

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

UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

*Analyse comparative et simulation par éléments finis d'un
assemblage collé(JSR).*

Présenté par :

-DJABRIA Miloud

-GHEZALI Mohamed Islem

Dirigé par :

-Dr. BOUAKKAZ Ahmed Ouadah

PROMOTION : 2024-2025

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la force, la patience et la volonté d'accomplir ce projet de fin d'études dans les meilleures conditions.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Dr. BOUAKKAZ Ahmed Ouadah, notre encadrant au sein de **UHBC**, pour son suivi rigoureux, ses conseils précieux et son soutien constant tout au long de ce travail. Sa bienveillance et sa disponibilité ont largement contribué à la qualité de ce projet.

Nous remercions également l'ensemble du corps enseignant de Département de Génie Mécanique

pour la qualité de l'enseignement dispensé au cours de notre formation, ainsi que toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à notre évolution.

Nous tenons à adresser nos remerciements les plus sincères à nos parents pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et matériel, et leur confiance tout au long de notre parcours. Leur présence à nos côtés a été une source de force inestimable.

Nous n'oublions pas nos frères, sœurs et amis, qui nous ont toujours encouragés, soutenus et motivés, même dans les moments de doute. Leur présence et leur bienveillance ont été d'un grand réconfort.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réussite de ce projet.

[DJABRI Miloud]

[GHEZALI Mohamed Islem]

Résumé :

Le collage structural s'impose de plus en plus comme une solution d'assemblage performante dans le domaine de l'ingénierie mécanique, en particulier pour les structures sollicitées où la répartition homogène des contraintes et la préservation de l'intégrité des matériaux sont cruciales. Ce travail de recherche vise à analyser le comportement mécanique de différents adhésifs en utilisant une approche numérique fondée sur le logiciel Abaqus et l'application de modèles de zone cohésive. L'étude met l'accent sur l'influence de la rigidité des adhésifs sur la distribution des contraintes dans l'assemblage collé. Les résultats numériques montrent que les adhésifs à faible rigidité, comme le 3M 2216, permettent une meilleure dissipation des contraintes, notamment une réduction significative des contraintes de Von Mises, contribuant ainsi à améliorer la durabilité de l'assemblage. Cette étude confirme également l'efficacité des simulations numériques comme outil de prédiction du comportement des assemblages collés, offrant une alternative fiable et économique aux campagnes d'essais expérimentaux souvent coûteuses et chronophages. Ces travaux ouvrent ainsi des perspectives intéressantes pour l'optimisation des assemblages collés dans les applications industrielles exigeantes.

Mots clés : Assemblage collé, joint à simple recouvrement (JSR), joint adhésif, modèle de zone cohésive.

Abstract:

Structural bonding is increasingly recognized as a high-performance joining method in mechanical engineering, especially for load-bearing structures where uniform stress distribution and material integrity are essential. This research aims to analyze the mechanical behavior of various adhesives using a numerical approach based on Abaqus software and cohesive zone modeling. The study focuses on the influence of adhesive stiffness on stress distribution within bonded joints. Numerical results show that low-stiffness adhesives, such as 3M 2216, offer superior stress dissipation capabilities, significantly reducing Von Mises stresses and enhancing joint durability. The findings also highlight the effectiveness of numerical simulation as a predictive tool for bonded joint performance, providing a reliable and cost-effective alternative to extensive experimental testing. This work opens promising prospects for the optimization of adhesive joints in demanding industrial applications.

Keywords: Bonded assembly, single lap joint (SLJ), adhesive joint, cohesive zone model.

الملخص :

يُعتبر اللصق الهيكلي بشكل متزايد وسيلة فعالة للربط في مجال الهندسة الميكانيكية، خاصة في التطبيقات التي تتطلب توزيعاً متجانساً للإجهادات والحفاظ على سلامة المواد. يهدف هذا البحث إلى دراسة السلوك الميكانيكي لمجموعة من المواد اللاصقة باستخدام مقاربة رقمية تعتمد على برنامج Abaqus ونماذج المناطق التلاصقية (Cohesive Zone Models). تركز الدراسة على تأثير صلابة المادة اللاصقة في توزيع الإجهادات داخل الوصلات الملتصقة. أظهرت النتائج العددية أن المواد اللاصقة المرنة، مثل M 22163، تتمتع بقدرة عالية على تبديد الإجهادات، مما يساهم في تقليل إجهادات فون ميز (Von Mises) بشكل فعال وتحسين متانة الوصلات. كما تؤكد النتائج فعالية المحاكاة العددية كأداة تنبؤية موثوقة لسلوك الوصلات الملتصقة، مما يجعلها بديلاً اقتصادياً ومجدياً عن التجارب المخبرية المكثفة. تفتح هذه الدراسة آفاقاً واعدة لتحسين أداء الوصلات اللاصقة في التطبيقات الصناعية عالية المتطلبات.

الكلمات المفتاحية: تجميع ملتصق، وصلة بتراكب بسيط (JSR)، وصلة لاصقة، نموذج المنطقة التماسكية.

Table des matières

Remerciement

Résumé

Abstract

المخلص

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 13

CHAPITRE I : Les Assemblages Mécaniques : Principes, Techniques et Applications

I.1 Introduction : 15

I.2.1 Assemblage démontable (temporaire) : 16

I.2.1.1 Les assemblages filetés :16

I.2.1.1.b Les propriétés de l'assemblage fileté:17

I.2.1.2 Les assemblages par obstacle : 17

I.2.1.3 Les types de l'assemblage par obstacle :17

I.2.1.4 Applications des assemblages démontables : 19

I.2.1.4.a Secteur mécanique :19

I.2.1.4.b Secteur électronique :19

I.2.1.4.c Secteur du mobilier :19

I.2.1.5 Avantages et inconvénients de l'Assemblage démontable : 19

I.2.1.5.a Avantages :19

I.2.1.5.b Inconvénients :20

I.3 Assemblage non démontable (permanent) : 20

I.3.1 Assemblages par déformation :20

I.3.2 Assemblage par soudure :21

I.3.2.1 Classification générale des procédés de soudage :22

I.3.2.2 procédés de soudage : 23

I.3.2.2.a Soudage oxyacéthylnique :23

I.3.2.2.b Soudage à l'arc électrique :23

I.3.2.2.c Soudage par résistance électrique :24

I.3.2.3 Avantages et inconvénients du soudage : 24

I.3.2.4 Applications du soudage : 25

I.3.3.1 Configurations de joints collés :	26
I.3.3.3 Avantages et inconvénients du collage :	27
I.3.3.4 Mise en œuvre :	28
I.4 Impact environnemental des techniques d'assemblage :	29
I.5 Vers des solutions écoresponsables :	29
I.6 Assemblages hybrides : allier performance et durabilité :	29
I.7 L'apport des nouvelles technologies : impression 3D et assemblage sans fixation mécanique :	30
I.7.1 Impression 3D :	31
I.7.2 Assemblage sans fixation mécanique :	31
I.8 Optimisation des assemblages par la simulation et l'intelligence artificielle :	32
I.9 Conclusion	32

CHAPITRE II : Les Modèles de Zone Cohésive

II.1 : Introduction :	34
II.2 : Historique et premiers modèles de zone cohésive :	35
II.3 : Formulation et modélisation énergétique :	36
II.3.a : Décomposition dans le repère normal/tangent :	36
II.3.b : Potentiel et énergie de décohésion :	36
II.4 : Analyse critique des modèles de zone cohésive :	37
II.4.a : Avantages :	37
II.4.b : Inconvénients :	38
II.5 : Différents modèles de zone cohésive :	39
II.5.a : Modèle de Dugdale :	39
II.5.b : Modèle de Tvergaard et Hutchinson :	39
II.5.c : Modèle de Palmer et Rice :	40
II.5.d : Modèle de Camacho et Ortiz :	40
II.5.e : Modèles de Needleman et Xu :	42
II.6 : Conclusion :	42

CHAPITRE III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collé à simple recouvrement

III.1 Introduction :	44
III.2 Présentation du logiciel Abaqus :	44
• Pourquoi avons-nous choisi Abaqus ?	45

III.3 Caractéristiques principales d’Abaqus :	46
III.4 Composants principaux d’Abaqus :	46
III.5 Applications du logiciel Abaqus :	47
III.6 Étude du joint collé à simple recouvrement :	48
III.6.1 Modèle géométrique :	48
III.6.2 Propriétés des matériaux :	49
a. Aluminium 2024-T3 :	49
b. Adhésif Adékit A140 :	50
c. Adhésif Hysol EA 9369 :	51
d. Adhésif Cytec FM-73M :	51
e. Adhésif 3M 2216 :	51
III.7 Résultats et discussions :	52
1.Contraintes dans l’adhésif "Adékit A140" :	52
• Discussion des résultats – Adékit A140 :	55
2.Contraintes dans l’adhésif "Hysol EA 9369" :	55
• Discussion des résultats – Hysol EA 9369 :	58
3.Contraintes dans l’adhésif "Cytec FM-73M" :	59
• Discussion des résultats – Cytec FM-73M :	62
4.Contraintes dans l’adhésif "3M 2216" :	63
• Discussion des résultats – 3M 2216 :	66
5.Comparaison des adhésifs :	66
•Discussion des résultats – Comparaison générale :	69
III.8 Conclusion :	70
Conclusion Générale	72
Références:	73

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Assemblage filetés.

Figure I.2 : Assemblage par goupille

Figure I.3 : Assemblage par clavette

Figure I.4: Assemblage par cannelures

Figure I.5 : Assemblage par anneaux élastiques

Figure I.6 : Différentes techniques d'assemblage par déformation plastique : (a) rivetage auto poinçonneur (coupe), (b) rivetage, (c) clinchage à point rond, (d) clinchage à point carré

Figure I.7 : Soudage autogène et hétérogène.

Figure I.8 : Soudage oxyacétylénique.

Figure I.9 : Soudage à l'arc électrique.

Figure I.10 : Soudage par résistance électrique.

Figure I.11 : différentes configurations de joints collés.

Figure I.12 : modes de sollicitation des joints collés

Figure I.13 : les différentes méthodes de mise en œuvre des colles.

Figure I.14 : Différentes techniques d'assemblage hybride(a) un assemblage boulonné-collé, (b) un assemblage riveté-collé, (c) Soudage par points et collage.

Chapitre II

Figure II.1: Schémas du modèle de zone cohésive.

Figure II.2 : Décomposition du saut de déplacement en une composante normale et tangentielle

Figure II.3: Modèle de Dugdale

Figure II.4: Modèle de Tvergaard et Hutchinson

Figure II.5 : Modèle de Palmer et Rice

Figure II.6 : Modèle de Camacho et Ortiz

Figure II.7 : Modèles de Needleman et Xu

Chapitre III

Figure III.1: L'Interface du logiciel Abaqus

Figure III.2. Modèle géométrique 3D du joint collé en simple recouvrement (dimensions en mm).

Figure III.3. Distribution générale des contraintes dans le joint collé (mode initial).

Figure III.4. Courbe contrainte-déformation de l'aluminium 2024-T3.

Figure III.5. Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif Adékit A140.

Figure III.6. Distribution de la contrainte normale S11 dans l'adhésif Adékit A140 (direction longitudinale).

Figure III.7. Distribution de la contrainte normale S22 dans l'adhésif Adékit A140 (épaisseur).

Figure III.8. Distribution de la contrainte normale S33 dans l'adhésif Adékit A140 (largeur).

Figure III.9. Distribution de la contrainte de cisaillement S13 dans l'adhésif Adékit A140.

Figure III.10. Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif Hysol EA 9369.

Figure III.11. Distribution de la contrainte normale S11 dans l'adhésif Hysol EA 9369.

Figure III.12. Distribution de la contrainte normale S22 dans l'adhésif Hysol EA 9369.

Figure III.13. Distribution de la contrainte normale S33 dans l'adhésif Hysol EA 9369.

Figure III.14. Distribution de la contrainte de cisaillement S13 dans l'adhésif Hysol EA 9369.

Figure III.15. Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif Cytec FM-73M.

Figure III.16. Distribution de la contrainte normale S11 dans l'adhésif Cytec FM-73M.

Figure III.17. Distribution de la contrainte normale S22 dans l'adhésif Cytec FM-73M.

Figure III.18. Distribution de la contrainte normale S33 dans l'adhésif Cytec FM-73M.

Figure III.19. Distribution de la contrainte de cisaillement S13 dans l'adhésif Cytec FM-73M.

Figure III.20. Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif 3M 2216.

Figure III.21. Distribution de la contrainte normale S11 dans l'adhésif 3M 2216.

Figure III.22. Distribution de la contrainte normale S22 dans l'adhésif 3M 2216.

Figure III.23. Distribution de la contrainte normale S33 dans l'adhésif 3M 2216.

Figure III.24. Distribution de la contrainte de cisaillement S13 dans l'adhésif 3M 2216.

Figure III.25. Contraintes de Von Mises le long du recouvrement pour chaque adhésif.

Figure III.26. Contraintes normales S11 le long du recouvrement pour chaque adhésif.

Figure III.27. Contraintes normales S22 le long du recouvrement pour chaque adhésif.

Figure III.28. Contraintes normales S33 le long du recouvrement pour chaque adhésif.

Figure III.29. Contraintes de cisaillement S13 le long du recouvrement pour chaque adhésif.

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Comparaison de l'empreinte carbone et de la durabilité des méthodes d'assemblage

Chapitre III

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques de l'aluminium 2024-T3 (plaques).

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques de l'adhésif Adékit A140.

Tableau III.3 : Propriétés mécaniques de l'adhésif Hysol EA 9369.

Tableau III.4 : Propriétés mécaniques de l'adhésif Cytec FM-73M.

Tableau III.5 : Propriétés mécaniques de l'adhésif 3M 2216.

Nomenclature

JSR	joint à simple recouvrement.
Q	énergie thermique produite (en joules).
R	résistance électrique du conducteur (en ohms,).
I	intensité du courant (en ampères, A).
t	temps pendant lequel le courant circule (en secondes, s).
3D	Tridimensionnelle.
RVE	élément de volume représentatif.
CZMs	Les modèles de zone cohésive.
FEM	méthode des éléments finis.
φ	Les contraintes cohésives d'un potentiel φ .
\vec{R}	Le chargement cohésif.
\vec{U}	Saut de déplacement.
E_{sep}	L'énergie de décohésion.
E_{sep}^N	L'énergie de décohésion normale.
E_{sep}^T	L'énergie de décohésion tangentielle.
R_N	La contrainte cohésive.
R_T	La contrainte cohésive tangentielle.
U_T	Déplacement tangentiel.
q	Le ratio entre les énergies de décohésion tangentielle et normale.
r	Le ratio entre U_N^* (valeur de U_N lorsque la contrainte normale est nulle) et δ_N .
Re	résistance élastique
CAE	Complete Abaqus Environment
S11, S22, S33	les composantes de contraintes normales
S13	la contrainte de cisaillement

Introduction générale

Les techniques d'assemblage jouent un rôle central en ingénierie mécanique pour assurer l'intégrité structurelle des systèmes. Outre le soudage et les fixations mécaniques (rivets, vis), le collage structurel s'impose aujourd'hui comme une solution compétitive. En effet, le collage utilise une couche adhésive entre deux surfaces, évitant les perçages et les apports thermiques locaux ; de ce fait, il répartit uniformément les contraintes sur toute la surface jointe et prévient les altérations microstructurales liées au soudage [1][2]. Cette répartition homogène des efforts réduit le risque de concentration locale (par exemple autour des boulons) et améliore la résistance en fatigue des assemblages [2][3]. De plus, en l'absence de perçage, le collage ne compromet pas l'intégrité des matériaux, ce qui permet l'assemblage fiable de matériaux dissemblables (métaux, composites, plastiques...).

Aujourd'hui, les assemblages collés trouvent de nombreuses applications industrielles du fait de leurs avantages : réduction de poids, assemblage multi-matériaux, meilleure répartition des contraintes, etc. [4] Ces atouts sont particulièrement recherchés dans l'automobile, l'aéronautique ou les équipements à haute performance mécanique. Ils expliquent pourquoi les chercheurs travaillent à l'optimisation des colles structurales pour le génie mécanique moderne.

Dans ce contexte, ce mémoire s'articule autour de trois axes principaux :

1. L'intérêt des assemblages collés dans l'ingénierie contemporaine, comparé aux autres méthodes d'assemblage mécanique.
2. La performance mécanique comparée de différents adhésifs en fonction des sollicitations
3. L'usage de la simulation numérique (en particulier Abaqus couplé à des modèles de zone cohésive) pour prédire le comportement des joints collés.

Le premier chapitre propose un état de l'art des techniques d'assemblage. Le second chapitre introduit les modèles de zone cohésive. Enfin, le troisième chapitre détaille une étude numérique sous Abaqus d'un joint collé à simple recouvrement, comparant plusieurs adhésifs structuraux. Ce travail vise à construire une méthodologie complète associant expérimentation et simulation pour dimensionner et optimiser des assemblages collés performants.

Chapitre I

Les Assemblages Mécaniques : Principes, Techniques et Applications

I.1 Introduction :

L'assemblage est une opération visant à solidariser deux objets. En construction métallique, Les assemblages peuvent être réversibles ou permanents.

L'assemblage mécanique a évolué significativement au fil du temps. Parmi les différentes méthodes d'assemblage, trois techniques principales se distinguent : le boulonnage, le collage et le soudage. Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients, nécessitant ainsi une adaptation en fonction des sollicitations appliquées à la structure, des exigences spécifiques des pièces à assembler et de leur nature même.

L'assemblage mécanique a évolué significativement au fil du temps, passant de techniques rudimentaires à des procédés hautement automatisés. Dans l'Antiquité, les premières méthodes d'assemblage reposaient sur l'utilisation de fibres naturelles et de cuirs pour relier les outils. Les civilisations égyptienne, grecque et romaine ont ensuite perfectionné ces techniques en introduisant les chevilles, les clous métalliques et les assemblages en tenon-mortaise. Au Moyen Âge, l'usage du métal s'est généralisé avec le développement des vis, des rivets et des charnières, permettant la fabrication d'instruments mécaniques plus sophistiqués. [7] Avec la Révolution industrielle au XVIIIe siècle, l'apparition des machines-outils comme les tours et les fraiseuses a révolutionné la production des pièces standardisées, facilitant ainsi leur assemblage. Parmi les figures marquantes de cette époque, James Watt, inventeur de la machine à vapeur améliorée, a contribué au développement des systèmes mécaniques nécessitant des assemblages plus précis. À la fin du XIXe et au début du XXe siècle, Henry Maudslay a joué un rôle clé dans la création de machines capables de produire des vis et des écrous uniformes, un progrès fondamental pour l'assemblage mécanique. [8] De son côté, Henry Ford a transformé l'industrie avec l'introduction de la production en série, optimisant les processus d'assemblage mécanique grâce aux chaînes de montage. Au XXe siècle, les techniques de soudage, comme le soudage à l'arc et le soudage par points, ont considérablement amélioré la robustesse des assemblages, devenant incontournables dans l'industrie automobile et aéronautique. Aujourd'hui, l'automatisation et la robotique ont radicalement transformé l'assemblage mécanique, réduisant l'intervention humaine tout en augmentant la précision et l'efficacité. Par ailleurs, les avancées en impression 3D et en matériaux intelligents permettent désormais de concevoir des pièces interconnectées sans recours aux fixations traditionnelles, redéfinissant ainsi le concept même de l'assemblage mécanique. [9]

I.2 Types d'assemblage :

Les assemblages se classent en deux grandes catégories selon leur démontrabilité. :

I.2.1 Assemblage démontable (temporaire) :

La liaison est conçue pour être démontée sans causer de dommages significatifs aux pièces, qui restent généralement réutilisables pour un nouvel assemblage. Toutefois, l'élément assurant la liaison peut ne pas être réutilisable. [10]

I.2.1.1 Les assemblages filetés :

Un assemblage par éléments filetés permet de relier solidement et de manière démontable une ou plusieurs pièces. Grâce à leur simplicité d'utilisation, ces éléments trouvent de nombreuses applications dans les domaines mécanique, civil, aéronautique et maritime. Ils sont conçus pour supporter aussi bien des charges statiques que des charges cycliques de fatigue. Les assemblages boulonnés figurent parmi les systèmes de liaison les plus répandus en mécanique, en raison de leur efficacité et de leur rôle essentiel dans la construction mécanique.

I.2.1.1.a Les types de l'assemblage fileté :

Un assemblage par éléments filetés se compose de deux ou plusieurs pièces assemblées à l'aide d'un ou plusieurs éléments de liaison spécifiques. [11]

Vis : Tige fileté, avec ou sans tête, dotée d'un dispositif d'entraînement (rainure, empreinte hexagonale, creux ou tête...).

Écrou : Pièce taraudée munie d'un système d'entraînement.

Goujon : Tige fileté aux deux extrémités.

Boulon : Ensemble composé d'une Vis à tête et d'un écrou, conçu pour assurer un serrage entre face d'appui de la tête et celle de l'écrou.

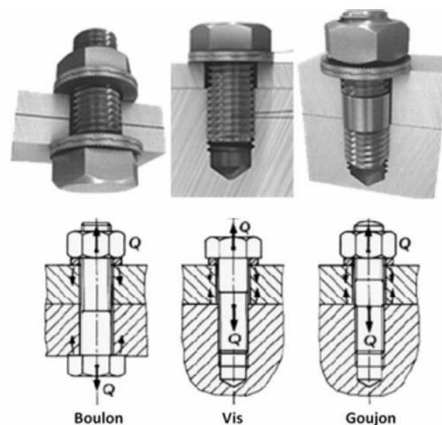


Figure I.1:Assemblage filetés. [11]

I.2.1.1.b Les propriétés de l'assemblage fileté:

- Solidité et résistance : Les assemblages filetés peuvent supporter des charges élevées, ce qui les rend idéaux pour des applications où la sécurité et la fiabilité sont essentielles.
- Facilité de démontage : Contrairement aux soudures permanentes, les assemblages filetés peuvent être facilement démontés pour des réparations, des ajustements ou des remplacements.
- Uniformité de la force de serrage : Lorsqu'ils sont correctement serrés, les assemblages filetés distribuent uniformément la force de serrage, minimisant les points de stress.
- Variété de matériaux : Les éléments filetés peuvent être fabriqués à partir de divers matériaux comme l'acier, le laiton, l'aluminium, et les plastiques, adaptés aux différentes exigences environnementales et mécaniques.
- Précision et fiabilité : Les filetages assurent un alignement précis des composants, améliorant la stabilité et la fonctionnalité de l'assemblage.
- Coût-efficacité : En raison de leur facilité de fabrication et de montage, les assemblages filetés sont souvent plus économiques que les alternatives. [13]

I.2.1.2 Les assemblages par obstacle :

L'assemblage par obstacle est une méthode d'assemblage mécanique où le maintien en position des pièces est assuré par des formes géométriques complémentaires empêchant leur séparation. Ce type d'assemblage ne nécessite pas forcément d'éléments de fixation comme des vis ou des soudures, mais repose sur le blocage mécanique des pièces entre elles. [14]

I.2.1.3 Les types de l'assemblage par obstacle :

- Goupille : Elle est utilisée soit pour fixer une pièce par rapport à une autre (goupille d'arrêt), soit pour assurer son positionnement ou son centrage (goupille de positionnement).

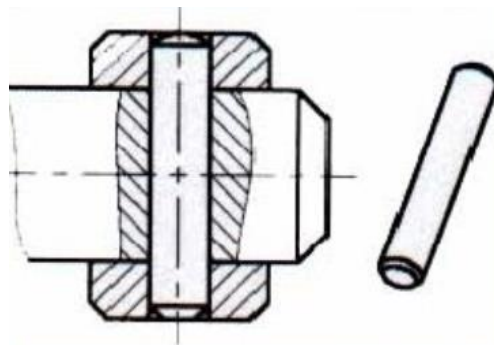


Figure I.2: Assemblage par goupille [10]

- Clavette : Elle permet de relier un arbre à un moyeu par un mécanisme d'obstacle.

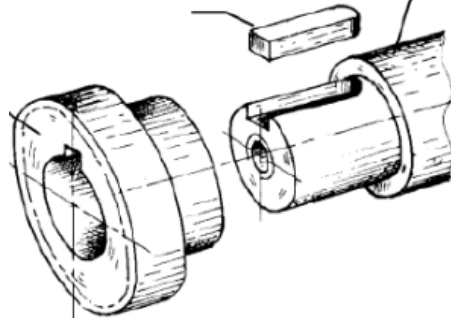


Figure I.3 : Assemblage par clavette [10]

- Cannelures : Elle permet de transmettre un couple entre un arbre et un moyeu, avec une efficacité supérieure à celle d'un assemblage par goupille ou clavette.

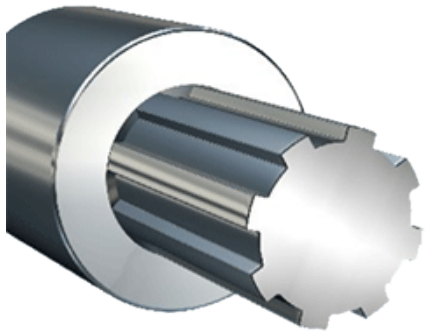


Figure I.4: Assemblage par cannelures [15]

- Anneaux élastiques (circlips) : Elle sert à stopper le mouvement de translation relatif entre deux pièces. Ces éléments, en forme d'anneaux fendus, possèdent une élasticité qui facilite leur montage et assure leur maintien en position après l'assemblage.



Figure I.5 : Assemblage par anneaux élastiques [15]

I.2.1.4 Applications des assemblages démontables :

Les assemblages démontables sont largement utilisés dans divers secteurs en raison de leur flexibilité et de leur efficacité. Leur capacité à faciliter l'entretien et les modifications en fait des solutions essentielles pour de nombreuses applications industrielles. Chaque domaine présente des exigences particulières qui nécessitent une adaptation précise des méthodes d'assemblage. [12]

I.2.1.4.a Secteur mécanique :

Dans l'industrie mécanique, ces assemblages sont privilégiés pour les machines-outils et les structures nécessitant un entretien régulier. L'utilisation de vis et de boulons assure un alignement précis des composants tout en garantissant une stabilité optimale. Par exemple, dans le secteur automobile, les moteurs et les systèmes de transmission intègrent des assemblages vissés, facilitant ainsi les réparations et le remplacement des pièces défectueuses.

I.2.1.4.b Secteur électronique :

Dans le domaine de l'électronique, les assemblages démontables jouent un rôle clé dans la conception de produits modulaires, comme les ordinateurs et les appareils électroménagers. Les fixations clipsées sont particulièrement appréciées, car elles permettent un montage et un démontage rapides sans endommager les composants sensibles. De plus, ces techniques favorisent une meilleure dissipation thermique et facilitent les mises à niveau ou les réparations.

I.2.1.4.c Secteur du mobilier :

Le secteur du mobilier tire pleinement parti des assemblages démontables pour offrir modularité et adaptabilité. Les vis, boulons et fixations clipsées sont couramment utilisés dans la fabrication de meubles en kit, ce qui simplifie le transport et le montage par les utilisateurs. Cette approche permet également de concevoir des meubles évolutifs, capables de s'adapter aux besoins changeants des consommateurs.

I.2.1.5 Avantages et inconvénients de l'Assemblage démontable :

I.2.1.5.a Avantages :

- Facilité de maintenance et de réparation : Les pièces peuvent être démontées et remplacées sans endommager l'ensemble.
- Modularité : Permet des modifications et des ajustements sans nécessiter de nouvelles fabrications.
- Réduction des coûts : Évite le remplacement complet d'un système en cas de défaillance d'une seule pièce.

- Facilité de transport et de stockage : Les composants peuvent être démontés pour réduire l'encombrement.
- Recyclabilité : Facilite la récupération et le réemploi des pièces.

I.2.1.5.b Inconvénients :

- Risque de desserrage : Peut nécessiter des dispositifs supplémentaires (écrous freinés, freins filet) pour éviter un desserrage involontaire.
- Moins de rigidité : Comparé à un assemblage permanent (soudure, collage), il peut être moins robuste et stable.
- Poids et encombrement : L'utilisation de boulons, écrous ou goupilles peut alourdir la structure.
- Temps de montage et démontage : Peut nécessiter plus de temps et d'outils spécifiques.

Coût initial plus élevé : Certains systèmes d'assemblage démontable peuvent être plus coûteux à concevoir et à fabriquer.

I.3 Assemblage non démontable (permanent) :

Un assemblage non démontable est une liaison qui ne peut être supprimée sans entraîner la déformation ou la destruction d'au moins l'une des pièces qui le composent. [10]

I.3.1 Assemblages par déformation :

Les Assemblages par déformation sont des éléments de fixation permanent, ils sont largement utilisés dans les avions, les équipements de transport, dans la construction de bâtiments, les chaudières, les ponts, les navires, l'automobile, l'électroménager, l'électronique etc....

- Rivetage : Le rivetage est un procédé d'assemblage permanent qui consiste à fixer ensemble plusieurs pièces à l'aide de rivets.
- Clinchage : Le clinchage est un procédé d'assemblage de tôles et de profilés basé sur une déformation locale des matériaux. Ce procédé implique une déformation plastique à froid des tôles au niveau de la zone d'assemblage.

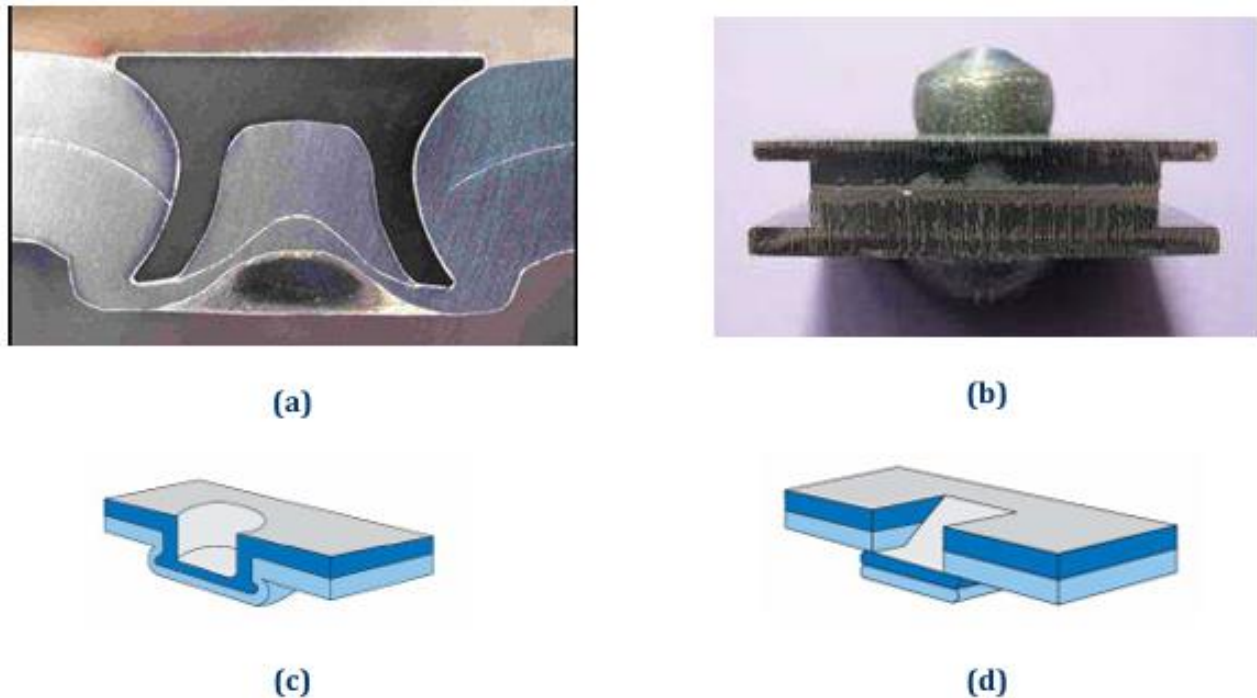


Figure I.6 : Différentes techniques d'assemblage par déformation plastique : (a) rivetage auto poinçonneur (coupe), (b) rivetage, (c) clinchage à point rond, (d) clinchage à point carré [16]

I.3.1.1 Avantages et inconvénients de l'Assemblages par déformation :

I.3.1.1.a Avantages :

- Sécurité de fixation ; économique ; cadences de production élevée ; assemblage de matières et d'épaisseurs différentes.

I.3.1.1.b Inconvénients :

- Non démontable ; tête protubérante. [17]

I.3.2 Assemblage par soudure :

Parmi les procédés d'assemblage mécanique, le soudage est le plus répandu dans de nombreux secteurs industriels, tels que le transport, l'industrie pétrolière et gazière, la construction navale, l'aéronautique et l'automobile. Il s'agit d'une technique permettant d'unir deux ou plusieurs éléments d'un assemblage afin d'assurer une continuité entre les pièces. Cette opération est réalisée sous l'effet d'une énergie thermique ou mécanique, générée par divers procédés tels que la combustion de gaz, l'arc électrique ou encore la pression. [18]

-Le soudage se présente sous deux aspects :

- **Le soudage hétérogène :**

Le brasage et le soudobrasage sont des procédés d'assemblage hétérogène où seul le métal d'apport assure la liaison entre les pièces, agissant ainsi comme un adhésif. La particularité de ces techniques réside dans le fait que le métal d'apport fond à une température inférieure à celle des matériaux à assembler, lesquels peuvent être de natures différentes.

- **Le soudage autogène :**

Le soudage autogène est un procédé d'assemblage homogène dans lequel les pièces à unir, de même nature ou de composition similaire, contribuent à la formation du joint ou du cordon de soudure. Cet assemblage est qualifié d'homogène, signifiant qu'il est constitué du même métal.

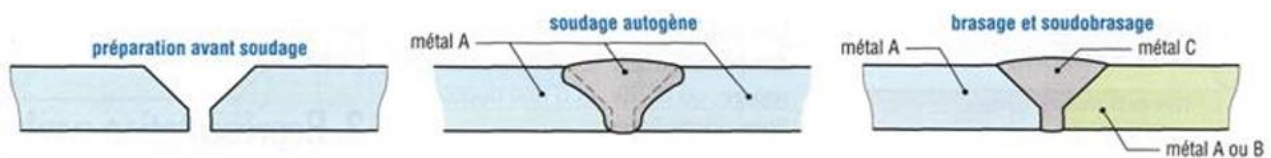


Figure I.7 : Soudage autogène et hétérogène. [19]

I.3.2.1 Classification générale des procédés de soudage :

Les procédés de soudage se distinguent principalement par la nature de la source d'énergie utilisée pour générer la chaleur nécessaire et par l'état du métal au niveau de la zone de soudage. [20]

- **Selon la source d'énergie :**

Les sources d'énergie doivent être capables de fournir, en un temps très court, une grande quantité de chaleur en un point précis. D'importants progrès technologiques ont permis de résoudre ce problème au début du siècle, notamment grâce à l'utilisation de la flamme oxyacétylénique, suivie de l'arc électrique.

Ainsi, les procédés de soudage peuvent être classés en fonction de leur source d'énergie, selon la répartition suivante :

-Energie électrique, Energie chimique, Energie mécanique, Energie focalisée.

- **Selon l'état du métal pendant le soudage :**

- Le soudage par fusion :

Ce procédé consiste à fondre les bords des pièces à souder en utilisant une source d'énergie telle que l'arc électrique, la flamme de gaz, une réaction chimique, l'énergie des rayons laser ou

encore un jet de plasma. Sous l'effet de la chaleur, les bords du métal se liquéfient et se lient entre eux ou avec un métal d'apport, formant ainsi un bain de fusion qui, en se solidifiant, donne naissance à la soudure.

- Le Soudage par pression :

Le soudage par pression englobe l'ensemble des procédés permettant d'obtenir une soudure, généralement sans ajout de métal d'apport, en appliquant une pression suffisante pour provoquer une déformation plastique des zones à assembler. Un chauffage localisé favorise alors la liaison atomique dans la zone de soudage.

I.3.2.2 procédés de soudage :

I.3.2.2.a Soudage oxyacétylénique :

L'énergie utilisée dans ce procédé provient de la flamme oxyacétylénique. C'est le seul procédé employé pour réaliser des joints soudo-brasés ou brasés. Il offre une grande flexibilité et est particulièrement recommandé pour les travaux délicats sur des pièces de différentes nuances et de petites dimensions. [20]

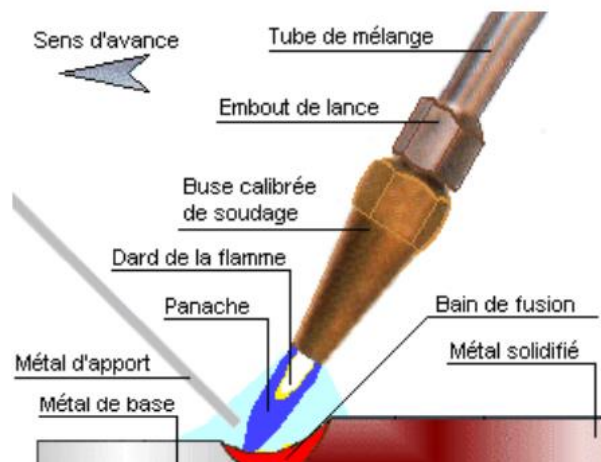


Figure I.8 : Soudage oxyacétylénique. [21]

I.3.2.2.b Soudage à l'arc électrique :

Ce procédé de soudage est le plus couramment utilisé en industrie pour le soudage autogène. Grâce à une fusion très localisée, il génère moins de déformations que le chalumeau tout en offrant une productivité accrue. La fusion du métal d'apport et des pièces à assembler est assurée par un arc électrique qui se forme entre une électrode et les pièces à souder. [19]

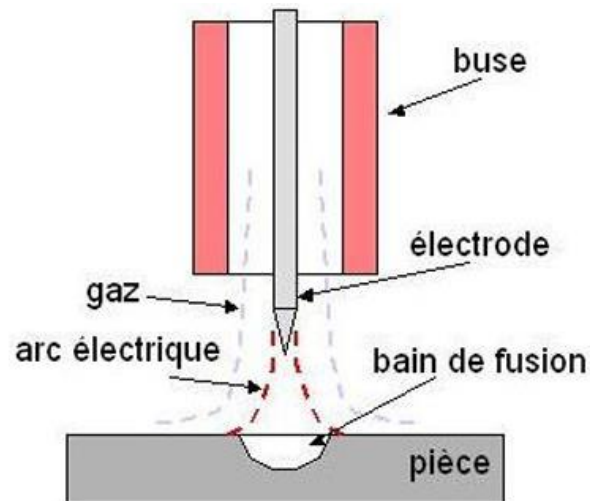


Figure I.9 : Soudage à l'arc électrique.[22]

I.3.2.2.c Soudage par résistance électrique :

Le chauffage requis au niveau du soudage est généré par l'effet de Joule, selon la relation :

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (I-1)$$

Dans ce procédé, l'intensité du courant de soudage et la durée de son passage jouent un rôle essentiel. Il est principalement utilisé pour l'assemblage de pièces par recouvrement. [20]

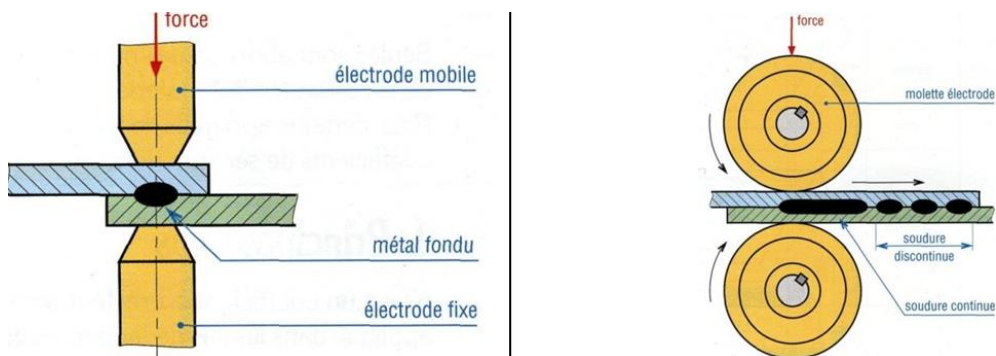


Figure I.10 : Soudage par résistance électrique. [19]

I.3.2.3 Avantages et inconvénients du soudage :

I.3.2.3.a Avantages :

- Les assemblages soudés offrent une résistance élevée par rapport à d'autres méthodes d'assemblage.
- Le soudage est fréquemment utilisé en complément du moulage, du forgeage et de l'estampage, permettant ainsi la fabrication de pièces aux formes complexes et de grandes dimensions.

- Il garantit une haute productivité et un coût de revient réduit, tout en assurant la possibilité d'assemblages étanches.
- Il contribue à la réduction des investissements initiaux pour l'équipement des ateliers de soudage.

I.3.2.3.b Inconvénients :

- La soudure génère des fumées toxiques, des rayonnements UV et des risques de brûlures ou d'explosions. Un bon équipement de protection est indispensable.
- Certains procédés nécessitent des machines coûteuses, comme le soudage laser ou à l'arc sous gaz.
- La soudure exige un savoir-faire spécifique, et une mauvaise exécution peut affaiblir les structures.
- La chaleur intense peut causer des déformations ou des tensions internes dans les pièces soudées.
- Contrairement au boulonnage, une soudure est permanente, ce qui complique les réparations ou les modifications ultérieures.
- Certains procédés nécessitent une grande quantité d'électricité, augmentant les coûts d'exploitation.

I.3.2.4 Applications du soudage :

- Mobilier métallique : Production de modèles durables et complexes de bureaux, d'armoires et d'étagères.
- Construction navale : Assemblage de plaques métalliques pour les coques, assurant l'étanchéité et la résistance structurelle.
- Construction : Construction de charpentes métalliques, de ponts et d'oléoducs pour assurer la solidité et la stabilité.
- Automobile : Assemblage de panneaux de carrosserie, de châssis et de composants de moteur dans un souci de sécurité et de performance.
- Aérospatiale : Fabrication de composants légers et très résistants pour les avions et les engins spatiaux.
- Réparation et entretien : Prolonger la durée de vie des équipements grâce à la soudure des revêtements et à l'habillage. [19]

I.3.3 Assemblage par collage :

Le collage est une technique d'assemblage qui assure une fixation solide et durable entre deux matériaux grâce à l'utilisation d'une colle. [24]

I.3.3.1 Configurations de joints collés :

Les configurations de joints collés désignent les différentes façons d'assembler deux pièces avec un adhésif. Le choix de la configuration dépend des contraintes mécaniques, thermiques et environnementales. Voici les principales configurations :

- Recouvrement simple : Couramment utilisé pour assembler des matériaux minces en raison de sa mise en œuvre facile et de sa bonne résistance.
- Section en Z : Offre une rigidité accrue aux pièces de grandes dimensions.
- Section trapézoïdale : Conçue pour rigidifier et assembler des matériaux composites.
- Joint à épissure : Employé lorsque la surface doit rester lisse, sans nécessiter de préparation spécifique.
- Section en U : Généralement utilisée pour augmenter la zone de collage et réduire les forces de pelage.
- Joint en bordure : Permet d'obtenir une surface affleurante lors de l'assemblage de matériaux différents, comme du verre et un châssis.

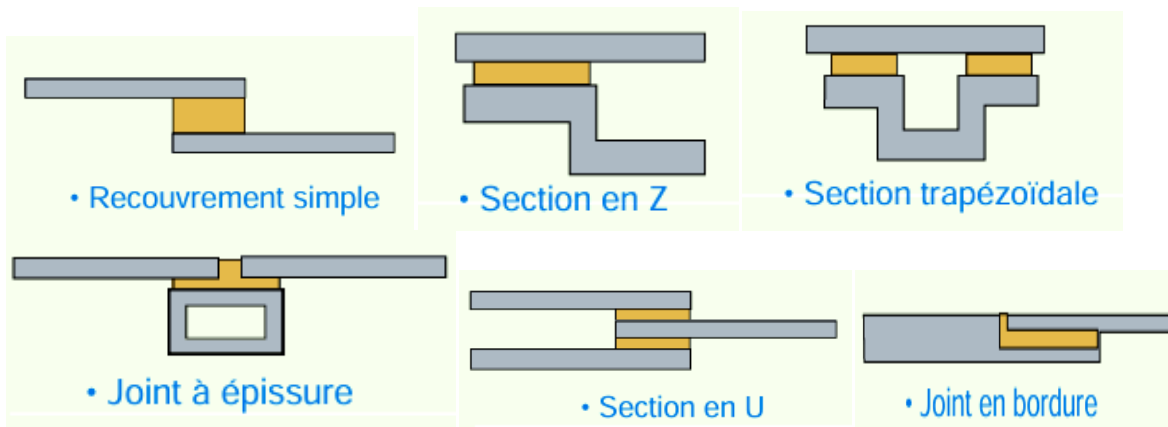


Figure I.11 : différentes configurations de joints collés. [23]

I.3.3.2 La conception de l'assemblage collé :

Pour réussir un collage efficace, il est essentiel de : [23]

- Connaître les conditions d'utilisation des assemblages, en s'appuyant sur un cahier des charges détaillé précisant notamment l'environnement d'usage.
- Intégrer le collage dès la phase de conception.

- Préparer soigneusement les surfaces à assembler.
- Sélectionner un adhésif adapté aux conditions de service.
- Réaliser des essais destructifs en amont pour valider les choix, ainsi que pendant la fabrication si les contrôles non destructifs ne sont pas envisageables pour des raisons de coût.
- Assurer une fabrication rigoureuse et, si possible, automatiser le processus.

Il existe quatre modes de sollicitation d'un joint collé : le cisaillement, la traction, le clivage, le pelage.

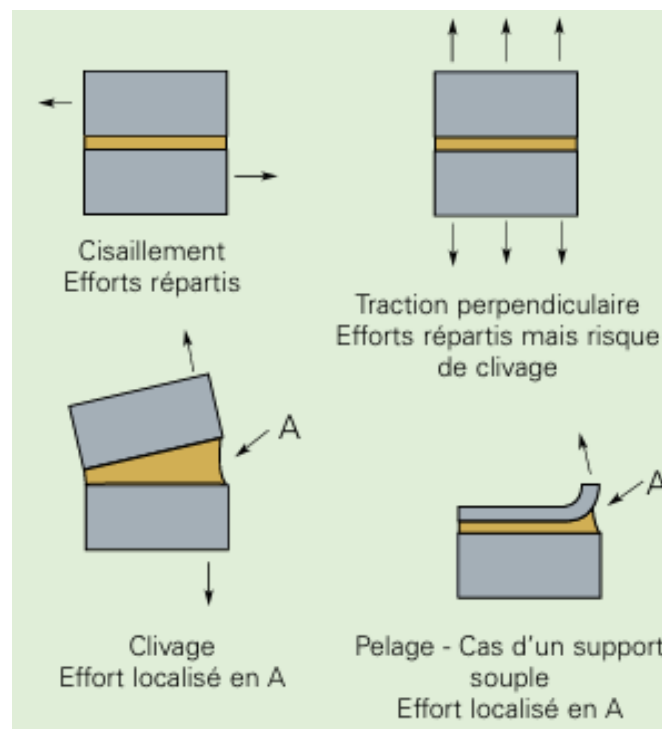


Figure I.12 : modes de sollicitation des joints collés. [23]

I.3.3.3 Avantages et inconvénients du collage :

I.3.3.3.a Avantages :

- Répartition homogène des contraintes.
- Possibilité d'assembler des matériaux de natures et d'épaisseurs différentes.
- Peu d'altération des matériaux : pas de température d'assemblage élevée, pas de percement des pièces et absence de corrosion électrochimique.
- Élasticité des joints collés permettant un amortissement des vibrations.
- Allègement des structures.
- Amélioration de l'esthétique de l'assemblage.
- Coût de revient généralement inférieur à celui d'un assemblage traditionnel.
- Opération facilement automatisable, permettant une production en grande série.

I.3.3.3.b Inconvénients :

- Les techniques de collage sont mal connues des industriels, ingénieurs, bureaux d'études
- Conception spécialement adaptée des pièces
- Bonne préparation des surfaces des métaux (des surfaces planes, propres et traitées).

I.3.3.4 Mise en œuvre :

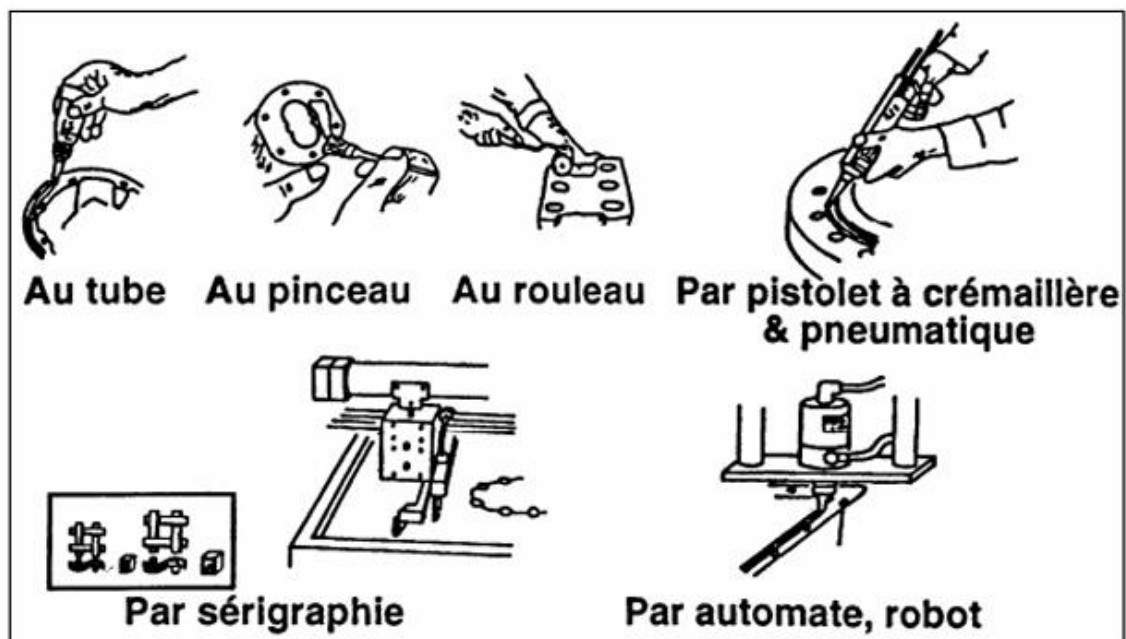


Figure I.13 : les différentes méthodes de mise en œuvre des colles. [24]

- Au tube : Application manuelle directement à partir d'un tube, adaptée aux petites surfaces et aux réparations.
- Au pinceau : Application plus précise et uniforme, souvent utilisée pour les colles liquides sur des surfaces planes.
- Au rouleau : Utilisé pour les grandes surfaces afin de répartir l'adhésif de manière homogène.
- Par pistolet à crémaillère et pneumatique : Permet un dosage précis, adapté aux adhésifs visqueux et aux applications industrielles.
- Par sérigraphie : Dépôt de colle à travers un pochoir, utilisé pour les composants électroniques ou les impressions industrielles.
- Par automate, robot : Application automatisée pour des assemblages de précision et des productions en série.

I.4 Impact environnemental des techniques d'assemblage :

L'empreinte carbone des procédés d'assemblage varie selon les techniques utilisées, qu'il s'agisse du soudage, du collage ou du boulonnage. Certaines méthodes génèrent davantage d'émissions et de déchets, tandis que d'autres offrent des alternatives plus durables. [19]

Méthode d'assemblage	Empreinte carbone	Durabilité
Soudage	Élevée (nécessite beaucoup d'énergie, émet des gaz)	Moins durable
Collage	Moyenne (dépend du type d'adhésif utilisé)	Durabilité moyenne
Techniques d'assemblage démontables	Faible (ne nécessite ni chaleur ni produits chimiques)	Plus durable

Tableau I.1 : Comparaison de l'empreinte carbone et de la durabilité des méthodes d'assemblage

I.5 Vers des solutions écoresponsables :

Les assemblages démontables favorisent le recyclage des matériaux et limitent les déchets. L'utilisation d'adhésifs écologiques constitue également une piste prometteuse pour réduire l'impact environnemental.[25]

I.6 Assemblages hybrides : allier performance et durabilité :

Associer plusieurs techniques d'assemblage permet d'optimiser la résistance mécanique et de limiter les contraintes thermiques. Par exemple, la combinaison du soudage et du collage est de plus en plus répandue dans l'aéronautique et l'automobile. [26]

I.6.1 Exemples d'assemblages hybrides :

- Joints rivetés-collés : Combinent les avantages du rivetage et du collage pour améliorer la durabilité et la résistance mécanique.
- Liaison par clinchage : Technique de sertissage combinée au collage, permettant d'assembler des matériaux minces avec une grande rigidité.

- Soudage par points et collage : Utilisé dans l'industrie automobile pour améliorer la résistance et la rigidité des assemblages.
- Soudage par friction-malaxage et collage : Favorise une meilleure résistance mécanique tout en réduisant la corrosion.

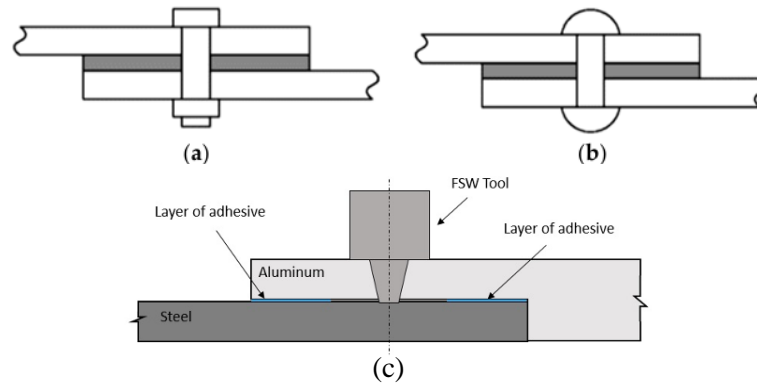


Figure I.14 : Différentes techniques d'assemblage hybride (a) un assemblage boulonné-collé, (b) un assemblage riveté-collé, (c) Soudage par points et collage .[27]

I.6.2 Avantages des assemblages hybrides :

- Optimisation des propriétés des matériaux.
- Amélioration des performances mécaniques.
- Réduction du poids.
- Les assemblages hybrides permettent de minimiser les effets de la corrosion et d'améliorer la durabilité des structures exposées à des environnements extrêmes.
- Résistants aux contraintes mécaniques et thermiques.
- Économie de coûts : permettent de réduire les coûts de maintenance et d'exploitation à long terme.

I.7 L'apport des nouvelles technologies : impression 3D et assemblage sans fixation mécanique :

Les avancées en fabrication additive ouvrent la voie à des structures imbriquées, limitant le recours aux boulons et aux soudures. Par ailleurs, les matériaux auto-assemblant trouvent des applications prometteuses, notamment en ingénierie biomédicale.[28]

I.7.1 Impression 3D :

L'impression 3D, ou fabrication additive, permet de produire des objets couche par couche à partir d'un modèle numérique.

Cela offre plusieurs avantages :

- Possibilité de créer des formes complexes et optimisées sans les contraintes des procédés traditionnels.
- Contrairement aux procédés d'usinage l'impression 3D utilise uniquement la matière nécessaire (Réduction des déchets).
- Fabrication de pièces uniques ou sur mesure sans surcoût significatif.
- Optimisation des performances : intégration de structures légères, améliorant la résistance et réduisant le poids.

I.7.2 Assemblage sans fixation mécanique :

L'assemblage sans fixation mécanique repose sur des techniques permettant d'assembler des composants sans utiliser de vis, boulons ou soudures.

Parmi ces techniques :

- Conception monobloc : des pièces qui nécessitaient plusieurs composants peuvent être fabriqués en un seul élément, réduisant ainsi les besoins en assemblage.
- Assemblage par encliquetage : systèmes de verrouillage intégrés dans la conception, facilitant l'assemblage et le démontage.
- Liaisons adhésives et soudure laser : utilisation de colles industrielles et de techniques comme la soudure par friction pour garantir une fixation sans fixation mécanique traditionnelle.

I.7.3 Applications :

- Industrie aéronautique et automobile.
- Médecine et prothèses.
- Architecture et construction.

I.8 Optimisation des assemblages par la simulation et l'intelligence artificielle :

L'utilisation de logiciels comme ANSYS ou Abaqus permet d'analyser et d'améliorer la résistance des assemblages avant leur fabrication. L'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique apportent également des solutions innovantes pour concevoir des structures plus performantes et durables. [29]

I.9 Conclusion :

L'assemblage mécanique est un domaine fondamental de l'ingénierie, évoluant sans cesse grâce aux avancées technologiques. Des méthodes traditionnelles comme le boulonnage et le rivetage aux procédés modernes comme le soudage laser et l'impression 3D, chaque technique présente des avantages et des limites, nécessitant un choix adapté aux contraintes mécaniques, économiques et environnementales. L'essor de la robotique et des matériaux intelligents redéfinit aujourd'hui les perspectives de l'assemblage, ouvrant la voie à des solutions plus légères, résistantes et adaptables. Ainsi, l'avenir de l'assemblage repose sur l'innovation et la recherche de compromis optimaux entre performance, durabilité et coût de fabrication.

Chapitre II

Les Modèles de Zone Cohésive

II.1 : Introduction :

Les modèles de zone cohésive constituent un outil efficace pour la simulation des processus de fissuration dans les matériaux. Elles sont largement utilisées pour analyser la localisation et la rupture dans les matériaux d'ingénierie [30]. Ces méthodes reposent sur l'idée des interactions cohésives qui décrivent le comportement de fracture non linéaire progressif à travers les surfaces fissurées, permettant ainsi de simuler la nucléation et la propagation des fissures à différentes échelles de temps et de longueur [30].

Cette approche se distingue de la mécanique des milieux continus traditionnelle, car les matériaux ne sont pas homogènes à l'échelle microscopique mais possèdent une microstructure complexe. Cela nécessite l'introduction du concept d'élément de volume représentatif (RVE) [31]. La séparation du matériau et sa dégradation sont décrites par des éléments d'interface qui séparent les zones intactes du matériau. Ainsi, le comportement mécanique est divisé en deux parties : l'élément de continuum classique et l'élément cohésif qui représente l'interaction entre ces éléments [31].

L'importance de ces approches réside dans leur capacité à décrire le comportement de la fracture, même en présence de fissures ou de défauts initiaux dans le matériau, qui peuvent apparaître lors du processus de fabrication ou sous charge en service. Contrairement aux modèles traditionnels qui supposent l'existence de fissures infiniment aiguës, les approches de zone cohésive prennent en compte la zone de processus où l'énergie est absorbée grâce aux interactions cohésives entre les surfaces de fracture. Ces interactions sont représentées par des courbes de traction-séparation dépendant des contraintes normales et de cisaillement, où la résistance maximale en traction (σ_{max}) est déterminée à partir de la courbe T- δ qui décrit l'évolution et la propagation de la fissure [31].

Parmi les types de modélisation, il existe des formulations non basées sur un potentiel énergétique, qui sont relativement simples à développer mais qui ne garantissent pas toujours la cohérence sous des conditions mixtes. En revanche, les formulations basées sur un potentiel énergétique reposent sur une fonction de potentiel qui assure une relation cohérente entre la force et la séparation, ce qui les rend plus précises et adaptées à l'analyse des processus de fracture [30].

Grâce à leur nature phénoménologique, les approches de zone cohésive peuvent être adaptées à la simulation de la fracture dans divers matériaux tels que les métaux, les polymères, les céramiques et les composites [25]. Ainsi, elles offrent un cadre puissant pour l'étude des

Chapitre II: Les Modèles de Zone Cohésive

mécanismes de fissuration et d'endommagement d'une manière plus réaliste et flexible par rapport aux modèles traditionnels.

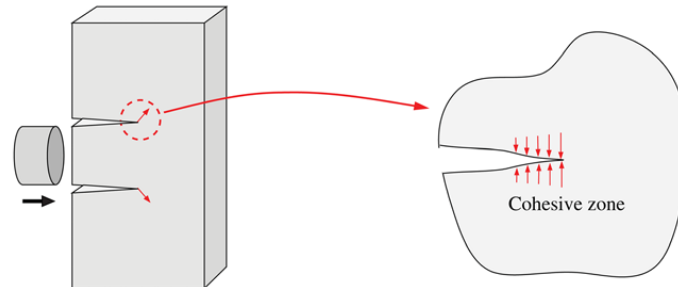


Figure II.1: Schémas du modèle de zone cohésive. [30].

II.2 : Historique et premiers modèles de zone cohésive :

Les modèles de zone cohésive (CZMs) trouvent leur origine dans les travaux pionniers de Barenblatt (1959) [32] et Dugdale (1960) [33]. Ces modèles ont été développés pour décrire le comportement des fissures en prenant en compte la cohésion des matériaux au niveau du front de fissure.

Le modèle de Barenblatt s'applique aux matériaux fragiles et introduit une contrainte cohésive agissant dans la zone de transition entre le matériau intact et la fissure réelle. La contrainte cohésive augmente avec l'ouverture de la fissure jusqu'à une valeur critique, après quoi elle diminue progressivement pour tendre vers zéro lorsque l'ouverture devient infinie. Barenblatt définit également un "module de cohésion", supposant que la taille de la zone cohésive est très petite devant la longueur de la fissure. Cette approche permet d'établir un critère de propagation de fissure en mode I basé sur l'énergie de rupture du matériau [36].

En parallèle, Dugdale (1960) [33] a développé un modèle similaire, mais appliqué aux matériaux ductiles. Contrairement à Barenblatt, il considère un comportement élasto-plastique parfait du matériau volumique. Dans ce modèle, la contrainte cohésive est constante (égale à la limite d'élasticité) tant que l'ouverture de la fissure est inférieure à une valeur critique, au-delà de laquelle elle devient nulle. Grâce à la méthode de Muskhelishvili (1953), Dugdale a établi une relation entre la taille de la zone cohésive et la longueur de la fissure [36].

Après leur introduction, ces modèles sont restés peu exploités pendant près de deux décennies en raison de la complexité des calculs. L'essor des méthodes numériques, notamment la méthode des éléments finis (FEM), a permis leur utilisation plus large pour modéliser l'évolution

des fissures dans les solides [35]. L'intégration des CZMs dans les maillages par des éléments cohésifs exige cependant une connaissance préalable du chemin de fissuration, ce qui constitue l'une de leurs limitations principales.

L'un des premiers chercheurs à appliquer ces théories fut Hillerborg (1976) [34], qui les utilisa pour modéliser la rupture du béton [35]. Depuis, les CZMs sont devenus des outils essentiels pour l'analyse des fissures et de la fracture des matériaux.

II.3 : Formulation et modélisation énergétique :

II.3.a : Décomposition dans le repère normal/tangent :

Ces deux modèles étudient uniquement la réponse dans la direction normale. Dans un cas plus général, le chargement cohésif peut être décomposé en une partie normale et une partie tangentielle :

$$\vec{R} = R_N \vec{n} + R_T \vec{t} \quad (\text{II-1})$$

\vec{U} et \vec{u} représentent respectivement la normale et la tangente à la fissure. La décomposition du saut de déplacement en une composante normale tangentielle est illustrée sur la Figure :

$$[\vec{u}] = U_N \vec{n} + U_T \vec{t} \quad (\text{II-2})$$

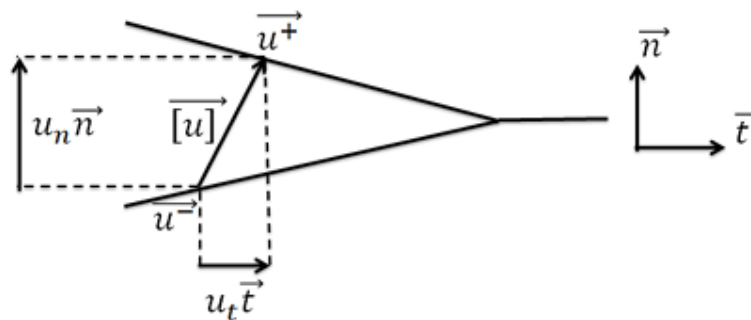


Figure II.2 : Décomposition du saut de déplacement en une composante normale et tangentielle [36].

II.3.b : Potentiel et énergie de décohesion :

Les premiers modèles de zone cohésive décrivent uniquement l'évolution des contraintes cohésives de traction en fonction du saut de déplacement normal. Les modèles sont enrichis pour rendre compte de l'évolution des contraintes cohésives tangentielles en fonction du saut de déplacement tangential .D'autres modèles tenant compte des lois de fissuration normales et

Chapitre II: Les Modèles de Zone Cohésive

tangentielles ont également été proposés Camacho et al. Mais dans ces modèles, les expressions de calculées de façon découplée. Et sont Les modèles de zone cohésive couplant le saut de déplacement normal et tangentiel. Needleman propose de faire dériver les contraintes cohésives d'un potentiel φ qui décrit les dépendances des contraintes cohésives et des sauts de déplacement, noté ici :

$$\varphi = \int_0^{[u]} (R_N dU_N + R_T dU_T) \quad (\text{II-3})$$

Les contraintes cohésives s'écrivent alors comme la dérivée partielle de ce potentiel par rapport aux sauts de déplacement normal et tangentiel :

$$R_N = \frac{\partial \varphi}{\partial U_N} \text{ et } R_T = \frac{\partial \varphi}{\partial U_T} \quad (\text{II-4})$$

S'il n'y a aucun couplage entre la réponse normale et la réponse tangentielle, on peut scinder ce potentiel φ en deux parties indépendantes :

$$\varphi = \varphi_N(U_N) + \varphi_T(U_T) \quad (\text{II-5})$$

On peut donc réécrire l'équation par :

$$R_N = \frac{\partial \varphi_N}{\partial U_N} \text{ et } R_T = \frac{\partial \varphi_T}{\partial U_T} \quad (\text{II-6})$$

Lorsque le saut de déplacement dépasse sa valeur critique $[U] \geq \delta$, le potentiel φ est constant et il est égal à l'énergie de décohésion E_{sep} qui est définie par :

$$E_{sep} = \int_0^{\delta} (R_N dU_N + R_T dU_T) \quad (\text{II-7})$$

Cette énergie de décohésion représente l'énergie consommée dans la zone cohésive pour faire avancer la fissure.

II.4 : Analyse critique des modèles de zone cohésive :

II.4.a : Avantages :

Les modèles de zone cohésive offrent plusieurs avantages dans la simulation numérique de la fissuration. Ils permettent de surmonter les défis liés à la mécanique de la rupture en représentant la fissure comme une interface entre les éléments volumiques, régie par une loi de comportement cohésive. Ainsi, l'amorçage de la fissuration est directement décrit par la réponse cohésive, éliminant le besoin de critères d'initiation ou d'introduction de pré-fissures dans les matériaux.

Chapitre II: Les Modèles de Zone Cohésive

Ces modèles facilitent également le suivi de la propagation des fissures sans nécessiter de critères de branchement. L'approche consiste à insérer des modèles de zone cohésive entre chaque maillage en éléments finis, ce qui permet au trajet de la fissuration d'être naturellement déterminé par les champs globaux et la réponse cohésive. [38].

L'évolution instable des fissures peut être capturée grâce à cette approche. L'adoucissement du comportement cohésif peut engendrer des sauts de solution, traduisant une perte d'unicité de la solution. Ce phénomène sera approfondi dans la section suivante, où une analyse détaillée des conditions d'unicité ainsi que des ajustements possibles pour assurer une propagation stable des fissures sera présentée. [41]. ces modèles permettent d'aborder la fissuration dans des contextes mécaniques complexes en intégrant différents comportements cohésifs. Nous examinerons ultérieurement certains modèles simplifiés ainsi que leurs performances.

II.4.b : Inconvénients :

Les modèles de zones cohésives, bien que puissants pour décrire les mécanismes de rupture, présentent plusieurs limitations notables. Une difficulté majeure réside dans la perte d'unicité de la solution lors de la phase d'adoucissement du comportement cohésif en régime quasi statique, entraînant des sauts brusques de déplacement ($\delta_1 \rightarrow \delta_2$) et une instabilité numérique. Pour contourner ce problème, une régularisation via des effets dynamiques ou des termes visqueux est souvent nécessaire, augmentant la complexité du modèle et son coût computationnel. De plus, les problèmes de rigidité initiale divergent selon le type de modèle : les modèles intrinsèques, avec leur souplesse initiale, sous-estiment la rigidité apparente du matériau intact, tandis que les modèles extrinsèques (ex. Dugdale), supposant une rigidité infinie, manquent parfois de réalisme. Sur le plan numérique, les non-régularités des modèles intrinsèques peuvent nuire à la convergence, et une mauvaise gestion de l'énergie élastique stockée risque de générer des solutions non physiques (déséquilibres énergétiques). Ces modèles dépendent aussi fortement de paramètres indirects, comme une longueur caractéristique difficile à interpréter expérimentalement, et nécessitent des critères supplémentaires (ex. viscosité) pour stabiliser les simulations. Leur capacité à reproduire des interactions de rupture dynamique ou des transitions fluides entre phases cohésives/non cohésives reste limitée, en partie à cause d'hypothèses simplificatrices. En synthèse, leur utilisation exige un compromis délicat entre fidélité physique et robustesse numérique, nécessitant des réglages précis et des techniques avancées pour éviter les artefacts.

II.5 : Différents modèles de zone cohésive :

Les modèles de zones cohésives offrent une solution à un éventail étendu de problématiques. Dans cette partie, nous mettons en avant quelques-uns des modèles cohésifs les plus répandus.

II.5.a : Modèle de Dugdale :

Le modèle de Dugdale (1960) est un modèle de zone cohésive utilisé pour décrire la propagation des fissures dans un matériau élastoplastique parfait. [33] Il postule que la contrainte cohésive R_N reste constante jusqu'à atteindre une ouverture critique δ_n . Une fois cette ouverture dépassée, la contrainte cohésive s'annule. [36]

$$R_N = \hat{R}_N \text{ si } 0 \leq U_N \leq \delta_N \quad (\text{II-8})$$

$$R_N = 0 \quad U_N > \delta_N \quad (\text{II-9})$$

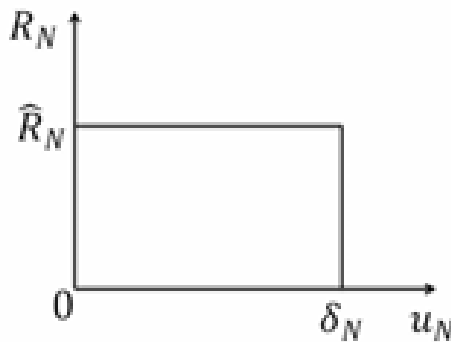


Figure II.3: Modèle de Dugdale [33].

II.5.b : Modèle de Tvergaard et Hutchinson :

Tvergaard et Hutchinson (1992) ont étudié la propagation des fissures dans les matériaux élastoplastiques. [39] Ils ont introduit une loi cohésive de type trapézoïdal. Ce modèle permet de décrire les processus de nucléation, de croissance et de coalescence des micro-vides, caractéristiques de la rupture dans les matériaux ductiles. Les paramètres du modèle sont les suivants : E_{sep} , R_N , δ_1 et δ_n , δ_2 et δ_n . [36]

L'énergie de séparation de l'interface E_{sep} est déterminée à partir de la relation suivante :

$$E_{sep} = \frac{1}{2} R_N (\delta_n + \delta_2 - \delta_1) \quad (\text{II-10})$$

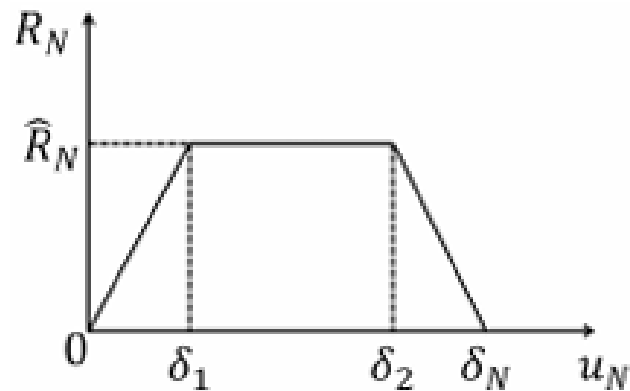


Figure II.4: Modèle de Tvergaard et Hutchinson [39].

II.5.c : Modèle de Palmer et Rice :

le modèle proposé par Palmer et Rice intègre l'effet du cisaillement. [40] Ce modèle décrit l'évolution de la contrainte cohésive tangentielle R_T en fonction du saut de déplacement tangentiel U_T . [31] L'application étudiée est liée à la géomécanique : dans des sols soumis à une compression constante, un saut de déplacement se manifeste lorsque le cisaillement atteint une valeur critique \widehat{R}_{TH} . Par la suite, le cisaillement diminue et tend vers une valeur constante \widehat{R}_{TB} .

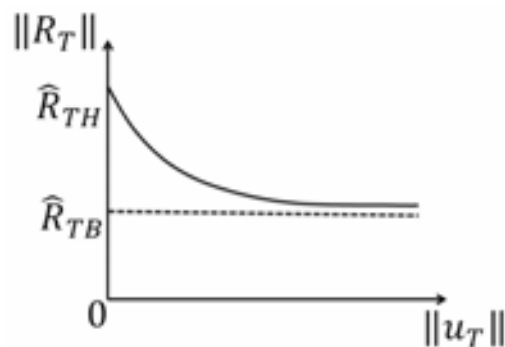


Figure II.5 : Modèle de Palmer et Rice [40].

II.5.d : Modèle de Camacho et Ortiz :

Le modèle développé par Camacho et Ortiz en 1996 intègre les lois de fissuration dans les directions normale et tangentielle. Ce modèle cohésif établit un lien entre les contraintes cohésives (normale et tangentielle) et les discontinuités de déplacement correspondantes. Il a été conçu spécifiquement pour étudier le comportement de la fissuration en conditions d'impact [36].

Chapitre II: Les Modèles de Zone Cohésive

Dans ce contexte, les expressions des composantes normales R_N et tangentielles R_T sont déterminées de manière indépendante. Les relations reliant la contrainte normale à l'ouverture normale, ainsi que la contrainte tangentielle à l'ouverture tangentielle, sont formulées séparément.

$$\begin{cases} R_N = \hat{R}_N \left(1 - \frac{U_N}{\delta_N}\right) \\ R_T = \hat{R}_T \left(1 - \frac{\|U_T\|}{\delta_T}\right) \text{sgn}(U_r) \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

Les énergies de décohesion, tant dans la direction normale que tangentielle, sont déterminées à partir des relations correspondantes.

$$E_{sep} = E_{sep}^N + E_{sep}^T = \frac{1}{2} \hat{R}_N \delta_N + \frac{1}{2} \hat{R}_T \delta_T: \quad (\text{II-12})$$

Les phases de décharge et de recharge sont également prises en compte dans le modèle ; elles sont ici supposées linéaires et identiques, autrement dit superposables.

$$\begin{cases} R_N = \hat{R}_N \left(1 - \frac{\delta_{N1}}{\delta_N}\right) \frac{U_N}{\delta_{N1}} \\ R_T = \hat{R}_T \left(1 - \frac{\|\delta_{T1}\|}{\delta_T}\right) \frac{U_T}{\|\delta_{T1}\|} \end{cases} \quad (\text{II-13})$$

Ce modèle s'applique aussi bien en traction qu'en compression. En traction, l'initiation de la fissure dépend des discontinuités de déplacement normales et tangentielles. En revanche, en compression, seul le saut de déplacement tangential intervient dans le processus d'amorçage de la fissure.

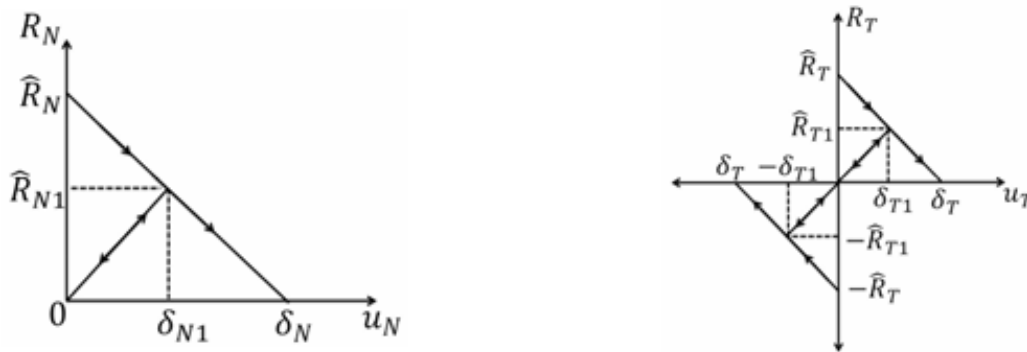


Figure II.6 : Modèle de Camacho et Ortiz [36].

II.5.e : Modèles de Needleman et Xu :

En 1994, Xu et Needleman ont introduit un modèle destiné à représenter le phénomène de fissuration sous chargement dynamique, en se focalisant sur les matériaux de type élastique [38]. Leur méthode repose sur une loi de zone cohésive, formulée à partir d'un potentiel $\varphi(U_N, U_T)$ [36], défini selon une expression particulière.

$$\varphi(U_N, U_T) = E_{sep} + E_{sep} \exp\left(-\frac{U_N}{\delta_N}\right) \left\{ \left[1 - r + \frac{U_N}{\delta_N}\right]^{\frac{1-q}{r-1}} - \left[q + \left(\frac{r-q}{r-1}\right) \frac{U_N}{\delta_N} \right] \exp\left(-\frac{U_T^2}{\delta_T^2}\right) \right\} \quad (\text{II-14})$$

Dans ce cadre, deux paramètres interviennent : l'un représente le rapport entre les énergies de décohésion tangentielle et normale, et l'autre exprime le rapport entre la valeur de U_N^* lorsque la contrainte normale est nulle et δ_N .

$$\begin{cases} E_{sep}^N = \widehat{R}_N \delta_N e \\ E_{sep}^T = \widehat{R}_T \delta_T \sqrt{e/2} \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

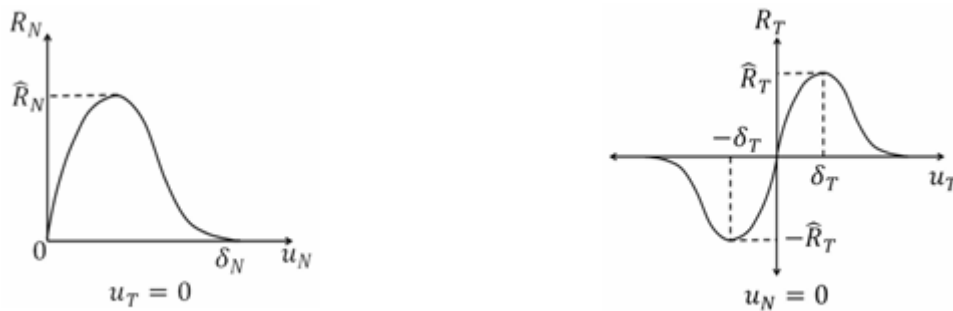


Figure II.7 : Modèles de Needleman et Xu [38].

II.6 : Conclusion :

Dans ce travail, nous avons examiné les modèles de zone cohésive (CZM) et leur rôle dans l'étude des mécanismes de fissuration dans des environnements mécaniques complexes, y compris l'amorçage, la propagation et le branchement des fissures. Bien que ces modèles constituent un outil numérique efficace pour décrire le comportement des fissures, l'identification précise de leurs paramètres matériels reste un défi, limitant ainsi leur capacité prédictive dans les simulations numériques. Par conséquent, les recherches futures devraient se concentrer sur le développement de méthodes plus précises et fiables pour identifier ces paramètres, ce qui contribuerait à améliorer l'application de ces modèles dans les domaines du génie mécanique et de la résistance des structures.

Chapitre III

Étude de l'influence de
comportement mécanique sur les
joints collé à simple
recouvrement

III.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude numérique d'un **joint collé à simple recouvrement** (JSR) réalisé sous Abaqus, un logiciel d'analyse par éléments finis. Nous présentons d'abord les grandes fonctionnalités d'Abaqus et ses atouts pour ce type de simulation, puis nous décrivons le modèle de structure collée étudié (géométrie et propriétés des matériaux). La partie principale du chapitre détaille les résultats de simulation des contraintes internes dans l'adhésif pour quatre colles différentes (Adékit A140, Hysol EA 9369, Cytec FM-73M, 3M 2216), ainsi que leur interprétation. Chaque série de résultats est suivie d'une **discussion des résultats** comparant les performances des adhésifs en termes de contrainte. Cette étude permettra de dégager des conclusions sur l'influence des propriétés mécaniques des adhésifs sur le comportement du joint. L'ensemble est présenté de manière claire et structurée, en respectant une mise en page académique (police Times New Roman 12 pt, interligne 1,5). Les références pertinentes sont citées pour appuyer les informations techniques.

III.2 Présentation du logiciel Abaqus :

Abaqus est un logiciel de simulation numérique avancé basé sur la méthode des éléments finis (FEM - Finite Element Method), utilisé pour analyser le comportement physique et mécanique des structures soumises à diverses conditions comme les charges mécaniques, les contacts, les frottements, les contraintes thermiques, et bien plus encore. Il est largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie mécanique, aéronautique, automobile, biomédicale et énergétique. Abaqus se distingue par sa capacité à modéliser une grande variété de matériaux — qu'ils soient linéaires, non linéaires, élastiques, plastiques, homogènes ou composites — tout en prenant en compte les phénomènes de grande complexité. Le logiciel est composé de plusieurs modules, notamment **Abaqus/CAE** (Complete Abaqus Environment), qui fournit une interface graphique complète pour créer les pièces (Parts), définir les matériaux (Materials), assembler les composants (Assembly), configurer les étapes d'analyse (Steps), appliquer les conditions limites et les charges, créer le maillage (Mesh), puis lancer les calculs. Abaqus comprend aussi deux solveurs puissants **Abaqus/Standard**, pour les analyses statiques et quasi-statiques, et **Abaqus/Explicit**, pour les événements dynamiques rapides comme les impacts ou les explosions. Le logiciel permet également l'écriture de fichiers d'entrée personnalisés (.inp), offrant un contrôle total pour les utilisateurs avancés, ainsi que l'utilisation de scripts en Python pour automatiser les tâches ou développer des modèles plus complexes. Grâce à sa robustesse et sa précision, Abaqus est devenu

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collé à simple recouvrement

un outil incontournable pour les ingénieurs souhaitant simuler le comportement réel des structures avec un haut niveau de réalisme et de fiabilité.[42]

- **Historique du logiciel Abaqus:**

Le logiciel Abaqus a vu le jour à la fin des années 1970. Il a été initialement développé par la société Hibbitt, Karlsson & Sorensen (HKS), fondée en 1978 aux États-Unis. Le nom ABAQUS est inspiré du mot "abacus", l'ancien outil de calcul, symbolisant la puissance de la modélisation numérique. À ses débuts, le logiciel était principalement utilisé dans les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile pour résoudre des problèmes complexes de mécanique non linéaire.[44]

Durant les années 1980 et 1990, Abaqus s'est imposé comme l'un des outils de simulation les plus fiables, notamment grâce à son moteur d'analyse robuste Abaqus/Standard pour les analyses statiques et thermiques, et Abaqus/Explicit pour les analyses dynamiques, de contact, et de chocs. En parallèle, l'interface Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment) a été introduite pour offrir une expérience plus conviviale aux utilisateurs, intégrant la modélisation, la définition des conditions de chargement, le maillage et l'interprétation des résultats.

En 2005, HKS a été rachetée par Dassault Systèmes, une entreprise française de renommée mondiale dans le domaine des logiciels de conception et de simulation. Abaqus a alors été intégré dans la plateforme SIMULIA, aux côtés d'autres outils de simulation numérique. Depuis cette intégration, le logiciel a connu une évolution rapide, avec des mises à jour annuelles enrichissant ses capacités en termes de matériaux avancés, d'interactions multiphysiques, et de couplage avec d'autres solutions (comme CATIA, SolidWorks ou MATLAB).

Aujourd'hui, Abaqus est considéré comme l'un des logiciels de référence dans le monde de la simulation numérique, utilisé dans la recherche scientifique, l'ingénierie de pointe, ainsi que dans l'enseignement universitaire. Son adoption croissante dans des domaines tels que le biomédical, les énergies renouvelables, et la fabrication additive démontre sa polyvalence et son adaptabilité aux nouveaux défis technologiques.

- **Pourquoi avons-nous choisi Abaqus ?**

Dans le cadre de ce projet, nous avons choisi le logiciel Abaqus en raison de sa capacité à modéliser avec précision des assemblages complexes comportant des matériaux composites, des colles

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collés à simple recouvrement

structurales et des comportements non linéaires. Ce choix nous permet d'obtenir des résultats fiables, reconnus dans le milieu scientifique et industriel, avec une grande souplesse dans la définition des matériaux, des chargements et des conditions limites. De plus, Abaqus offre une approche avancée de la modélisation du contact et des interactions mécaniques, ce qui est essentiel pour notre étude.

III.3 Caractéristiques principales d'Abaqus :

Abaqus présente plusieurs fonctionnalités clés qui le distinguent des autres logiciels FEA. Les principales sont :

- **Analyse non linéaire avancée** : capacité à gérer les grands déplacements, les comportements hyperélastiques des polymères, les effets thermo-mécaniques, etc.
- **Modélisation du contact et du frottement** : gestion robuste des assemblages avec contact entre pièces, pivotement, glissement, y compris frottement variable.
- **Bibliothèque de matériaux étendue** : prise en charge de matériaux hyperélastiques, viscoélastiques, composites, et possibilité de définir des lois non linéaires complexes.
- **Programmation et personnalisation** : possibilité d'implémenter des modèles de matériaux personnalisés en Fortran (UMAT, VUMAT) et de contrôler la simulation via des scripts Python.
- **Simulations multi-étapes** : capacité à enchaîner plusieurs étapes de chargement dans une même analyse, utile pour modéliser des séquences de montage ou de chargement progressif.
- **Interface graphique performante (Abaqus/CAE)** : environnement intuitif pour la modélisation géométrique, l'application des charges et l'extraction des résultats.

Ces caractéristiques font d'Abaqus un outil puissant pour la simulation structurelle approfondie et l'optimisation de la conception (appliqué notamment aux joints collés étudiés dans ce chapitre)[42].

III.4 Composants principaux d'Abaqus :

La suite Abaqus se compose de plusieurs modules complémentaires :

- **Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment)** : interface graphique pour la création de modèles géométriques, l'application des conditions aux limites et l'analyse des résultats.
- **Abaqus/Standard** : solveur implicite destiné aux analyses statiques et quasi-statiques, notamment pour les problèmes non linéaires.

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collé à simple recouvrement

- **Abaqus/Explicit** : solveur explicite pour l'étude des problèmes dynamiques rapides (impacts, crash-tests, large déformations).
- **Abaqus/CFD** : module de dynamique des fluides, pour des simulations couplées fluide-structure ou CFD indépendantes.
- **Abaqus/Multiphysics** : permet de réaliser des simulations couplées (thermo-mécanique, fluides-structure, électro-mécanique, etc.), ou d'intégrer Abaqus dans la plateforme 3DEXPERIENCE pour la simulation multiphysique.

Ces modules offrent un cadre complet pour traiter une grande variété de problèmes d'ingénierie.

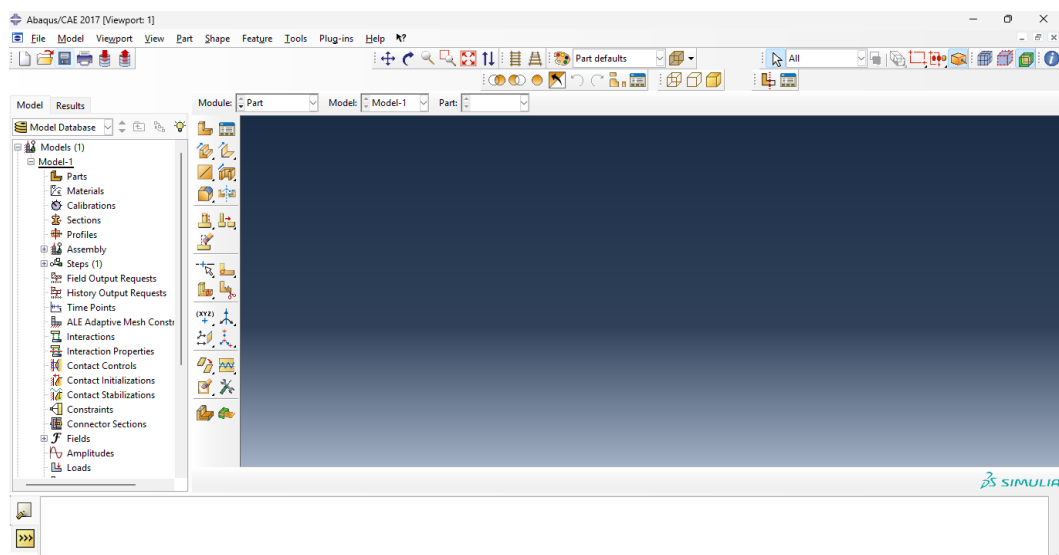


Figure III.1: L'Interface du logiciel Abaqus.

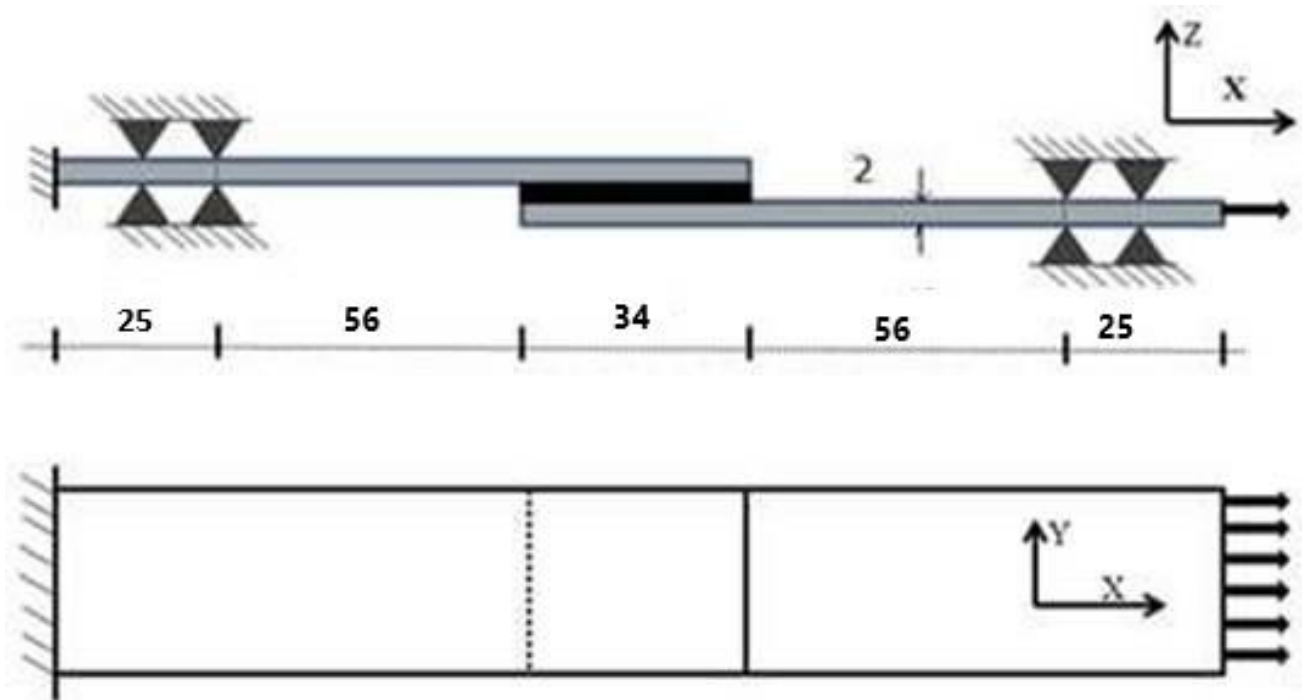
III.5 Applications du logiciel Abaqus :

Abaqus est l'un des principaux logiciels de simulation structurelle dans l'industrie et la recherche. Il est largement utilisé dans l'aérospatiale (analyse de contraintes sur les structures d'avions), l'automobile (simulation de crash-tests, d'essieux, d'assemblages), le génie civil (comportement des ponts et des bâtiments) et la biomécanique (analyse d'implants, de tissus). Son succès provient de sa précision et de son adaptabilité à des modèles complexes. Par exemple, il permet de définir des modèles de matériaux spécifiques pour simuler des composites ou des tissus biologiques et de coupler différents phénomènes physiques [44]. Dans le contexte des joints collés, Abaqus est particulièrement adapté grâce à sa capacité à modéliser les couches adhésives fines et à calculer les champs de contraintes détaillés (comme ceux présentés dans ce chapitre).

III.6 Étude du joint collé à simple recouvrement :

III.6.1 Modèle géométrique :

Le modèle étudié est un **joint adhésif collé en simple recouvrement** formé par deux plaques rectangulaires en aluminium 2024-T3. Les dimensions géométriques sont les suivantes : chaque plaque a une longueur $L_p = 115$ mm, une largeur $b = 25$ mm et une épaisseur $e_p = 2$ mm. Les plaques se recouvrent sur une longueur $L = 34$ mm. L'adhésif occupe la zone de recouvrement (longueur 34 mm, largeur 25 mm) avec une épaisseur $e_a = 0,10$ mm. L'assemblage complet est soumis à une charge de traction uniaxiale selon l'axe X, correspondant à une contrainte nominale appliquée de $\sigma = 25$ MPa.



La figure III.2 illustre le montage géométrique simulé : on distingue les deux plaques recouvrantes et la fine couche d'adhésif entre elles. Les cotes principales y sont indiquées, en particulier la longueur de recouvrement et l'épaisseur de l'adhésif. Ce modèle sert de base pour l'application des conditions aux limites et de chargement. L'ensemble est discrétisé en éléments finis (maillage adapté à la faible épaisseur de l'adhésif) pour réaliser la simulation.

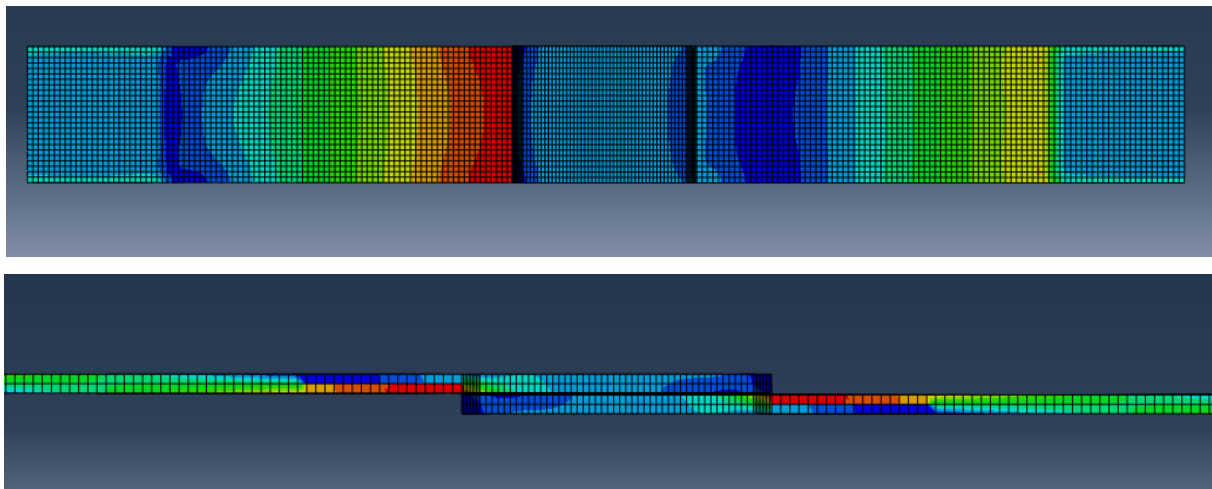


Figure III.3 : Distribution générale des contraintes dans le joint collé (mode initial).

La figure III.3 présente une vue globale de la répartition des contraintes dans le joint collé sous la charge appliquée. On observe que les contraintes (par exemple de Von Mises) se concentrent principalement dans la zone de recouvrement, surtout aux extrémités du collage où les plaques se chevauchent. Cette tendance est caractéristique d'un joint en recouvrement : le transfert de charge entre les plaques via l'adhésif induit des pointes de contrainte aux bords du recouvrement. L'analyse Abaqus permet de quantifier ces contraintes locales avec précision.

III.6.2 Propriétés des matériaux :

Tous les matériaux sont supposés linéaires, isotropes et homogènes. Les propriétés mécaniques de la plaque en aluminium 2024-T3 et des adhésifs utilisés sont présentées ci-dessous.

a. Aluminium 2024-T3 :

Matériau	E (MPa)	ν	G (MPa)	ρ (kg/m ³)	Résistance ultime (MPa)	Limite élastique 0,2% (MPa)
Aluminium 2024-T3	72 000	0.33	27 400	2780	470	324

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques de l'aluminium 2024-T3 (plaques).

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collés à simple recouvrement

La plaquette en aluminium présente un module d'Young élevé (72 GPa) et une densité de 2780 kg/m³. Sa limite d'élasticité (0,2 %) est de 324 MPa. La courbe de traction correspondante (Figure III.4) illustre le comportement élasto-plastique classique de cet alliage.

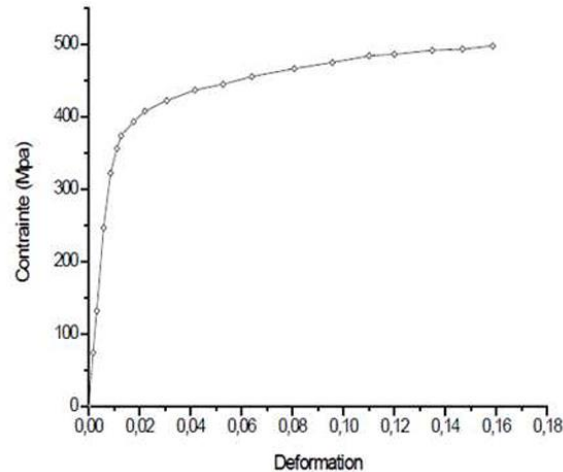


Figure III.4 : Courbe contrainte-déformation de l'aluminium 2024-T3.

La figure III.4 montre la relation contrainte/élongation pour l'aluminium 2024-T3 (0,2 % d'élasticité à 324 MPa). Ce comportement linéaire-élastique est utilisé dans la simulation pour les plaques. L'adhésif, de son côté, est modélisé avec un comportement purement élastique (vu l'étude statique).

b. Adhésif Adékit A140 :

Adhésif	E (MPa)	ν	G (MPa)
Adékit A140	2960	0.30	1000

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques de l'adhésif Adékit A140.

L'adhésif Adékit A140 est relativement rigide pour un adhésif polymère ($E \approx 2960$ MPa). Son coefficient de Poisson est de 0,30 et son module de cisaillement d'environ 1000 MPa. Ces valeurs (extraites de la littérature technique) sont utilisées pour modéliser le comportement élastique de la colle.

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collé à simple recouvrement

c. Adhésif Hysol EA 9369 :

Adhésif	E (MPa)	ν
Hysol EA 9369	660	0.43

Tableau III.3 : Propriétés mécaniques de l'adhésif Hysol EA 9369.

Cet adhésif époxy (Hysol EA 9369) est beaucoup plus souple que l'Adékit (module $E \approx 660$ MPa). Son coefficient de Poisson élevé (0,43) indique une plus grande ductilité, facilitant les déformations.

d. Adhésif Cytec FM-73M :

Adhésif	E (MPa)	ν	G (MPa)
Cytec FM-73M	2334.5	0.33	877.6

Tableau III.4 : Propriétés mécaniques de l'adhésif Cytec FM-73M.

Cytec FM-73M est un adhésif structurant de rigidité moyenne. Son module d'Young (≈ 2335 MPa) et son faible ν (0,33) le rendent plus rigide que le Hysol EA 9369, mais moins que l'Adékit. Son module de cisaillement est d'environ 877,6 MPa.

e. Adhésif 3M 2216 :

Adhésif	E (MPa)	ν
3M 2216	350	0.30

Tableau III.5 : Propriétés mécaniques de l'adhésif 3M 2216.

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collés à simple recouvrement

L'adhésif 3M 2216 est le plus souple du groupe ($E \approx 350$ MPa). Il est souvent utilisé pour ses grandes déformations admissibles (strains élevées) mais présente une résistance élastique (R_e) relativement basse (≈ 15 MPa). Ce comportement ductile se traduit par une dissipation des contraintes plus importante dans le joint.

III.7 Résultats et discussions :

Les figures suivantes montrent la distribution des contraintes dans l'adhésif pour chaque matériau étudié. Pour chaque adhésif, les contraintes affichées sont : Von Mises (contrainte équivalente) et les composantes de contraintes normales S_{11} , S_{22} , S_{33} ainsi que la contrainte de cisaillement S_{13} dans l'adhésif. (Les axes de référence sont choisis avec S_{11} suivant la direction longitudinale du joint (axe X), S_{22} dans l'épaisseur, S_{33} dans la largeur du joint, et S_{13} le cisaillement associé.)

1. Contraintes dans l'adhésif "Adékit A140":

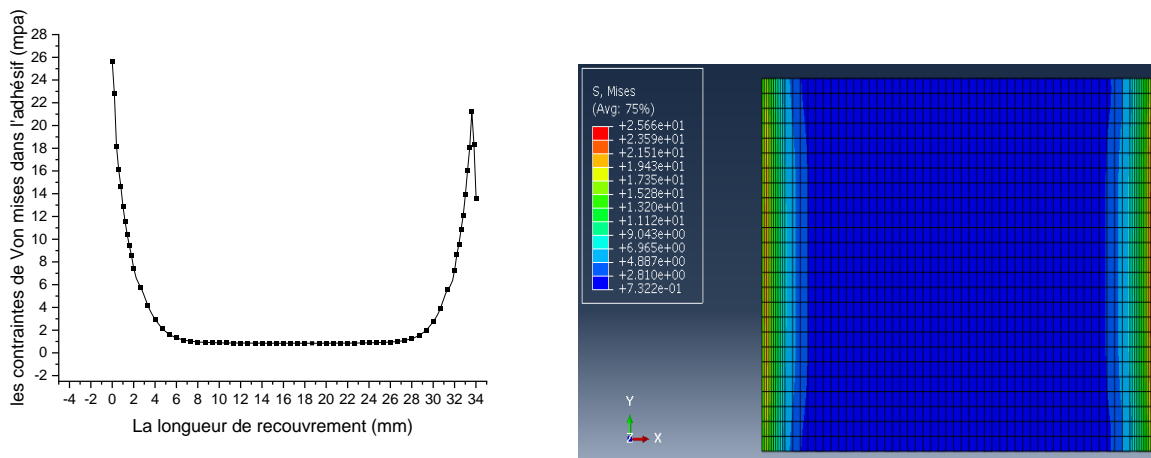


Figure III.5 : Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif Adékit A140.

- **La figure III.5** montre la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises dans l'adhésif Adékit A140 soumis à la traction. Cette carte de contraintes indique que les valeurs sont maximales aux extrémités du recouvrement (zone en rouge) et pratiquement nulles au centre de l'adhésif. La contrainte de Von Mises varie ainsi de près de 0 MPa (au milieu du joint) jusqu'à un pic d'environ 25.6 MPa aux bords du collage. Cette évolution traduit le fait que l'adhésif rigide concentre la charge aux jonctions du recouvrement : sa faible déformabilité empêche la dissipation de l'effort, d'où ces fortes contraintes localisées aux extrémités et un effort minimal dans la zone centrale.

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collé à simple recouvrement

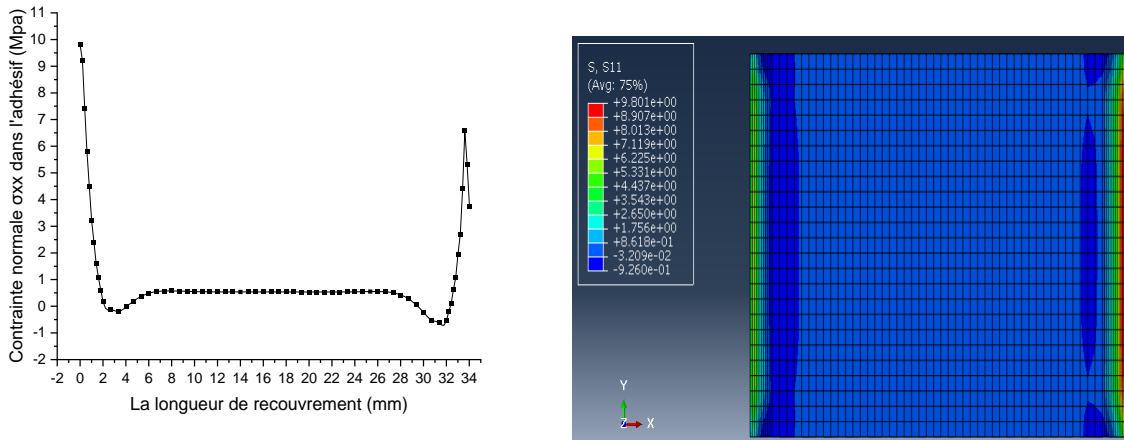


Figure III.6 : Distribution de la contrainte normale S11 dans l'adhésif Adékit A140 (direction longitudinale).

- **La figure III.6** révèle que la contrainte normale S11 suit la même tendance : on observe un pic de tension en bout de recouvrement d'environ 9.8 MPa. Cela correspond à la zone où l'adhésif travaille en traction/compression pour transmettre la charge entre les plaques. Les régions internes à l'adhésif (loin des extrémités) subissent peu de contrainte normale.

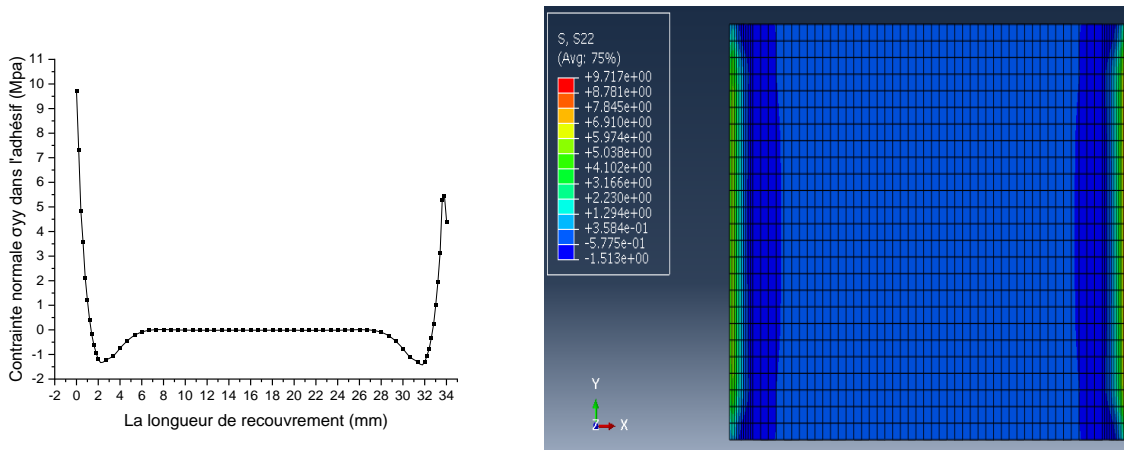


Figure III.7 : Distribution de la contrainte normale S22 dans l'adhésif Adékit A140.

- **La figure III.7** indique que la contrainte normale S22 (perpendiculaire au plan du collage) est très faible dans l'adhésif, avec une contrainte max environ 9.7 MPa. La couleur uniforme (près de zéro) montre que l'adhésif ne subit quasiment pas de contrainte perpendiculaire notable.

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collé à simple recouvrement

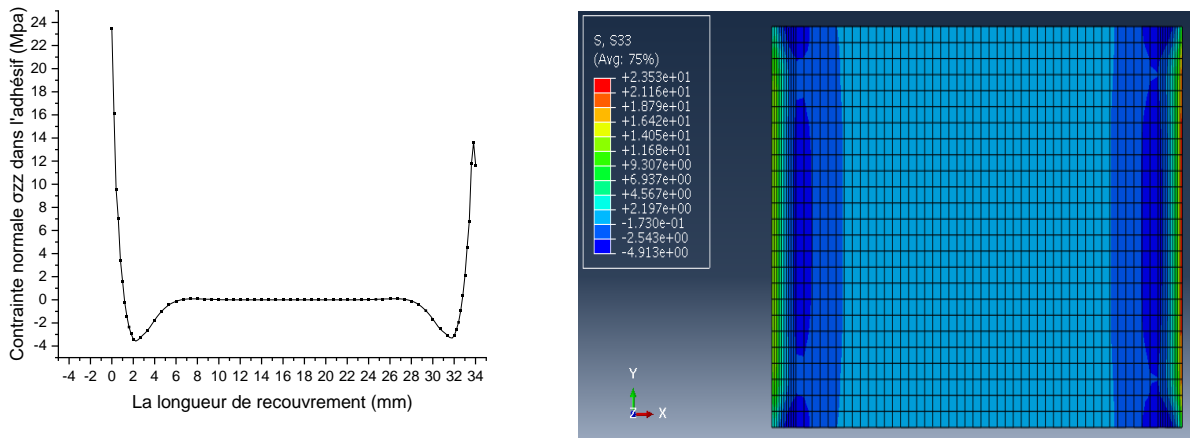


Figure III.8 : Distribution de la contrainte normale S33 dans l'adhésif Adékit A140.

- **La figure III.8** montre la distribution de la composante S33 (transversale au joint) dans l'adhésif Adékit A140. Comme pour S22, la contrainte reste très faible et uniforme (zone bleue uniforme), traduisant une sollicitation négligeable. Les valeurs de S33 sont donc proches de 0 MPa (moins d'un MPa) jusqu'à un pic d'environ 23.5 MPa aux bords du collage, indiquant que l'adhésif subit très peu de contrainte dans la direction transversale. Ce comportement est dû au fait que la charge principale est appliquée longitudinalement, de sorte que les contraintes dans la largeur du joint demeurent pratiquement nulles.

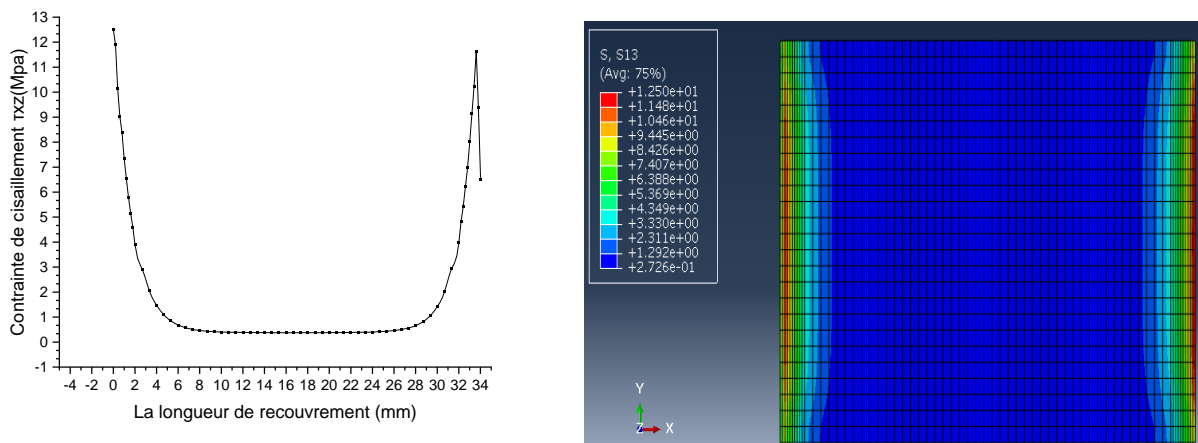


Figure III.9 : Distribution de la contrainte de cisaillement S13 dans l'adhésif Adékit A140.

- **La figure III.9** représente la répartition de la contrainte de cisaillement S13 (dans le plan du joint, suivant l'axe longitudinal) dans l'adhésif Adékit A140. On observe que le cisaillement

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collés à simple recouvrement

est également concentré aux extrémités du recouvrement (zones en rouge) et quasi nul au centre de la zone collée. La contrainte S13 varie ainsi de près de 0 MPa en zone centrale à environ 12 MPa aux extrémités du collage. Cette forte contrainte de cisaillement locale traduit l'importance du transfert de charge par cisaillement dans le joint collé en recouvrement : l'adhésif supporte la majeure partie de l'effort en cisaillement aux jonctions du collage

• Discussion des résultats – Adékit A140 :

Les résultats pour l'adhésif Adékit A140 (module élevé) montrent une forte concentration de contraintes en bout de recouvrement. Le niveau maximal de Von Mises (Figure III.5) est le plus élevé des quatre adhésifs étudiés. Les figures S11 (III.6) et S13 (III.9) confirment que l'adhésif supporte principalement la charge en traction longitudinale et cisaillement aux jonctions du recouvrement. Les composantes S22 et S33 restent faibles (III.7, III.8), comme attendu pour une colle mince. Ce comportement s'explique par la rigidité relative de l'Adékit A140 : il se déforme peu, concentrant ainsi les efforts aux limites du collage. En comparaison avec les adhésifs plus souples (voir Discussions suivantes), on s'attend à ce que l'Adékit produise les plus hauts pics de contrainte.

2. Contraintes dans l'adhésif "Hysol EA 9369":

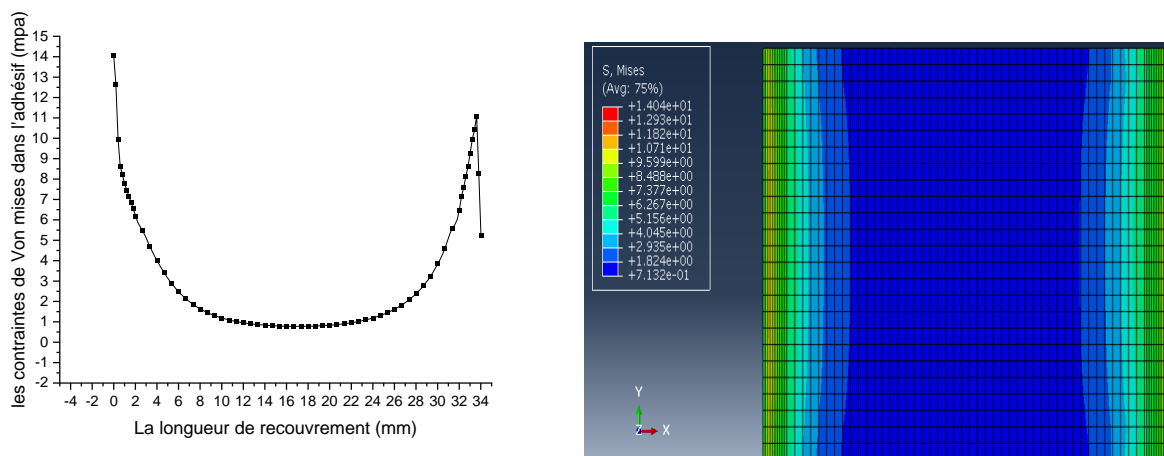


Figure III.10 : Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif Hysol EA 9369.

- **La figure III.10** illustre la distribution de la contrainte de Von Mises dans l'adhésif Hysol EA 9369 sous la même sollicitation de traction. La carte de contrainte conserve une géométrie de pointe aux extrémités du recouvrement (comme pour l'Adékit), mais avec des amplitudes plus modérées. Les valeurs minimales (environ 0 MPa) se situent au centre du joint, tandis que les maxima atteignent environ 10–14 MPa aux bords du collage, reflétant le module d'Young plus faible de l'adhésif. Cette diminution des valeurs extrêmes traduit le comportement plus ductile de Hysol : il se déforme davantage et répartit mieux l'effort, ce qui atténue les concentrations de contrainte aux extrémités par rapport à l'adhésif rigide.

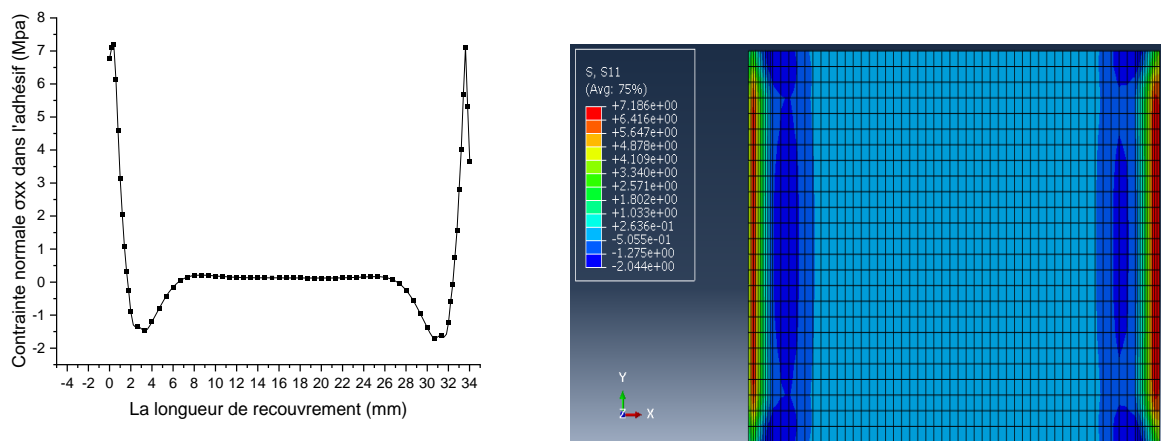


Figure III.11 : Distribution de la contrainte normale S_{11} dans l'adhésif Hysol EA 9369.

- **La figure III.11** présente la répartition de la composante normale S_{11} dans l'adhésif Hysol EA 9369. Comme pour Adékit, on retrouve des pics de traction/compression aux extrémités du recouvrement, mais leur amplitude est réduite. Les valeurs de S_{11} varient ainsi d'environ -7 MPa (compression) à $+7$ MPa (traction) aux bords du collage, soit des valeurs moindres qu'avec l'Adékit. Ce profil atténué s'explique par la plus grande déformabilité de Hysol : l'adhésif plus souple s'allonge davantage sous charge, ce qui homogénéise partiellement la répartition des contraintes longitudinales.

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collé à simple recouvrement

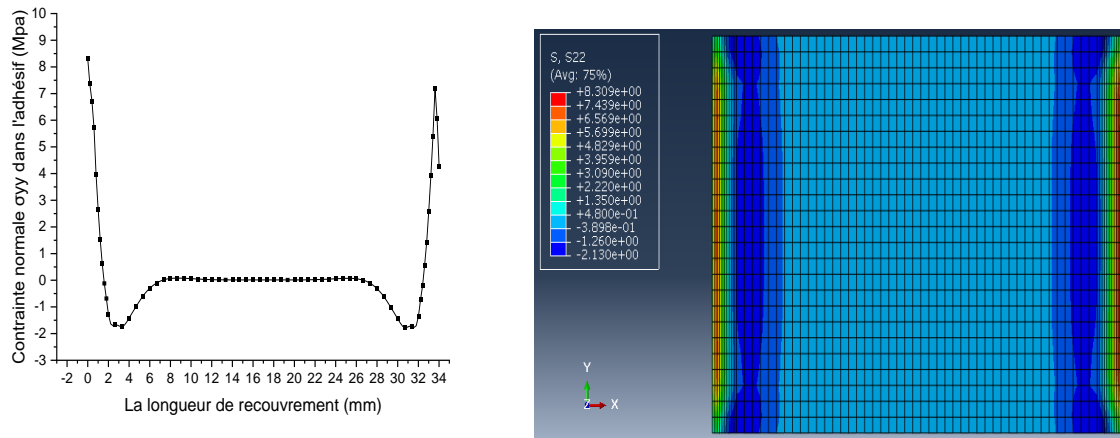


Figure III.12 : Distribution de la contrainte normale S22 dans l'adhésif Hysol EA 9369.

La figure III.12 montre la composante normale S22 dans l'adhésif Hysol EA 9369. On observe un profil quasi nul (zone bleue uniforme) identique au cas de l'Adékit, avec des contraintes S22 très proches de 0 MPa avec une contrainte max aux bords du collage environ 8.3 MPa. Cela confirme qu'aucune contrainte significative ne s'établit à travers l'épaisseur de l'adhésif, même pour ce matériau plus souple. L'épaisseur très faible de la colle explique ce comportement : quelle que soit la rigidité de l'adhésif, la composante S22 reste négligeable.

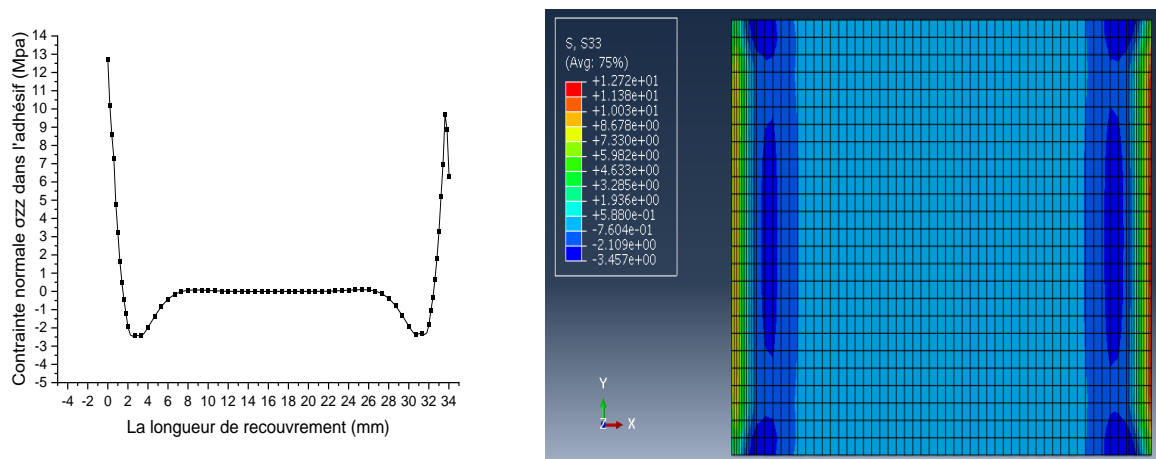


Figure III.13 : Distribution de la contrainte normale S33 dans l'adhésif Hysol EA 9369.

- La figure III.13 présente la composante normale S33 (selon la largeur) dans l'adhésif Hysol EA 9369. Là encore, la carte reste uniforme et bleue, indiquant que la contrainte S33 est très

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collés à simple recouvrement

faible avec une contrainte max aux bords du collage environ 12 MPa. On en conclut que Hysol EA 9369 ne subit pratiquement aucune contrainte dans la direction transverse du joint, comme pour les autres adhésifs. Ce résultat est cohérent avec la nature du chargement : la sollicitation principale étant longitudinale, aucune contrainte normale transversale significative n'apparaît.

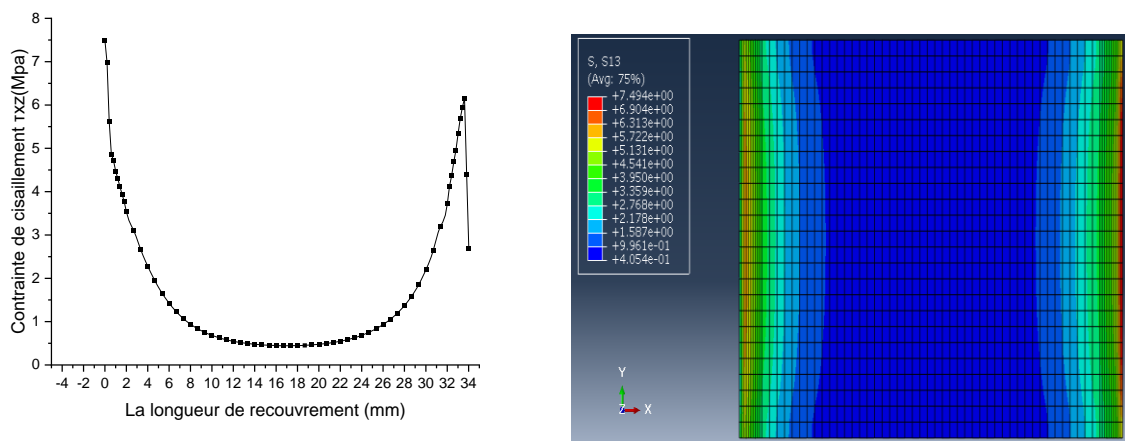


Figure III.14 : Distribution de la contrainte de cisaillement S13 dans l'adhésif Hysol EA 9369.

- **La figure III.14** montre la répartition de la contrainte de cisaillement S13 dans l'adhésif Hysol EA 9369. On constate que le cisaillement est concentré aux extrémités du recouvrement (couleurs plus intenses) mais avec des valeurs moindres que dans le cas de l'Adékit. Les valeurs de S13 varient d'environ 0 MPa au centre à environ 6–7 MPa aux bordures du collage. Cette valeur réduite s'explique par la flexibilité accrue de Hysol : l'adhésif se déforme et dissipe une partie de l'effort, limitant ainsi les pics de contrainte en cisaillement aux extrémités.

• Discussion des résultats – Hysol EA 9369 :

Pour l'adhésif Hysol EA 9369 (module E beaucoup plus faible), les figures III.10–III.14 montrent une distribution des contraintes similaire qualitativement, mais avec des amplitudes réduites. Les contraintes de Von Mises et de S11 (III.10–III.11) présentent toujours des maximaux aux extrémités du recouvrement, mais ces pics sont atténués par rapport au cas Adékit A140. L'adhésif plus ductile

se déforme davantage, ce qui uniformise partiellement la répartition des contraintes. La contrainte de cisaillement S_{13} (III.14) est toujours concentrée aux bords, mais avec des valeurs moindres. Comme précédemment, S_{22} et S_{33} (III.12–III.13) restent négligeables. En résumé, le Hysol EA 9369 montre une meilleure répartition des efforts (moins de concentration) en raison de sa plus grande souplesse, confirmant que la raideur relative de l'adhésif influence fortement la localisation des contraintes.

3. Contraintes dans l'adhésif "Cytec FM-73M" :

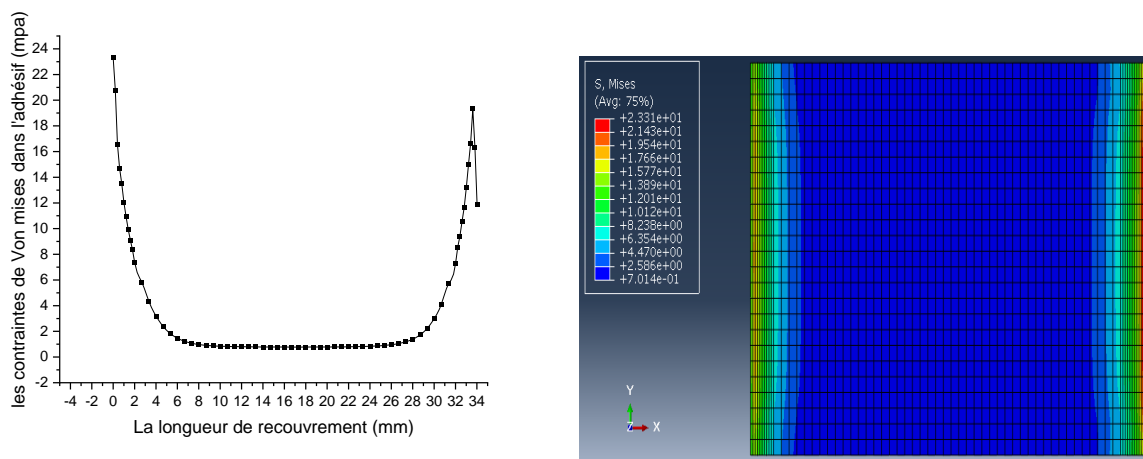


Figure III.15 : Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif Cytec FM-73M.

- **La figure III.15** représente la distribution de la contrainte de Von Mises dans l'adhésif Cytec FM-73M. On constate que cette contrainte atteint des niveaux parmi les plus élevés des quatre adhésifs étudiés, se classant en deuxième position après l'Adékit A140, avec de forts pics aux extrémités du recouvrement. Les valeurs de Von Mises sont maximales aux jonctions du collage (de l'ordre de 19–23 MPa) et diminuent à environ 0 MPa vers la zone centrale. Ce comportement s'explique par le module relativement élevé de Cytec (≈ 2335 MPa) : l'adhésif transmet la charge longitudinalement avec peu d'amortissement interne, ce qui concentre fortement les contraintes de Von Mises aux extrémités du joint.

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collé à simple recouvrement

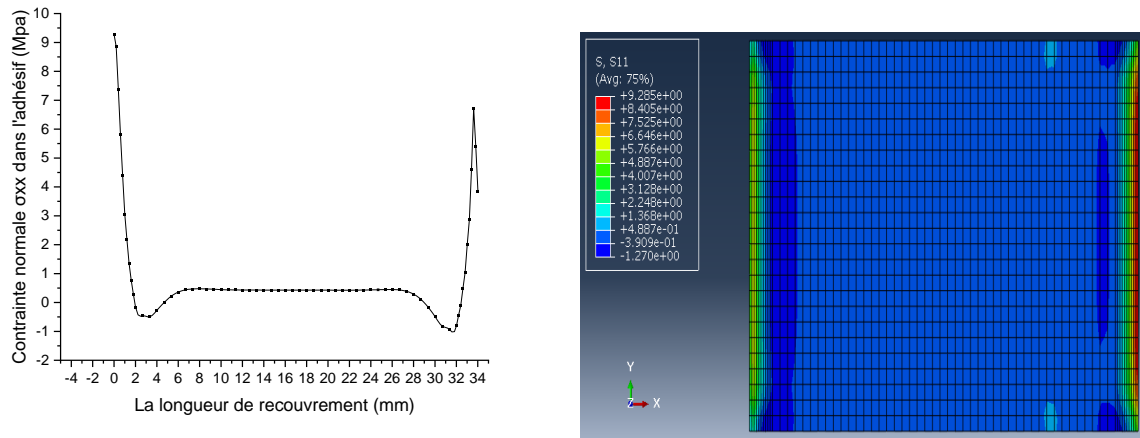


Figure III.16 : Distribution de la contrainte normale S11 dans l'adhésif Cytec FM-73M.

- **La figure III.16** donne la contrainte normale S11 dans Cytec FM-73M. On retrouve un fort pic de traction aux extrémités, indiquant une valeur élevée de S11 en bordure (de l'ordre de 9,25 MPa), tandis que l'intérieur de l'adhésif reste très peu sollicité. Cela signifie que l'adhésif Cytec subit localement une traction longitudinale marquée aux bords du recouvrement, conforme à la forte rigidité de ce matériau. Le profil de S11 est donc fortement concentré aux extrémités, comme le signalent les zones rouges sur l'image.

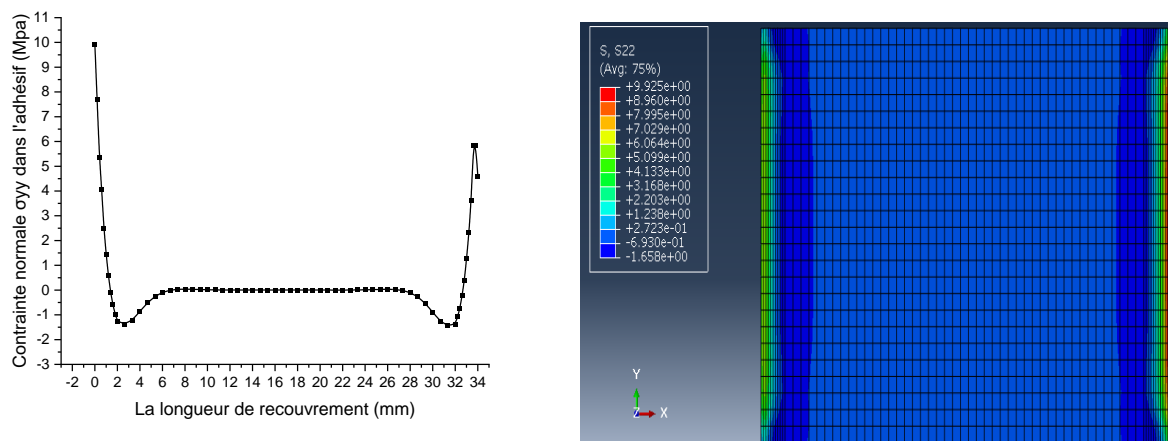


Figure III.17 : Distribution de la contrainte normale S22 dans l'adhésif Cytec FM-73M.

- **La figure III.17** montre la composante S22 pour Cytec FM-73M. L'image est presque entièrement bleue, indiquant que S22 est très faible sur tout le recouvrement. Cela confirme que, indépendamment de l'adhésif, les contraintes à travers l'épaisseur (S22) restent

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collé à simple recouvrement

négligeables dans cette géométrie de joint. En d'autres termes, même un adhésif très rigide ne génère pas de contrainte significative perpendiculairement à son plan.

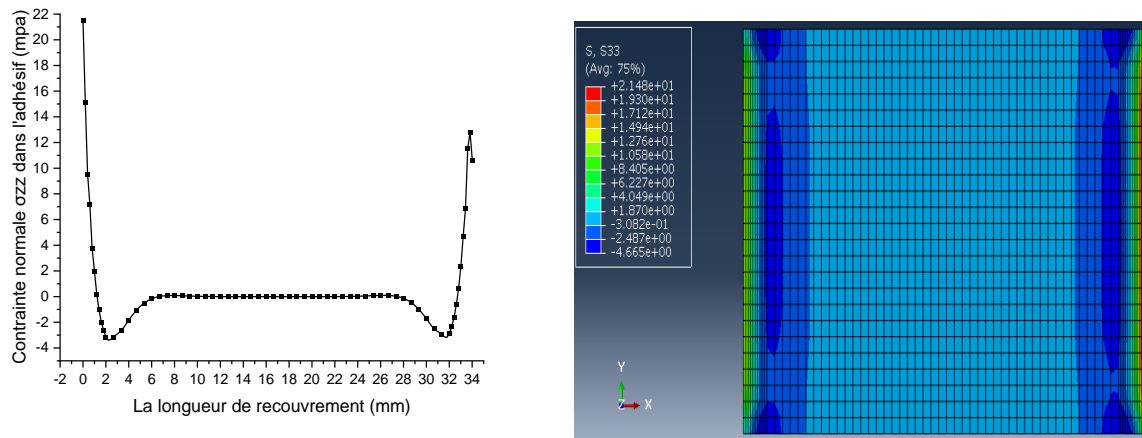


Figure III.18 : Distribution de la contrainte normale S33 dans l'adhésif Cytec FM-73M.

- **La figure III.18** affiche la composante S33 (contrainte transverse) pour Cytec FM-73M. De même, la carte de couleurs est uniforme et bleue, ce qui signifie que S33 est pratiquement nul partout. Toutefois, une exception est observée au niveau du bord soumis à la compression, où une valeur maximale de 21,8 MPa a été relevée. Cette absence de contrainte transversale pour Cytec est cohérente avec les observations précédentes : la charge est quasi exclusivement transmise en longueur ou en cisaillement, et S33 reste marginal

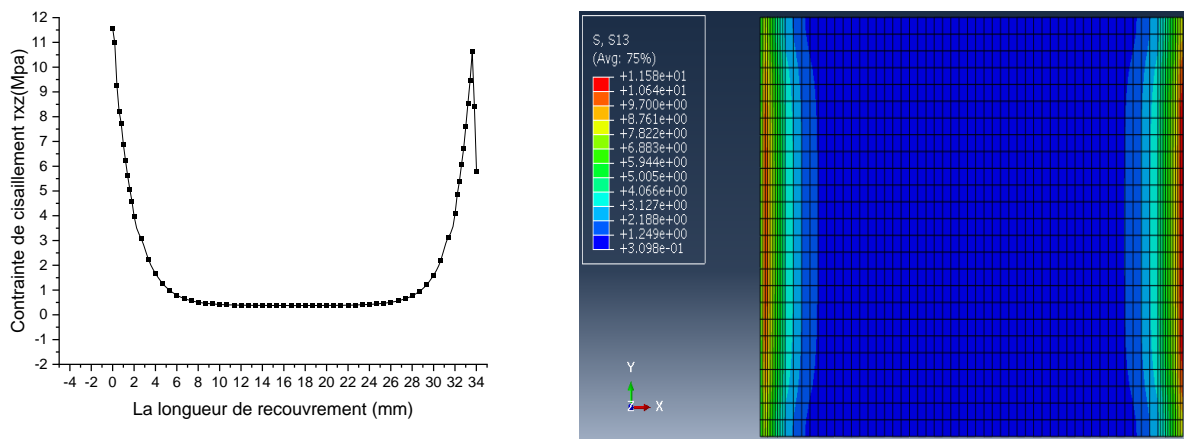


Figure III.19 : Distribution de la contrainte de cisaillement S13 dans l'adhésif Cytec FM-73M.

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collés à simple recouvrement

- **La figure III.19** présente la contrainte de cisaillement S_{13} dans Cytec FM-73M. On distingue de forts pics aux extrémités du collage, indiquant des valeurs de cisaillement très élevées (de l'ordre de 10–11,5 MPa) aux bords du recouvrement. Le reste de l'adhésif est en grande partie bleu (faible cisaillement). Ce profil met en évidence que Cytec et Adékit induisent les plus fortes contraintes de cisaillement aux jonctions, confirmant que cet adhésif rigide concentre les efforts de cisaillement aux extrémités du joint, comme mentionné dans le texte de discussion
- **Discussion des résultats – Cytec FM-73M :**
- L'adhésif Cytec FM-73M, avec un module de Young relativement élevé (environ 2335 MPa), présente les niveaux de contrainte les plus importants après Adékit A140 parmi les quatre adhésifs étudiés.
Les figures III.15 à III.19 montrent que la contrainte de Von Mises (figure III.15) atteint des valeurs élevées aux extrémités du recouvrement, bien que légèrement inférieures à celles générées par Adékit.
De même, la composante normale S_{11} (figure III.16) est fortement concentrée aux bords du joint.
La contrainte de cisaillement S_{13} (figure III.19) est également marquée en rouge au niveau des jonctions, indiquant une concentration significative des efforts.
- Ce comportement traduit le fait qu'un adhésif rigide comme le Cytec transmet la charge de manière presque directe, mais avec un amortissement interne légèrement supérieur à celui de l'Adékit.
Les contraintes S_{22} et S_{33} (figures III.17–III.18) restent faibles, ce qui est attendu pour une couche de colle mince.
- En résumé, le Cytec FM-73M montre un comportement très concentrateur de contraintes, bien que moins critique que celui de l'Adékit A140, ce qui le place au second rang en termes de pics de contraintes et de risque de dépassement de la tolérance au cisaillement.

4. Contraintes dans l'adhésif "3M 2216":

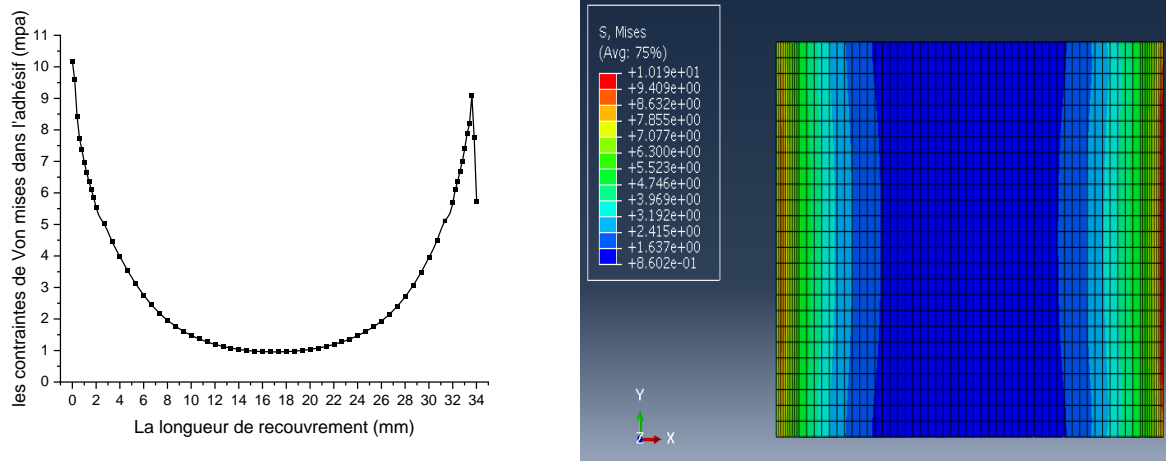


Figure III.20 : Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif 3M 2216.

- **La figure III.20** On observe sur la carte une répartition relativement homogène dans le volume de colle, avec des valeurs maximales aux extrémités du recouvrement (jonctions bord-à-bord) beaucoup plus faibles que pour les adhésifs rigides. Cet adhésif 3M 2216 est très déformable ($E \approx 350$ MPa, $R_e \approx 15$ MPa); sa faible raideur permet de « dissiper » la contrainte sur une plus grande zone, d'où des pics de Von Mises atténués. Ce comportement confirme qu'un adhésif souple tend à répartir plus uniformément la charge, réduisant ainsi les concentrations locales (bords à risque)

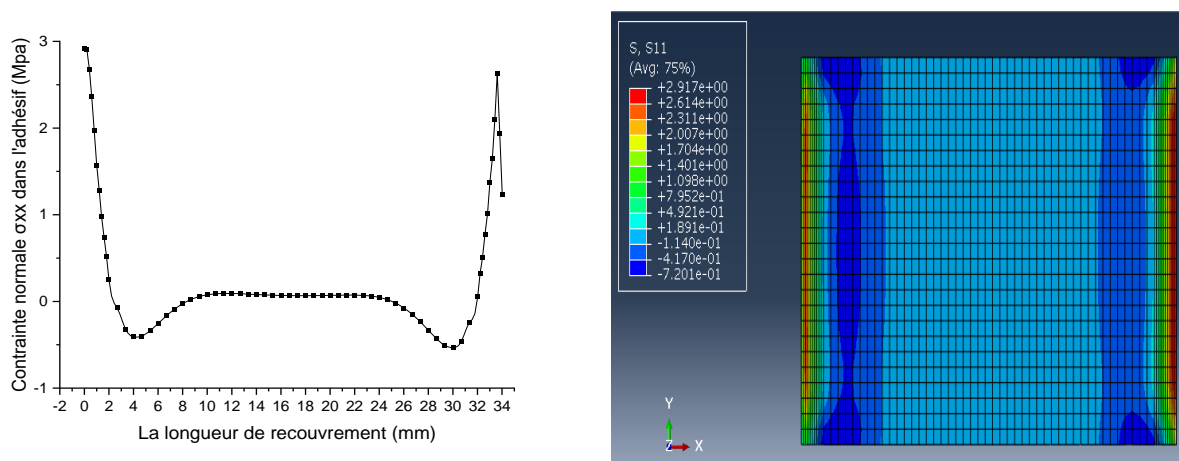


Figure III.21 : Distribution de la contrainte normale S11 dans l'adhésif 3M 2216.

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collés à simple recouvrement

La Figure III.21 montre des pics de traction/compression aux extrémités du joint (effet de levier typique), mais de faible amplitude chez 3M 2216. Ces pics découlent du transfert de charge entre les plaques (effet de pelage), amplifiés par la raideur de la colle. Ici, grâce à l'élasticité élevée de 3M 2216, S11 reste relativement faible partout, indiquant que l'adhésif se déforme plutôt que de développer de fortes tensions longitudinales. En pratique, une contrainte S11 modérée est moins critique pour la rupture de l'adhésif. La tendance de faible pic S11 corrobore le fait qu'un adhésif ductile absorbe une partie de l'énergie, limitant les surcontraintes aux coins

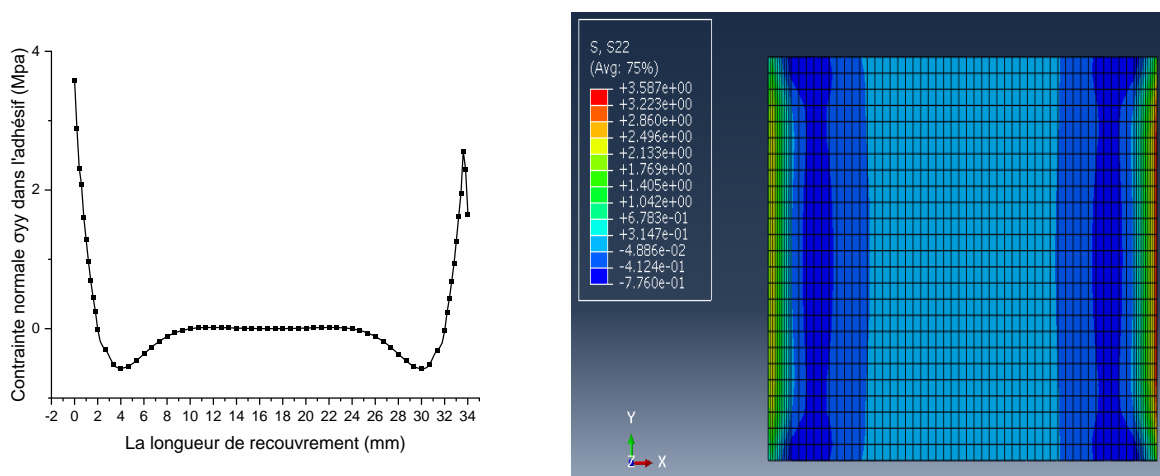


Figure III.22 : Distribution de la contrainte normale S22 dans l'adhésif 3M 2216.

- La figure III.22 montre la composante normale S22 dans l'adhésif 3M 2216. On observe un profil quasi nul (zone bleue uniforme), avec des contraintes S22 très proches de 0 MPa avec une contrainte max aux bords du collage environ 3,5 MPa. Cela confirme qu'aucune contrainte significative ne s'établit à travers l'épaisseur de l'adhésif, même pour ce matériau plus souple. L'épaisseur très faible de la colle explique ce comportement : quelle que soit la rigidité de l'adhésif, la composante S22 reste négligeable.

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collé à simple recouvrement

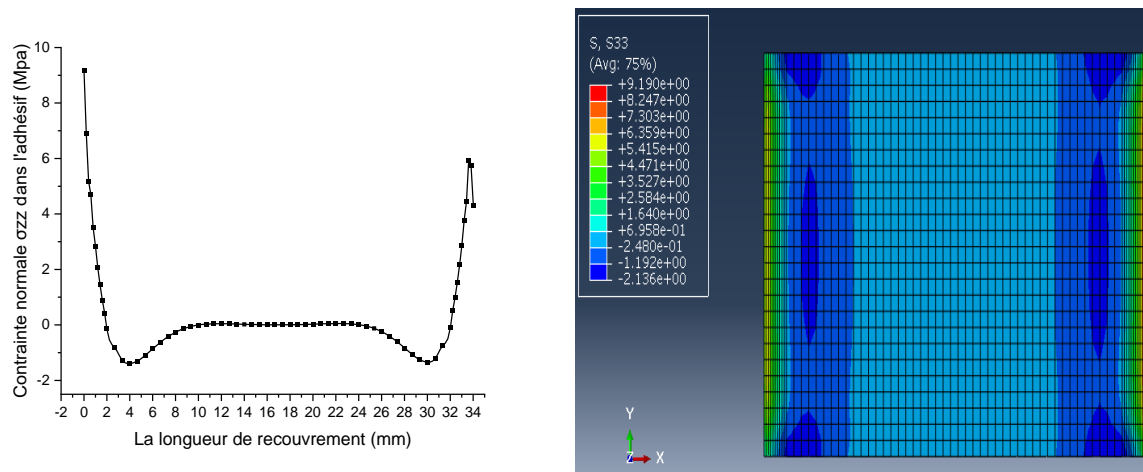


Figure III.23 : Distribution de la contrainte normale S33 dans l'adhésif 3M 2216.

- **La figure III.23** présente la composante normale S33 (selon la largeur) dans l'adhésif 3M 2216. Là encore, la carte reste uniforme et bleue, indiquant que la contrainte S33 est très faible avec une contrainte max aux bords du collage environ 9 MPa. On en conclut que 3M 2216 ne subit pratiquement aucune contrainte dans la direction transverse du joint, comme pour les autres adhésifs. Ce résultat est cohérent avec la nature du chargement : la sollicitation principale étant longitudinale, aucune contrainte normale transversale significative n'apparaît.

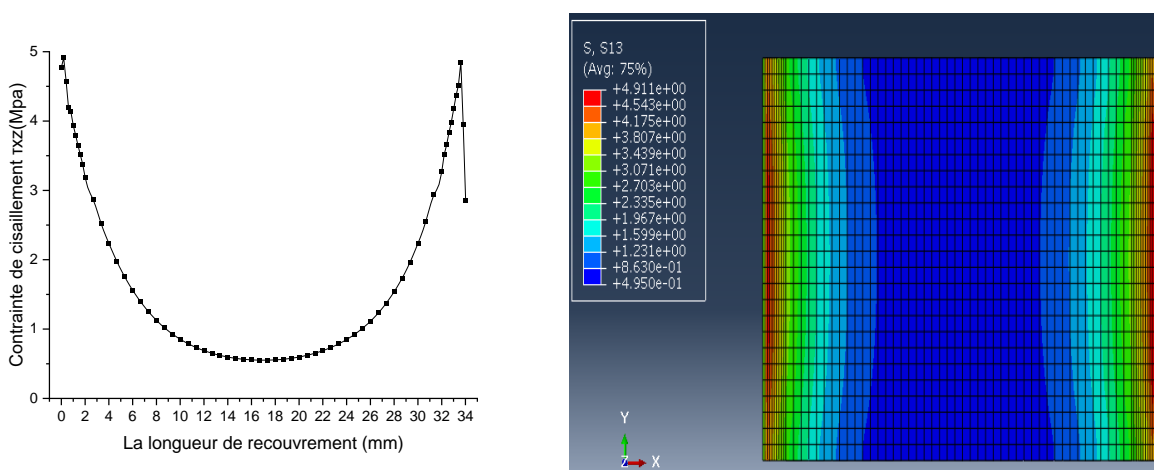


Figure III.24 : Distribution de la contrainte de cisaillement S13 dans l'adhésif 3M 2216.

- **La figure III.24** montre la répartition de la contrainte de cisaillement S13 dans l'adhésif 3M 2216. On constate que le cisaillement est concentré aux extrémités du recouvrement (couleurs plus intenses) mais avec des valeurs moindres que dans les autres cas. Les valeurs de S13 varient d'environ 0 MPa au centre à environ 4–5 MPa aux bordures du collage. Cette valeur réduite s'explique par la flexibilité accrue de 3M 2216 : l'adhésif se déforme et dissipe une partie de l'effort, limitant ainsi les pics de contrainte en cisaillement aux extrémités.
- **Discussion des résultats – 3M 2216 :**

L'adhésif 3M 2216, avec le module le plus faible (350 MPa), présente la répartition des contraintes la plus homogène et les valeurs maximales les plus basses. Les figures III.20–III.24 montrent que les pics de Von Mises (III.20) et de S11 (III.21) aux extrémités du joint existent toujours, mais en moindre intensité. L'adhésif très déformable dissipe une partie de l'effort, limitant les concentrations. Le cisaillement S13 (III.24) reste notable aux jonctions, mais avec une amplitude inférieure à celle des adhésifs rigides. Comme pour les autres cas, S22 et S33 (III.22–III.23) sont pratiquement nulles. Ce comportement illustre que l'adhésif souple (3M 2216) répartit mieux la charge sur l'interface, réduisant les risques de rupture locale.

5. Comparaison des adhésifs :

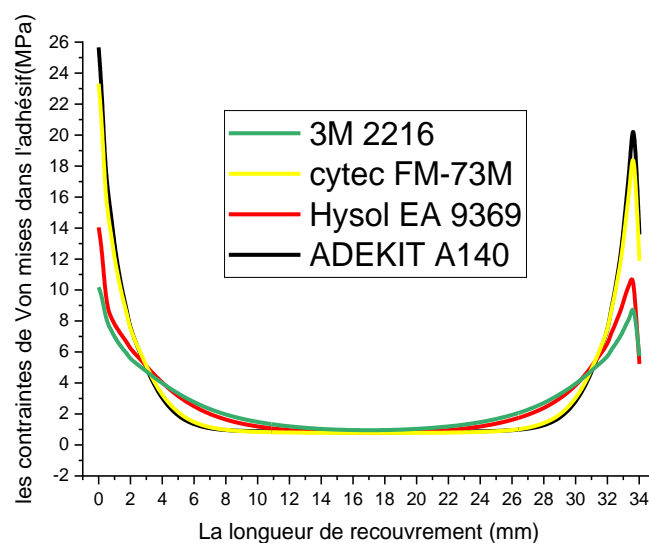


Figure III.25 : Contraintes de Von Mises le long du recouvrement pour chaque adhésif.

Chapitre III : Étude de l'influence de comportement mécanique sur les joints collés à simple recouvrement

La Figure III.25 superpose les profils des contraintes de Von Mises calculés le long de la ligne médiane du recouvrement pour les quatre adhésifs. Le tracé montre clairement qu'Adékit A140 génère les valeurs maximales de Von Mises, suivi par Cytec FM - 73 M, puis Hysol EA 9369 et 3M 2216 avec les plus faibles. Cette hiérarchie reflète l'ordre des rigidités des colles : les adhésifs les plus rigides produisent les pointes de contrainte les plus élevées, comme le texte l'indique clairement.

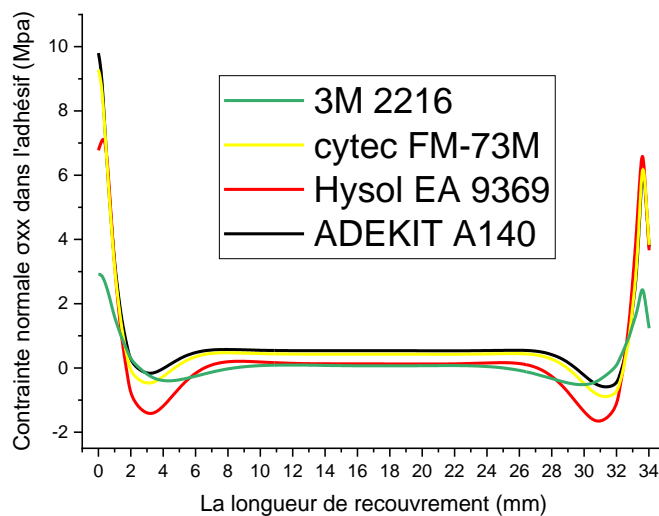


Figure III.26 : Contraintes normales S_{11} le long du recouvrement pour chaque adhésif.

La Figure III.26 présente les contraintes normales S_{11} en fonction de la position le long du recouvrement pour chaque adhésif. On y voit une tendance analogue : Cytec et Adékit affichent de forts pics de S_{11} aux extrémités, tandis que Hysol et 3M atteignent des niveaux bien plus faibles. La courbe conforte donc le lien entre rigidité et contrainte transmise : les adhésifs ductiles atténuent la traction longitudinale comparativement aux adhésifs rigides.

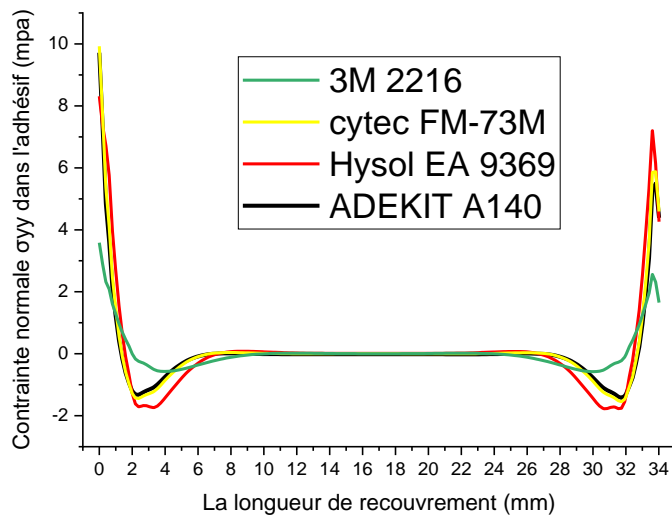


Figure III.27 : Contraintes normales S22 le long du recouvrement pour chaque adhésif.

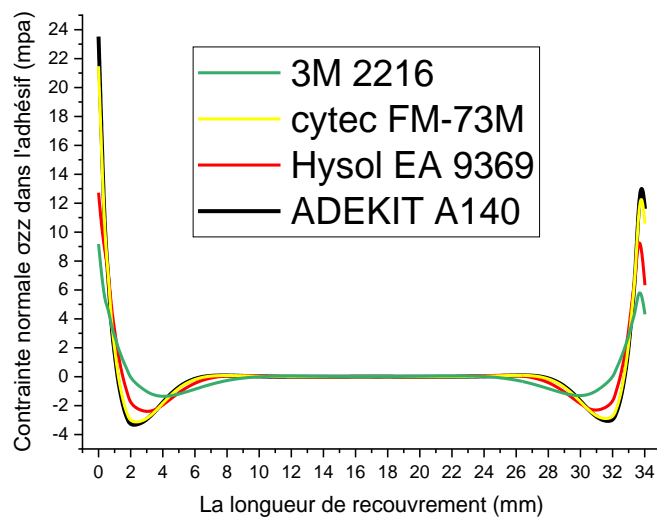


Figure III.28 : Contraintes normales S33 le long du recouvrement pour chaque adhésif.

Figures III.27–III.28 : Dans toutes les configurations, S22 et S33 restent très proches de zéro tout au long du recouvrement. Ce résultat n'est pas surprenant : les contraintes normales perpendiculaires au plan (épaisseur et largeur) sont négligeables dans une liaison mince dominée par le cisaillement. L'essentiel de la charge est transféré en S11 et S13, sans effort notable en S22/S33. Pour la conception, cela signifie que l'adhésif ne subit pratiquement pas de charge en compression ou tension hors-plan dans ce test, et on peut se focaliser sur les contraintes de cisaillement/traction dans l'épaisseur du joint.

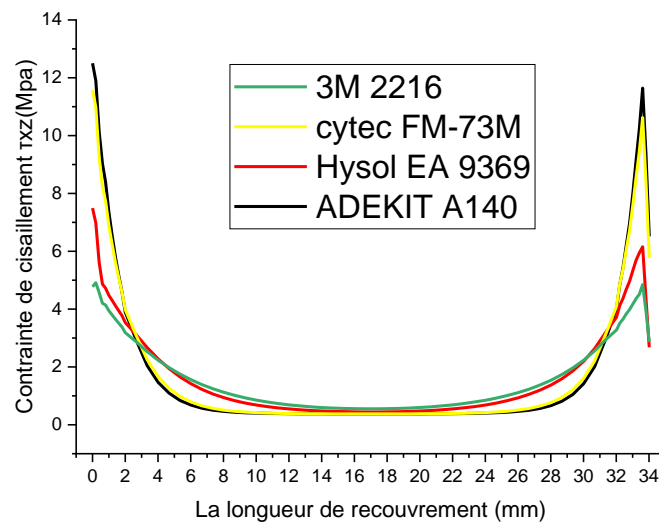


Figure III.29 : Contraintes de cisaillement S13 le long du recouvrement pour chaque adhésif.

La figure III.29 présente S13 en fonction de la position le long du recouvrement pour chaque adhésif. On constate que Cytec et Adékit donnent les niveaux de cisaillement les plus élevés aux extrémités (leurs courbes sont les plus hautes aux bords), alors que Hysol et surtout 3M ont des profils beaucoup plus bas et atténués. Ce résultat montre que les adhésifs souples réduisent considérablement l'intensité des contraintes de cisaillement par rapport aux adhésifs rigides, et correspond à la discussion indiquant que Hysol et 3M présentent des niveaux de cisaillement plus faibles.

- **Discussion des résultats – Comparaison générale :**

La comparaison croisée (figures III.25–III.29) met en évidence l'influence décisive du module d'Young des adhésifs sur les contraintes internes du joint. Les adhésifs les plus rigides (Adékit A140 puis Cytec FM-73M) conduisent à des pics de contraintes de Von Mises et de S11 très prononcés, tandis que les adhésifs souples (Hysol EA 9369 et surtout 3M 2216) modèrent ces concentrations. En particulier, l'adhésif 3M (module ≈ 350 MPa) affiche une distribution de contrainte beaucoup plus uniforme, réduisant de manière significative les maxima (ce qui peut diminuer le risque de rupture adhésive). Pour toutes les configurations, S22 et S33 sont négligeables, indiquant que l'essentiel de la charge est transféré en direction longitudinale (S11) et en cisaillement (S13). Ces résultats soulignent que choisir un adhésif plus ductile permet de mieux répartir les contraintes dans la zone de collage, alors qu'un adhésif rigide concentre les efforts aux extrémités du recouvrement.

III.8 Conclusion :

Ce chapitre a montré comment le logiciel Abaqus peut être utilisé pour analyser en détail le comportement mécanique d'un joint collé à simple recouvrement. La simulation numérique a permis de quantifier la répartition des contraintes internes dans l'adhésif sous charge de traction. Les principaux enseignements sont les suivants : d'une part, les contraintes de Von Mises et les composantes normales se concentrent systématiquement aux extrémités du recouvrement, où l'adhésif transfère la charge entre les plaques ; d'autre part, le choix de l'adhésif a un impact majeur sur l'amplitude de ces contraintes. Les adhésifs rigides (Cytec FM-73M, Adékit A140) induisent des pics de contrainte très élevés, tandis que les adhésifs souples (3M 2216, Hysol EA 9369) dissipent mieux les efforts, aboutissant à des contraintes maximales plus faibles. Parmi les quatre colles étudiées, "Adékit A140" présente le niveau de contrainte de Von Mises le plus élevé, et 3M 2216 le plus faible.

Ces résultats fournissent des indications importantes pour la conception des assemblages collés : un adhésif plus ductile peut améliorer la répartition des contraintes et réduire la probabilité de défaillance adhésive. Enfin, le chapitre a illustré les capacités d'Abaqus à traiter des problèmes structuraux complexes et multiphysiques, confirmant son utilité dans le développement de joints collés performants.

Conclusion Générale

En conclusion, les assemblages collés se révèlent être une option de plus en plus pertinente pour la conception structurelle moderne. En répartissant les charges sur toute la surface collée et en éliminant la nécessité de perçage, le collage maximise l'intégrité des matériaux et diminue les concentrations locales de contraintes [1][2]. Les avantages associés (réduction de poids, capacité à assembler des matériaux dissemblables, meilleure endurance en fatigue, etc.) confirment la diffusion rapide de cette technique dans l'automobile, l'aéronautique et d'autres domaines exigeants [4].

Les travaux menés dans ce mémoire soulignent également l'influence cruciale des propriétés de l'adhésif sur la performance mécanique du joint. L'étude numérique menée au chapitre 3 a démontré que la rigidité relative de l'adhésif conditionne fortement la répartition des contraintes internes [5]. Les adhésifs rigides (Cytec FM-73M, Adékit A140) induisent des pics de contrainte très élevés aux extrémités du recouvrement, tandis que les adhésifs souples (3M 2216, Hysol EA 9369) dissipent mieux les efforts mécaniques. En particulier, l'adhésif 3M 2216 a affiché le niveau de contrainte de Von Mises le plus bas [5].

Enfin, l'usage de la simulation numérique (Abaqus couplé à des modèles de zone cohésive) s'est avéré un outil puissant pour prédire le comportement des joints collés sans recourir exclusivement à des essais coûteux. La modélisation cohésive a permis de quantifier finement l'amorçage et la propagation des fissures dans l'adhésif [6]. En somme, ce mémoire met en évidence que les assemblages collés, couplés à des simulations avancées, offrent une stratégie de conception efficace pour des structures légères et performantes.

Références:

1. Basalla, G. (1988). *The Evolution of Technology*. Cambridge University Press.
2. Whitney, D. E. (2004). *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. Oxford University Press.
3. Mendes France, L. P. (2017). *Modes d'assemblage des pièces mécaniques*.
4. Hamza-Cherif, S. M. (2016–2017). *Assemblages par éléments filetés : Éléments de technologie et dimensionnement*. Université Aboubekr Belkaid - Tlemcen.
5. Résultats de simulation, Chapitre 3 : Étude du joint collé à simple recouvrement.
6. Park, K., & Paulino, G. H. (2011). *Cohesive zone models: A critical review of traction-separation relationships across fracture surfaces*.
7. "The Evolution of Technology" (George Basalla, 1988)
8. Industrial Revolution - Technology, Factories, Change | Britannica
9. Mechanical assemblies: their design, manufacture, and role in product development
Responsibility by Daniel E. Whitney
10. Mansouri, K. (2023). Cours Assemblage Des Matériaux.
11. Hamza-Cherif, S. M. (2016–2017). Assemblages par éléments filetés : Éléments de technologie et dimensionnement [Polycopié]. Université Aboubekr Belkaid - Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Génie-Mécanique.
12. Stratégies pour les assemblages démontables : guide pour professionnels
13. BOLTS AND NUTS: www.boltscience.com
14. "Modes d'assemblage des pièces mécaniques : complet et partiel" from L.P. P. Mendes France.
15. SCHILTZ Composants industriels et pièces normalisées
16. Roux, É. (2011). Assemblage mécanique : stratégies d'optimisation des procédés et d'identification des comportements mécaniques des matériaux (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris). HAL Open Science.
17. Achour, A. (2024). Support de cours: Structures métalliques (3ème année Licence Travaux Publics). Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem.
18. Darfa, A. (2020). Analyse numérique du comportement en rupture des assemblages collés [Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret].
19. Cour Assemblages thermiques Chapitre 4 UFM1/ISTA GPL (2°L) S4 2021/2022
20. Bensaada, S. (2019). LE SOUDAGE 4.1. Généralités. Université de Biskra. Consulté sur ResearchGate
21. STA - Soudage Technique d'Auvergne. (n.d.). Soudage Oxyacétylénique (SOA). Retrieved

from <https://sta-form.com/soudage-oxyacetylene-soa/>

22. Chapuis, J. (2011). Une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc (Doctoral dissertation, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc). HAL. <https://theses.hal.science/tel-00600292v1>
23. Auteur inconnu. (s.d.). Les assemblages spéciaux et le collage (Chapitre 7). Alcan Marine.
24. Cour Assemblages par collage Chapitre 3 UFM1/ISTA GPL (2°L) S4 2021/2022
25. "Sustainable Manufacturing and Design" - J. Hesselbach et al.
26. Recherche Google Scholar - Hybrid Joining in Automotive Engineering.
27. Maggiore, S., Banea, M. D., Stagnaro, P., & Luciano, G. (2021). A review of structural adhesive joints in hybrid joining processes.
28. "Additive Manufacturing Technologies" - Gibson, Rosen & Stucker.
29. Google Scholar - Finite Element Analysis of Mechanical Joints.
30. Park, K., & Paulino, G. H. (2011). Cohesive zone models: A critical review of traction-separation relationships across fracture surfaces.
31. Kozák, V. (2008). Cohesive zone modelling. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/238528947>.
32. G. Barenblatt, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 23(3), 622(1959). DOI 10.1016/0021-8928(59)90157-1
33. (Dugdale, 1960) D.S. Dugdale, Yielding of steel sheets containing slits. *J. of the Mech. and Ph. of Sol.* 8, 100-104 (1960).
34. A. Hillerborg, M. Modéer, P.E. Petersson, *Cement and concrete research* 6(6), 773(1976).
35. Nordmann, J., Naumenko, K., & Altenbach, H. (2020). Cohesive zone models—Theory, numerics and usage in high-temperature applications to describe cracking and delamination. In ResearchGate. Springer.
36. Wen, S. (2012). Identification expérimentale de modèles de zones cohésives à partir de techniques d'imagerie thermomécanique [Doctoral dissertation, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc]. HAL Archives Ouvertes.
37. A.C. Palmer, J.R. Rice, The growth of slip surfaces in the progressive failure of overconsolidated clay. *Proceedings of the Royal Society (London)*, A332, 527-548 (1973).
38. (Xu et al, 1994) X.P. Xu, et A. Needleman, Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. *J. Mech Phys. Solids*, 42(9), 1397-1434 (1994).
39. (Tvergaard et al, 1992) V. Tvergaard, J.W. Hutchinson, The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids. *J. Mech. Phys. Solids*, 40, 1377-1397 (1992).

40. (Palmer et al, 1973) A.C. Palmer, J.R. Rice, The growth of slip surfaces in the progressive failure of overconsolidated clay. Proceedings of the Royal Society (London), A332, 527-548 (1973).
41. (Monerie, 2000) Y. Monerie, Fissuration des matériaux composites : rôle de l'interface fibre/matrice. Thèse, Université d'Aix-Marseille II (2000).
42. Dassault Systèmes – SIMULIA, Abaqus FiniteElementAnalysis, page produit officielle (Consulté en 2024). 3ds.com
43. NAFEMS, “Analysis Origins – ABAQUS”, Blog technique (accès web). nafems.org
44. Dassault Systèmes – SIMULIA, SIMULIA Product Portfolio – Engineering Simulation, site officiel (Consulté en 2024). 3ds.com