et techniques d'optimisation numérique, notamment :

3.1. La Méthode de Gradient (descente): L'algorithme de gradient, également appelé algorithme de descente de gradient, fait référence à un algorithme d'optimisation différentiable. Il s'agit donc de minimiser une fonction différentiable réelle définie dans un espace euclidien. Il est également connu sous le nom d'algorithme de descente la plus raide car le gradient est la pente de la fonction

linéaire au point actuel et donc, localement, est la pente la plus raide (concept basé sur le produit scalaire). **[31].**

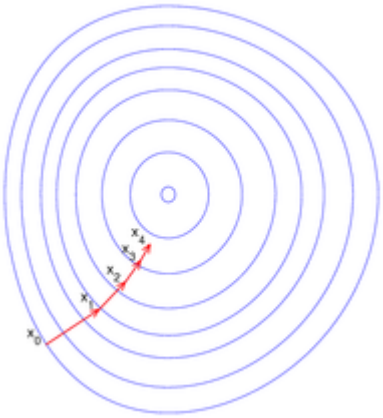


Figure 26. Illustration de logarithme de gardien.

3.2. Méthodes de l'algorithme de la ligne d'arrêt: C'est une méthode utilisée en optimisation pour déterminer le moment optimal pour arrêter le processus itératif lorsqu'il converge vers une solution acceptable ou vers d'autres critères prédéterminés.

Il existe différentes méthodes pour déterminer la ligne d'origine dans un algorithme d'optimisation, veuillez suivre ces étapes :

1- Critères de tolérance : L'algorithme provoquera des différences entre les itérations et les itérations réussies qui sont meilleures qu'une certaine tolérance.

2- Vérifiez le nombre d'itérations : L'algorithme arrivera après un nombre fixe d'itérations, en fonction de la convergence.

3- Critère de la variation de la fonction objectif : L'algorithme s'arrête lorsque la variation de la fonction objective est suffisamment petite.

4- Critères de stabilité : L'algorithme arrivera lorsque la solution ne changera pas plus que les signes les plus significatifs dans les itérations. **[32].**

3.3. La programmation par contraintes : (PPC, ou CP pour constraint programming en anglais) est un paradigme de programmation qui permet de résoudre des problèmes combinatoires de grande taille tels que les problèmes de planification et d'ordonnancement **[33].**

En programmation par contraintes, on sépare la partie modélisation à l'aide de problèmes de satisfaction de contraintes (ou CSP pour Constraint Satisfaction Problem), de la partie résolution dont la particularité réside dans l'utilisation active

des contraintes du problème pour réduire la taille de l'espace des solutions à parcourir (on parle de propagation de contraintes).

Dans le cadre de la programmation par contraintes, les problèmes sont modélisés à l'aide de variables de décision et de contraintes, où une contrainte est une relation entre une ou plusieurs variables qui limite les valeurs que peuvent prendre simultanément chacune des variables liées par la contrainte. Les algorithmes de recherche de solution, en PPC, s'appuient généralement sur la propagation de contraintes, pour réduire le nombre de solutions candidates à explorer, ainsi que sur une recherche systématique parmi les différentes affectations possibles de chacune des variables. De tels algorithmes garantissent de trouver une solution, quand elle existe, et permettent de prouver qu'il n'existe pas de solution à un problème s'ils n'ont pas trouvé de solution à la fin de la recherche exhaustive.

3.4. Méthode basée sur les barrières : Ce sont des méthodes basées sur la transformation d'un problème d'optimisation avec contraintes en un problème sans contraintes en introduisant des termes barrières dans la fonction objectif. Ces termes isolants permettent de « pénaliser » les solutions qui ne respectent pas les contraintes, ce qui les rend moins attractives dans la recherche de la solution optimale.

La méthode de multiplication de Lagrange est l'une des techniques les plus utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation avec contraintes. Elle consiste à ajouter à la fonction objectif des termes de Lagrange, qui sont des multiplicateurs de Lagrange associés aux contraintes du problème. Ensuite, le problème d'optimisation a été résolu en trouvant les points fixes de la fonction de Lagrange, qui est la fonction objectif augmentée des termes de Lagrange. En plus de la méthode de multiplication de barrière, qui utilise des termes de barrière pour rendre
les contraintes inactives « coûteuses » en termes de valeur de la fonction objectif. Cela motive l'algorithme d'optimisation à trouver des solutions qui respectent les contraintes, car les solutions qui ne les respectent pas auront une valeur objective très élevée.

Ces méthodes sont efficaces pour résoudre un large éventail de problèmes d'optimisation non linéaire, y compris des problèmes avec contraintes mixtes.

3.5. Méthodes stochastiques : Les méthodes stochastiques sont particulièrement utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation incertains et complexes, dans lesquels les données et les modèles peuvent ne pas être précis ou complets. **[35].**

Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode Improvement Function Evaluation (EF), qui utilise des algorithmes aléatoires pour explorer l'espace de recherche. Un exemple bien connu est l'algorithme de recherche taboue, dans lequel des solutions potentielles sont générées et évaluées de manière aléatoire, puis des mécanismes tabous sont utilisés pour éviter de revisiter des solutions déjà explorées. FE est souvent utilisé pour des problèmes d'optimisation combinatoire, tels que le problème du voyageur de commerce ou la planification de la production. **[36].**

On retrouve également une méthode d'optimisation de distribution aléatoire (SA) qui simule un processus aléatoire pour explorer l'espace de recherche. Tel qu'un algorithme de recuit simulé, qui commence par une solution initiale et accepte potentiellement des solutions pires au fil du temps. **[37].**

Ces méthodes stochastiques fournissent des outils puissants pour résoudre des problèmes d'optimisation dans des environnements où les données et les modèles sont incertains ou incomplets, ou lorsque les problèmes sont trop complexes pour être résolus de manière déterministe.

3.6. Méthodes évolutives : Ce sont des méthodes d'amélioration inspirées de la biologie et de l'évolution, comme

Algorithme génétique qui fonctionne en générant un ensemble initial de solutions candidates représentées par des chromosomes. Ces chromosomes sont ensuite soumis à des processus tels que la sélection, le croisement et la mutation, imitant ainsi les processus biologiques de reproduction et de diversité génétique. Les individus les mieux adaptés, c'est-à-dire ceux dont le chromosome représente la solution optimale ou proche de l'optimale, sont sélectionnés pour former la génération suivante. Ce processus itératif se poursuit jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit atteinte, telle que le nombre maximum d'itérations ou qu'une solution satisfaisante soit obtenue. **[38].**

L'algorithme d'espèces, ou optimisation par essaim de particules (PSO), est une autre méthode évolutive qui s'inspire du comportement social des espèces animales. Dans cette approche, chaque « particule » de la population représente une solution candidate. Les particules se déplacent dans l'espace de recherche en fonction de leur propre expérience et de l'expérience collective des habitants. **[39].**

Toutes ces méthodes sont souvent utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes et multimodaux.

4. L'optimisation numérique des joints collés:

L'optimisation numérique des joints collés est un processus utilisé pour améliorer l'outil de joint collé en termes de résistance, de durabilité, de poids, etc., et il s'agit de réduire les coûts et les matériaux utilisés grâce à l'utilisation d'outils et de techniques d'optimisation numérique pour trouver la combinaison optimale de matériaux, formes géométriques et normes de fabrication.

Le processus d'optimisation numérique des joints comprend généralement les étapes suivantes :

4.1. la modélisation mathématique: La première étape consiste à créer une modélisation mathématique du joint collé et de son environnement est de :

4.1.1. Définition des paramètres du modèle :

- Les caractéristiques du matériau du joint : incluent les propriétés mécaniques, thermiques, et chimiques de l'adhésif et des substrats.
- Géométrie du joint : comprend les dimensions du joint, la rugosité de la surface, et la configuration de l'interface.
- Conditions environnementales : telles que la température, l'humidité, et d'autres facteurs environnementaux qui peuvent affecter les propriétés du matériau et le comportement du joint.
- Contraintes mécaniques : comprennent les charges appliquées, les contraintes de cisaillement, et d'autres contraintes mécaniques qui agissent sur le joint.

4.1.2. Choix de l'approche de modélisation :

- Méthodes analytiques : peuvent être utilisées pour des configurations de joint simples avec des conditions environnementales et mécaniques bien définies.
- Méthodes numériques : comme la méthode des éléments finis, permettent de modéliser des configurations de joints complexes avec des interactions matériau/environnement/mécanique plus réalistes.

4.1.3. Développement des équations :

- Les équations peuvent être basées sur des principes de physique tels que la conservation de la masse, l'équilibre des forces, et les lois de comportement des matériaux, par exemple l'équation de diffusion peut être utilisée pour modéliser la migration de l'eau à travers un joint collé en fonction de la différence de concentration et de la géométrie du joint.

4.1.4. Exemple de modèle :

- Un exemple de modélisation mathématique pourrait être un modèle de joint collé utilisant la loi de Hooke pour représenter le comportement élastique du matériau, combinée avec des équations de diffusion pour modéliser l'absorption d'humidité dans le joint.

4.1.5. Validation du modèle :

- La validation peut être réalisée en comparant les résultats de la modélisation avec des données expérimentales ou des résultats numériques obtenus à partir de simulations de référé , par exemple les Comparaison des déformations prédites par le modèle avec les mesures de déformation réelles lors de tests de traction sur un joint collé.

4.2. Maximisation de la résistance mécanique du joint :

- L'objectif de maximisation de la résistance mécanique du joint vise à garantir que le joint peut supporter les charges mécaniques auxquelles il est soumis sans se rompre. Cela implique souvent l'optimisation de la liaison adhésive entre les substrats, la sélection appropriée des matériaux d'adhésif et la conception de la géométrie du joint pour maximiser la surface de contact et la résistance à la traction. . **[40] , [41].**
- Minimisation du coût de production :

- L'objectif de minimisation du coût de production vise à réduire les dépenses associées à la fabrication et à l'assemblage des joints collés. Cela peut inclure la sélection économique des matériaux d'adhésif, l'optimisation des processus de fabrication et la réduction des coûts de main-d'œuvre. **[42] , [43].**

- Maximisation de la durée de vie du joint :

L'objectif de maximisation de la durée de vie du joint vise à assurer que le joint peut maintenir ses performances structurelles et fonctionnelles pendant une période prolongée. Cela implique souvent l'optimisation des matériaux d'adhésif pour résister à la dégradation, la conception du joint pour minimiser les contraintes et les défauts, ainsi que la prise en compte des conditions environnementales et de chargement prévues. **[44] , [45].**

- Minimisation des effets secondaires tels que les émissions de gaz ou les vibrations :

- L'objectif de minimisation des effets secondaires vise à réduire les impacts négatifs sur l'environnement ou le confort des utilisateurs associés à l'utilisation des joints collés. Cela peut inclure la sélection de matériaux d'adhésif à faible émission de gaz, la conception du joint pour réduire les vibrations indésirables et l'utilisation de techniques d'optimisation pour minimiser les effets secondaires tout en maintenant les performances requises. **[46] , [47].**

4.3. Définition des contraintes : Les contraintes peuvent inclure :

- Contraintes mécaniques :

- Les contraintes mécaniques comprennent les contraintes de traction, de compression et de torsion qui résultent des charges appliquées aux structures assemblées par des joints collés. Elles peuvent également inclure des contraintes de cisaillement et de flexion. Les modèles mathématiques des joints collés doivent prendre en compte ces contraintes pour évaluer la résistance et la durabilité du joint. **[48] , [49].**

- Contraintes thermiques :

- Les contraintes thermiques résultent des variations de température auxquelles le joint est soumis. Ces contraintes peuvent entraîner des déformations et des contraintes résiduelles qui peuvent affecter la performance du joint collé, en particulier dans des environnements où des températures extrêmes sont rencontrées. **[50] , [51].**

- Contraintes de taille et de forme :

- Les contraintes de taille et de forme sont liées à la géométrie du joint collé et aux conditions de fabrication. Des différences de dimensions entre les substrats ou des défauts de fabrication peuvent entraîner des contraintes locales qui affectent la distribution des contraintes et la résistance du joint. **[52] , [53].**

- Contraintes liées à la durabilité et à la sécurité :

- Ces contraintes concernent la capacité du joint collé à maintenir ses performances dans des conditions environnementales variées et à résister à la dégradation au fil du temps. Elles incluent la résistance à l'humidité, à la corrosion, aux rayonnements et à d'autres facteurs environnementaux. **[54] , [55].**

4.4. Sélection de la méthode d'optimisation : En fonction de la nature du problème et des contraintes impliquées, une méthode d'optimisation numérique appropriée doit être choisie. Les méthodes couramment utilisées pour l'optimisation des joints collés incluent

- Descente de gradient :

- Cette méthode consiste à ajuster itérativement les paramètres du modèle pour minimiser une fonction objectif, généralement l'écart entre les propriétés attendues et réelles du joint collé.

- Elle est souvent utilisée pour ajuster les paramètres du processus de fabrication du joint, tels que la pression d'application, la température de polymérisation, etc.

- L'optimisation basée sur la descente de gradient peut être efficace pour trouver un minimum local de la fonction objectif, mais elle peut également être sensible aux conditions initiales et aux points de convergence.

- Des algorithmes populaires tels que la descente de gradient stochastique (SGD) ou la descente de gradient avec momentum sont parfois utilisés pour accélérer la convergence.

- Exemple d'application : Optimisation des paramètres de processus pour maximiser la résistance à la traction d'un joint collé tout en minimisant l'épaisseur de l'adhésif utilisé

- Programmation à contraintes :

- Cette approche est utilisée pour optimiser les joints collés tout en respectant un ensemble de contraintes spécifiques, telles que les limites de charge admissible, les contraintes de déformation, ou les propriétés du matériau.

- Elle peut être mise en œuvre en utilisant des techniques d'optimisation basées sur la programmation linéaire, non linéaire ou mixte en intégrant les contraintes dans la fonction objectif ou en les traitant séparément.

- L'optimisation avec programmation à contraintes permet de garantir que les solutions optimales respectent toutes les exigences du problème.

- Exemple d'application : Optimisation de la géométrie d'un joint collé pour maximiser sa résistance tout en respectant les contraintes de déformation imposées par la structure adjacente.

- Méthodes basées sur les barrières :

- Ces méthodes traitent les contraintes d'inégalité en les transformant en termes de pénalités dans la fonction objectif, ce qui permet de les intégrer de manière transparente dans le processus d'optimisation.

- Elles sont souvent utilisées lorsque les contraintes sont difficiles à exprimer de manière explicite dans le cadre d'un problème d'optimisation standard.

- Les méthodes basées sur les barrières permettent de trouver des solutions qui minimisent la fonction objectif tout en restant à l'intérieur des limites imposées par les contraintes.

- Exemple d'application : Optimisation de la quantité d'adhésif utilisée dans un joint collé tout en évitant les défaillances dues à des contraintes de résistance imposées par la charge de service.

- Méthodes stochastiques :

- Ces méthodes sont utilisées pour explorer de manière probabiliste l'espace des solutions, ce qui est utile lorsque les joints collés présentent des comportements complexes ou lorsque les conditions de service sont soumises à des variations aléatoires.

- Elles peuvent être mises en œuvre à l'aide d'algorithmes évolutifs, de méthodes de Monte Carlo ou d'optimisation basée sur des techniques d'échantillonnage.

- Les méthodes stochastiques permettent de prendre en compte la variabilité des matériaux, des conditions environnementales et des paramètres de fabrication dans le processus d'optimisation.

- Exemple d'application : Optimisation de la conception d'un joint collé pour maximiser sa durabilité dans des conditions de service sujettes à des variations aléatoires de température et d'humidité.

En combinant ces différentes méthodes d'optimisation en fonction des caractéristiques spécifiques du problème de joint collé, on peut obtenir des solutions robustes et fiables qui répondent aux exigences de performance et de fiabilité.

4.5. Résolution de l'optimisation : l'optimisation numérique est ensuite effectuée à l'aide de la méthode choisie et des données de modélisation qui incluent toutes les informations pertinentes sur le joint interconnecté et son environnement. **[56].**

Cela peut inclure des données sur les matériaux utilisés, les conditions de service attendues, les propriétés des matériaux, les dimensions géométriques des joints, les restrictions de charge, etc. Tout cela dans le but d'obtenir une solution optimale ou quasi optimale pour les joints collés considérés.

La phase de validation et de mise à jour dans le processus d'optimisation des joints collés est une étape critique pour garantir que la solution obtenue est fiable et applicable dans des conditions réelles. Voici une explication plus détaillée de cette étape :

- Validation de la solution:

- La validation de la solution optimale implique généralement de comparer les prédictions du modèle optimisé avec les résultats expérimentaux obtenus par le biais de tests réels sur des joints collés. Ces tests peuvent inclure des essais de traction, des tests de cisaillement, des tests de fatigue, etc., en fonction des exigences spécifiques du projet. **[57].**

- Les résultats expérimentaux fournissent une mesure concrète de la performance du joint collé dans des conditions réelles, ce qui permet de déterminer si la solution optimale prédite par le modèle mathématique correspond à la réalité.

- Analyse des écarts et des erreurs :

- En comparant les prédictions du modèle avec les résultats expérimentaux, il est possible d'identifier les écarts et les erreurs entre les deux. Ces écarts peuvent être dus à des simplifications ou des hypothèses excessives dans le modèle mathématique, des erreurs de mesure lors des tests expérimentaux, ou d'autres facteurs imprévus.

- L'analyse de ces écarts permet de comprendre les limites du modèle et les domaines où des améliorations sont nécessaires pour améliorer sa précision et sa validité.

- Mise à jour des modèles et des méthodes d'optimisation:

- Sur la base des résultats de la validation, les modèles mathématiques peuvent être ajustés, révisés ou améliorés pour mieux représenter le comportement réel des joints collés. Cela peut impliquer l'ajout de termes supplémentaires, la correction des paramètres, ou même la modification de l'approche mathématique sous-jacente. **[57].**

- De même, les méthodes d'optimisation utilisées pour résoudre le problème peuvent être révisées ou ajustées pour tenir compte des nouveaux paramètres ou des nouvelles contraintes identifiés lors de la validation.

- Itération du processus :

- Une fois que les modèles et les méthodes ont été mis à jour, le processus d'optimisation peut être réitéré pour rechercher une solution améliorée. Cela implique souvent plusieurs itérations du processus de validation et de mise à jour jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit obtenue. **[58].**

En résumé, la phase de validation et de mise à jour dans l'optimisation des joints collés est un processus itératif qui implique la comparaison des prédictions du modèle avec les résultats expérimentaux, l'identification des écarts et des erreurs, et la mise à jour des modèles et des méthodes en conséquence. Cette étape est cruciale pour garantir que la solution optimale obtenue est fiable et valide dans des conditions réelles.

5. Généralité sur logiciel d'expérience (MODDE) :

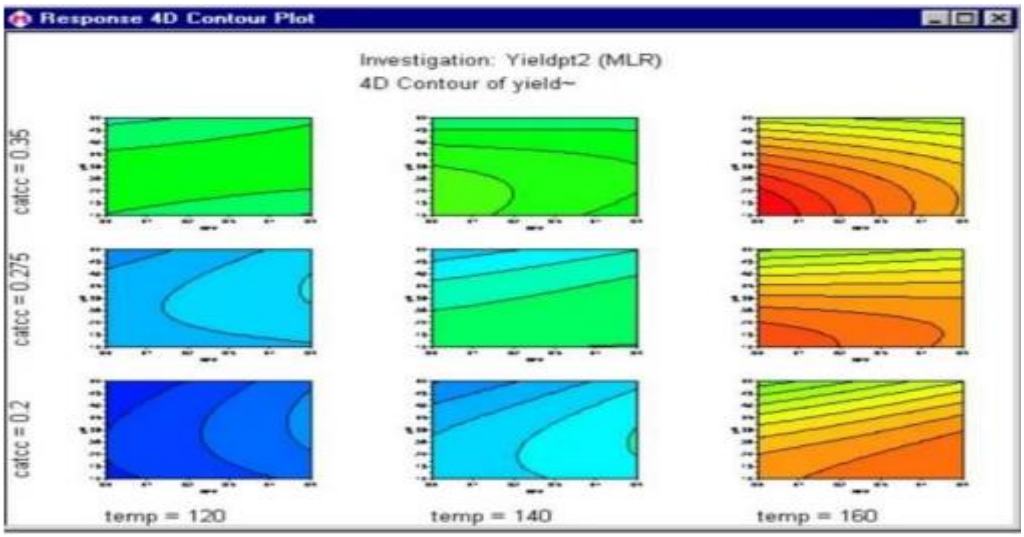


Figure27. Le MODDE d'expérience (MODDE 5.0)

MODDE 5 est un programme spécialisé en analyse et optimisation statistiques, développé par Umetrics, une filiale du département Analytics de Sartorius Stedim Biotech. Le programme est utilisé pour concevoir des expériences et analyser des données expérimentales, y compris l'analyse de données chromatographiques, la conception et la validation de processus, ainsi que la modélisation statistique, en particulier dans les domaines de la recherche et du développement. Ainsi que dans les industries pharmaceutique, chimique, alimentaire et manufacturière.

5.1. L'objectif de logiciel d'expérience (MODDE) :

identifiant les combinaisons optimales de niveaux des facteurs qui influencent les réponses mesurées.

MODDE vise à maximiser les réponses souhaitées ou à minimiser les réponses indésirables, tout en prenant en compte les contraintes et les interactions potentielles entre les facteurs.

L'optimisation par le biais de MODDE permet de :

- Identifier les facteurs clés : MODDE permet de déterminer les facteurs qui ont le plus d'impact sur les performances du système. Cela permet de se concentrer sur les variables essentielles et de les optimiser pour obtenir les meilleurs résultats.

- Réduire les essais : MODDE permet de réduire le nombre d'essais expérimentaux nécessaires en utilisant des plans d'expérience efficaces. Cela permet d'économiser du temps, des ressources et des coûts associés à la réalisation d'un grand nombre d'essais.

- Comprendre les interactions entre les facteurs : MODDE permet d'analyser les interactions entre les facteurs et de comprendre comment ils influencent les réponses mesurées. Cela permet d'ajuster les niveaux des facteurs de manière optimale pour maximiser les performances.

- Fournir des recommandations pratiques : MODDE fournit des recommandations pratiques pour optimiser les performances du système. Ces recommandations sont basées sur des analyses statistiques rigoureuses des données expérimentales, ce qui permet d'obtenir des résultats fiables et reproductibles . **[59].**

5.2. Fonctionnalités et capacités de MODDE 5 pour l'Analyse Statique et l'Optimisation :

MODDE 5 propose une gamme de fonctionnalités et de capacités pour l'analyse statistique et l'optimisation, y compris :

5.2.1. Analyse multivariée : MODDE 5 permet d'analyser simultanément plusieurs variables d'un ensemble de données pour révéler des relations complexes et des modèles cachés entre ces variables, ce qui peut aider à comprendre les processus de base et à optimiser les conditions de travail.

5.2.2. Conception de procédés : Le programme fournit des outils pour concevoir des processus robustes et efficaces en utilisant des techniques telles que :

-Analyse en composantes principales (ACP) : Ceci se fait en réduisant les dimensions des données et en identifiant les variables les plus importantes qui affectent la qualité du produit final. En visualisant les relations entre les variables dans un espace de faible dimension, les utilisateurs peuvent mieux comprendre la structure des données et découvrir des tendances et des modèles significatifs.

-Analyse du réseau Pearson : cette analyse explore les relations linéaires entre les variables du processus de fabrication. En construisant un réseau de relations basé sur les coefficients de corrélation de Pearson, les utilisateurs peuvent identifier les interactions entre les variables et évaluer l'impact de chaque variable sur la qualité du produit final.

- Analyse de corrélation partielle (PCOR) : MODDE 5 comprend également la fonction d'analyse de corrélation partielle, qui vous permet de déterminer les relations directes entre les variables tout en contrôlant les effets d'autres variables. Cette approche permet de découvrir des relations causales entre les variables et de prendre des décisions éclairées pour optimiser les paramètres du processus de fabrication.

5.2.3. Optimisation: MODDE 5 fournit des outils pour l'optimisation des conditions de travail, telles que :

-Optimisation des conditions de chromatographie **:** La chromatographie est une technique utilisée pour séparer les composants d'un mélange en fonction de leurs interactions avec une phase stationnaire et une phase mobile. MODDE 5 peut être utilisé pour optimiser les paramètres de chromatographie tels que la composition de la phase mobile, le débit d'écoulement, la température, etc. L'objectif est d'obtenir une séparation optimale des composants cibles avec une efficacité maximale et des temps de rétention appropriés.

-Optimisation des conditions de fermentation **:**La fermentation est un processus biologique utilisé pour produire des substances telles que des médicaments, des enzymes, des aliments fermentés, etc. MODDE 5 peut être utilisé pour optimiser les conditions de fermentation telles que la composition du milieu de culture, la température, le pH, la concentration en nutriments, etc. L'objectif est d'obtenir des rendements de fermentation élevés et des produits de haute qualité de manière efficace et reproductible.. **[60].**

5.2.4. Validation de processus : MODDE 5 permet d'effectuer des études de validation de processus, en utilisant des techniques telles que l'analyse des

variations de processus (PVA) qui permet d'analyser et de quantifier les sources de variation dans le processus, tandis que MAVA se concentre sur l'impact

Des variations de matériaux sur les performances du processus. Ces technologies aident les entreprises à améliorer leurs processus de fabrication et à garantir la qualité des produits.

5.2.5. Visualisation et modélisation : MODDE 5 propose un ensemble d'outils de visualisation et de modélisation nécessaires pour aider à analyser et interpréter les données, y compris des outils de création de modèles prédictifs pour extrapoler les résultats à partir de données existantes. Et une simulation in silico pour choisir différents scénarios hypothétiques et évaluer l'impact de différentes variables sur les résultats finaux.

5.2.6. Intégration avec d'autres systèmes : Le logiciel peut être intégré avec d'autres systèmes de gestion de données et de laboratoire pour faciliter la collecte, l'analyse et la gestion des données.

En résumé, MODDE 5 est conçu pour être facilement accessible et utilisable par des utilisateurs non spécialistes en statistiques et en optimisation, grâce à une interface utilisateur intuitive et des fonctionnalités de guide de procédure. Cependant, il est également adapté aux experts en statistiques et en optimisation, en offrant une grande flexibilité et des fonctionnalités avancées pour la personnalisation et la création de modèles personnalisés.

6. Logiciel ABAQUS :

6.1. Définition :

ABAQUS est un progiciel de calcul d'éléments finis développé par ABAQUS, Inc (Dassault Systèmes).Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE..

ABAQUS/Standard utilise un schéma d'intégration implicite traditionnel et sert de solveur polyvalent pour diverses tâches de calcul. D'autre part, ABAQUS/Explicit utilise un schéma d'intégration explicite, spécifiquement conçu pour résoudre des problèmes non linéaires dynamiques ou quasi-statiques. ABAQUS/CAE fournit une plateforme intégrée pour la visualisation et la modélisation, s'interfaçant de manière transparente avec les deux solveurs mentionnés ci-dessus**.** Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications.

Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages C++, Fortran pour les parties calcul et Python pour les scripts et les paramétrisations. La gestion de l'interface graphique est assurée par FOX Toolkit.

ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

ABAQUS fut d'abord conçue pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériaux. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues. **[61].**

6.2. Description des possibilités d'ABAQUS

ABAQUS est un solveur (Standard, Explicit, Implicite, etc.) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier (entrée) ou fichier de données d'extension (.inp) et qui écrit la solution dans un fichier (de sortie) ou fichier de résultats d'extension (.odb) (Tableau)

Le fichier (texte) de données :	**Le fichier de résultats :**
Extension : **inp** Contenu : mots clés qui décrivent les géométries, les matériaux, les conditions aux limites	Extension : **odb** Contenu : contours et courbes résultats

Tableau1. Fichier abaqus

Une simulation numérique peut être réalisée en créant un fichier d'entrée par l'intermédiaire d'un éditeur texte en connaissant les différents mots clés ou en utilisant l'interface graphique d'ABAQUS CAE.

ABAQUS couvre presque tout les domaines de la physique et tous les types de problèmes

- Mécanique
- Thermique
- Electrique
- Problèmes couplés Problèmes:
- Statique et dynamique
- Linéaires et non linéaires

La gamme d'éléments proposée par ABAQUS est très étendue (plus de 100) et il est possible de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard) (Figure).

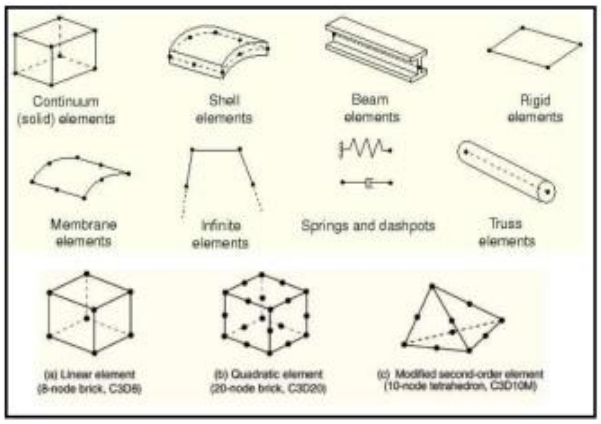


Figure 28. Types d'éléments

6.2.1. Les unités : Avant de débuter la définition d'un modèle sous ABAQUS, il est nécessaire de choisir le système d'unités à utiliser. Il n'existe aucun système d'unités intégré dans ABAQUS. Il est nécessaire de spécifier toutes les données dans un système d'unités conforme.

Longueur	Mètres	mm
Force	Newton	Newton
Pression/contrainte	Pascal	MPa
Densité	Kg/m3	Tonnes/mm3
Masse	Kg	Tonnes
température	Kelvin	Kelvin

Tableau 2. Les unités

6.2.2. Les principales fonctionnalités et capacités d'Abaqus incluent :

6.2.2.1. Analyse structurale : Abaqus permet de modéliser et d'analyser le comportement des structures sous différentes charges et conditions environnementales, y compris les contraintes mécaniques (traction, compression, flexion et torsion) et thermiques (changements de température, gradients thermiques, conduction, convection et rayonnement thermique), ce qui en fait Il est possible de modéliser le comportement des matériaux dans différentes conditions de température. En simulant l'effet de l'humidité sur les matériaux et les structures et en modélisant sa diffusion à travers les matériaux, outre les dilatations et contractions résultant de ses modifications, il permet également de modéliser les phénomènes de déformation non linéaire, plastique et viscoélastique, en plus des matériaux composites et des grandes déformations. Structures.

6.2.2.2. L'analyse dynamique : Le logiciel permet d'étudier le comportement des structures et des systèmes mécaniques sous des charges variables dans le temps, telles que :

Vibrations en modélisant et en analysant les vibrations des structures en réponse à des stimuli dynamiques, tels que des charges cycliques ou des forces cycliques. Cela comprend l'analyse des fréquences naturelles, des modèles de vibrations, des réponses dynamiques des structures, des impacts et des ondes de choc. **[62].**

- Impacts : Le programme peut simuler les effets d'un impact sur les structures, tels que des collisions entre des parties de la structure ou entre la structure et un objet externe. Cela permet l'analyse des déformations, pressions et forces résultant de ces effets. **[63].**

- Ondes de choc : Abaqus peut modéliser la propagation des ondes de choc à travers les structures, ainsi que les effets dynamiques associés, tels que les déformations locales et les hautes pressions. Ceci est particulièrement utile pour analyser des structures soumises à des charges explosives ou à des impacts soudains.

6.2.2.3. Analyse de durabilité : La simulation sur le programme abaqus permet d'évaluer la durabilité des matériaux et des structures en analysant leur résistance aux dommages accumulés dans des conditions de chargement répétées ou variables. Cela peut inclure la prise en compte des effets de la fatigue, de la corrosion, de la dégradation des matériaux, etc.

6.2.2.4. Analyse cinématique et cinétique utilisant Abaqus vise à étudier le mouvement et les forces agissant sur les structures et les systèmes mécaniques simulés dans le programme, permettant l'évaluation de leur comportement dynamique dans différentes conditions de chargement et de mouvement.

6.2.2.5. Modélisation des matériaux :

Abaqus est bien connu pour être capable de travailler avec une vaste bibliothèque de modèles de matériaux, y compris les métaux, les plastiques, les caoutchoucs, les mousses, les composites, les sols granulaires, les roches et le béton ordinaire et armé. **[64].**

Tous les problèmes ne sont pas constitués uniquement de matériaux isotropes linéaires. Abaqus jouit d'une bonne réputation pour les métaux, les caoutchoucs et les composites. Avec cela, les propriétés élastiques et plastiques peuvent être attribuées aux matériaux isotropes ou anisotropes. Elles peuvent également

dépendre de la vitesse et de la température. Pour une modélisation plus spécifique dans certaines industries, des modèles de matériaux de sol et de roche ont été développés ainsi que des modèles de béton et de céramique. Enfin, de nombreuses propriétés d'endommagement et de défaillance peuvent être implémentées dans la définition du matériau pour déterminer la fissuration et la défaillance du matériau

Abaqus/CAE, traiter les données et dériver des comportements de matériaux isotropes élastiques et plastiques à partir des données.

.7. Conclusion

En conclusion, ce chapitre offre une exploration approfondie de la progression historique, des méthodologies et des outils logiciels associés à l'optimisation numérique. De ses débuts à ses applications contemporaines, l'évolution des techniques d'optimisation est examinée. À travers le prisme de l'optimisation des joints collés, l'utilité du logiciel MODDE est mise en avant, aux côtés d'un aperçu des capacités du logiciel ABAQUS dans l'analyse par éléments finis. Ce chapitre sert de guide complet, offrant des insights sur le passé, le présent et l'avenir de l'optimisation numérique dans les disciplines de l'ingénierie.

CHAPITRE 03

La méthode des éléments finis

1. Introduction :

La méthode des éléments finis (MEF) est devenue un outil indispensable dans le domaine de l'ingénierie et des sciences appliquées pour la modélisation et l'analyse numérique de structures complexes. Cette méthode, qui repose sur des concepts mathématiques solides et des techniques informatiques avancées, permet de résoudre une vaste gamme de problèmes dans des domaines aussi divers que l'aérospatiale, la mécanique des fluides, la mécanique des solides, la biologie et bien d'autres.

La popularité croissante de la méthode des éléments finis découle de sa capacité à fournir des solutions précises et efficaces à des problèmes d'ingénierie réels. En discrétisant le domaine d'intérêt en éléments finis, cette méthode permet de transformer des problèmes complexes en un système d'équations algébriques, pouvant être résolu numériquement à l'aide d'algorithmes informatiques.

Dans ce chapitre, nous explorerons la méthode des éléments finis ca historique jusqu'a a ces avantages dans le paysage scientifique et ingénierie

2. Historique :

La méthode des éléments finis remonte à l'antiquité, où les Grecs reconnaissaient déjà l'approche de diviser les problèmes complexes en plus simples. On peut par exemple approcher le périmètre d'un cercle en

Calculant le périmètre d'un polygone à n côtés, pourvu que n soit suffisamment grand. Il suffit alors de connaître la longueur d'un segment de droite, problème beaucoup plus simple que celui de la

Longueur d'un arc de cercle**[65].**. Son développement moderne débute au début du XXe siècle, avec des chercheurs approximant la continuité élastique à l'aide de tiges élastiques paraboliques distinctes. Courant, en 1943, est reconnu comme le premier à formaliser la méthode en utilisant une interpolation polynomiale sur des sous-régions triangulaires pour étudier les problèmes de torsion , La méthode est ensuite perfectionnée et appliquée avec succès chez Boeing en 1953 pour l'analyse des structures d'ailes d'avion, on a développé le premier élément fini, sa matrice de rigidité, l'assemblage et la résolution par la méthode des déplacements

Marquant ainsi le début de son utilisation pratique. Au cours des décennies suivantes, elle devient un outil essentiel dans divers domaines de l'ingénierie, notamment l'aérospatiale et la mécanique des fluides, grâce aux contributions de chercheurs renommés. Dans les années 1960, l'expression "éléments finis" est popularisée par Clough dans un article sur l'analyse de l'élasticité linéaire en deux dimensions. C'est à cette époque que les chercheurs ont commencé à étendre l'application de cette méthode à d'autres domaines de l'ingénierie, tels que les problèmes de transfert de chaleur et de débit de fuite**.** En 1967, Zienkiewicz et

Cheung ont publié le premier livre entièrement dédié à la méthode des éléments finis, marquant ainsi une étape importante dans sa documentation et sa diffusion.

Dans les années 1970, les applications des éléments finis se sont élargies pour inclure des problèmes non linéaires et des grandes déformations. En 1972, le livre d'Oden sur les continus non linéaires a marqué une avancée significative dans ce domaine. Depuis lors, la méthode des éléments finis a été intégrée en tant que discipline des mathématiques appliquées, utilisée pour modéliser numériquement une multitude de systèmes physiques dans divers domaines. Les bases mathématiques de cette méthode ont été établies dans les années 1970, accompagnées du développement de nouveaux éléments et de recherches sur la convergence, parmi d'autres domaines connexes.**[66]**

De nos jours, les éléments finis jouent un rôle essentiel, indispensable en mécanique (fluides et solides, interactions, structures), et sont utilisés dans de nombreux domaines qui impliquent des problèmes d'EDP aux limites, tels que les mathématiques financières ou l'électromagnétisme. Il existe de nombreux codes industriels (solveurs) qui sont généralement associés à un logiciel de CAO 1 ou de Design Assisté par ordinateur (CAD) en anglais. Considérons Abaques, Cast3M et bien d'autres encore.**[67].**

3. Définition :

La méthode des éléments finis également connue sous le nom de Méthode des Mailles Finies ce nom vient de la décomposition du domaine d'étude en éléments : ils sont Souvent représenté par un maillage (voir figure) est une procédure numérique qui peut être appliquée pour obtenir des solutions d'un groupe Une variété de problèmes en ingénierie. Qui consiste à «découper» la pièce que l'on étudie en un grand nombre de petits éléments, appelés "nœuds", et en appliquant des équations mathématiques sur ces éléments sur lesquels les calculs seront plus faciles à effectue**[68].**

MEF peut être appliquée pour obtenir des solutions d'un groupe Les problèmes stationnaires, transitoires, linéaires ou non linéaires peuvent être analysés Linéarité dans l'analyse des contraintes, le transfert de chaleur, l'écoulement des fluides et les problèmes électromagnétiques sa capacité à traiter des problèmes difficiles et complexes permet également de simplifier les calculs et de réduire le temps et les coûts de conception et d'analyse. Il faut prendre en compte la taille et la répartition des éléments finis en fonction de la complexité du problème et des contraintes imposées, afin d'éviter des erreurs de calcul et des résultats non fiables.

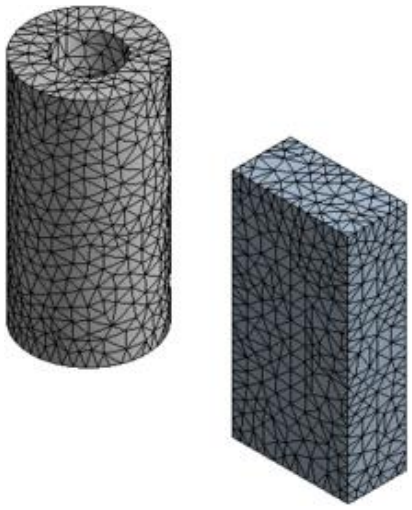


Figure 29. Maillages

4. Principe de la méthode des éléments finis :

la méthode fonctionne en divisant le domaine physique en petits éléments finis, puis en approximant la solution du problème sur chaque élément. Les solutions approchées des éléments sont ensuite assemblées pour obtenir une solution approchée pour l'ensemble du domaine

On procède en respectant les étapes suivantes ::

1. Formulation des équations: Les équations différentielles aux dérivées partielles (EDP) gouvernant le problème sont exprimées sous forme intégrale.

2. Discrétisation du domaine: Le domaine physique est divisé en éléments finis, généralement des tétraèdres, des prismes ou des hexaèdres.

3. Approximation sur un élément: La solution approchée sur chaque élément est exprimée à l'aide de fonctions de base simples, comme des polynômes.

4. Assemblage des éléments: Les contributions des éléments individuels sont combinées pour former un système d'équations algébriques linéaires (SLAE).

5. Résolution du système: Le SLAE est résolu pour obtenir les valeurs approchées des variables physiques aux nœuds des éléments.

6. Post-traitement: Les résultats sont analysés et visualisés pour obtenir des informations utiles sur le comportement du système physique.**[69].**

5. Caractéristique d'un élément finis :

5.1. Attributs d'un élément fini :

Une division artificielle (par l'imagination) d'un environnement continu en éléments finis permet de séparer l'un de ces éléments afin de l'analyser et d'en déterminer les caractéristiques. La détermination d'un élément fini englobe les aspects suivants

Géométrie :Un élément fini peut être un segment droit ou courbé, triangulaire ou quadrilatère (plan ou courbe), tétraèdre, prismes ou hexaèdre (brique). Les éléments peuvent être séparés par des points, des segments de droite ou de courbe, des faces planes ou courbes.

5.2. Matériau : Le matériau de l'élément est déterminé par une loi de comportement telle que la loi de Hooke isotrope, etc.

5.3. Nœuds : Les nœuds sont essentiels pour définir la géométrie et garantir la connexion entre les éléments ; ils occupent les sommets, les milieux des arêtes et des faces, etc.

5.4. Degrés de liberté : La fonction d'approximation (généralement appelée champ de déplacements ou champ de potentiels) est calculée en fonction des valeurs spécifiques qu'elle prend aux nœuds, en les transformant en valeurs inconnues nodales. En combinant les différents éléments adjacents, l'union permet de reconstruire la solution complète (assemblage) tout en respectant certaines règles, appelées critères de convergence.

5.5. Forces nodales : sont des forces qui sont liées aux degrés de liberté à travers les nœuds. Ces variations sont causées par les charges etc.). Grâce à ces paramètres d'identification, il est possible de créer les deux caractéristiques essentielles d'un élément fini, à savoir sa matrice de rigidité et sa force vectorielle.**[70].**

6. Représentation des éléments finis:Trois catégories d'éléments finis à une, deux et trois dimensions sont identifiées. Chaque élément est caractérisé par sa forme géométrique, le type de courbe ou de surface qui forme sa frontière, ainsi que le nombre de nœuds géométriques.

6.1. Les éléments unidimensionnels : comprennent des barres, des poutres rectilignes ou des courbes, qui peuvent être utilisés individuellement ou associés à des plaques pour représenter les raidisseurs dans un voile.

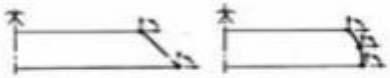
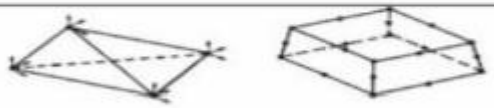
6.2. Les éléments bidimensionnels : élasticité plane, plaque en flexion, coques courbes, de forme triangulaire ou quadrangulaire

6.3. Les éléments tridimensionnels : éléments de volume ou coques épaisses.

6.4. Les éléments axisymétriques : forment une catégorie spécifique : tous ont une section triangulaire ou quadrangulaire, avec des coques coniques ou méridiennes courbes.**[71].**

CLASSE	NOM	GÉOMÉTRIE
1 D.	Barre	
	Poutre	

(a)

2 D.	Elasticité 2D membranes	
	plaques en flexion	
	Coques	
AXISYM.	Tores axisymétriques	
	Coques axisymétriques	
3 D.	Volume	
	Coque épaisse	

(b)

Figure30. Types des éléments finis

7. Choix des éléments finis :

Il est essentiel que les éléments soient adaptés à la nature du problème à aborder, c'est-à-dire qu'ils respectent les hypothèses et se conforment aux conditions de la modélisation. D'autres programmes proposent une sélection très étendue, d'autres très restreinte. Il est donc nécessaire d'examiner les caractéristiques principales des éléments disponibles :

- Modèle (déplacement, équilibre, mixte.
- Convergence (critères et taux).
- Degré (des divers champs).
- Nœuds, et inconnues aux divers nœuds.
- Compatibilité des éléments les uns avec les autres.
- Performances et limitations..

8. Qualité d'un élément fini : Un bon élément fini doit réunir les propriétés suivantes :

- Aucun défaut de base (mécanisme…).
- Convergence rapide.
- Bonne précision, déjà dans un maillage grossier.
- Qualités de convergence et précision conservée pour une distorsion raisonnable.
- Vecteurs forces consistants.
- souplesse d'emploi.
- Connexion (conforme) possible avec d'autres modèles.
- Dérivation théorique simple et claire.
- Programmation efficace et limpide.**[72].**

9. Rôle crucial de méthode des éléments finis dans l'optimisation des structures :

Les ingénieurs s'appuyaient sur des méthodes de calcul manuelles et des tests physiques pour évaluer les performances des structures. Avant l'avènement de la FEA, cela prenait souvent du temps et était sujet aux erreurs. De plus, cela a limité la capacité des ingénieurs à concevoir des structures complexes et optimales. L'introduction de la FEA a révolutionné l'optimisation structurelle en fournissant une solution numérique puissante pour analyser le comportement des structures sous diverses charges et conditions. La FEA fournit une approximation précise du comportement global d'une structure. Voici quelques-unes des façons dont MEF contribue à atteindre cet objectif :

9.1. Modélisation précise : pour créer le modèle d'éléments finis dune structure La méthode des éléments finis (MEF) simplifie la modélisation complexe en divisant le domaine en petits éléments. Reliés par des nœuds Chaque élément est décrit par

des équations simples, facilitant ainsi la création d'un modèle précis de la structure. On obtient une représentation numérique précise du comportement global de la structure. Cette approche permet de partager les degrés de liberté aux nœuds voisins, simplifiant ainsi la résolution des équations algébriques. En combinant les équations de chaque élément, on peut obtenir un modèle complet et précis de la structure, prêt à être analysé et optimisé pour répondre aux exigences spécifiques.**[73].**

Exemple :

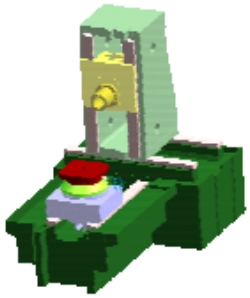


Figure 31. Centre d'usinage vertical

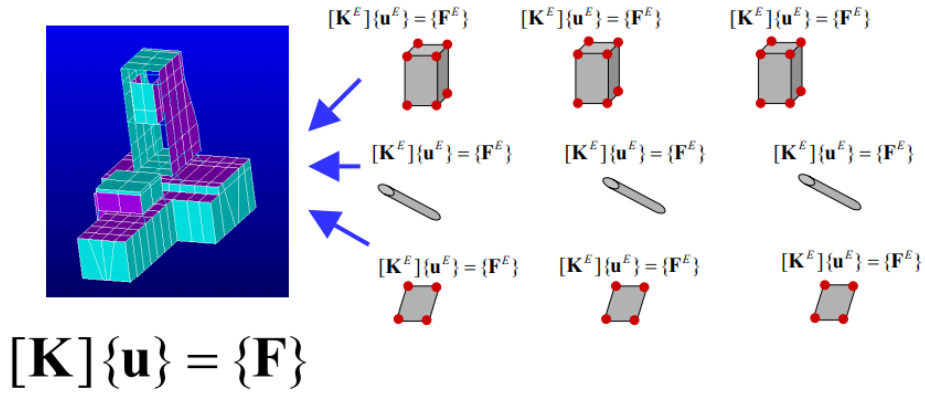


Figure 32. Obtenir les équations algébriques pour chaque élément

9.2. Analyse des performances :Il existe de nombreuses analyses qui permettent d'identifier les domaines qui pourraient nécessiter des améliorations pour obtenir la conception et les performances optimales de la structure.

l'utilisation de MEF permet aux ingénieurs d'analyser diverses propriétés des structures, telles qu'une analyse approfondie des contraintes pour évaluer le degré de résistance de différents matériaux et conceptions à différentes charges, forces sismiques ou trafic. ponts, en complément de l'analyse vibratoire pour étudier le comportement de structures dynamiques telles que les ponts sous charges

dynamiques. Ses résultats identifient les domaines qui pourraient nécessiter des améliorations

9.3. Conception Optimisée : En utilisant la MEF .les concepteurs peuvent analyser l'influence de diverses variables sur les performances des structures comme la disposition des matériaux et les paramètres de fabrication la taille pour trouver des solutions optimales. Cette capacité d'optimisation permet de créer des structures plus légères, plus rigides et plus efficaces

9.4. Réduction du poids et du coût : une capacité de réduise les coûtes de matériaux et de construction. Tout en maintenant leur résistance et leur durabilité al'aide de mef d'optimisation conception des structures Cette capacité d'analyse des coûts permet aux entreprises de rationaliser leurs opérations et de commercialiser des produits rentables.

9.5. Amélioration de la durée de vie et de la fiabilité : MEF offre un haut niveau de précision dans la prévision du comportement structurel et contribue à assurer la sécurité des structures en identifiant les points faibles et les points de défaillance potentiels, permettant ainsi aux ingénieurs d'identifier les problèmes potentiels avant le début de la construction, ce qui contribue à améliorer la durée de vie et la fiabilité des structures. .

9.6. Test et validation : grâce à la capacité de MEF représenté dans le Simulation des conditions de chargement réelles et évaluation des performances des structures telles que les charges élevées et les vibrations aide à réduire la nécessité de tests coûteux et accélère le TEMPS de développement et Validation des conceptions disponibles dans des conditions réelles

9.7. Innovation et développement de nouveaux matériaux:MEF permet aux développeurs et l'ingénieur de créer des matériaux et des procédés de fabrication de pointe. Cela favorise et permet le développement de structures plus performantes, légères et durables.

Finalement en peut dire que L'analyse par méthodes éléments finis est devenue un outil puissant dans ce domaine, révolutionnant la façon dont les ingénieurs abordent la conception structurelle .et le aide pour concevoir des systèmes efficaces, économiques et fiables.

10. L'utilisation omniprésente des éléments finis dans le paysage scientifique et ingénierie :

10.1. Ingénierie structurale : MEF permet des simulations de design contribue à améliorer la durée de vie et la fiabilité des structures AR 'identifier et de corriger les problèmes de conception à un stade précoce du processus de développement

10.2. Electromagnétisme : la Méthode des Éléments Finis (MEF) est utilisée dans le domaine de l'électromagnétisme pour modéliser les défauts fins. Cette méthode

consiste à remplacer le défaut fin par une surface imperméable au courant sur laquelle des conditions aux limites appropriées sont appliquées pour prendre en compte la discontinuité du champ électromagnétique. En suit , on peut analyser l'interaction électromagnétique entre la sonde et le défaut pour des configurations de CND par courants de Foucault. ! aussi ils sont couramment utilisées pour la conception de dispositifs électroniques, la simulation de champs électromagnétiques, ou l'analyse de structures métalliques soumises à des champs magnétiques, les méthodes des éléments finis offrent une approche puissante et flexible pour résoudre les équations de Maxwell et d'autres équations fondamentales de l'électromagnétisme.

10.3. Mécanique des fluides :MEF aide à résoudre les équations fondamentales qui décrivent le mouvement des fluides, telles que les équations de Navier-Stokes, par fournir une approximation des domaines de définition des équations à résoudre En plus la simulation du comportement des fluides dans une large gamme d'applications industrielles, ces simulations permettent l'analyse du comportement des fluides dans différentes conditions de fonctionnement, ce qui est essentiel pour concevoir et améliorer les performances de ces systèmes.MEF est particulièrement avantageux pour la modélisation de systèmes d'écoulement de fluides complexes, qui incluent des fluides circulant dans des systèmes complexes.

10.4. Acoustique: La simulation des basses fréquences n'est pas possible avec les méthodes traditionnelles de simulation acoustique de la pièce, telles que le suivi des rayons et les sources images. La méthode des éléments finis (FEM fournit un outil pratique et a été utilisée pour modéliser l'acoustique d'une pièce à basse fréquence une simulation d'un petit studio est présentée en utilisant un code MEF où le les absorbeurs de bruit sont modélisés à l'aide d'impédances de surface.

l'analyse et l'optimisation de l'acoustique dans diverses applications àl'aide DE MEF, permettant de créer des environnements sonores agréables et fonctionnels.

10.5. Géologie et géophysique : La MEF est un outil précieux pour mieux comprendre les processus géologiques et pour résoudre des problèmes concrets liés à l'exploitation des ressources naturelles et à la protection de l'environnement. elle permet de modéliser et de simuler une large gamme de phénomènes géologiques complexes comme la propagation des ondes de contrainte l'interaction dynamique entre les structures du sol l'infiltration de fluides dans les sols et les roches Analyse des Fréquence et modes propres des ouvrages enterrés et semi-enterrés

10.6. Biomédecine : L'utilisation de la méthode des éléments finis permet de simuler le comportement mécanique de nombreuses applications médicales, comme les os et les dents. Cette simulation permet de connu la durabilité des os et des dents à différents types de contraintes, ce qui est utile aux médecins pour connaître leur capacité portante. Pour les implants et les systèmes prothétiques, en plus de créer et de tester des modèles précis pour améliorer les méthodes de traitement et la sécurité des implants.

10.7. Sciences environnementales: la méthode des éléments finis est de plus en plus appliquée aux problèmes de transport des eaux de surface et des sols. etletude transfert de chaleur dans l'environnement, que ce soit dans les océans, l'atmosphère ou les structures géothermiques. Ces simulations permettent de mieux comprendre les flux thermiques, les gradients de température et les processus de transfert de chaleur La méthode est parfaitement adaptée à la simulation d'applications réelles complexes pour résoudre des problèmes environnementaux et pour mener des études d'impact environnemental.

10.8. Design et optimisation : Grâce à la méthode des éléments finis FEM en simulant de nombreuses propriétés telles que les contraintes et les déformations, elle permet de tester virtuellement les idées et d'identifier les points faibles, et peut accélérer le temps et réduire le besoin de tests coûteux et de développement efficace des performances de chaque design

10.9. Industrie aérospatiale : MEF contribue à garantir la sécurité, la fiabilité et les performances des avions. Par donné la possibilité de comprendre les contraintes thermiques et mécaniques auxquelles les composants de moteur comme les aubes de turbine. De plus, Conception d'ailes plus légères et plus rigides pour améliorer la portance et réduire la traînée. la possibilité de représenter et d'étudier les charges subies lors du lancement, notamment pour les structures spatiales comme les satellites

10.10. Énergie renouvelable : MEF permet d'analyse des flux d'eau dans les rivières et les réservoirs, Analyse de structures hydrauliques et barrages Analyse des flux d'air autour des éoliennes, et optimisant leur placement dans les parcs éoliens.

Ces exemples mettent en évidence l'ampleur et l'importance de la méthode des éléments finis dans de multiples domaines de pratique.

11. Conclusion :

En résumé, la MEF se positionne comme une méthode essentielle pour l'analyse et la simulation dans les domaines de l'ingénierie et des sciences. Il est indispensable pour les chercheurs, les ingénieurs et les étudiants qui sont confrontés aux défis complexes du monde moderne en raison de sa puissance, de sa flexibilité et de sa polyvalence. La MEF continuera sans aucun doute à jouer un rôle central dans les années à venir, contribuant à la conception de produits et de structures plus performants, à l'optimisation de processus industriels et à la compréhension de phénomènes physiques complexe

1. Introduction :

L'utilisation de logiciels de simulation est devenue un outil essentiel dans le domaine des techniques d'assemblage collé afin d'évaluer les performances opérationnelles et de repérer les stratégies d'amélioration. ABAQUS est un logiciel très répandu dans ce domaine, connu pour sa capacité à représenter de manière précise et détaillée les comportements complexes des matériaux et des liaisons adhésives. Après avoir réalisé la simulation avec ABAQUS et recueilli les données, il est primordial de mener une analyse approfondie des résultats afin de tirer des conclusions pertinentes pour optimiser les processus d'assemblage. L'objectif de ce chapitre est d'analyser les résultats de la simulation dans le cadre particulier des techniques d'assemblage collé. Nous étudierons les diverses étapes et méthodes requises afin d'analyser de manière efficace les résultats de la simulation et de prendre des décisions éclairées.

Dans un premier temps, nous examinerons les principales mesures de performance à prendre en considération lors de l'analyse des résultats. Cela peut inclure des indicateurs tels que les délais d'assemblage,, l'utilisation des matériaux, ou d'autres indicateurs spécifiques aux techniques d'assemblage collé étudiées, tels que la résistance de la colle. Nous aborderons l'importance de ces mesures ainsi que la façon de les évaluer afin d'évaluer les performances globales du processus d'assemblage.

Nous étudierons aussi la nécessité de vérifier les résultats de la simulation. Il est essentiel de procéder à la validation afin de garantir que le modèle de simulation reflète fidèlement le processus d'assemblage réel. Nous aborderons les différentes méthodes de validation et les critères à considérer afin de garantir la fiabilité des résultats.

Enfin, nous examinerons comment les résultats de la simulation peuvent être exploités afin de prendre des décisions d'optimisation dans le domaine des techniques d'assemblage sous forme de colle. Nous aborderons la détection des éléments essentiels, des lacunes et des possibilités d'amélioration à partir des résultats de la simulation. Nous étudierons aussi la manière dont ces résultats peuvent être exploités afin de suggérer des stratégies d'amélioration et d'évaluer leur potentiel d'influence sur les performances du processus d'assemblage collé.

2. Modules :

ABAQUS est structuré en plusieurs modules. La réalisation complète d'un projet de simulation sous ABAQUS, s'effectue après un passage successif dans les ces modules. Nousessayons de présenter les principaux modules d'ABAQUS. Considérons assemblage collage entre deux plaques par joint à recouvrement et assemblage collage joint bord à bord à recouvrement simple. Pour les deux assemblages on utiliser les plaques des matériaux suivant:Aluminium 2024T3, Maillechort, SA312de même section rectangulaire S=50x100 mm² et d'épaisseur e=5mm et pour la plaque de colle on a l'araldit2015, FM73, FM300 avec une section carrée S=50x50 mm² et d'épaisseur e=0,15mm .Les plaques sont encastrée par une extrémité et libre de l'autre. On applique un champ de traction sur sa face supérieure de 20 MPA (Figure). Les plaques sont supposée élastiques, du module d'Young ET des coefficients de Poisson suivants :

« E1=73100 v=0,36 », « E2=120000 v=0,35 », « E3=204000 v=0,3 »

Ensuit La plaque de colle est aussi supposée élastique de :

« E1=25200 v=0,36 », « E2=25500 v=0,32 », « E3=132051 v=0,34 »

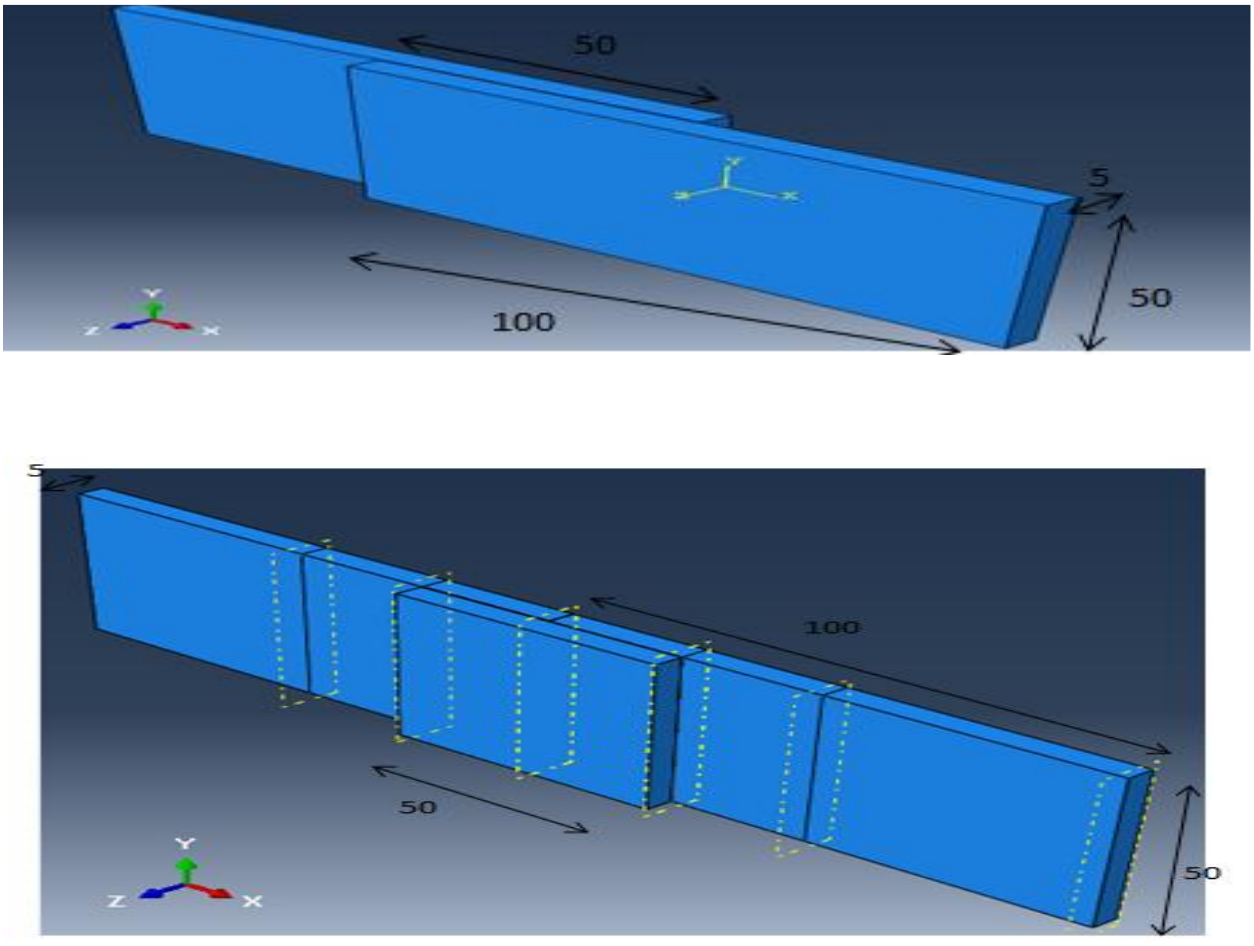


Figure34. Les 2 modèles à réaliser.

2.1 Module PART :

Ce module permet de modéliser des pièces par révolution ou par extrusion. Il permet aussi de créer et d'éditer des géométries et des entités (points, traits, et plans de référence). Ces entités comprennent à la fois les parties déformables et les parties rigides. Pour les créer, il faut utiliser l'icône de création.

Création des plaques : Dans l'arbre du modèle on cliquer deux fois sur (Parts) Dans la boite de dialogue Create Part On Nommer la pièce plaque On Sélectionner (3D/Déformable /Solid/Extrusion) on Mettre (Approximate size) : mettre 200 (Figure) Cliquer Continue ,On Créer rectangle de 50 x 100 mm² ont cliqué sur Done la fenêtre (Edit Base Extrusion) s'affiche, mettre la valeur 5 dans la case (Depth) (Figure) et on cliqué sur OK (Figure)

Quand on terminer cette création on copier le parte sur la fenêtre part manger pour gagner le temps (figure)

Pour la plaque de colle onsuit ce qui précède,juste pour l'État de création ,On Créer carrée de 50 x 50 mm² ont cliqué sur Done la fenêtre (Edit Bas Extrusion)s'affiche, mettre la valeur 0 ,15 dans la case (Depth) (Figure35) et on cliqué sur OK (Figure36).

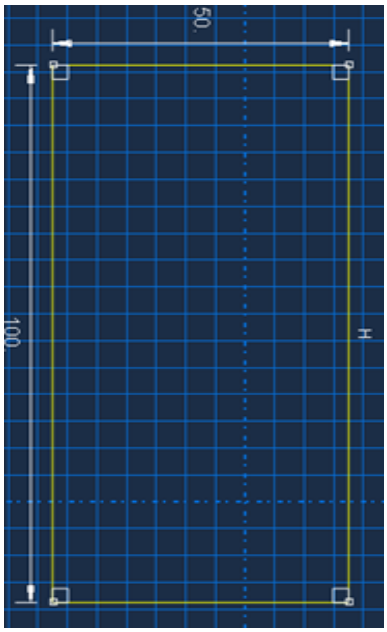


Figure35.désignation de la plaque.

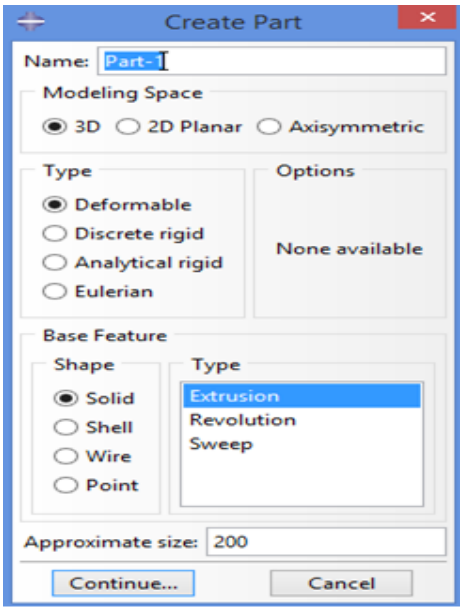


Figure36. Création de la plaque.

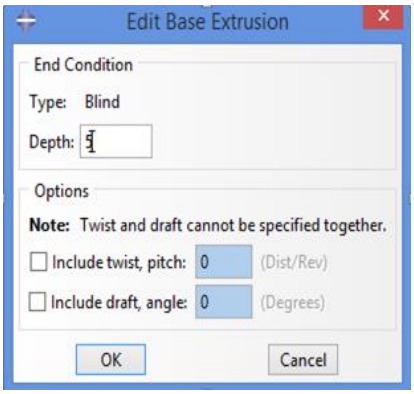


Figure37. Désignation de l'épaisseur.

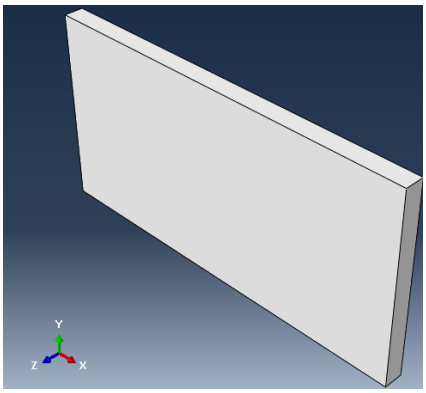


Figure38. Confirmation de l'extrusion.

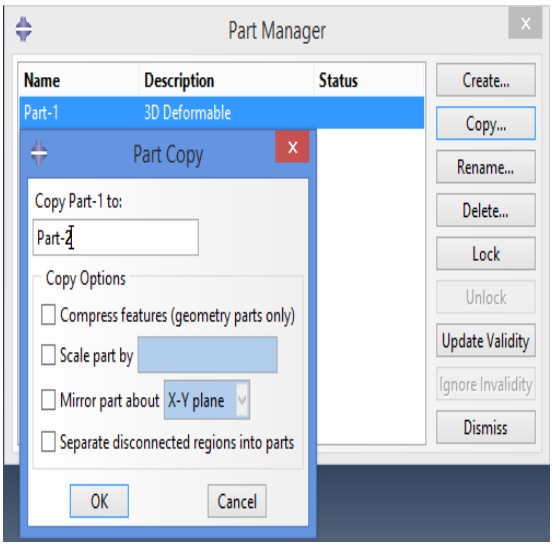


Figure39.: part copy plaque 1.

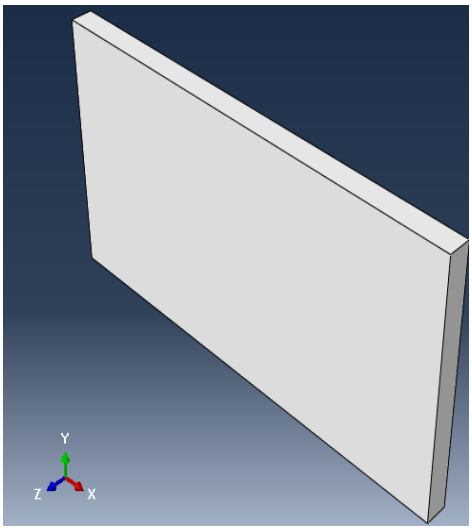


Figure40. Confirmation de l'extrusion.

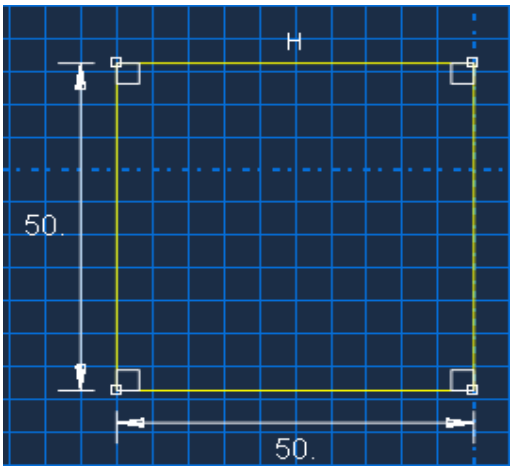


Figure41. Désignation de la plaque.

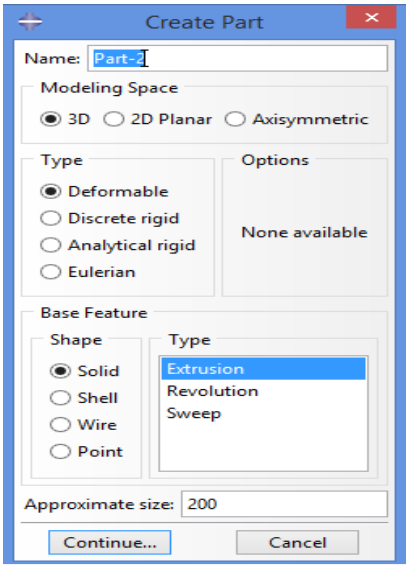


Figure42. Création de la plaque.

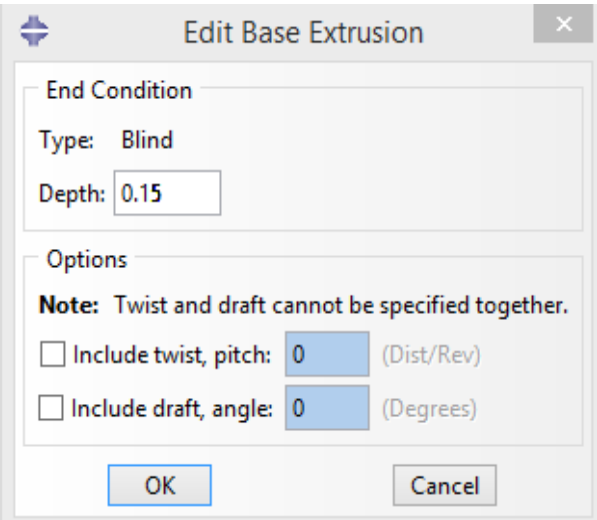


Figure44. Désignation de l'épaisseur.

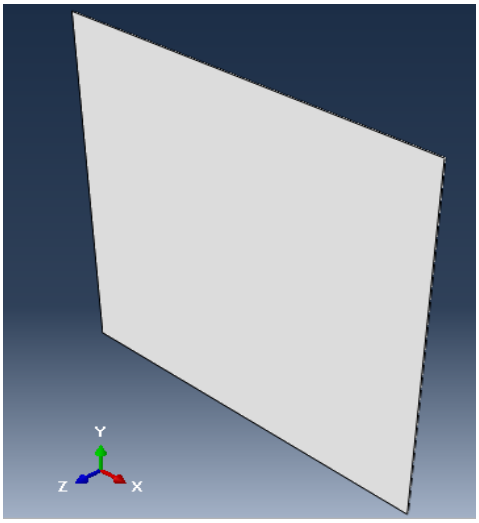


Figure45. Confirmation de l'extrusion.

2.2 Module PROPERTY :

Le module PROPERTY permet de définir les propriétés du ou des matériaux des parties déformables qui constituent le modèle ainsi que et la masse des corps rigides si nécessaire. Dans ce module et selon le cas étudié, on est amené à définir des propriétés élastiques et/ou plastiques (ou autres). Pour ce faire il suffit de cliquer sur l'icône (Création d'un matériau) (Figure). Il est préférable de donner un nom spécifique à chacun des matériaux ce qui permet la création d'une base de données propre au projet. On définit par la suite : les propriétés élastiques via (Mechanical/ Elasticity/Elastic) (module d'Young et le coefficient de Poisson pour le cas par exemple d'un matériau isotrope) et les propriétés plastiques via (Mechanical/Plasticity/Plastic). Dans ce module on crée aussi la section du matériau et l'assignement à toutes les parties de la pièce ou du mécanisme étudiés (Figure46).

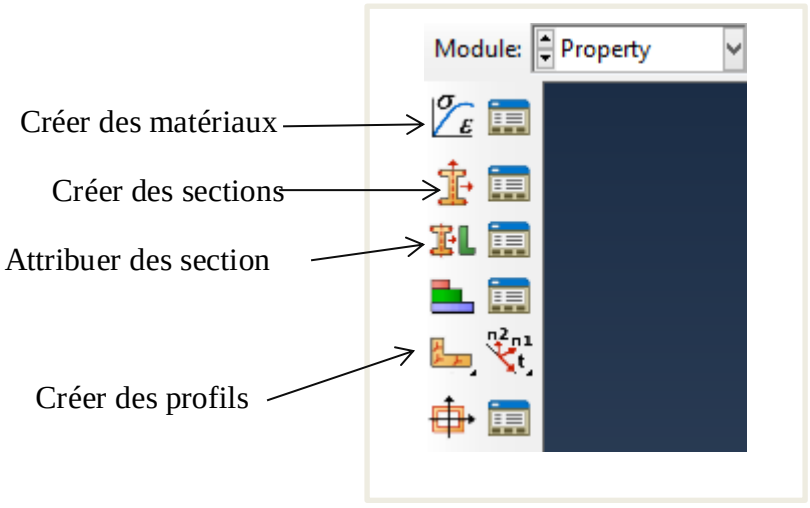


Figure46. Le module property.

Pour Notre plaque :
Définition du matériau et ses propriétés Dans l'arbre du modèle double cliquer sur (Materials) on Renomme le matériau aluminium 2024T3, on Donne une description (au choix) On Cliquer sur l'onglet: (Mechanical/Elasticity/Elastic) Introduire le module d'Young : 73100 MPa Introduire le coefficient de Poisson : 0.36 (Figure) on Clique sur OK
Définition et affectation des propriétés de la section Dans l'arbre modèle on double-cliquer sur Sections Dans la boite de dialogue (Create Section) qui s'affiche
On Renomme la section (Section_plaque) Dans la liste (Category), on sélectionne Solid Dans la liste Type, on sélectionne (Homogeneous) (Figure47) On Clique sur Continue Dans la boite de dialogue Edit Section on Accepte la sélection par défaut du matériau aluminium 2024T3 (Figure) On Cliquer sur OK.

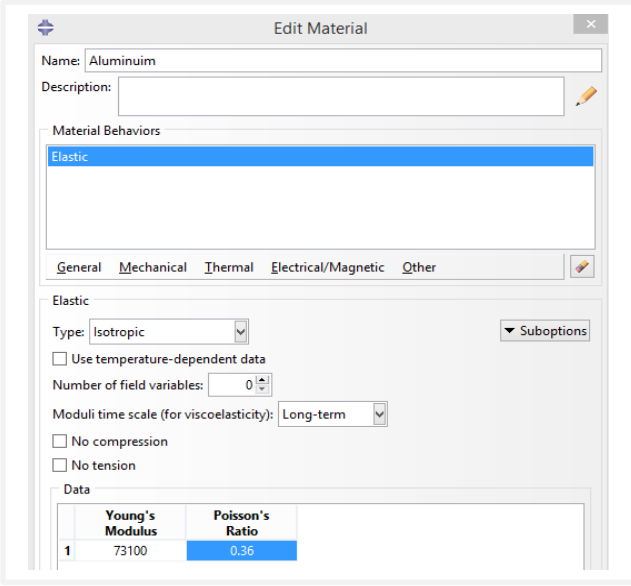


Figure47. Définition les propriétés du matériau.

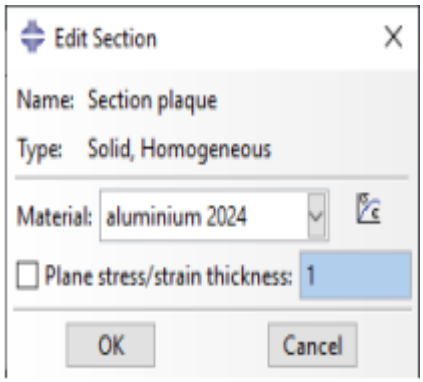


Figure47. Sélection de la section.

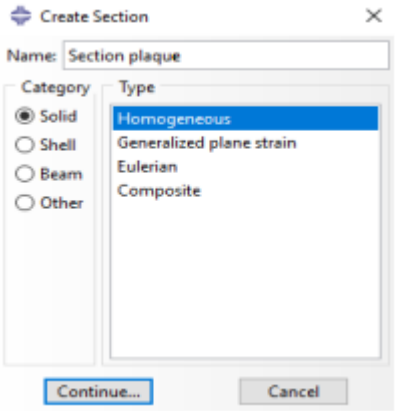


Figure48. Définition la section de la plaque.

• Affectation de la section à la structure Pour affecter la section Section_plaque à la structure, double-cliquer sur (Section Assignements) dans la liste des attributs de la pièce qui apparaît. Dans le (Viewport), on sélectionne la pièce entière. ABAQUS/CAE mets la structure en surbrillance (Figure), on cliqué sur Done. Dans la boite de dialogue (Edit Section Assignement) on accepte la sélection par défaut de la section (Section_plaque) puis on cliquer OK (Figure). ABAQUS/CAE affecte la section à plaque et colore la structure entière en turquoise (Figure49). On Clique sur (Done).

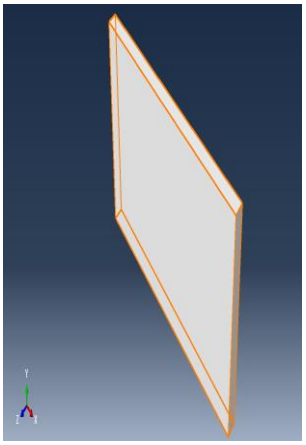


Figure49.
Sélection la pièce entière.

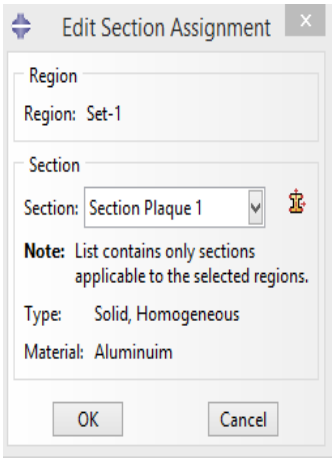


Figure50.
Choix de section.

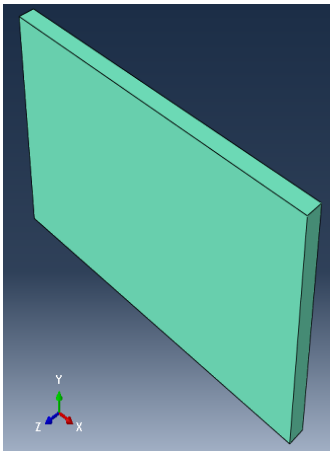


Figure51.
Affectation la section.

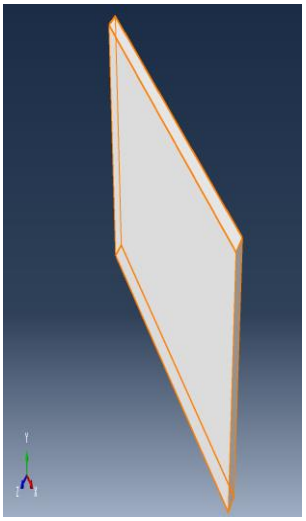


Figure52.
Sélection la pièce entière.

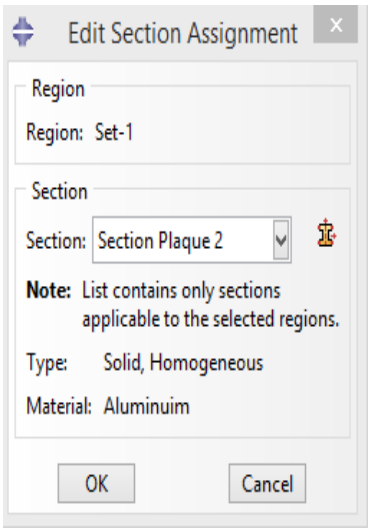


Figure53.
Choix de section.

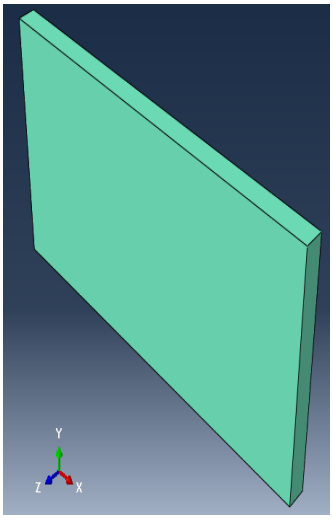


Figure54.
Affectation la section.

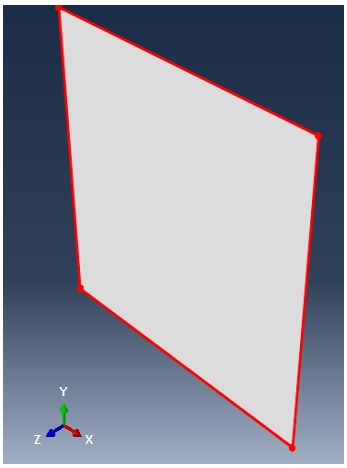


Figure55 .
Sélection la pièce entière.

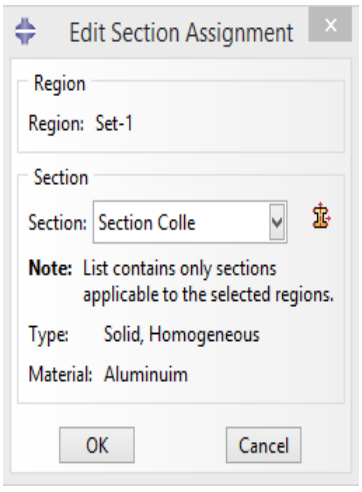


Figure56.
Choix de section.

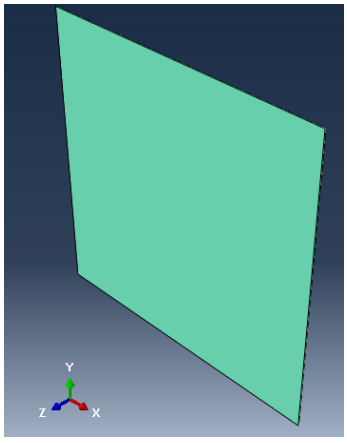
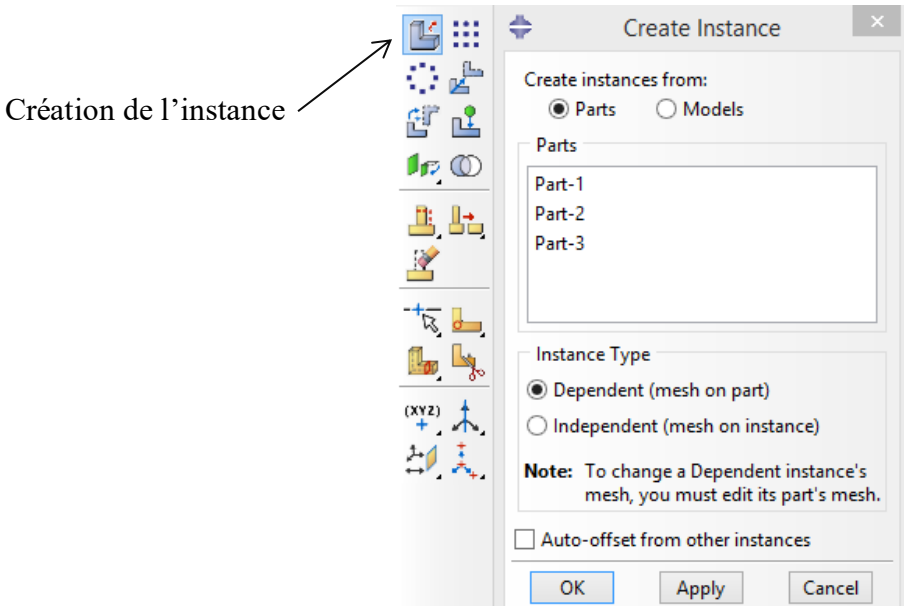


Figure57.
Affectation la section.

2.3. Module ASSEMBLY :

Ce module, permet de créer une instance à partir des entités déjà définies dans le module Part. Ces instances seront celles qu'on manipulera par la suite dans le modèle. Dans le cas général, à partir de l'icône en haut à gauche, on crée une instance en sélectionnant tous les éléments créés dans Part. On peut aussi dans certains cas faire subir des mouvements d'ensemble à ces instances pour les repositionner dans l'espace. Le module ASSEMBLY permet d'assembler les différentes pièces créées dans un projet. Cette étape est nécessaire même si le projet n'est composé que d'une seule pièce.



Fiaure58. Module ASSEMBLY.

Pour notre pièce : assemblage collage entre deux plaques par joint à recouvrement cliquer sur (Instances) dans la liste qui apparait Dans la boite de dialogue (Create Instance) on sélectionner tous les plaques et on cliquer OK (Figure59).

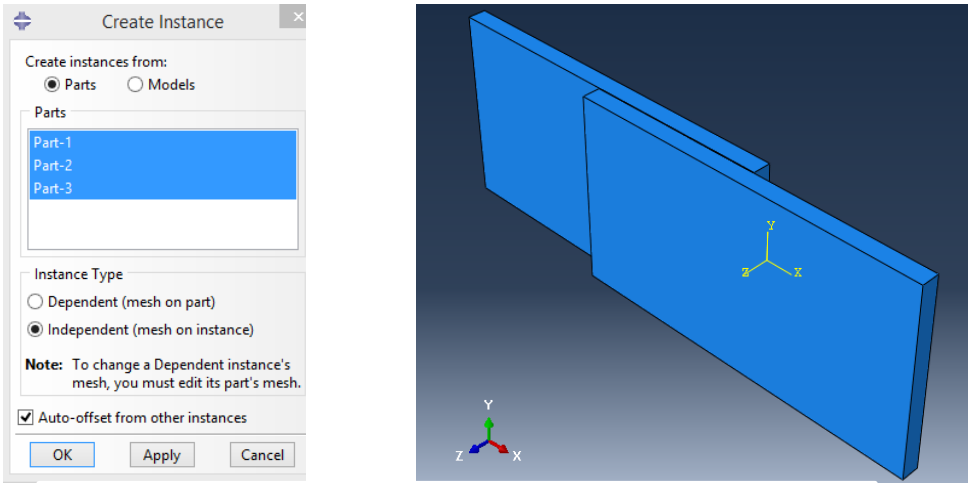


Figure59. Créer une instance.

2.4. Module STEP :

Le module STEP permet d'effectuer les étapes de calcul. Selon le cas une analyse peut comporter un ou plusieurs Steps. On choisir le mode Static, General comme par exemple dans le cas d'une analyse statique. Ou bien Dynamic explicit dans le cas d'études de crash ou d'impact.

Création d'un step pour notre pièce : Configuration du pas de l'analyse Dans ce cas, nous nous intéressons à la réponse statique de cette plaque sollicitée en traction par une charge répartie appliquée sur sa face supérieure de 20 MPa. Nous avons un chargement unique, alors un seul pas d'analyse est nécessaire pour la simulation. L'analyse se compose de deux pas au total :

- Un premier pas (généré automatiquement par ABAQUS/CAE), dans lequel on applique les conditions aux limites en déplacements (encastrement).
- Un second pas d'analyse, on applique une pression de 20 Mpa sur la face supérieure.
- Création du pas d'analyse On crée un pas d'analyse statique qui suit le pas initial de l'analyse. Double cliquer sur Steps pour créer un pas. ABAQUS/CAE passe au module Step et la boîte de dialogue Create Step apparaît (Figure) Une liste de toutes les procédures générales et un nom du pas Step-1 est fourni par défaut On Sélectionne Static General, comme Procedure type On Clique sur Continue La boîte de dialogue Edit Step apparaît avec les paramètres par défaut pour un pas d'analyse Static General L'onglet Basic est sélectionné par défaut
- On Accepte les valeurs par défaut fournies pour le pas, On Clique sur OK pour créer le pas et pour quitter la boîte de dialogue Edit Step.

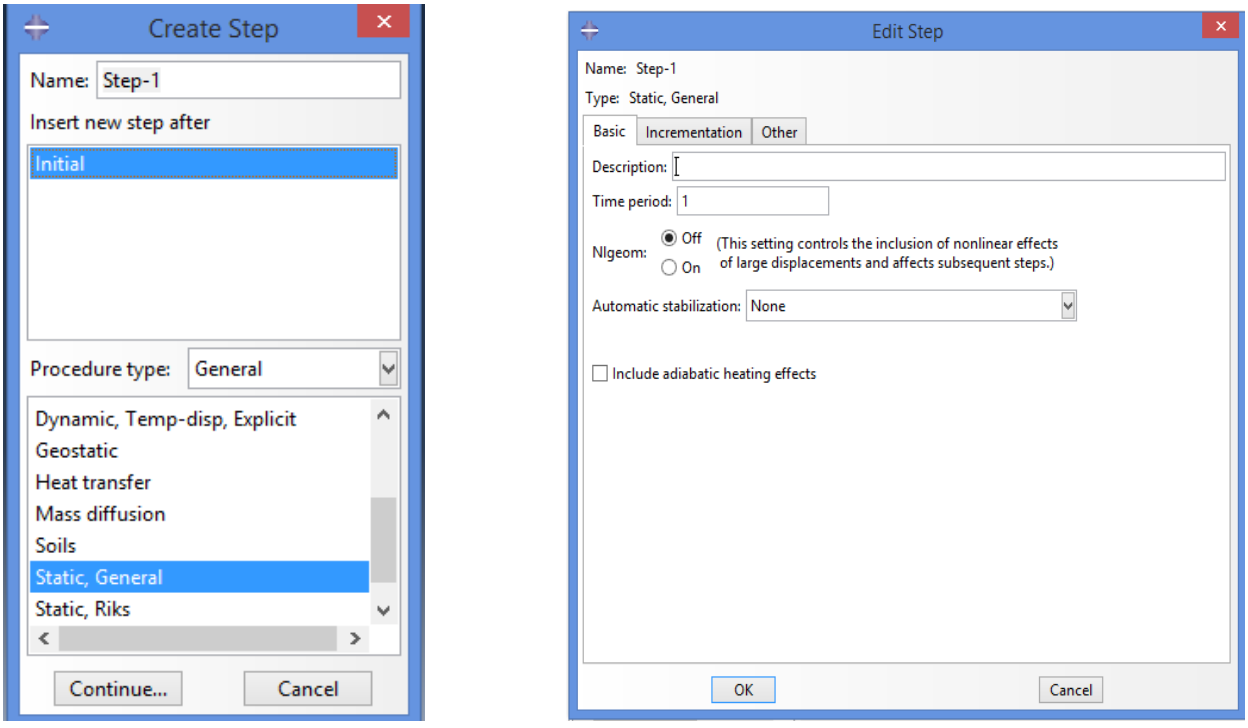


Figure60. création de step.

2.5. Module Interaction :

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Le passage par ce module n'est obligatoire que s'il y'a plusieurs instances qui sont en contact. Le module permet de définir les contraintes subites par la pièce ou le système étudié. On définit donc le type d'effort appliqué à la pièce ou au système. Ce module permet de spécifier tous les chargements et toutes les conditions aux limites du problème étudié. Les chargements et les conditions aux limites sont dépendantes des Steps, par exemple une force qui est appliquée au step 1 peut être inactive au step 2

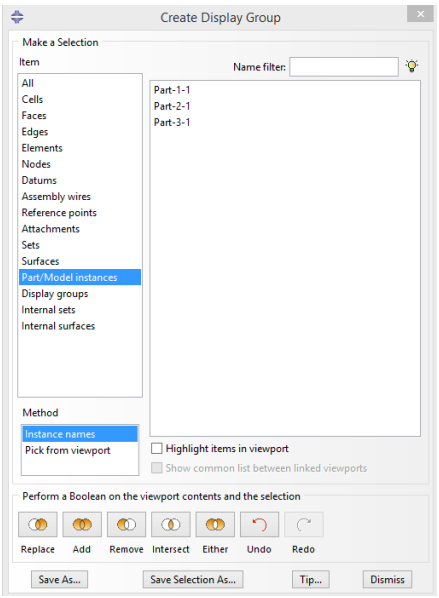


Figure61. create display groupe.

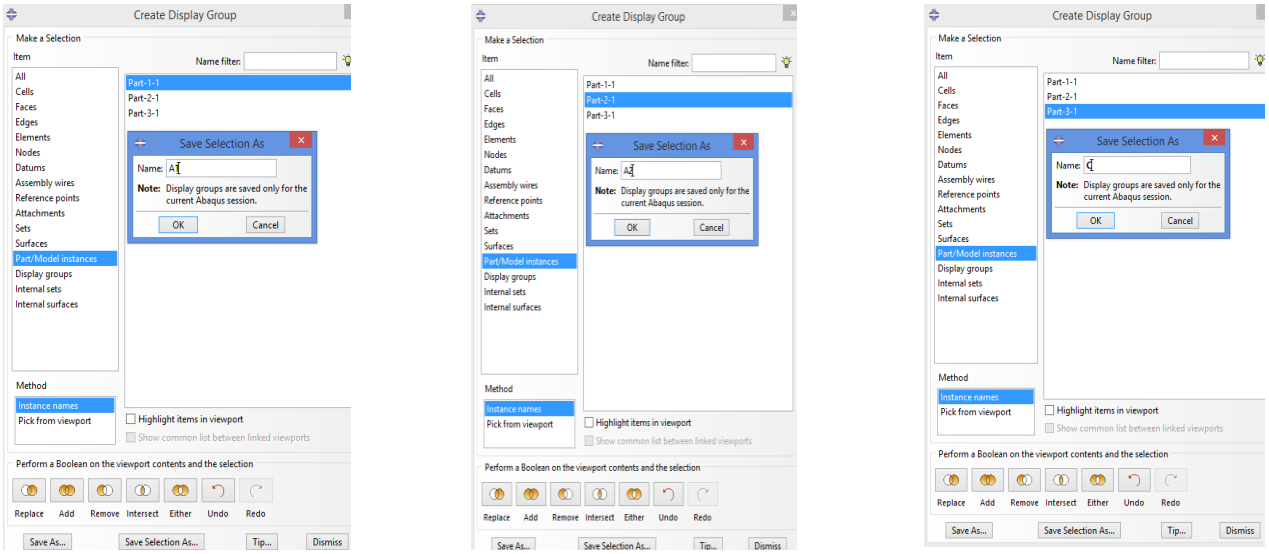


Figure62.create display groupe (elements).

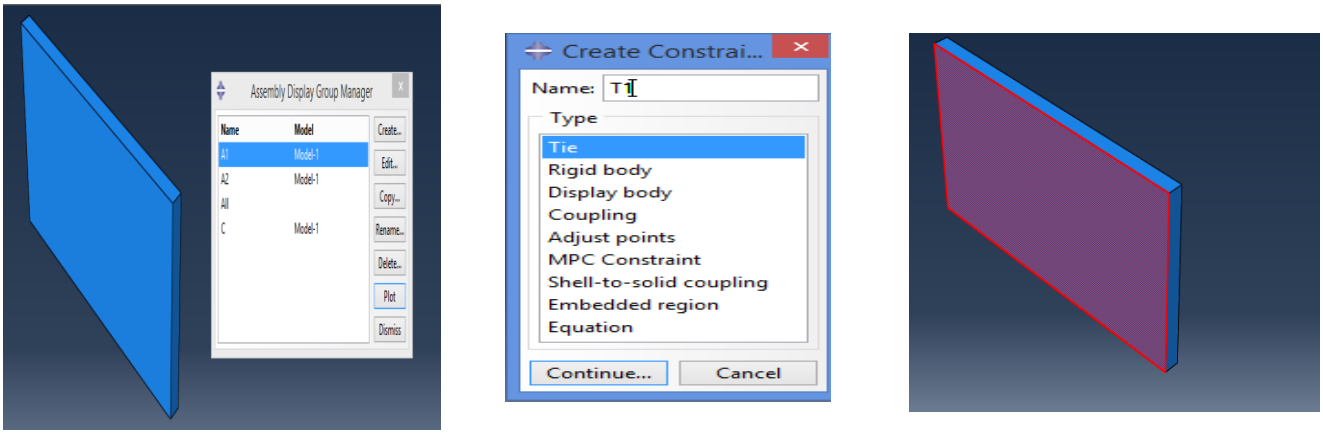


Figure63. Creatcontraint T1et Choisir le maître surface (plaque1) de la plaque.

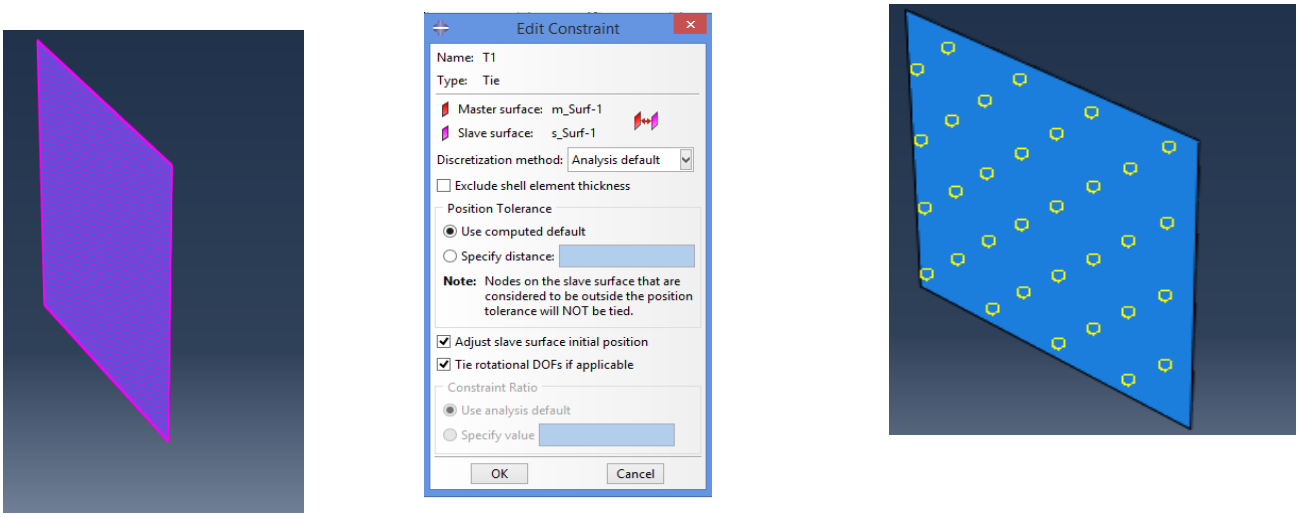


Figure64. La modification de contrainte (t1) et Choisir le maître surface (la colle).

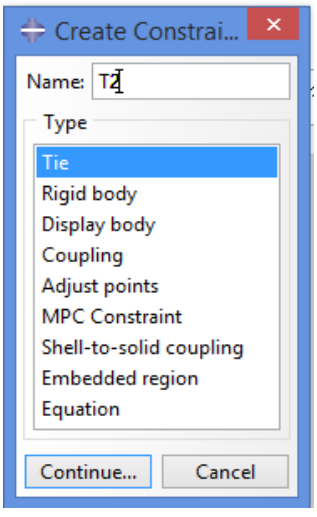


Figure65. creat contraint T1.

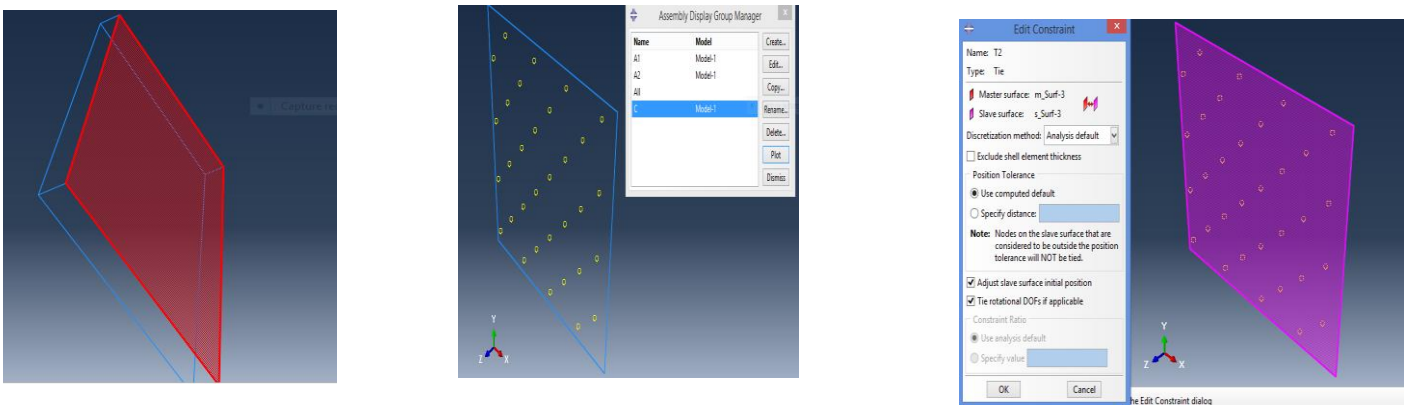


Figure66. Choisir l'esclave surface (la plaque 2) puis La modification de contrainte (t2).

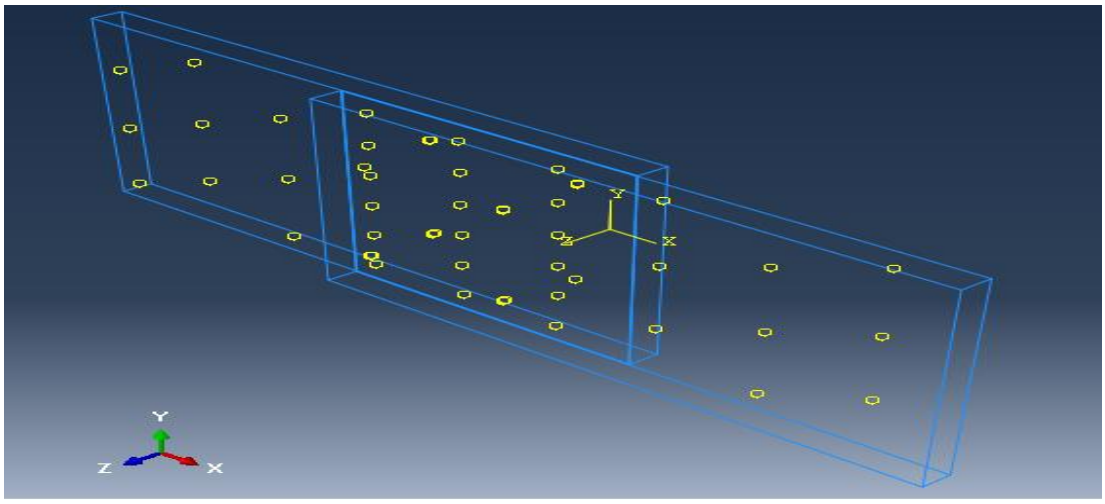


Figure67. Résultat d'interaction

2.6. Module LOAD :

Application des conditions aux limites à la plaque dans l'arbre modèle double cliquer sur la base (BCs) . ABAQUS/CAE passe au module LOAD et la boîte de dialogue Create (Boundry Condition) s'affiche. Dans la liste des pas Steps, on sélectionne (Initial). Dans la liste (Category) on accepte (Mechanical) comme catégorie par défaut. Dans la liste (Types for Selected Step) on sélectionne (Symmetry/Antisymmetry/Encastre) et on clique sur Continue (Figure68). Dans le (Viewport), on sélectionne la face à encastrée et on clique sur Done (Figure69). La boîte de dialogue (Edit Boundry Condition) s'affiche on Coche la case Encastre et on clique sur OK (**a**)et(**b**) (Figure70).

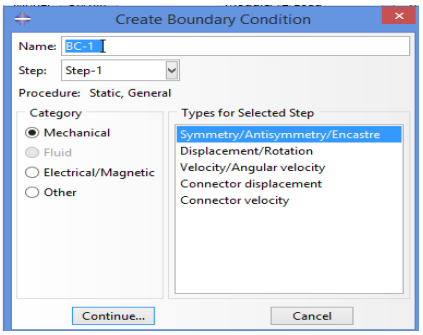


Figure68. Création de l'encastrement.

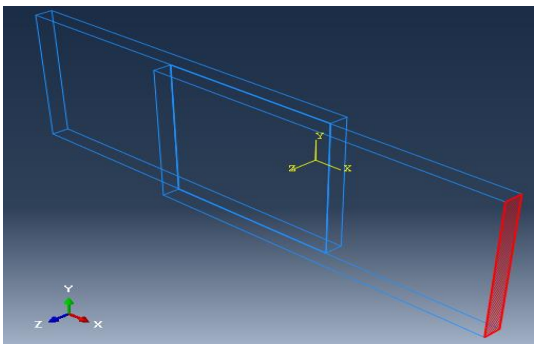
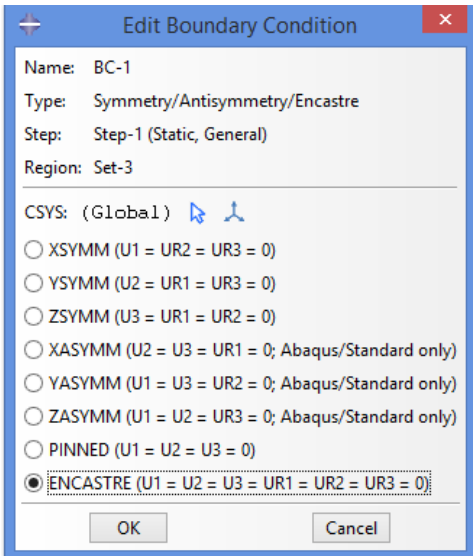
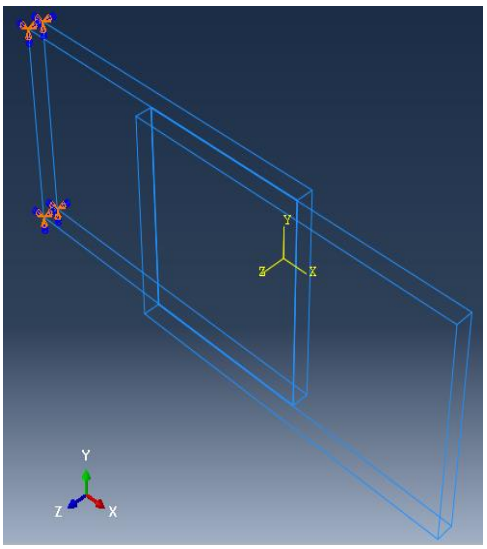


Figure69. Sélection la face à encastrée





(**a**) (**b**)

Figure70. affectation de l'encastrement.

Application du chargement sur la plaque :
On Clique sur (Create Load), La fenêtre (Edit Load) apparait, Dans la liste (Category), On accepter (Mechanica)l comme catégorie. Dans la liste (Types for Selected Step) on sélectionne (Pressure) (Figure71) et on clique sur Continue. Dans le (Viewport), on sélectionne la face supérieure (Figure72) et on clique sur (Done). La boîte de dialogue (Edit Load) s'affiche. On Remplir le champ Magnitude, avec la valeur (-20) et on cliquer sur OK (**a**) et (**b**) (Figure73).

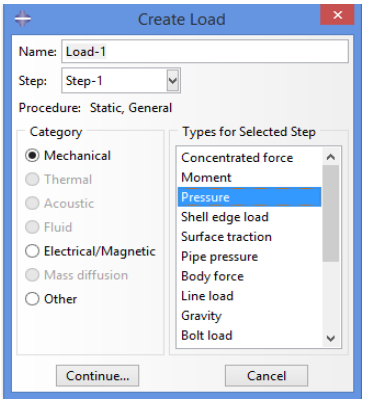


Figure71. Création de l'encastrement.

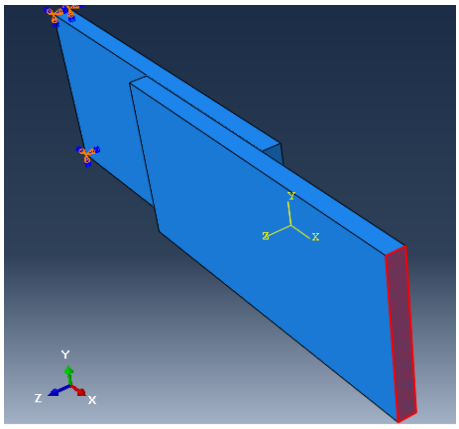
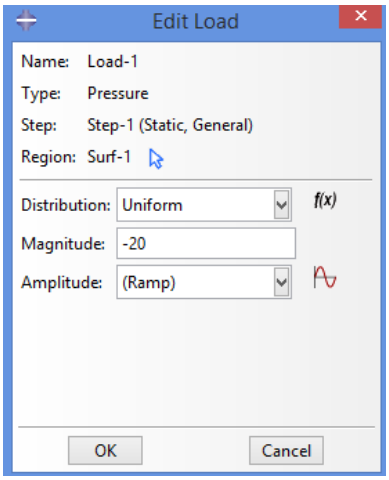
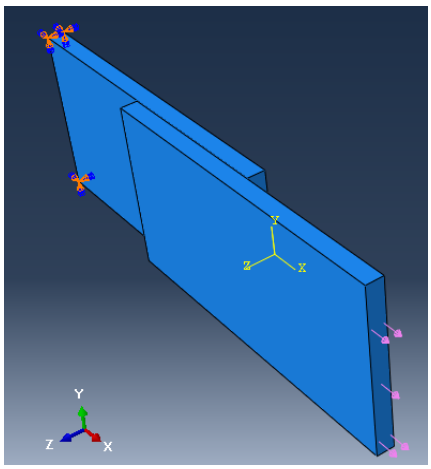


Figure72. Sélection la face de traction





(**a**) (**b**)

Figure73. affectation de champ Magnitude.

2.7. Module MESH :

Le module MESH permet de créer le maillage de La pièce. Il contient tous les outils nécessaires pour générer le maillage élément fini sur un assemblage. Il n'est pas nécessaire que le maillage soit régulier, en effet on peut resserrer le maillage près des endroits d'intérêts (par exemple aux endroits où l'on pense que la solution va beaucoup varier, cependant il faut veiller à avoir des éléments faiblement distordus (se rapprocher d'un polygone régulier). Plus ce maillage est resserré plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise. Il existe plusieurs éléments classiques pour mailler notre pièce (hexaèdre, tétraèdre…).

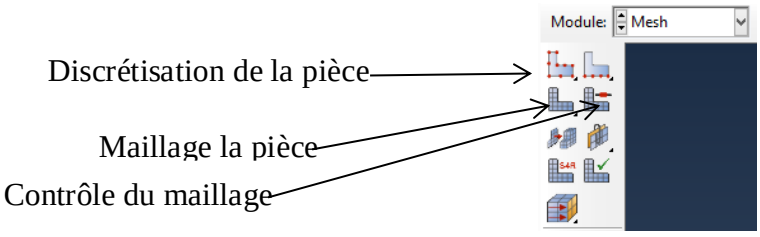


Figure74. Module MESH.

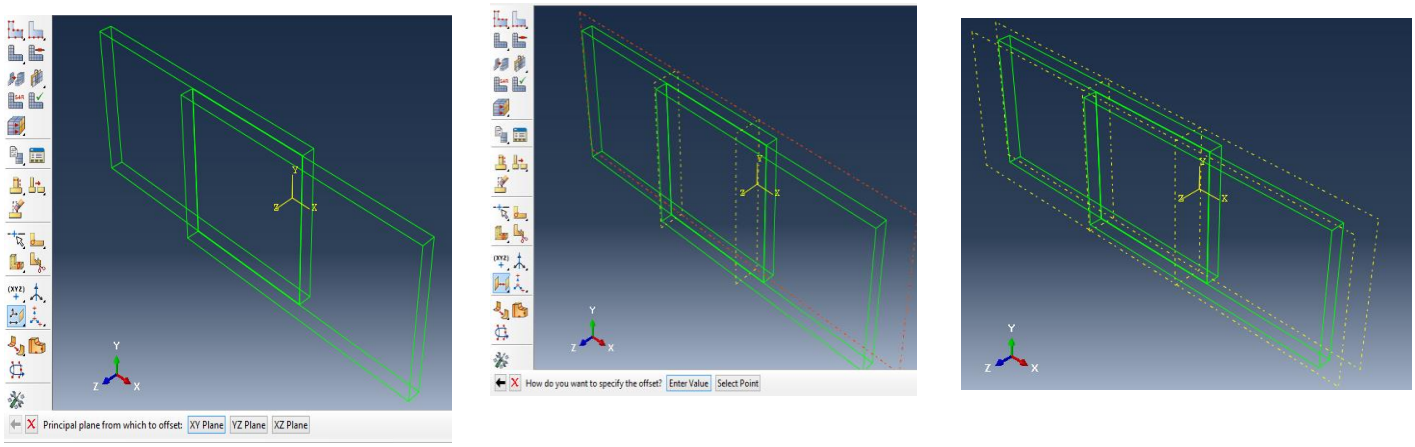


Figure75.

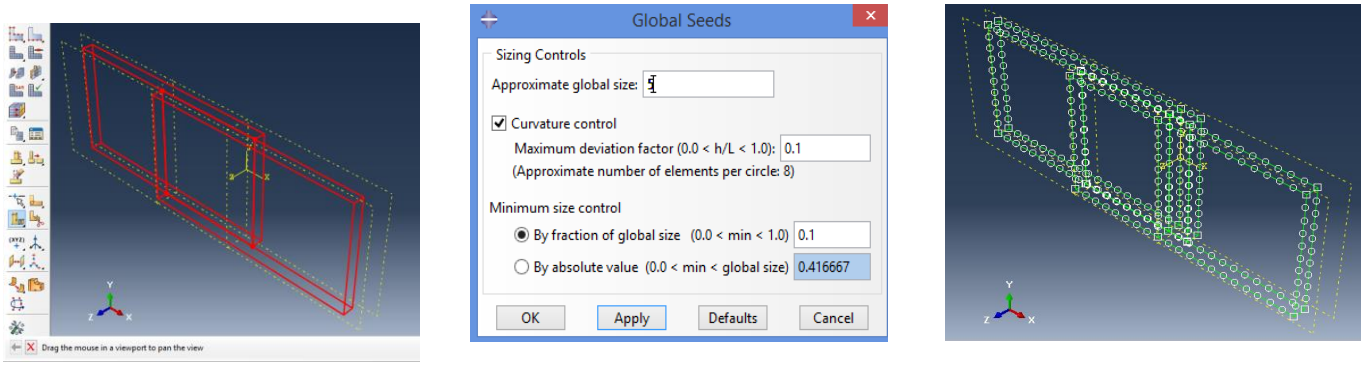


Figure76. Affectation la taille des éléments.

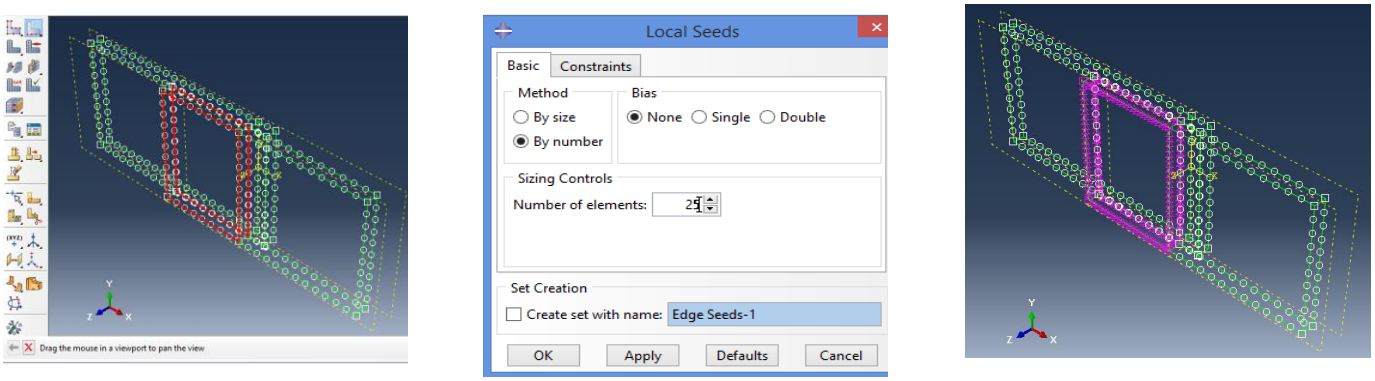


Figure77. Affectation le nombre des éléments.

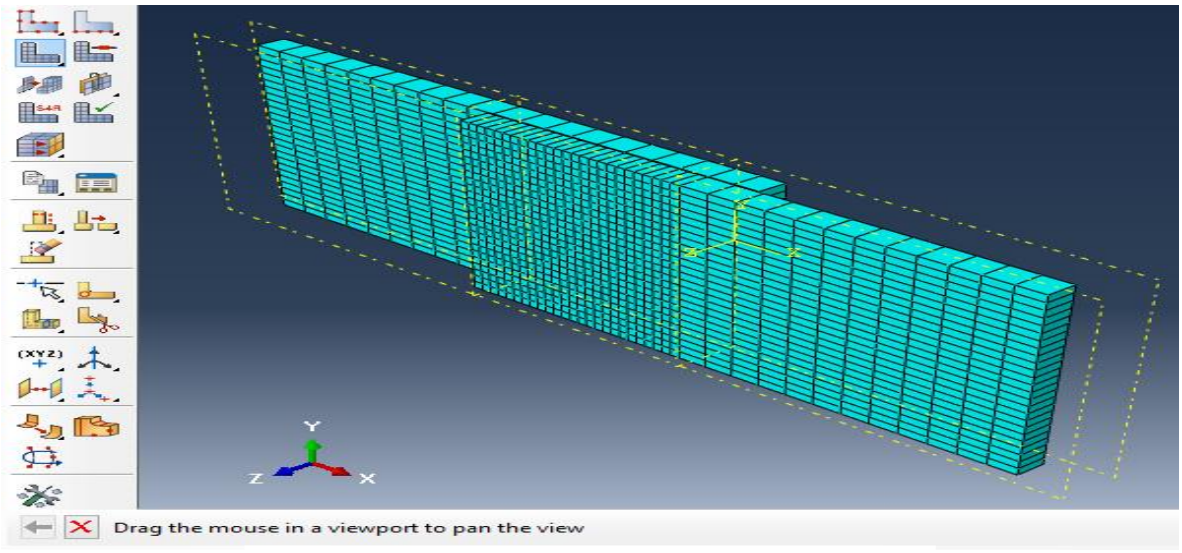
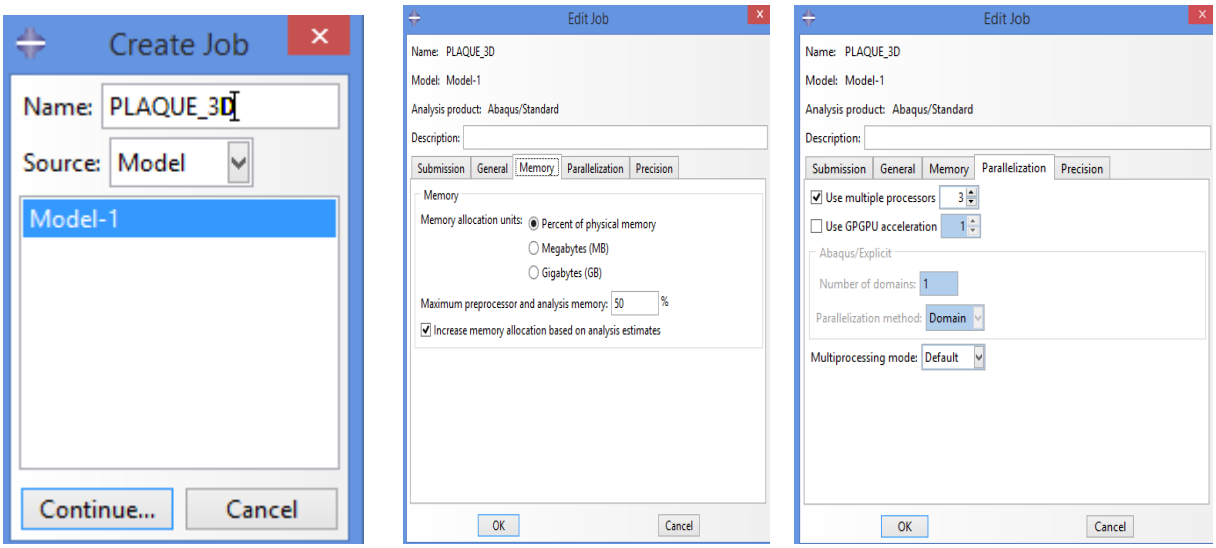


Figure78. Confirmation de maillage.

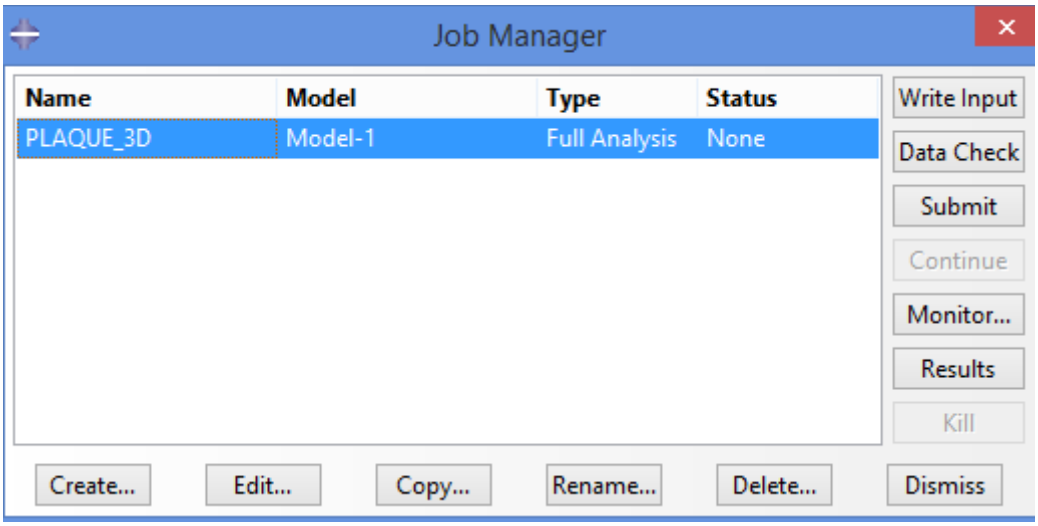
2.8. Module JOB :

Le module JOB permet de lancer le calcul. Les contraintes, les déformations et les déplacements de notre pièce ou système étudié sont ainsi calculés. Création du job : Double cliquez sur Jobs pour ouvrir la boîte de dialogue (Create Job), On Créer un nouveau travail, On Nomme le job plqaue_3D et on clique sur OK, Pour soumettre le travail on Cliquer sur (Submit)(**m**) et (**n**) (Figure 3-33). A la fin de l'analyse en bas du (Viewport), ABAQUS affiche (Completed Successfully) (Figure79)



(m) (n) (o)

Figure79. la première création de job.



(p)

Figure80. la deuxième création de job.

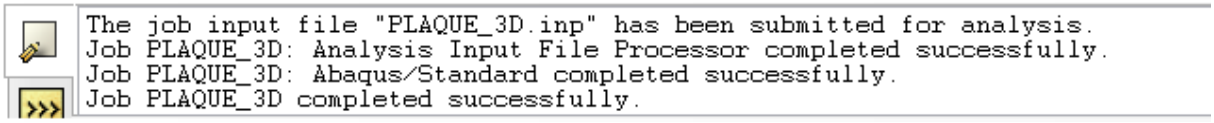


Figure81. affichage le message de réussite**.**

2.9. Module VISUALIZAION :

MODELE01

Le module VIZUALISATION permet de visualiser les résultats des calculs lancés précédemment (Figure82.83).

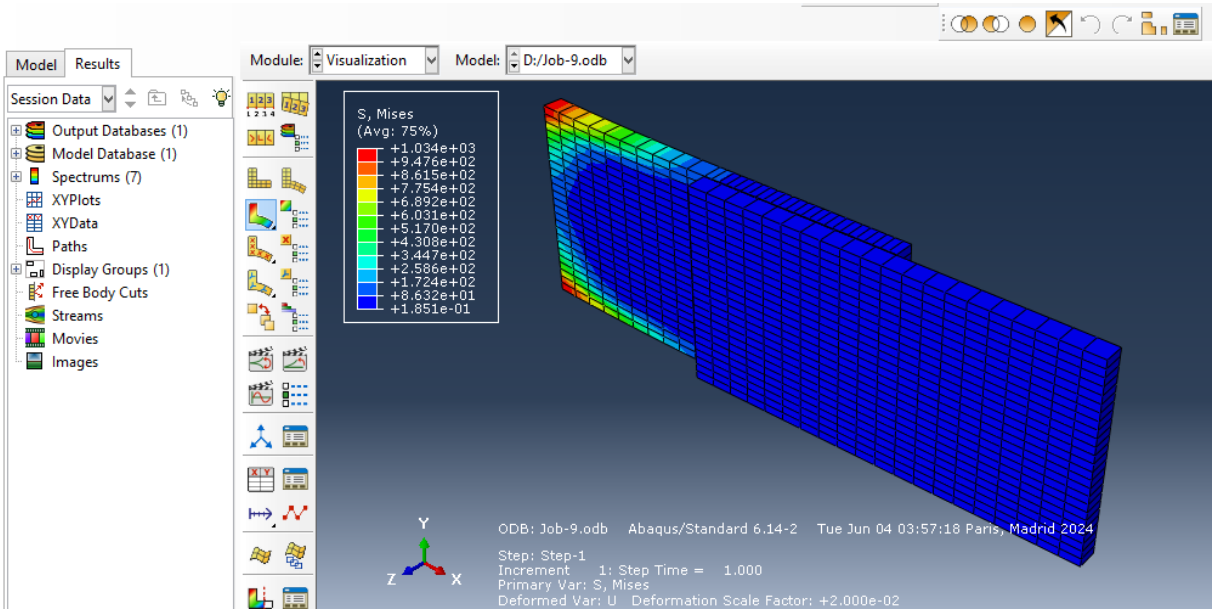


Figure82.visualisation les résultats Modele 01.

MODELE 02

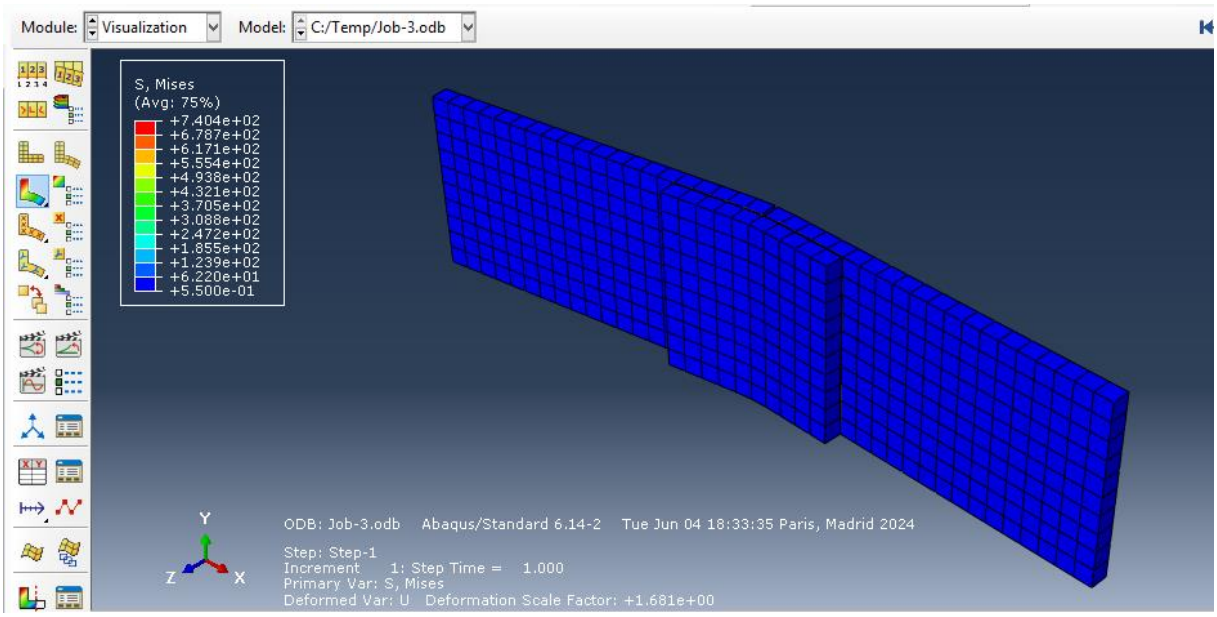


Figure83. visualisation les résultats Modele 02.

4. Les résultats de simulation :

4.1. Première expérience :

Cette expérience concerne l'optimisation de l'assemblage collé entre deux plaques par joint à recouvrement simple nous avons sélectionné trois matériaux pour les plaques notamment : Aluminium 2024T3, Maillechort, SA312 et pour la colle : l'araldit2015, FM73, FM300 à l'aide de ce logiciel nous avons maximisé le contrainte de cisaillement et de .

4.1.1 Simulation de première expérience :

Factors

	Name	Abbr.	Units	Type	Use	Settings	Transform	Prec.	MLR Scale	PLS Scale
1	plaque	pla	Mpa	Multilevel	Controlled	73100;120000;204000	None	Free	Orthogonal	Unit Variance
2	colle	col	Mpa	Multilevel	Controlled	25200;25500;132051	None	Free	Orthogonal	Unit Variance
	Double - click here to add a new factor.									

Figure84. Table des données (entrées).

Responses

	Name	Abbr.	Units	Transform	MLR Scale	PLS Scale	Type
1	cis	cis	Mpa	None	None	Unit Variance	Regular
2	pel	pel	Mpa	None	None	Unit Variance	Regular
	Double - click here to add a new response.						

Figure85. Table des données (sorties).

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	plaque	colle	cis	pel
1	1	N1	3	Incl	73100	25200	167	192
2	2	N2	17	Incl	120000	25200	149	196
3	3	N3	12	Incl	204000	25200	126	187
4	4	N4	6	Incl	73100	25500	167	192
5	5	N5	11	Incl	120000	25500	153	186
6	6	N6	7	Incl	204000	25500	130	176
7	7	N7	10	Incl	204000	25500	130	176
8	8	N8	9	Incl	73100	132051	211	121
9	9	N9	5	Incl	73100	132051	211	121
10	10	N10	1	Incl	120000	132051	201	144
11	11	N11	4	Incl	204000	132051	187	167
12	12	N12	15	Incl	204000	132051	187	167
13	13	N13	14	Incl	73100	25200	167	192
14	14	N14	8	Incl	204000	25200	126	187
15	15	N15	16	Incl	204000	132051	187	167
16	16	N16	2	Incl	204000	132051	187	167
17	17	N17	13	Incl	204000	132051	187	167

Figure86. Table des données (entrées-sorties) de 17 cas.

4.1.2. Résultats de simulation :

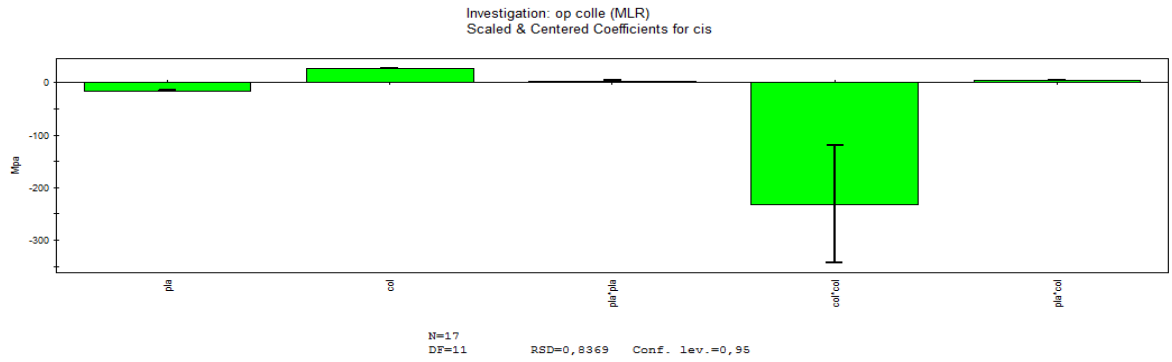


Figure 87. Diagramme pour coefficient de l'optimisation de cisaillement.

Ce graphique représente un diagramme à barre dédiés aux propriétés mécaniques. L'axe horizontal représente les différents paramètres de l'optimisation et l'axe vertical représente les pourcentages les plus grands et les plus petits dans chaque groupe, tandis que les paramètres des propriétés de la colle aux carrés et propriétés de la plaque aux carrés se sont les paramètres les plus significatifs.

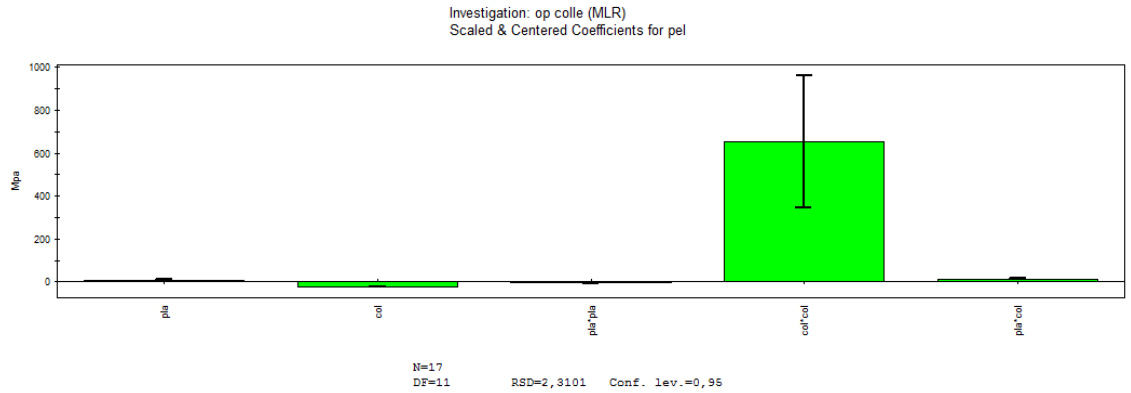


Figure 88. Diagramme pour coefficient de l'optimisation de pelage.

Ce graphique représente un diagramme à barre dédiés aux propriétés mécaniques. L'axe horizontal représente les différents paramètres de l'optimisation et l'axe vertical représente les pourcentages les plus grands et les plus petits dans chaque groupe, tandis que les paramètres des propriétés de la colle aux carrés et propriétés de la plaque aux carrés se sont les paramètres les plus significatifs.

	Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
1	plaque	Free		73100	204000
2	colle	Free		25200	132051

Figure 89. Paramétres des données de l'entrés.

	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	cis	Maximize	1	219,781	233,371	
2	pel	Maximize	1	182,458	191,236	

Figure 90. Choix d'optimisation maximiser les sorties.

Iteration: 5001 Iteration slider:

	1	2	3	4	5	6
	plaque	colle	cis	pel	iter	log(D)
1	73100	25618,8	169,788	183,658	5000	1,0538
2	166640	132051	192,149	158,181	1918	1,0678
3	73100	25618,7	169,786	183,661	5001	1,0538
4	156971	132051	193,703	155,339	1884	1,1011

Figure 91.Résultat de maximisation.

D'après la simulation par le logiciel MODDE (mode d'expérience) et lorsque nous augmentons l'itération à 5000, nous avons trouvé le résultat optimal pour optimiser le joint de collage Voilà les deux figure c dessus ce représente la maximisation des résultats de contrainte de cisaillement et pelage.

Coefficient List - cis

	1	2	3	4	5
1	**cis**	**Coeff. SC**	**Std. Err.**	**P**	**Conf. int(±)**
2	**Constant**	402,283	50,4766	6,77207e-006	111,097
3	**pla**	-15,8838	0,23752	1,03718e-015	0,522773
4	**col**	26,4062	0,245678	5,65213e-018	0,540727
5	**pla*pla**	2,1693	0,600771	0,00409136	1,32227
6	**col*col**	-231,764	50,6342	0,000793939	111,444
7	**pla*col**	3,82501	0,231335	4,07149e-009	0,509159
8					
9	N = 17	Q2 =	--	Cond. no. =	591,0339
10	DF = 11	R2 =	--	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	--	RSD =	0,8369
12				Conf. lev. =	0,95

Figure 92. Table d'extraction de la formule de l'optimisation du cisaillement collage a simple recouvrement.

Le modèle mathématique trouvé à partir de MODDE 5.0 est :

- Caisaillement :

σ=402,283-15,8838Pla+26,4062Col+2,1693Pla^2-231,764Col^2+ 3,82501Pla*Col

Coefficient List - pel

	1	2	3	4	5
1	**pel**	**Coeff. SC**	**Std. Err.**	**P**	**Conf. int(±)**
2	**Constant**	-483,578	139,334	0,00523399	306,667
3	**pla**	9,1215	0,655642	2,51038e-008	1,44304
4	**col**	-22,6572	0,67816	2,06447e-012	1,4926
5	**pla*pla**	-5,01002	1,65835	0,0116329	3,64995
6	**col*col**	655,55	139,769	0,000660488	307,625
7	**pla*col**	13,6815	0,638568	2,55061e-010	1,40546
8					
9	N = 17	Q2 =	--	Cond. no. =	591,0339
10	DF = 11	R2 =	--	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	--	RSD =	2,3101
12				Conf. lev. =	0,95

Figure 93. Table d'extraction de la formule de l'optimisation du pelage du collage a simple recouvrement.

Le modèle mathématique trouvé à partir de MODDE 5.0 est :

- Pelage :

σ= -483,578+9,1215Pla-22,6572Col-5,01002Pla^2+655,55Col^2+13,6815Pla*Col

4.2. Deuxième expérience :

Cette expérience concerne l'optimisation de l'assemblage collé d'un joint bord à bord à recouvrement simple nous avons sélectionné trois matériaux pour les plaques notamment : Aluminium 2024T3, Maillechort, SA312 et pour la colle : l'araldit2015, FM73, FM300 à l'aide de ce logiciel nous avons maximisé le contrainte de cisaillement et de pelage.

4.2.1 Simulation de première expérience :

Factors

	Name	Abbr.	Units	Type	Use	Settings	Transform	Prec.	MLR Scale	PLS Scale
1	plaque	pla	Mpa	Multilevel	Controlled	73100;120000;204000	None	Free	Orthogonal	Unit Variance
2	colle	col	Mpa	Multilevel	Controlled	25200;25500;132051	None	Free	Orthogonal	Unit Variance
	Double - click here to add a new factor.									

Figure 94. Table des données (entrées).

Responses

	Name	Abbr.	Units	Transform	MLR Scale	PLS Scale	Type
1	cis	cis	Mpa	None	None	Unit Variance	Regular
2	pel	pel	Mpa	None	None	Unit Variance	Regular
	Double - click here to add a new response.						

Figure 95. Table des données (sorties).

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	plaque	colle	cisaillement	pelage
1	1	N1	1	Incl	73100	25200	14,3	28,9
2	2	N2	15	Incl	120000	25200	17,4	33,4
3	3	N3	4	Incl	204000	25200	20,8	39,5
4	4	N4	7	Incl	73100	25500	14,4	27,2
5	5	N5	3	Incl	120000	25500	17,6	33
6	6	N6	16	Incl	204000	25500	21	39
7	7	N7	17	Incl	204000	25500	21	39
8	8	N8	6	Incl	73100	132051	5,9	11
9	9	N9	12	Incl	73100	132051	5,9	11
10	10	N10	2	Incl	120000	132051	8	23,4
11	11	N11	13	Incl	204000	132051	10,8	26
12	12	N12	8	Incl	204000	132051	10,8	26
13	13	N13	9	Incl	73100	25200	14,3	28,9
14	14	N14	5	Incl	204000	25200	20,8	39,5
15	15	N15	11	Incl	204000	132051	10,8	26
16	16	N16	10	Incl	204000	132051	10,8	26
17	17	N17	14	Incl	204000	132051	10,8	26

4.2.2. Résultats de simulation :

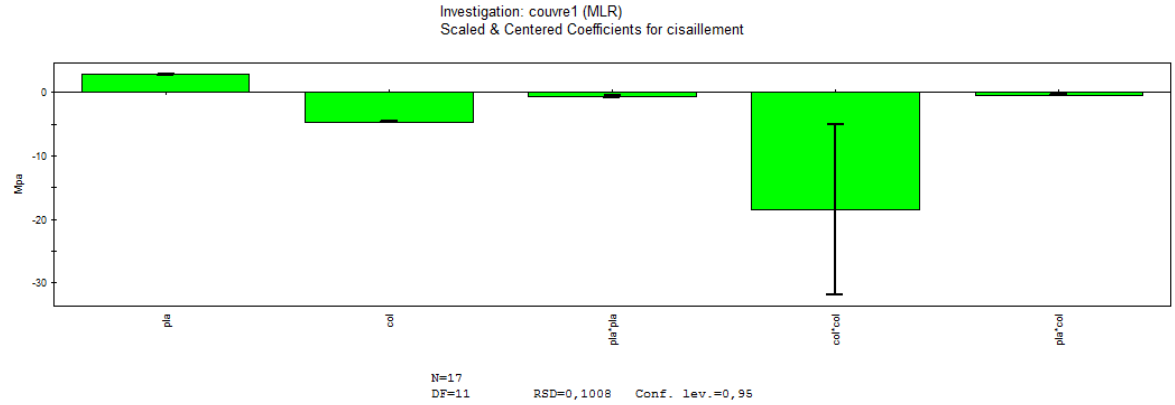


Figure 97. Diagramme pour coefficient de l'optimisation de cisaillement.

Ce graphique représente un diagramme à barre dédiés aux propriétés mécaniques. L'axe horizontal représente les différents paramètres de l'optimisation et l'axe vertical représente les pourcentages les plus grands et les plus petits dans chaque groupe, tandis que les paramètres des propriétés de la colle aux carrés et propriétés de la plaque aux carrés se sont les paramètres les plus significatifs.

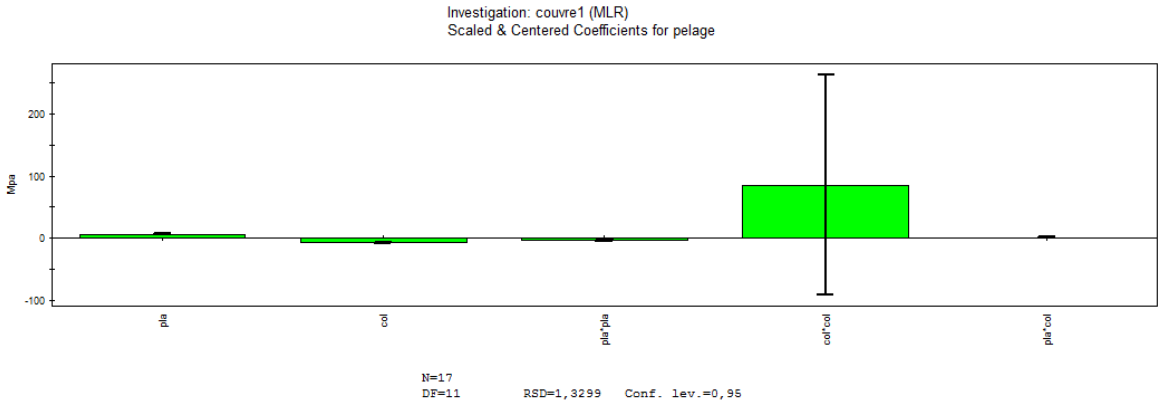
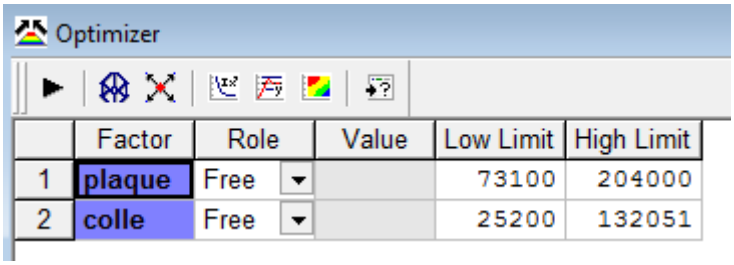


Figure98. Diagramme pour coefficient de l'optimisation de pelage.

Ce graphique représente un diagramme à barre dédiés aux propriétés mécaniques. L'axe horizontal représente les différents paramètres de l'optimisation et l'axe vertical représente les pourcentages les plus grands et les plus petits dans chaque groupe, tandis que les paramètres des propriétés de la colle aux carrés et propriétés de la plaque aux carrés se sont les paramètres les plus significatifs.



	Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
1	plaque	Free		73100	204000
2	colle	Free		25200	132051

Figure 99. Choix des propriétés des entrées.

	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	cisaillement	Maximize	1	20,2514	21,77	
2	pelage	Maximize	1	38,0942	40,8404	

Figure100. Choix d'optimisation (maximiser).

Iteration: 5001 Iteration slider:

	1	2	3	4	5	6
	plaque	colle	cisaillement	pelage	iter	log(D)
1	203982	25200,1	20,8313	39,4674	1654	-0,5003
2	203999	132051	10,783	26,2253	5000	1,6057
3	204000	25200	20,8318	39,4673	844	-0,5005
4	203999	132051	10,783	26,2254	5001	1,6057

Figure 101.Résultat de maximisation des entrées.

D'après la simulation par le logiciel MODDE (mode d'expérience) et lorsque nous augmentons l'itération à 5000, nous avons trouvé le résultat optimal pour optimiser le joint collé Voilà les deux figure c dessus ce représente la maximisation des résultats de contrainte de cisaillement et pelage.

Coefficient List - cisaillement

	1	2	3	4	5
1	cisaillement	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	32,129	6,07855	0,000258041	13,3786
3	pla	2,86696	0,028603	1,21763e-017	0,0629539
4	col	-4,63688	0,0295853	8,94167e-020	0,0651161
5	pla*pla	-0,691417	0,0723468	1,16049e-006	0,159232
6	col*col	-18,4971	6,09753	0,0113772	13,4204
7	pla*col	-0,387451	0,0278581	2,5185e-008	0,0613145
8					
9	N = 17	Q2 =	--	Cond. no. =	591,0339
10	DF = 11	R2 =	--	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	--	RSD =	0,1008
12				Conf. lev. =	0,95

Figure 102. Table d'extraction de la formule de l'optimisation du cisaillement collage bord à bord avec couvre joint.

Le modèle mathématique trouvé à partir de MODDE 5.0 est :

- Caisaillement :

σ= 32,129+2,86696Pla-4,63688Col-0,691417Pla^2-18,4971Col^2- 0,387451Pla*Col

Coefficient List - pelage

	1	2	3	4	5
1	pelage	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	-55,8734	80,2133	0,500532	176,546
3	pla	6,4222	0,377448	3,00413e-009	0,830748
4	col	-7,30858	0,390412	1,08513e-009	0,85928
5	pla*pla	-3,43871	0,954697	0,00415616	2,10125
6	col*col	85,7362	80,4638	0,309468	177,097
7	pla*col	0,687516	0,367619	0,088286	0,809114
8					
9	N = 17	Q2 =	--	Cond. no. =	591,0339
10	DF = 11	R2 =	--	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	--	RSD =	1,3299
12				Conf. lev. =	0,95

Figure 103. Table d'extraction de la formule de l'optimisation du pelage collage bord à bord avec couvre joint.

Le modèle mathématique trouvé à partir de MODDE 5.0 est :

- Pelage :

σ= -55,8734+6,4222Pla-7,30858Col-3,43871Pla^2+85,7362Col^2+0,687516Pla*Col

3-analyse des contraintes adhésives :

La répartition des contraintes de cisaillement et du pelage sur les joints collés est un aspect crucial de la conception et de l'optimisation des assemblages collés.

La contrainte de cisaillement est appliquée par traction sur la colle, forçant les substrats à glisser les uns sur les autres. Ici, la force est dans le même plan que le joint. Dans la théorie des plaques, lorsque l'on isole un élément de plaque, il faut définir le cisaillement sur deux paires de faces opposées. Si l'axe z est normal à la plaque, on appelle qx l'effort tranchant sur la face normale à l'axe x, et qy l'effort tranchant sur la face normale à l'axe y. Dans une situation de flexion, la répartition des cissions xz(z) et yz(z) est identique au cas de la poutre en flexion.

Les assemblages qui travaillent en clivage ou en pelage concentrent la contrainte sur une extrémité, ce qui peut entraîner des défaillances prématurées du collage, surtout en cas de vibrations, de chocs ou de fatigue. Pour la résistance au pelage, l'unité de mesure peut être les N/cm, qui est un rapport de force sur une longueur.

Les conceptions qui conviennent le mieux aux adhésifs sont celles qui travaillent majoritairement en traction, compression ou cisaillement. Cela permet d'appliquer la contrainte sur toute la surface du plan de collage. La modification de la conception d'origine peut ajouter une pièce supplémentaire visant à renforcer le collage des composants d'origine. Cela transforme une partie de la contrainte en clivage en une contrainte en cisaillement, ce qui renforce le collage.

Les assemblages par recouvrement font travailler généralement la colle en cisaillement, contrainte idéale pour les adhésifs. Dans un scénario parfait, la colle travaille tout le temps en cisaillement. Certains assemblages par petites surfaces sont bidimensionnels, et la majorité des contraintes sont appliquées sous forme de cisaillement ou de pelage/clivage. Contrairement aux assemblages panneau sur cadre qui répartissent la charge sur des longueurs linéaires relativement longues, les assemblages par joint fin nécessitent des colles à très haute résistance capables de supporter les contraintes sur une très petite surface.

Les figures 104 jusqu'à 115 présente la variation des contraintes de cisaillement de l'adhésives selon l'axe XZ par rapport aux contraintes appliquées sur deux modèles d'assemblages colées collage joint bord à bord à recouvrement simple et le deuxième modèle collage entre deux plaques par joint à recouvrement.

On constate que l'augmentation de la valeur des contraintes appliquées sur les deux plaques collées s'accompagne d'une augmentation des contraintes appliquées sur l'adhésif reliant les deux plaques.

Nous notons également que le changement de propriétés mécaniques du matériau adhésif affecte sur la cohérence du l'assemblage.

Dans la première forme, nous avons observé que l'augmentation des propriétés mécaniques est clairement contribuée à l'augmentation de la traction sur la zone adhésive, ce qui concerne le transfert de tension dans le système et dans le second cas, nous avons noté que l'augmentation des propriétés mécaniques a contribué à la réduction de la tension.

En conclusion, la répartition des contraintes de cisaillement et du pelage sur les joints collés est un aspect essentiel de la conception des assemblages collés. Une bonne compréhension de ces contraintes et de leur impact sur la performance de l'assemblage peut aider à optimiser la conception et à améliorer la durabilité et la fiabilité de l'assemblage.

Aluminium(73100)

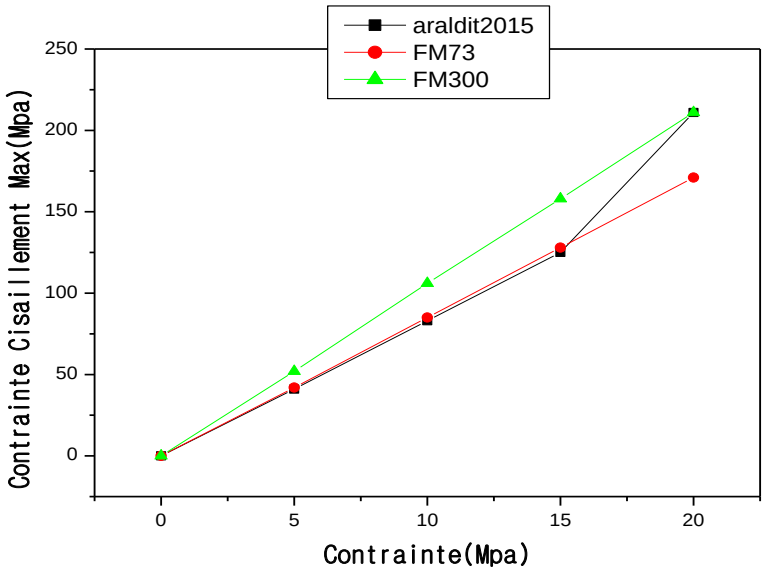


Figure104 contrainte de cisaillement d'un collage joint bord à bord à recouvrement simple par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en aluminium

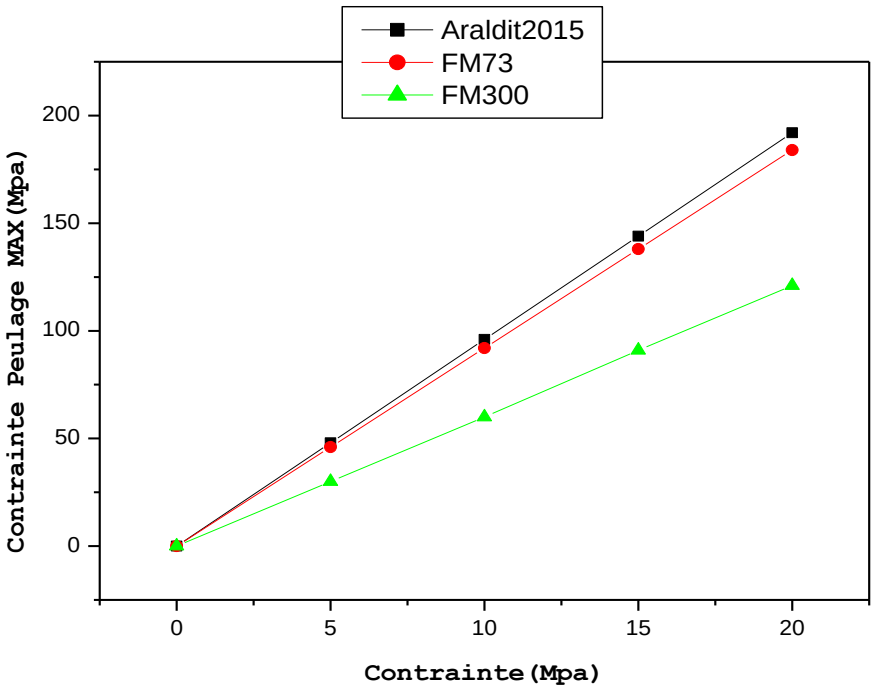


Figure105 contrainte de pelage d'un collage joint bord à bord à recouvrement simple par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en aluminium

maillechort (120000)

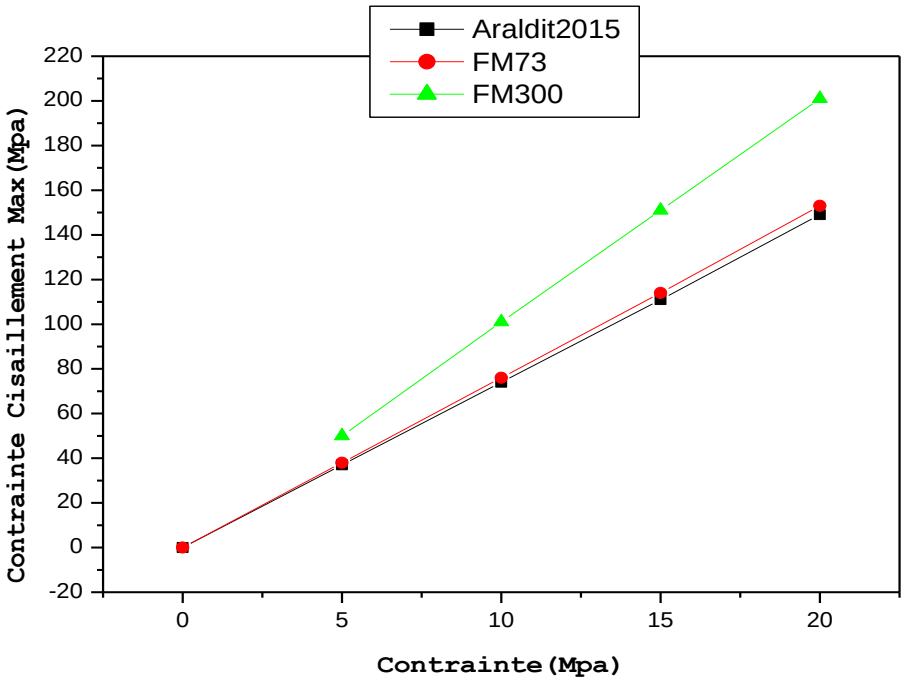


Figure106 contrainte de cisaillement d'un collage joint bord à bord à recouvrement simple par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en maillechort

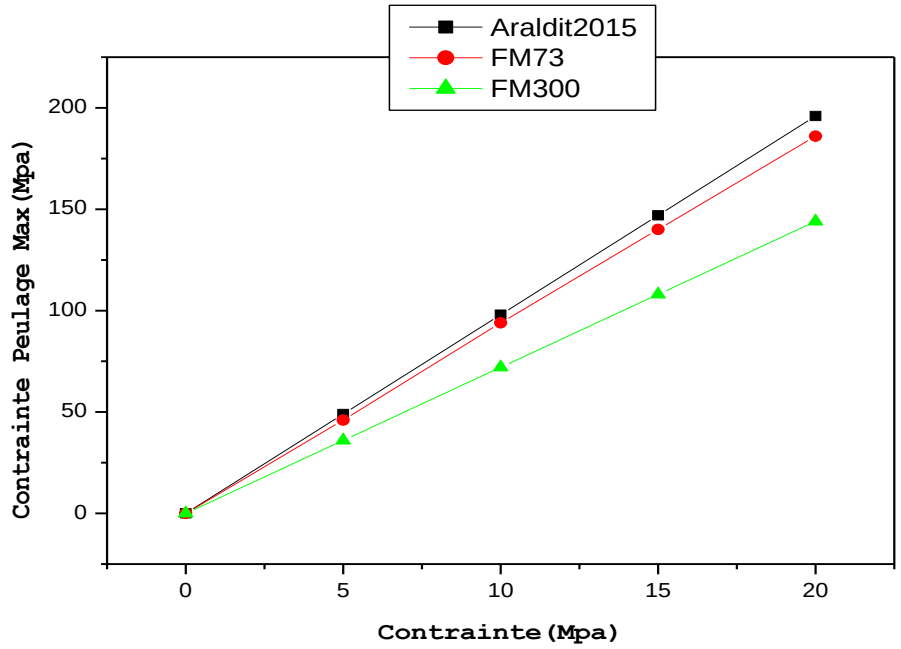


Figure107 contrainte de pelage d'un collage joint bord à bord à recouvrement simple par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en maillechort

SA312(204000)

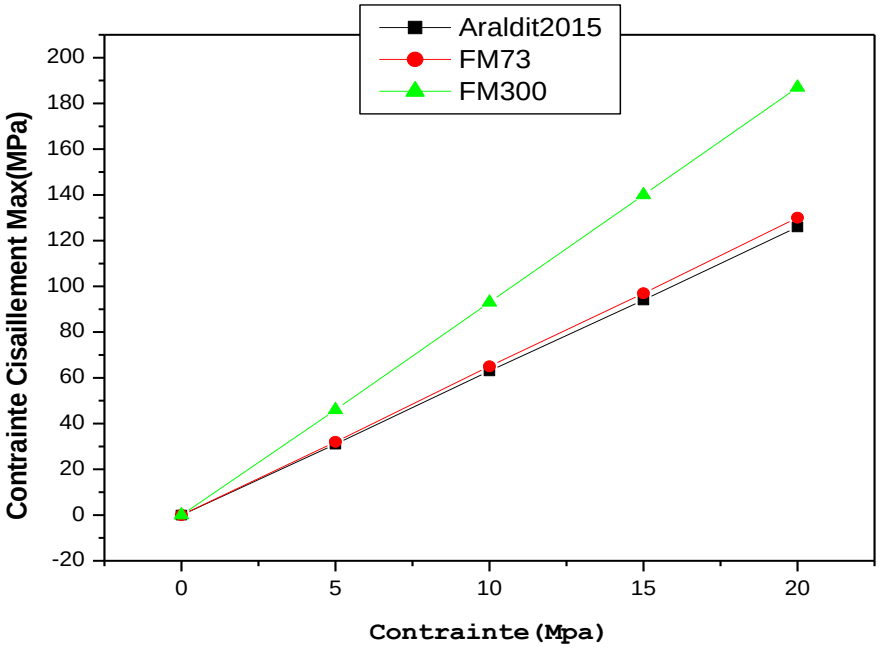


Figure108 contrainte de cisaillement d'un collage joint bord à bord à recouvrement simple par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en acier

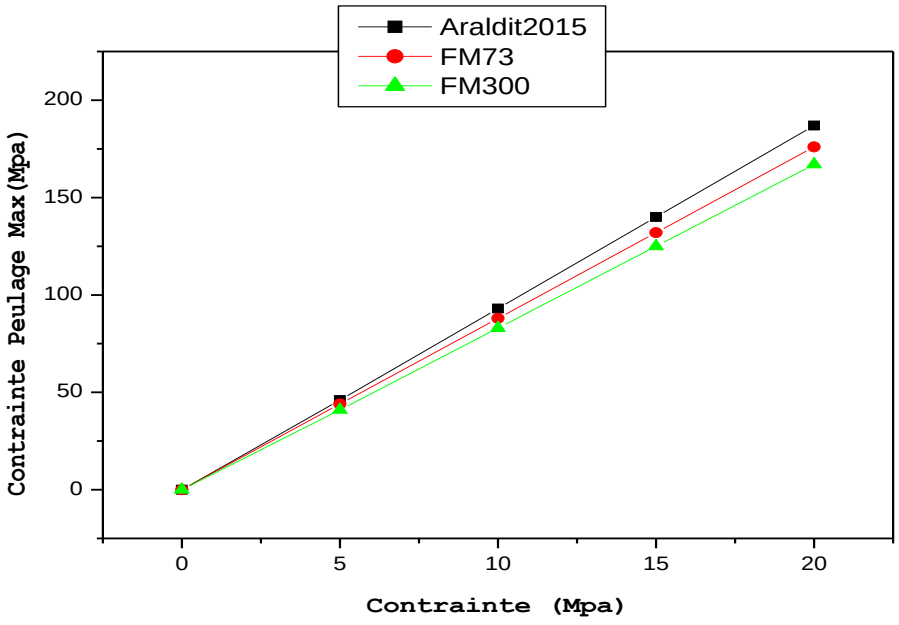


Figure109 contrainte de pelage d'un collage joint bord à bord à recouvrement simple par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en acier

MODELE 02

Aluminium(73100)

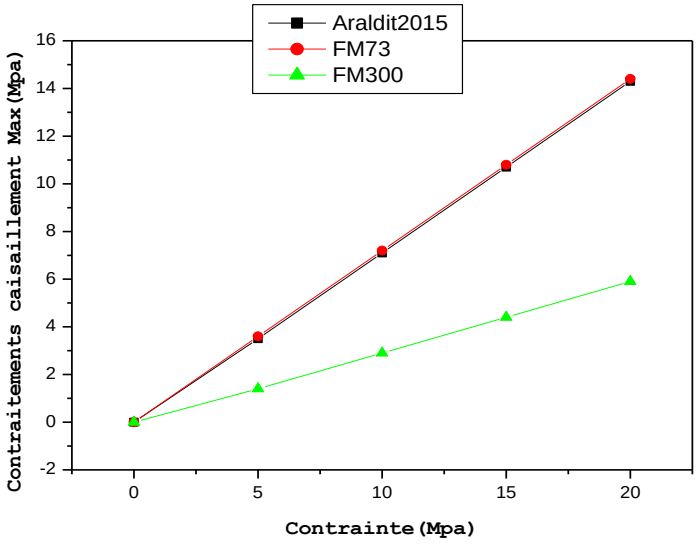


Figure110 contrainte de cisaillement d'un collage entre deux plaques par joint à recouvrement par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en aluminium

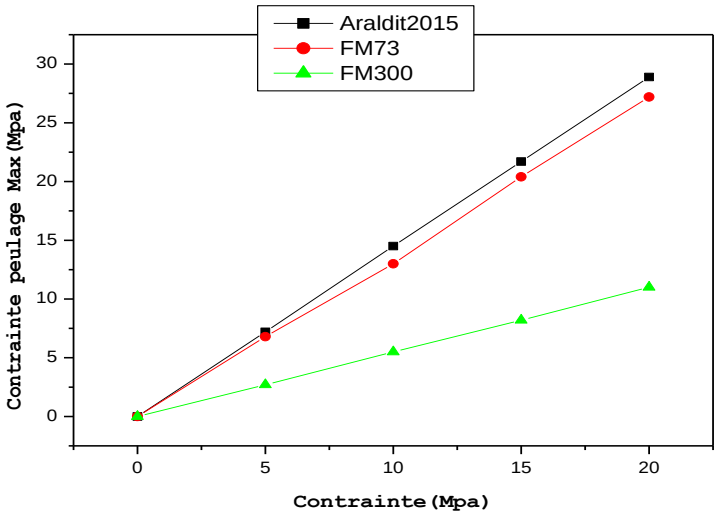


Figure111 contrainte de pelage d'un simple collage entre deux plaques par joint à recouvrement par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en acier

maillechort (120000)

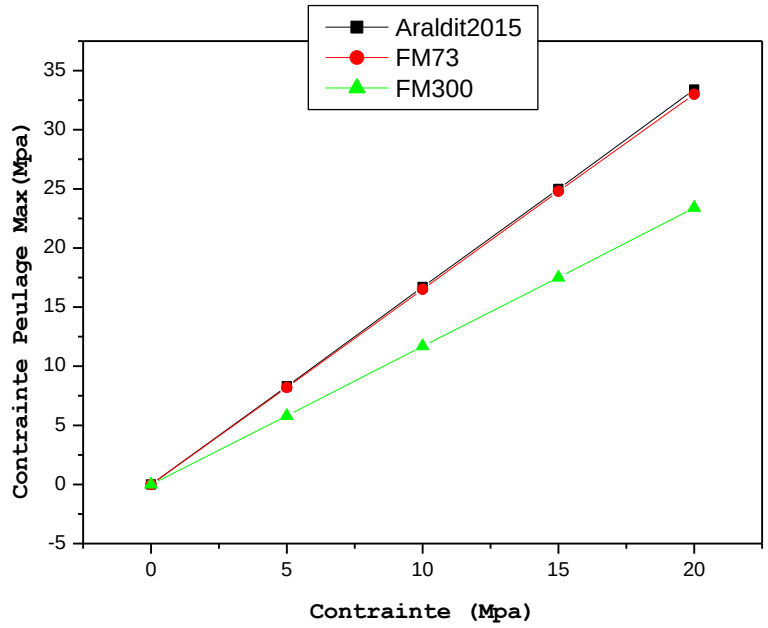


Figure112 contrainte de cisaillement d'un simple collage entre deux plaques par joint à recouvrement par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en maillechort

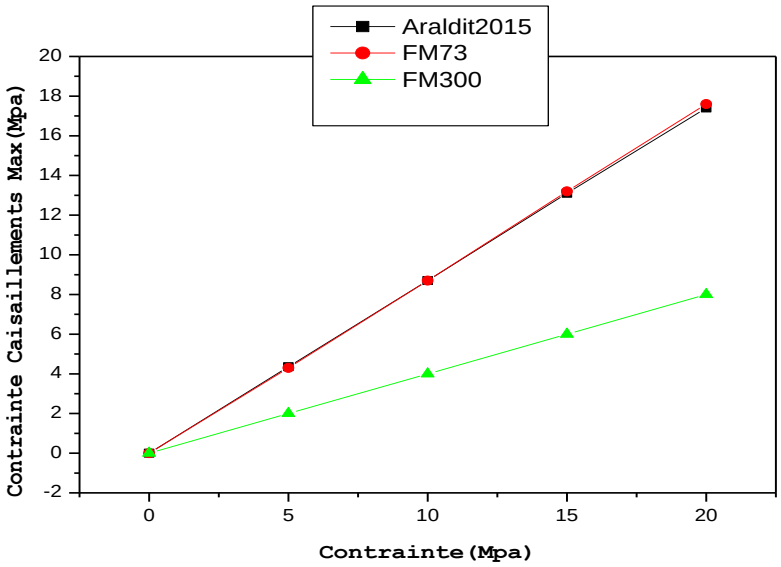


Figure113 contrainte de pelage d'un simple collage entre deux plaques par joint à recouvrement par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en maillechort

SA312(204000)

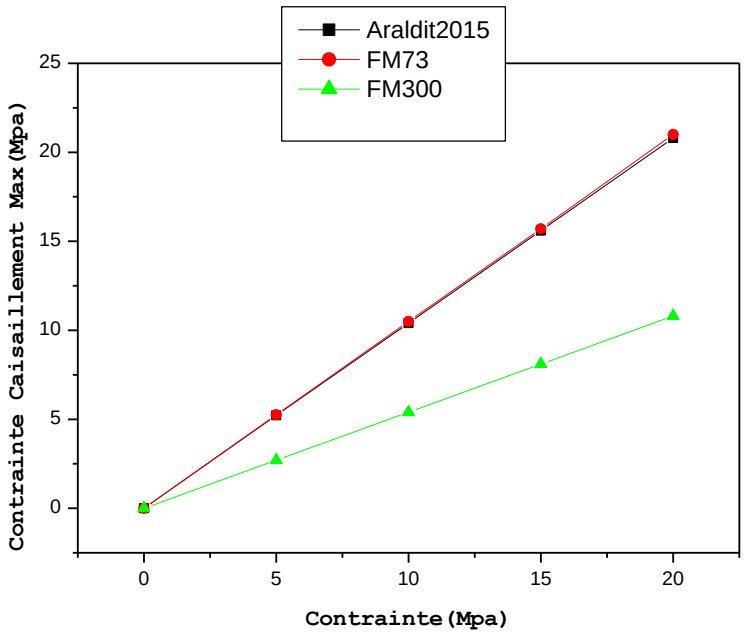


Figure114 contrainte de cisaillement d'un simple collage entre deux plaques par joint à recouvrement par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en acier

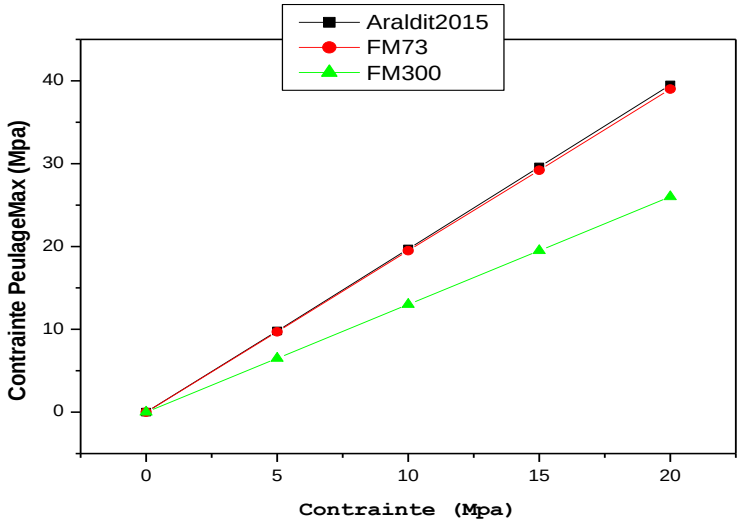


Figure115 contrainte de pelage d'un simple collage entre deux plaques par joint à recouvrement par rapport des différents types d'adhésives pour des plaques en acier

Conclusion Générale :

L'optimisation des joints collés est un processus complexe qui nécessite une attention particulière à plusieurs facteurs clés.

****Choix de la colle** : Le choix de la colle est crucial pour obtenir un joint collé optimal. Les colles peuvent varier en fonction de leurs propriétés, comme leur résistance à l'humidité, leur temps de séchage, leur résistance à la température, et leur compatibilité avec les matériaux à coller. Par exemple, les colles cyanoacrylates durcissent instantanément lorsqu'elles sont en contact avec des surfaces de jointement par une réaction avec l'humidité de surface.**

****Préparation de la surface** : La préparation de la surface à coller est également un facteur important. Les surfaces doivent être propres, dégraissées et exemptes de parties friables pour assurer une bonne adhérence. Dans certains cas, des considérations spécifiques peuvent être nécessaires, comme la rugosité de la surface ou la présence d'huiles naturelles.**

****Conception du joint** : La conception du joint joue un rôle crucial dans l'optimisation du joint collé. Un joint équilibré est souvent recherché pour maximiser les performances mécaniques. Par exemple, les assemblages par recouvrement font travailler la colle en cisaillement, une contrainte idéale pour les adhésifs.**

****Durabilité** : La durabilité est un autre aspect important de l'optimisation des joints collés. Un joint collé doit conserver une part significative de sa capacité à supporter des efforts sous des conditions très variées d'environnement (humidité) et de sollicitations (chimique, mécanique, thermique, électrique).**

****Surveillance** : Enfin, la surveillance des joints collés peut aider à détecter les petites variations de contrainte et à corriger les erreurs de positionnement de la jauge de contrainte, améliorant ainsi la performance du joint.**

En somme, l'optimisation des joints collés est un processus multidimensionnel qui nécessite une attention particulière à la sélection de la colle, à la préparation de la surface, à la conception du joint, à la durabilité et à la surveillance. En tenant compte de tous ces facteurs, il est possible de maximiser la performance et la durabilité des joints collés.

Liste de références

[1] file:///C:/Users/AM ER-SOFT/Downloads/Documents/Chapitre%203%20Assemblages%20par%20collage%202022%20S2.pdf

[2].https://www.pixartprinting.fr/blog/breve-histoire-du-collage/

[3].https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-des-materiaux/chimie-des-surfaces/le-collage-un-moyen-ancestral-moderne-et

[4].https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/materiaux-d-emballage-et-methodes-de-conditionnement-42716210/colles-et-adhesifs-pour-emballages-ag6750/phenomenes-d-adhesion-et-prise-de-la-colle-ag6750niv10001.html

[5] https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/materiaux-et-technologies-en-conception-42520210/rubans-adhesifs-bm7612/theorie-de-l-adhesion-bm7612v2niv10002.html

[6] https://www.nae.fr/wp-content/uploads/2014/05/EB_Assemblage_TP.pdf

[7] MEMOIRE DE MAGISTER ANALYSER TRIDIMENTIONELLE AU CPMPORTEMANT MECANIQUE DES ASSEMBLAGE COLLER

[8] https://www.afer-industrie.fr/fr/blog/les-bonnes-pratiques-de-preparation-de-surface-pour-le-collage

[9] https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblage-des-materiaux-par-collage-42188210/collage-des-materiaux-bm7616/mise-en-uvre-bm7616niv10002.html

[10] MEMOIRE DE MAGISTERPrésenté parMr. KHELOUFI Lakhdar

[11] https://www.sous-traiter.fr/lassemblage-par-collage-limportance-de-la-preparation-des-surfaces/

[12] https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/plasturgie-procedes-specifiques-aux-composites-42474210/collage-des-composites-am5220/preparation-des-surfaces-am5220niv10002.html

[13] https://theses.hal.science/tel-03934679v1/file/2021UCFAC035_KOUICEM.pdf

[14] https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9369661/

[15] https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-materiaux-de-construction-42224210/colles-et-adhesifs-c960/domaines-d-utilisation-en-construction-c960niv10001.html

[16] https://www.maxicours.com/se/cours/les-procedes-d-assemblage/

[17] https://www.ateliers14.com/les-avantages-du-collage-industriel/

[18] https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/materiaux-et-technologies-en-conception-42520210/rubans-adhesifs-bm7612/assemblage-colle-versus-fixation-mecanique-bm7612v2niv10001.html

[19] https://www.3mfrance.fr/3M/fr_FR/solutions-adhesives-assemblage/formation-apprentissage/avantages-de-la-colle/

[20] https://fr.scribd.com/document/44619470/Collage

[21] https://www.maxicours.com/se/cours/les-procedes-d-assemblage/

[22]. SebastianXhonneux, « Perception de l'optimisation en mathématiques et en économie au fil des siècles et l'enseignement du théorème de Lagrange [archive] », sur APMEP, 27 octobre 2008 (consulté le 15 mars 2010).

[23].voir l'article « Méthode de Newton ».

[24]. Joseph-Louis Lagrange, « Manière plus simple et plus générale de faire usage de la formule de l'équilibre donnée dans la section deuxième », dans Mécanique analytique

[25]. https://en.wikipedia.org/wiki/Least_squares
https://blogs.sas.com/content/iml/2022/03/16/least-squares-gauss-newton.html

[26] the related subjects of linear algebra and approximation, which had produced a vast literature. » George Dantzig (1990).

[27].- Harold W. Kuhn, "The Hungarian Method for the assignment problem", Naval Research Logistics Quarterly, 2: 83–97, 1955. Kuhn's original publication.

[28]. Harold W. Kuhn, "Variants of the Hungarian method for assignment problems", Naval Research Logistics Quarterly, 3: 253–258, 1956.

[29]. Ford, L. R., & Fulkerson, D. R. (1956). Maximal Flow through a Network. **Canadian Journal of Mathematics, 8**, 399-404.

[30]. The Computer Journal, Volume 6, Issue 2, August 1963, Pages 163–168, https://doi.org/10.1093/comjnl/6.2.163

[31]. https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Algorithme_du_gradient

[32].https://mae.ufl.edu/mdo/Papers/5274.pdf#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fmae.ufl.edu%2Fmdo%2FPapers%2F5274.pdf%0AVisible%3A%200%25%20).
[33]. Roman Bartak, A Guide to Constraint Programming, 1998 [3]

[34]. Boyd, Stephen, and LievenVandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.

[35]. Stochastic Optimization Methods: Applications in Engineering and Operations Research" par Kurt Marti et Peter Schweitzer.

[36]."Stochastic Processes, Optimization, and Control Theory" par Alan J. King et Stein W. Wallace.

[37]. "What is Simulated Annealing?". www.cs.cmu.edu. Retrieved 2023-05-13.

[38]- "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning" par David E. Goldberg.

[39]."ParticleSwarmOptimization" par Maurice Clerc et James Kennedy.

[40]. Soutis, C., & Adams, R.D. (1996). "Optimization of Bonded Composite Joints Using Genetic Algorithms." *Composites Science and Technology*, 56(2), 149-156.

[41].- O'Brien, T.K., & Deale, F. (2001). "Optimization of Adhesively Bonded Joints Subjected to Combined Mechanical and Environmental Loading." *Journal of Composite Materials*, 35(14), 1273–1301.

[42] - Dorn, L., & Spiegel, M. (2010). "Cost-Effective Design of Adhesive Joints Using Finite Element Simulation and Optimization Techniques." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(5), 697-709.

[43] - Armstrong, D.E.J., &Masek, M. (2003). "Cost Optimisation of Adhesive Joints in Automotive Structures." *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23(4), 269-278

[44] - Chowdhury, M.A., &Silberschmidt, V.V. (2017). "Multi-Objective Optimization of Adhesive Bonded Joints Subjected to Fatigue Loading." *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 78, 106-117.

[45] - Lucas, W.A., & Adams, R.D. (1984). "Environmental Durability of Structural Adhesive Bonds." *The Journal of Adhesion*, 16(1-4), 1-22.

[46] - Sankar, B.V., &Aitharaju, V. (2007). "Multi-Objective Optimization of Composite Bonded Joints for Vibration Damping Applications." *Journal of Composite Materials*, 41(21), 2593-2616

[47] - Esen, H., &Fenercioglu, H. (2006). "Temperature and Pressure Effects on the Adhesive Bonding Process." *Materials & Design*, 27(8), 688-694

[48] - Adams, R.D., &Comyn, J. (2005). *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*. Wood head Publishing.

[49] - Hart-Smith, L.J., & Adams, R.D. (1979). "Failure of Structural Adhesive Bonds." *International Journal of Adhesion and Adhésives*, 1(1), 15-22.

[50] - Kinloch, A.J. (1987). "The Science of Adhesion." *Journal of Materials Science*, 22(1), 1-32.

[51] - Esen, H., &Fenercioglu, H. (2006). "Temperature and Pressure Effects on the Adhesive Bonding Process." *Materials & Design*, 27(8), 688-694.

[52] - Hart-Smith, L.J. (1981). "Diffusion Processes in Adhesively Bonded Joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1(1), 59-65.

[53] - Carbas, R.J.C., & da Silva, L.F.M. (2018). "Influence of Joint Geometry on the Stress Distribution and Strength of Adhesively Bonded Single-Lap Joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84, 215-227.

[54] - Lucas, W.A., & Adams, R.D. (1984). "Environmental Durability of Structural Adhesive Bonds." *The Journal of Adhesion*, 16(1-4), 1-22.

[55] - Pocius, A.V. (1997). *Adhesion Measurement of Thin Films, Thick Films, and Bulk Coatings*. Butter Worth-Heinemann.

[56]. Optimization Concepts and Applications in Engineering" par Ashok D. BelegunduetTirupathi R. Chandrupatla

[57]. Engineering Optimization: Theory and Practice" par Singiresu S. Rao

[58]."Structural Optimization" par Martin P. Bendsoeet Ole Sigmund

[59]. Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments.John Wiley & Sons.

[60]. - Eriksson, L., Byrne, T., Johansson, E., Trygg, J., Vikström, C., &Wold, S. (2013). Multi-and megavariate data analysis: principles and applications. Umetrics Academy.

[61].https://fr.wikipedia.org/wiki/Abaqus

[62]. - « Guide de l'utilisateur d'AbaqusAnalysis »

[63]. « Guide théorique Abacus »

[64]. A Practical Guide to FiniteElementModelingwithAbaqus" par Z. Zhu et S. S. Quek.

[65].http://dspace.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1161/MIMOIRE%20FIN%20D%27ETUDE%20ILYES%20NEMRI.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[66].https://cel.hal.science/cel-00763690v3/file/v3_cours.pdf

[67].https://choi.users.lmno.cnrs.fr/pdf/cours-mef.pdf

[68].https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_des_%C3%A9l%C3%A9ments_finis

[69].https://www.researchgate.net/profile/Deghboudj-Samir/publication/327582107_METHODE_DES_ELEMENTS_FINIS/links/5b981b2d299bf14ad4cea1f9/METHODE-DES-ELEMENTS-FINIS.pdf

[70].https://core.ac.uk/download/pdf/35403109.pdf

[71].http://thesis.univ-biskra.dz/1737/1/24.pdf

[72].https://www.cairn.info/revue-economique-2003-2-page-329.htm

[73].https://engineering.stackexchange.com/questions/47459/what-are-the-fundamental-and-governing-equations-used-for-structural-solid-mecha