

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR & DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE DJILALI LIABES
FACULTE DE TECHNOLOGIE**



DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

**MEMOIRE DE MAGISTERE
OPTION : MECANIQUE DES MATERIAUX AVANCES**

Thème

ANALYSE TRIDIMENSIONNELLE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES ASSEMBLAGES COLLÉS

PRÉSENTÉ PAR :

- HADJ BOULENOUAR RACHID

MEMBRES DU JURY :

Mr Madani Kouider	Professeur, UDL-SBA	PRESIDENT
Mr Bachir Boudjra Belabess	Professeur, UDL-SBA	EXAMINATEUR
Mr Belhouari Mohamed	Professeur, UDL-SBA	EXAMINATEUR
Mr Boutabout Benali	Professeur, UDL-SBA	ENCADREUR

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2014-2015

Chapitre I : Théorie du collage

I. Introduction	1
I.1. Historique du collage	2
I.2. Mécanisme du collage et principe théorique	4
I.2.1. Définition	4
I.2.2. Adhésion	4
I.2.2.1. Adhésion par contact	5
A. Principe mécanique	5
B. Le principe thermodynamique-Notion de mouillage	5
C. Principe de diffusion et interdiffusion	7
I.2.2.2. Adhésion physique	8
A. Principe électrostatique	8
B. Principe d'adsorption physique	8
C. Principe des couches de faibles cohésions	9
I.2.2.3. Adhésion chimique	10
A. Principe chimique	10
I.2.2.4. Remarque	10
I.2.2.5. Bilan	11
I.2.3. Développement de la cohésion prise de la colle	13
I.2.3.1. Extrait sec	13
I.2.3.2. Mode de prise	13
A. Les colles à l'eau	13
B. Les colles en solution	13
C. Colles à deux composants	14
D. Les colles thermodurcissables à un composant	14
E. Monomères polymérisables	14
F. Les adhésifs thermofusibles	14
G. Colles polymérisés sous l'action de l'humidité	14
H. Les enductions thermocollantes	15
I.3. Traitement de surface avant collage	15
I.3.1. L'importance du traitement	15
I.3.2. Cas des métaux	15
I.3.2.1. Aluminium	15
A. Dégraissage	16
B. Traitement chimique	16
I.3.2.2. Acier	16
A. Traitement de surface du composite	16
I.4. Principaux adhésifs utilisés dans l'industrie	17
I.4.1. Adhésifs structuraux	17
I.4.1.1. Adhésifs anaérobies	17
I.4.1.2. Adhésifs cyanoacrylates :	17
A. Résine acryliques à haute ténacité	17

Table des matières

B. Résines époxydes	17
C. Résines phénoliques	18
D. Critères de choix	18
I.4.2. Adhésifs thermofusibles	19
I.5. Comportement mécanique et physico-chimique	19
I.5.1. Comportement mécanique	19
I.5.1.1. Le test de cisaillement sollicité en traction	20
I.5.1.2. Le test de traction de joint bout à bout	21
I.5.1.3. Le test de pelage	22
I.5.1.4. Le test de clivage	23
I.5.1.5. Test de torsion	25
I.5.2. Comportement physico-chimique	26
I.5.2.1. Résistance à l'eau et l'humidité	26
I.5.2.2. Résistance à la chaleur ou au froid	27
I.5.2.3. Résistance au produit chimique	27
I.5.3. Défaut du collage	27
I.6. Avantages et inconvénients du collage	28
I.6.1. Avantages	29
I.6.2. Inconvénients	29
I.7. Historique des différentes méthodes d'analyses des JSR	30
I.7.1. Analyses élastiques linéaires à deux dimensions	32
I.7.1.1. Analyses linéaires élastiques	32
I.7.1.2. Analyses de Volkersen	32
I.7.1.3. Analyses de Goland et Reissner	34
I.7.1.4. Limites des analyses classiques	34
I.7.2. Analyses élasto-plastique à deux dimensions	35
I.7.2.1. Analyses de Hart-Smith	35
I.7.3. Analyses tridimensionnelles	36
Références bibliographiques	37

Chapitre II : Etude du comportement des assemblages collés

I. Comportement mécanique des joints collés	40
I. 1. Approches Analytiques	40
I.1.1. Analyse uniaxiale	41
I.1.2. Analyse biaxiales	43
A. La surface de collage	46
A.1. La longueur de recouvrement	46
A.2. La largeur de recouvrement	47
A.3. L'épaisseur du joint collé	48

Table des matières

I.2. Approches Numériques	49
I.2.1. Approches de Harris et Adams	49
I.2.2. Approches de Tsai et Morton	49
II. Le comportement mécanique des adhésifs	53
II. Analyse mécanique des joints collés	53
III.1. Essai de cisaillement par traction	54
III.2. Essai de Pelage	55
III.3. Essai de Clivage	55
III.4. Essai de Cisaillement par torsion	55

Chapitre III: Résultats et discussions

I. Introduction	58
II. Essai de cisaillement par traction	61
III. But de l'analyse	62
III.1. Propriétés de l'alliage d'aluminium 2024-T3	62
III.1.1. Composition chimique	62
III.1.2. Propriétés mécaniques d'aluminium 2024-T3	63
III.2. Propriétés de l'adhésif (ADEKIT-A-140)	63
III.3. Modèles numériques 3D non linéaires	65
III.4. La géométrie	65
III.5. Maillage	65
III.6. Modèles géométriques	66
IV. Analyse des résultats	66
V. Influence de la géométrie du JSR sur la répartition de l'ICC	67
V.1. Epruvette simple (sans modification)	69
V.2. Biseutage de la plaque	70
V.3. Bourrelet d'adhésif	76
V.4. Biseutage interne de la plaque avec bourrelet de l'adhésif	81
V.5. Biseutage interne fixe avec bourrelet d'adhésif externe	86
VI. L'effet de la présence des défauts dans le joint d'adhésif	91
VII. Influence de la longueur de recouvrement	103
VIII. Conclusion	108
Référence bibliographiques	109

I. Introduction :

La technique d'assemblage par collage joue actuellement un rôle prépondérant dans de nombreux domaines tels que l'industrie aéronautique, la construction automobile, la construction navale, la fabrication et l'élaboration de produits à base des matériaux composites et de polymères. L'approche multi matériaux présentée dans ce chapitre a pour but de dresser un état des connaissances actuelles sur les procédés d'études et dimensionnement des assemblages collés de toutes sortes mais aussi de souligner l'importance des différents paramètres intervenant dans la qualité d'un collage dès son élaboration jusqu'à son utilisation. Cependant, seule une approche mécanique du comportement des assemblages collés sera abordée ici, même si des notions de physicochimie des surfaces et des interfaces sont indispensables à la bonne compréhension des phénomènes d'adhésion.

La compréhension des phénomènes d'adhésion et leurs mécanismes élémentaires est la plus grande importance car une adhésion optimale entre l'adhésif et son substrat est nécessaire à un bon collage. Il existe ainsi deux types d'approches permettant d'expliquer les phénomènes d'adhésion entre deux matériaux (approche physique et thermodynamique).

Les théories de l'adhésion ont pour but d'expliquer les phénomènes pouvant être à l'origine de l'adhésion entre deux matériaux mais ne permettent pas de les quantifier. Les essais mécaniques effectués sur les assemblages collés permettent de mesurer l'adhérence de l'assemblage qui dépend de divers paramètres ne résultant pas forcément que d'un phénomène d'adhésion. L'adhérence peut être quantifiée à partir d'essais mécaniques par l'énergie de séparation de l'assemblage collé. Ainsi, pour optimiser l'adhérence entre matériaux, des traitements de surfaces et une caractérisation de cette surface avant et après traitement sont indispensables.

En favorisant l'adhérence lors de la conception de l'assemblage, et plus particulièrement lors des phases indispensables de préparation des surfaces, la durée de vie de l'assemblage est amplifiée. Cependant, d'autres facteurs doivent être pris en compte pour garantir à l'assemblage collé un maintien dans le temps de ses caractéristiques mécaniques, tant au niveau de sa fabrication que de son utilisation.

L'adhérence des assemblages collés est généralement mesurée à l'aide d'essais mécaniques de séparation de l'assemblage mais peut aussi être évaluée par des procédés de contrôle non destructifs de l'assemblage qui permettent d'identifier des défauts dans le joint de colle tels que de la porosité, un déficit de polymérisation, de la micro fissuration ou des décollements ponctuels. Les essais mis en œuvre permettent une étude de la répartition de

l'état de contrainte en fonction des données géométriques de l'assemblage et de la loi de comportement de l'adhésif. Les deux configurations sur lesquels le plus grand nombre de travaux a été réalisé sont le joint à simple recouvrement et le joint abouté. Mais des problèmes subsistent quant aux conditions aux limites de tels systèmes dans des analyses par calcul numérique.

I.1. Historique du Collage :

Le collage est une technique d'assemblage qui remonte à la plus haute antiquité. En effet, quinze siècles avant J.C., les Egyptiens employaient déjà des colles naturelles. Une révolution importante dans le domaine de l'adhésion se produit dans les années 40 avec l'utilisation du collage métal/métal en construction aéronautique et la découverte des résines époxydes [2] [3]. Ces résines jouent maintenant un rôle prépondérant dans le domaine du collage structural.

La notion de colle structurale apparaît dans les années 1940, Les études entreprises sur les collages caoutchouc-métal et bois-métal et la mise au point des polyuréthanes et des colles phénoliques impulsent le développement des technique de collage métal-métal. Ces colles qui permettent une très grande résistance, commencent à être utilisées dans la construction des avions. Les résines époxy (permettant d'effectuer des collages sous faible pression) et les polymères silicones (utilisées soit pour coller, soit pour jouer un simple rôle de joints d'étanchéité et ou de dilation thermique) sont découvert à la même époque.

Si le collage n'était initialement utilisé que pour les structures secondaires, son domaine d'utilisation s'est étendu. Ainsi, depuis plus de 50 ans, l'industrie aéronautique utilise le collage sur des structures primaires, et ceci au dépens d'autres techniques plus classiques tels le rivetage, la soudure ou le boulonnage. Les avantages du collage sont nombreux; dont un gain de masse, la possibilité d'assembler des matériaux différents, une meilleure répartition des contraintes ou encore l'absence de corrosion. De plus, le grand choix d'adhésifs présents aujourd'hui sur le marché permet de trouver une solution adéquate à de nombreux problèmes [4].

Malgré leur utilisation industrielle, peu de données existent sur le comportement à long terme des adhésifs structuraux ou des assemblages collés. Il existe diverses explications à cet état de fait, une des plus importantes étant le caractère multidisciplinaire de la science de l'adhésion qui implique des domaines très variés telles la chimie (macromoléculaire,

dégradation...), la physicochimie (mécanismes d'adhésion, vieillissement...), la physique des surfaces, la rhéologie ou encore la mécanique ce qui complique considérablement l'étude des propriétés des adhésifs.

L'arrivée des matériaux composites, dans les années 1956 à 1975, pour lesquels le collage est la principale méthode d'assemblage, et le développement de nouveaux adhésifs thermostables, résistant à hautes températures, ainsi que les exigences très élevées de la recherche spatiale, ont encore fait progresser le collage à un rythme très rapide [5].

Aussi bien L'industrie automobile commence à utiliser le collage structural des métaux à partir de 1965-1970 de même, l'industrie électronique à profiter l'un des grands avantages du collage, à savoir la possibilité d'assembler de très petites pièces.

Enfin, en voyant que l'assemblage par collage et adopté par tout les industries, ce qui permis d'élargir leur marché aux autres secteurs industriels. Ainsi le marché français des colles et adhésifs est passé de quelque 5000 t/an en 1920 à 400000 t/an en 2000[6].

En effet, cette technique d'assemblage présente d'innombrables avantages. Parmi celles-ci citons l'aptitude à assembler des matériaux de nature différente, une meilleure répartition des contraintes par rapport au rivetage ou au boulonnage, un gain de poids, diminution des points de corrosion. Suivant les types d'adhésifs utilisés, une bonne résistance aux chocs et à la fatigue, la faculté de diminuer les bruits et les vibrations et d'assurer l'étanchéité.

Pour autant, le collage reste une technique d'assemblage complexe. La préparation des surfaces doit être minutieuse. La réticulation optimisée des adhésifs est parfois longue. La résistance mécanique des assemblages collés est limitée par les propriétés thermomécaniques de l'adhésif lui-même, et, admettons-le, la durée de vie des ces assemblages n'est jamais connue avec précision.

I.2. Mécanisme du collage et principe théorique :

I.2.1. Définition :

Une différence existe entre les termes "adhésion" et "adhérence". En effet, on peut définir l'adhésion comme l'étude des mécanismes qui participent à la formation d'une interface plus ou moins forte et stable entre deux matériaux, alors que l'adhérence est la résistance à rupture de l'assemblage, on appelle interphase la zone d'épaisseur non nulle où les propriétés physico-chimiques et mécaniques sont différentes de celles du substrat d'une part et du

polymère d'autre part. L'interface, quant à elle, se définit comme la frontière entre deux phases (elle n'inclut pas la notion d'épaisseur).

Une colle (ou un adhésif) est un produit chimique qui permet d'assembler deux ou plusieurs matériaux de nature analogues ou différents. On tend de plus en plus à appeler adhésifs les colles modernes et performantes, telles que les époxydes, polyuréthanes, cyanoacrylates et les acryliques.

Le produit chimique est d'abord fluide. Ce qui permet l'enduction et le bon contact entre la colle (l'adhésif) et les matériaux à assembler et s'y accroche par divers mécanismes physiques ou chimiques ou encore mécanique et thermodynamique. Puis les matériaux sont assemblés et la colle durcit ou sèche c'est ce que l'on l'appelle le durcissement ou le séchage ou la prise ou la polymérisation de la colle, qui met en œuvre divers mécanismes physique et chimiques, Les colles (ou adhésifs) se caractérisent par l'adhésion et la cohésion [7].

I.2.2. Adhésion :

L'adhésion est une liaison inter-faciale qui dépend aux interactions entre la surface du substrat et l'adhésif. On comprend donc que les forces d'adhérence puissent être réduites par la présence d'un agent contaminant adhérent à la surface, qui empêche le contact entre l'adhésif et le substrat. Le processus de collage est directement influencé par la rugosité, les propriétés chimiques et l'énergie de surface. Les paramètres de surface jouent un rôle dans l'adhésion, tel que la bonne mouillabilité des surfaces à assembler. Il faut que l'adhésif puisse s'étaler correctement et s'écouler dans toutes les irrégularités et les creux du substrat. Les facteurs qui augmentent la surface réelle de contact, comme la rugosité et la porosité favorisent l'adhésion par un processus d'ancrage mécanique. De même, la présence de groupes chimiques réactionnels en surface peut permettre la création de liaison chimique forte entre le substrat et l'adhésif [8].

I.2.2.1. Adhésion par contact :

A. Principe Mécanique :

Cette théorie fût proposée initialement en 1925 par McBain et Hopkins en 1925 dont les travaux concernaient notamment le collage du bois.

L'adhésion est assurée par un ancrage mécanique du polymère qui pénètre dans les microcavités et irrégularités de surface du substrat bien avant la solidification ce qui permet de constituer de nombreux points d'amorçage après la solidification de l'adhésif, Un bon

ancrage mécanique nécessite un choix judicieux de la rugosité de surface et dépend à la fois de la viscosité de l'adhésif et de la mouillabilité du substrat. Une bonne affinité adhésif/surface du substrat limite la formation de défauts liés à de l'air piégé.

Ce qui est nécessaire alors que la colle mouille parfaitement les surfaces afin de ne pas piéger de bulle d'air dans les porosités, ce qui induirait des concentrations de contraintes et fragiliserait le joint. Une rugosité trop importante peut elle aussi être source de bulles d'air. Il existe donc une rugosité optimale des substrats à assembler (Figure I-1).

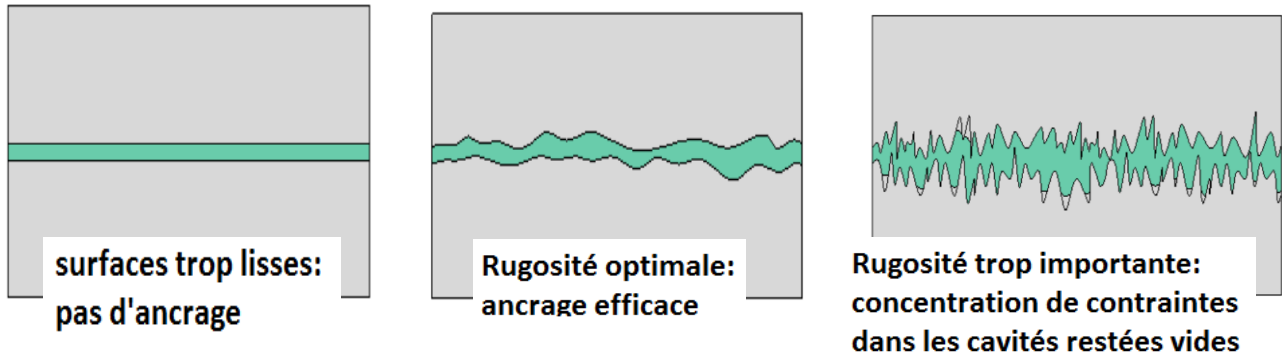


Figure I.1 : Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique.

B. Le principe thermodynamique- Notion de mouillage :

Ce principe est mis au point par SHARPE et SCHONCHON (1963) [9]. Considérons un liquide mis en contact avec un solide, la variation d'énergie libre du système solide/ liquide correspond au travail nécessaire pour séparer un élément de surface unitaire. Ce travail correspond à l'énergie d'adhésion qui se traduit par l'équation de DUPRE [10] :

$$W_{SL} = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL} \quad (I-1)$$

Avec γ_S : Tension superficielle du solide
 γ_L : Tension superficielle du liquide
 γ_{SL} : Tension interfaciale solide/liquide

Si à l'équilibre θ est l'angle de raccordement du liquide avec le solide (figure I-2) on a, d'après le modèle d'Young :

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cos \theta \quad (I-2)$$

Ce qui permet d'écrire :

$$W_{SL} = \gamma_L (1 + \cos \theta) \quad (I-3)$$

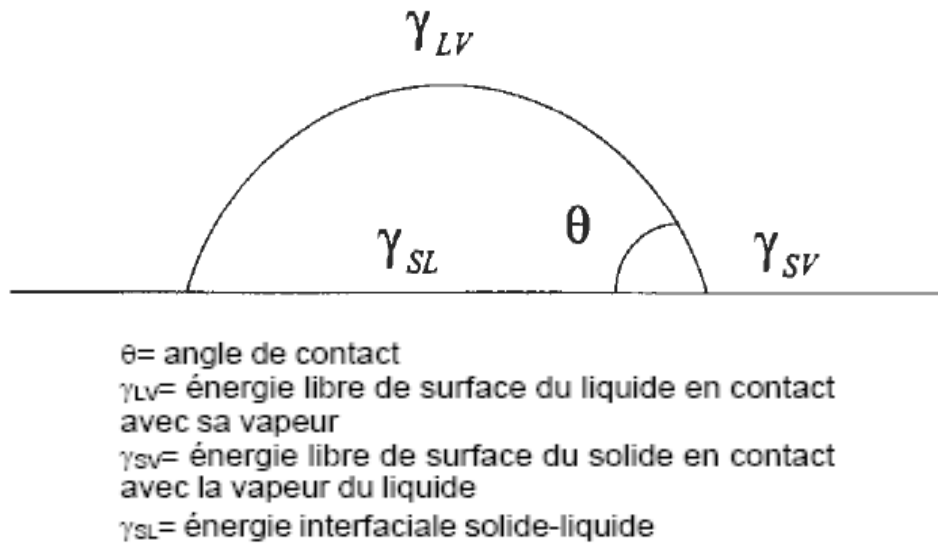


Figure I.2 : Etalement d'une goutte sur un solide.

Lorsque le mouillage est parfaitement réalisé, l'angle de raccordement est nul et l'énergie d'adhésion sera maximale.

En fait, l'énergie d'adhésion est supérieure à l'énergie de cohésion de l'adhésif c'est-à-dire du liquide dans ce qui précède.

On en déduit que, théoriquement, la rupture d'un joint collé ne devrait pas s'effectuer à l'interface colle/solide mais de manière cohésive c'est-à-dire soit dans le joint de colle soit dans le support, La théorie est très divergente de la pratique puisque, pour un liquide ayant une énergie de surface voisine de 30 mJ/m^2 , et en admettant que les forces intermoléculaires sont à peu près négligeables à des distances de $0,3 \text{ nm}$, la force nécessaire pour séparer ce liquide d'un solide, perpendiculairement à leur surface de contact, serait voisine de 200 MPa . En pratique on n'atteint au mieux que le dixième de cette valeur.

Par ailleurs, pour qu'il y'ait collage, il faut qu'il y'ait mouillage et donc que l'angle de raccordement liquide/solide soit voisin de 0 ou $\cos \theta$ soit le plus grand possible.

La relation (I-2) peut s'écrire :

$$\cos \theta = \frac{\gamma_s - \gamma_{sl}}{\gamma_l} \quad (\text{I-4})$$

On en déduit immédiatement qu'un bon mouillage sera réalisé lorsque :

- La tension superficielle de l'adhésif γ_L est petite
- L'énergie de surface du solide γ_S grande
- L'énergie interfaciale γ_{SL} soit faible

Ce pendant, ne peut pas être trop petite car l'énergie d'adhésion serait très faible.

C. Principe de diffusion et inter-diffusion :

Ce principe est proposé par VOGUSTKI en 1949 [11]. Cette théorie vise essentiellement les assemblages polymère-polymère mais de différentes natures chimique, l'idée ici est que les chaînes macromoléculaires des matériaux en contact (colle et substrat à chaque bord du joint), vont diffuser à l'interface selon un mécanisme, appelé reptation, cette interdiffusion assure la cohésion de l'assemblage grâce à la formation d'une interphase entre la colle et substrat (Figure I-3).

Dans certains cas, l'emploi d'agents de couplage conduit à un mécanisme d'adhésion similaire à celui décrit ci-dessus, particulièrement dans le cas d'un collage entre une résine époxydique et un verre [Smith et coll., 1994].

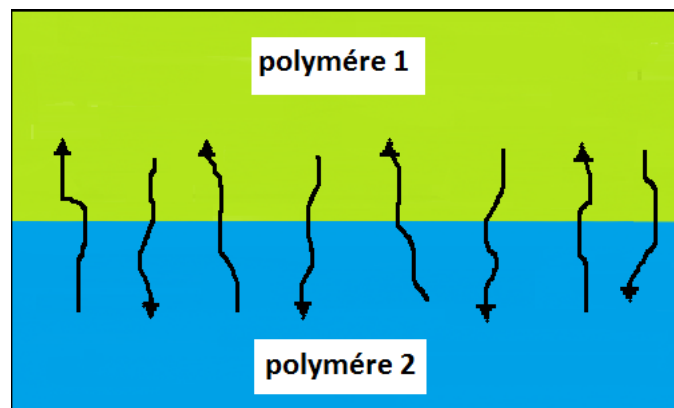


Figure I-3 Inter diffusion macromoléculaire.

I.2.2.2. Adhésion physique :

A. Principe électrostatique :

Ce principe a été développé en 1948 par DERYAGIN et coll. [12] ont observé, lors d'un essai de pelage sur le polychlorure de vinyle, des phénomènes électrostatiques qui les ont amenés à proposer une explication électronique au processus. On sait depuis que la dissipation d'énergie au cours d'un essai de pelage est liée principalement aux réponses visqueuses et viscoélastiques du matériau

Cette théorie est basée sur le transfert de charges électriques lors du contact. Ce processus conduit en général à la formation d'une double couche électrique à l'interface. Cette théorie s'applique surtout aux assemblages verre-polymère, elle n'est pas applicable pour un assemblage du type verre-métal par exemple. Les transferts de charges électriques ne sont pas toujours observés dans les collages, ce qui fait penser qu'ils sont la cause de l'adhésion entre le verre et le polymère (Voir figure I-4).

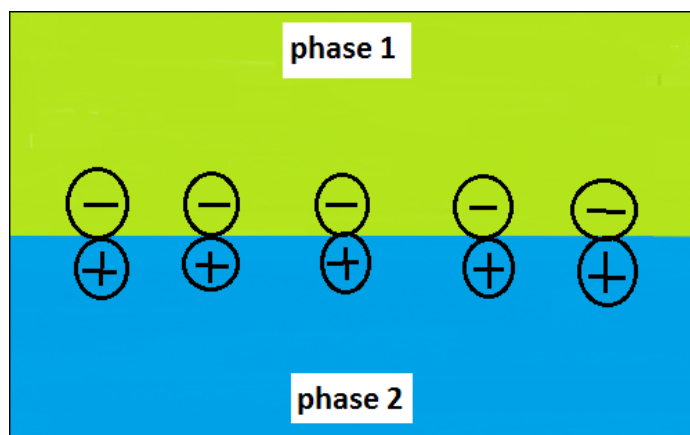


Figure I.4 : Charge électrique.

B. Principe d'adsorption physique :

L'adhésion peut être assurée par des forces d'attraction intermoléculaires de Van Der Waals, qui n'agissent qu'à très faibles distances, de l'ordre de 0,5nm, on distingue plusieurs natures d'interaction :

Les forces qui peuvent s'établir sont les forces de dispersion interactions entre dipôles formés temporairement dans le métal, ces forces d'attraction n'agissent qu'à très faible distance les énergies dans le cas et de 1 à 20 KJ/mole.

Les forces qui peuvent s'établir sont les forces d'induction qui agissent entre un dipôle permanent existant dans le polymère de la colle et un dipôle induit dans le substrat, l'énergie de liaisons est faible et égale à 2Kj/mole.

Les forces qui peuvent s'établir se sont les forces de liaisons dipôle- dipôle c'est le cas d'un polymère polaire sur un édifice ionique, du verre par exemple Les forces qui peuvent s'établir se sont les forces de liaison hydrogène qui sont l'interaction entre un atome électronégatif (oxygène- halogène) et un atome d'hydrogène, c'est le cas d'un adhésif polyuréthanes sur certain plastique, l'énergie de liaison dans ce cas peut aller jusqu'à 40Kj/mole.

C. Principe des couches de faibles cohésions :

Il s'agit plus ici d'une théorie de la rupture des interfaces que d'un principe d'adhésion. Dans le cas d'une forte cohésion de l'assemblage, la rupture n'a généralement pas lieu à l'interface, mais dans une couche voisine. BIKERMAN [13] postule donc dans les années soixante l'existence d'une interphase d'épaisseur fine entre les deux matériaux. Cette couche de faible cohésion, due à la présence d'imperfections provenant de la mise en œuvre telle que les bulles d'air par exemple et à la discontinuité entre les phases, constitue une zone de transition et présente des gradients de propriétés et de structure. Cette théorie permet de se placer à une échelle très fine car elle décrit l'interface en termes d'interactions moléculaire (figure I-5).

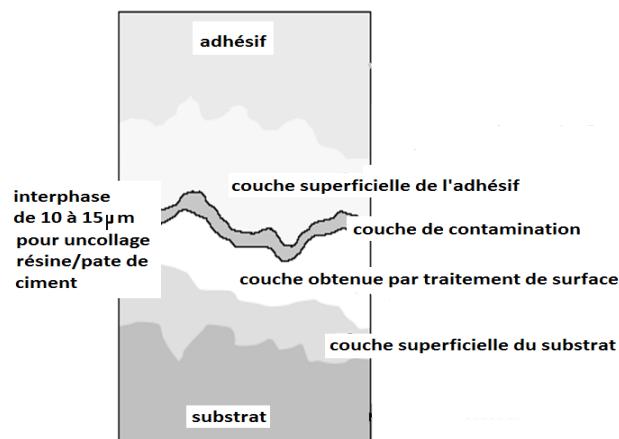


Figure I.5 : Couche de faible cohésion du modèle du Bikerman.

I.2.2.3. Adhésion chimique :

A. Principe chimique :

Les forces de liaison chimique se développent lorsque les molécules ou atomes du substrat et de l'adhésif sont susceptibles de mettre en commun un certain nombre d'électrons et de réaliser ainsi des liaisons ioniques ou covalentes.

Les phénomènes chimiques sont de première importance dans le cas des adhésifs car ils mettent en jeu des énergies très importantes pouvant aller jusqu'à : 500Kj/mole pour les liaisons covalents et 1000 Kj/mole pour les liaisons ioniques, cela peut être le cas avec des adhésifs polyuréthanes sur de nombreux substrats (plastique, bois).

I.2.2.4. Remarque :

L'importance de ces diverses liaisons chimiques et physiques dans le phénomène de collage dépend de l'écartement entre les molécules de colle et du substrat (figure I-6), les collages les plus efficaces sont obtenues pour des écartements très faible de l'ordre du dixième de manomètre, d'où l'intérêt d'un bon mouillage et d'un bon pressage des surfaces entre elles au moment de l'assemblage.

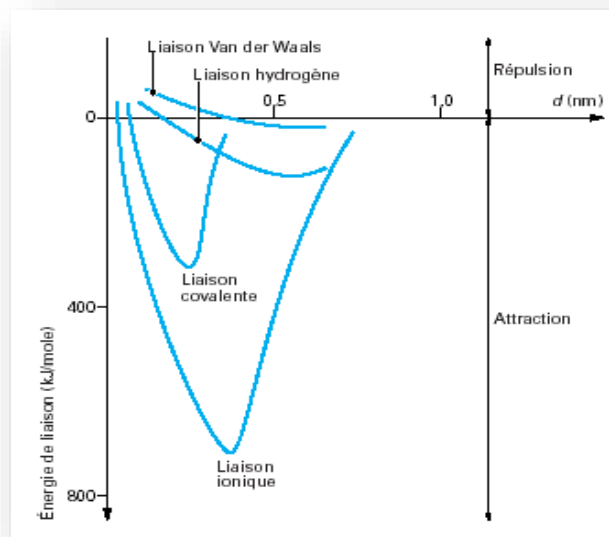


Figure 1.6 : Energies des liaisons en fonction de la distance d .

En pratique, les forces d'adhésion réellement développées sont beaucoup plus faibles que les forces théoriques indiquées précédemment physiques et chimiques parce que les supports ne sont pas plans à l'échelle moléculaire et ne sont pas donc partout en contact avec les

molécules de la colle, ou parce que les supports peuvent être pollués localement par des graisses, des poussières, des oxydes, ou des matériaux corrodés.

I.2.2.5. Bilan :

On peut cependant considérer que les processus de collage se déroulent en plusieurs grandes étapes qui font intervenir ces différents mécanismes de l'adhésion (Figure I-7) :

- mise en contact des substrats avec la colle ;
- création des liaisons plus ou moins fortes et de portées variables, qui vont maintenir la cohésion de l'assemblage.

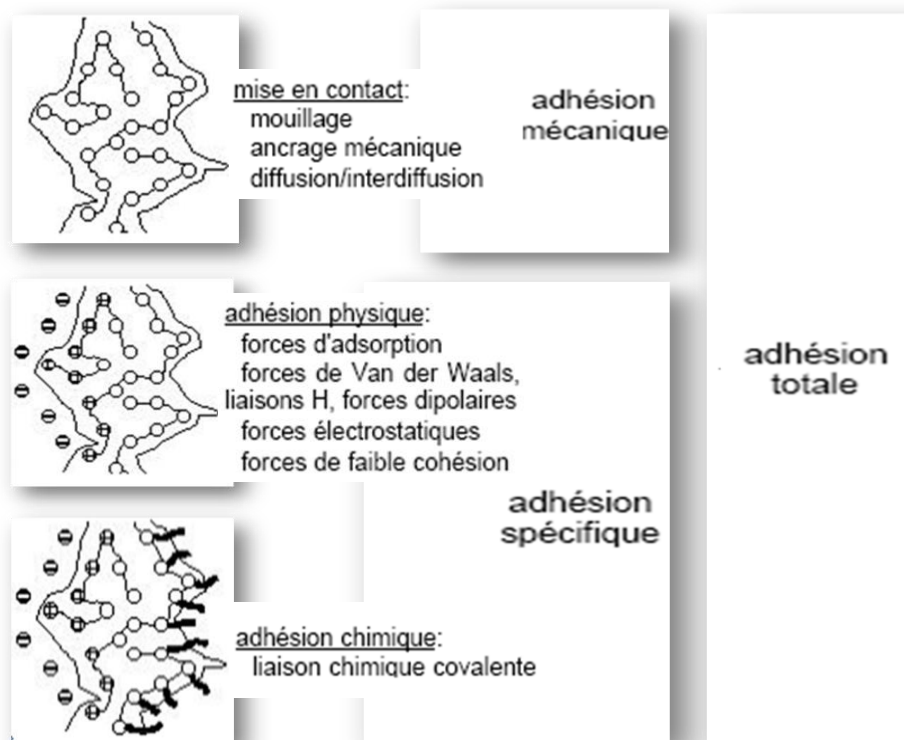


Figure I.7 : Décomposition de la procédure de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion.

Finalement on peut conclure qu'aucune des approches théoriques des phénomènes d'adhésion n'est susceptible d'expliquer de manière pleinement satisfaisante les faits expérimentaux. Cependant, certains principes peuvent être déduits. Nous retiendrons les suivants :

- une composition collante doit avoir au moment de son utilisation une faible tension de surface, le quelle est fonction inverse de la température et de la pression.
- les compositions collantes sont préférentiellement des matériaux polymères plastiques ou élastomères.
- la rupture d'un joint correctement collé doit se produire de manière cohésive, c'est-à-dire dans le joint ou dans le support mais pas à l'interface.
- La cohésion du joint sera d'autant meilleure que les matériaux, substrat et colle présenteront entre eux des interactions moléculaires intenses physiques et chimiques.
- Inversement une mauvaise affinité chimique peut fortement affaiblir le collage.
- Le coefficient de dilatation thermique et le module d'élasticité de l'adhésif doivent être compatibles avec les coefficients de dilation des deux substrats, pour ne pas créer de tensions internes trop élevés.

I-2-3. Développement de la cohésion prise de la colle :

Après l'assemblage des deux matériaux ou substrat, la colle doit durcir ou sécher, afin de donner une liaison solide, mécaniquement résistante entre les deux matériaux, c'est le phénomène de prise de la colle, Le mode de prise des colles et adhésifs dépend de leur nature physique et chimique.

I.2.3.1. Extrait sec :

Certains adhésifs sont des dispersions ou des solutions de polymères dans un liquide porteur qui est le plus souvent de l'eau, rarement du solvant.

L'extrait sec (ES) est la teneur en matière active de la colle, c'est-à-dire un rapport de masses m (exprimé en %)

$$E_S = \frac{(\text{Mass de polymère de base} + \text{mass de résines} + \text{mass de charge et aditifs})}{\text{mass total de la colle}} \quad (\text{I-5})$$

Le complément à 100% indique alors le pourcentage de liquide porteur lequel s'évapore ou est absorbé par les matériaux pendant le collage.

I.2.3.2. Mode de prise :

Les colles peuvent se différencier suivant leur mode de prise, et suivant chaque mode la colle n'acquiert toutes ces propriétés : mécanique, physique et chimique.

A. Les colles à l'eau (émulsion ou solution aqueuses) :

La prise s'effectue par évaporation de l'eau avant assemblage et l'absorption de l'eau par les substrats poreux, il faut aux moins un des matériaux soit absorbant, les principaux paramètres sont :

- épaisseur du joint de colle
- degré d'absorption des substrats
- température et humidité
- liaison entre l'eau et les polymères de base

En trouve par exemple l'émulsion acrylique.

B. Les colles en solution :

La prise s'effectue par absorption et évaporation des solvants, ses paramètres sont :

- taux évaporation des solvants
- ventilation et température
- Certaines colles polyuréthanes.

C. Colle à deux composants :

La prise s'effectue par réaction chimique entre les deux composants à température ambiante ou chaude, les principaux paramètres sont :

- réaction entre les deux composants
- température et durée
- proportion du mélange
- En trouve généralement les époxydes et les polyuréthanes.

D. Les colles thermodurcissables à un composant :

La prise s'effectue par réaction chimique sous l'action de la chaleur, les principaux paramètres sont :

- réactivité de la résine à base
- température, pression et durée
- en trouve généralement les époxydes mono composante et les phénoliques.

E. Monomères polymérisables :

Prise par polymérisation entre les deux matériaux sous l'action d'un catalyseur, par exemple un catalyseur alcalinité pour les cyanoacrylates

F. Les adhésifs thermo fusibles :

Ce sont les Hotmelts « polyamides », Leur prise par refroidissement de la colle, préalablement fondue entre 130°C jusqu'à 200°C suivant les cas, ces paramètres de prise sont :

- Vitesse de refroidissement et l'épaisseur du joint de colle

G. Colles polymérisés sous l'action de l'humidité :

La prise s'effectue par réaction chimique entre l'humidité ambiante ou des matériaux, et l'adhésif contenant des terminaisons isocyanates, les principaux paramètres sont :

- réactivité des isocyanates
- humidité de l'air et des substrats
- En trouve généralement les polyuréthanes.

H. Les enductions thermocollantes :

Ils ne sont pas adhésive à froid mais réactives à la chaleur, il nécessite une température et pression suffisantes [14] [15].

I.3. Traitement de surface avant collage :

Pour réaliser un bon collage, il est souvent nécessaire de préparer les surfaces avant d'appliquer la colle. Cette préparation peut consister en un simple nettoyage de la surface ou bien à utiliser des méthodes spécifiques de traitement, pour donner des caractéristiques souhaitables à cette surface, on utilise les traitements de surface décrite ultérieurement [16].

I.3.1. L'importance du traitement

La surface des métaux est recouverte de plusieurs couches de produits défavorables au collage.

- Eliminer les saletés, pollution, et lubrifiants de laminage, étirage
- Eliminer les couches d'adsorbées, eau par exemple.
- Eliminer les couches plus ou moins fragile (oxyde naturel, oxyde hydratés) jusqu'à retrouver le métal nu, parfaitement propre.

- Faire en sorte que l'adhésif mouille bien la surface
- Augmenter la rugosité de surface, pour augmenter l'accrochage mécanique.
- Recréer une nouvelle couche réactive d'oxyde ou autre couche solide sur la quelle l'adhésif choisi adhèrera fortement. De plus le traitement de surface doit être relativement facile à réaliser, et surtout facile à contrôler pour vérifier son efficacité.

I.3.2. Cas des métaux

I.3.2.1. Aluminium :

Tout les métaux usuels fixent l'oxygène et l'eau à la surface de l'aluminium on trouve de l'alumine (AL_2O_3), de l'aluminium hydraté (AL_2O_3,OH) ou ($AL_2O_3,3H_2O$) ou des oxydes mixtes dans les cas des alliages, l'adhérence de l'alumine sur le métal de base est le plus souvent forte mais l'alumine naturelle manque de cohésion. De plus l'alumine hydrate facilement et les couches d'hydrates sont très fragiles [17].

A. dégraissage :

- Soit en vapeur de solvants chlorés, qui éliminent la plupart des contaminants (graisse...)
- Soit par dégraissage alcalin par immersion de 10 minutes à température comprise entre 70 et 82°C dans une solution qui contient de métal silicate de sodium et sulfonât de sodium, suivi d'un rinçage efficace à l'eau, on élimine ainsi les derniers contaminants et une partie des oxydes restants étant dissous et éliminés par traitement chimique.

B. Traitement chimique :

Ensuite les pièces sont soumises à un traitement chimique qui peut être soit le traitement FPL (Forest Product Laboratory) c'est le plus ancien, ou bien le traitement P₂, traitement oxydant qui donne une couche d'oxyde solide et fortement adhérent ou mieux maintenant les anodisations :

I.3.2.2. Acier

Malgré leur intérêt commercial et les nombreux recherches effectuées, les traitements de surface des aciers avant collage sont toujours aléatoire, parce qu'ils dépendent des compositions et structures variées des aciers, qu'il sont discutés et contesté par les recherches, et qu'ils sont difficiles à réaliser car les oxydes de fer sont toujours fragiles et non adhérents, Les différents traitements de surface existant pour l'acier sont :

- Le sablage qui consiste à poncer la surface à encoller au moyen de revêtements abrasifs, Il faut ensuite prendre soin de nettoyer la surface pour se débarrasser des particules abrasives.

- Le décapage chimique qui consiste à une immersion pendant 5 min à 23°C dans un bain qui contient de l'acide nitrique et l'acide phosphorique avec une eau ionisée, suivi finalement par un rinçage ceci produit une surface exempte de dépôt d'oxyde de fer [18].

A. Traitement de surface du composite

Les surfaces des pièces de composite ont été soigneusement dégraissées à la MéthylEthylCétone (MEC) passée au chiffon doux. Ces pièces ont ensuite été séchées pendant 2 heures environ avec les pièces d'aluminium dans une étuve Memmert type UE200 (Memmert GmbH, D-91126 Schwabach, Deutschland), réglée à 40°C ($\pm 1^\circ\text{C}$, fluctuations constatées) dont l'atmosphère est maintenue par du gel de silice à environ 20 % d'Humidité Relative (RH) ($\pm 5\%$, fluctuations constatées) [19].

I.4. Principaux adhésifs utilisés dans l'industrie

I.4.1 Adhésifs structuraux

I.4.1.1. Adhésifs anaérobies :

Ce sont des résines acryliques qui durcissent en présence de métal ou en absence d'oxygène atmosphérique. ce type de matériau polymérique à haute densité de réticulation constitue une couche d'adhésif thermodurcissable très résistante et dure, et qui remplit parfaitement toutes les cavités et interstices ou irrégularités des surfaces, les adhésifs anaérobies sont principalement utilisés pour le blocage ou le verrouillage de vis ou pour des applications similaires [20], ils ne sont pas adaptés aux applications nécessitant une bonne résistance au clivage ou au choc.

I.4.1.2. Adhésifs Cyanoacrylates :

Ce sont des résines acryliques qui, par opposition aux anaérobies, durcissent sous l'effet catalytique de l'humidité présente sur la plupart des surfaces, dans certaines conditions atmosphériques très chaudes ou très froides, cette couche est pratiquement inexistante et le durcissement est alors difficilement obtenu, dans les conditions normales, le durcissement s'opère, en quelques secondes une épaisseur de joint typique est de 0,025 à 0,35 mm.

A. Résines acryliques à haute ténacité :

Ce sont des résines acryliques modifiées qui possèdent des temps de prise très courts et qui présentent des résistances et une ténacité élevées. Elles sont livrées sous forme de deux composants (une résine et un catalyseur) qui sont généralement appliqués séparément: la résine sur l'une des surfaces, le catalyseur sur l'autre, elles nécessitent une préparation de surface minimale et montrent de bonnes propriétés d'adhérence sur une large gamme de matériaux [21].

B. Résines époxydes :

Ce sont les adhésifs structuraux le plus couramment utilisés, ils se composent d'une résine époxyde et d'un durcisseur et offrent une grande variété de formulations puisqu'il existe de nombreuses résines et de nombreux durcisseurs [22], ils forment des liaisons extrêmement résistantes et durables avec la plupart des matériaux, des adhésifs mono composants époxydes sont également disponibles.

5- Polyuréthanes : Les adhésifs polyuréthanes les plus courants sont des bi composants à durcissement rapide, ils conduisent à des liaisons résistantes, en particulier, au choc, ils sont utilisés pour le collage de plastiques renforcés par des fibres de verre, leur durcissement rapide nécessite souvent une application à l'aide d'une machine, comparés aux autres adhésifs structuraux, le joint d'adhésif peut également être attaqué lors du vieillissement dans certains milieux [23], l'épaisseur typique de joint de colle est de 0,1 à 0,5 mm.

C. Résines phénoliques :

Ce sont des résines de phénol-formol ou de crésol-formol [24], cette classe d'adhésifs est l'une des premières à avoir été utilisée pour des applications structurales, les résines phénoliques présentent l'inconvénient de dégager des composés volatils au cours du durcissement, certains types de résines peuvent résister à des températures extrêmement élevées pendant de brèves périodes, elles nécessitent souvent un équipement d'application spécialisé, cette classe d'adhésifs, avec les résines de résorcine-formol, constitue une catégorie de choix pour le collage de structures soumises à de sévères conditions de vieillissement, une épaisseur typique de joint de colle est de 0,05 mm.

D. Critères de choix :

Le tableau1 [25] rassemble les informations nécessaires et simples permettant à l'utilisateur de choisir le type d'adhésif structural à utiliser en fonction de divers paramètres liés à la mise en œuvre ou aux caractéristiques requises pour l'application finale envisagée.

Type d'adhésif	Savoir-faire requis pour l'application	Température d'application	Résistance aux solvants et à la chaleur	Toxicité
Anaérobies	x	A ou C	x x x	x
Cyanoacrylates	x	A	x x	x
Acryliques à haute ténacité	x à x x	A ou C	x x à x x x	x à x x
Époxydes	x x	A ou C	x x à x x x	x à x x
Polyuréthannes	x x à x x x	A	x x	x x à x x x
Phénoliques	x x x	A ou C	x x à x x x	x à x x
x faible x x moyen x x x élevé		A : température ambiante C : température élevée (chaleur)		

Tableau I.1 : caractéristique générale d'utilisations.

I.4.2. Adhésifs thermo fusibles

Les adhésifs thermo fusibles sont généralement à base de matières thermoplastiques solides à température ambiante, ils fondent généralement entre 150 et 200C° et sont appliqués sur le substrat à cette température, ils repassent à l'état solide par simple refroidissement, le polymère peut être du poly (acétate de vinyle), du polyéthylène, du polypropylène, du polyamide, etc.

I.5. Comportement mécanique et physico-chimique

I.5.1. Comportement mécanique

La difficulté pour caractériser l'adhérence d'un assemblage réside dans le choix de l'essai qui doit être représentatif des contraintes (mécaniques et environnementales) mises en jeu en cours de service, Sur la (Figure I-8) sont indiqués les principaux types de contrainte que l'on peut rencontrer dans un assemblage soumis à une sollicitation.

Il s'agit :

- de contraintes normales au plan du joint adhésif dans le cas d'une sollicitation en traction ou en compression de l'assemblage,
- de contraintes tangentielles au plan de joint dans le cas d'une sollicitation en cisaillement,
- de contraintes de pelage lorsque l'un des matériaux assemblés est souple,
- et de contraintes de clivage lorsque les matériaux assemblés sont rigides.

Dès la conception d'un joint adhésif, il est généralement conseillé d'éviter une localisation des contraintes en répartissant les charges imposées à la couche adhésive sur toute la surface collée. A ce titre, il est préférable de concevoir un joint de sorte à éviter de faire travailler l'assemblage en pelage ou en clivage. On essaiera de solliciter le joint adhésif en cisaillement ou en traction [26].

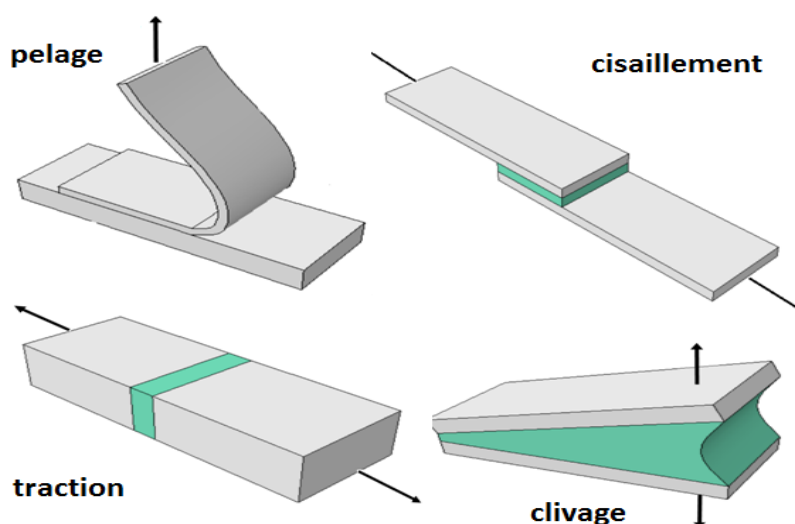


Figure I.8 : Différents types de contraintes.

I.5.1.1. Le test de cisaillement sollicité en traction

Les joints à recouvrement simple sont très fréquemment utilisés en raison de leur facilité de mise en œuvre, La contrainte de cisaillement moyenne peut être évaluée selon la relation:

$$\sigma = F/bl \quad (I-6)$$

Où F est la force à la rupture et bl la surface de recouvrement.

Dans cette configuration, il a été montré que l'état de contrainte dans le joint adhésif n'est pas uniforme et uni-axial, La contrainte de cisaillement aux extrémités du recouvrement est généralement beaucoup plus élevée que la valeur moyenne donnée par la relation précédente.

En raison de l'excentricité de la mise sous contrainte d'un tel joint, un moment de flexion est induit, conduisant à des contraintes normales de

Clivage. Ces contraintes peuvent être très élevées et conduire à la rupture cohésive de l'adhésif si ce dernier est rigide.

Plusieurs géométries de ce test ont donc été proposées afin de diminuer ces contraintes de clivage :

- le joint à double recouvrement (figure I-9-a), qui ne permet pas de résoudre entièrement le problème car des moments internes de flexion persistent, responsables de contraintes normales de compression et de traction dans le joint,
- le joint à quadruple cisaillement (figure-9-b), qui présente une meilleure répartition des contraintes mais sa mise en oeuvre est plus délicate et plus onéreuse [27].

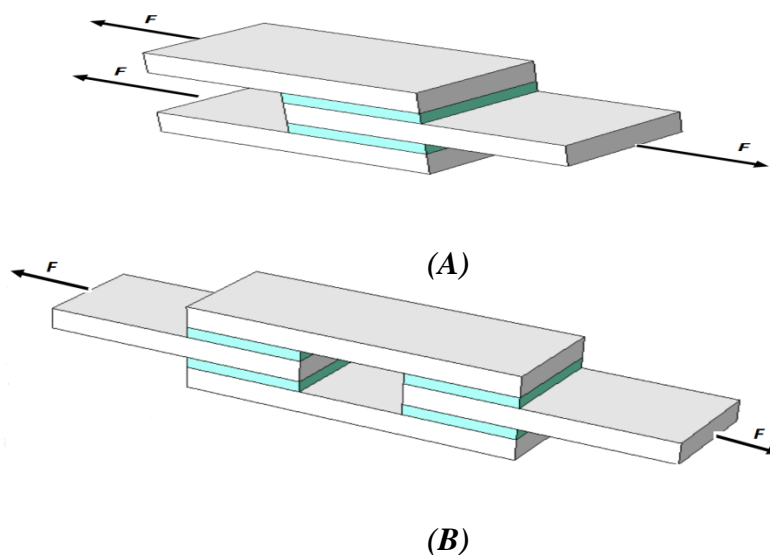


Figure I.9 : Eprouvettes double recouvrement (a) et a quadruple cisaillement(b)

Dans tous les cas cités, l'analyse d'un test en cisaillement est très complexe car la distribution des contraintes est reliée à de nombreux paramètres géométriques (épaisseurs de l'adhésif et des substrats, longueur et largeur de recouvrement) et aux caractéristiques des matériaux (modules, comportements élastique et viscoélastique). Les valeurs moyennes de la contrainte à la rupture obtenues expérimentalement sont à prendre avec précaution.

I.5.1.2. Le test de traction de joints bout à bout

Ce test applicable à tout type d'adhésif permet de déterminer la résistance à la rupture de joints bout à bout, lorsque ceux-ci sont soumis à un effort de traction (figure I-10).

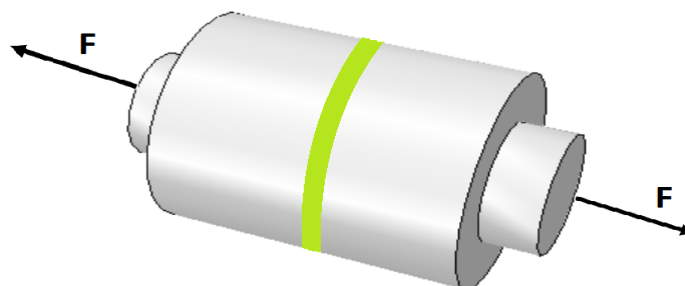


Figure I.10 : Essai de traction de joints à bout.

Appliqués pendant toute la durée de l'essai. Utilisé fréquemment, il est cependant très sensible à l'alignement lors de la mise sous contrainte du joint. Dans ce type d'éprouvette, le joint est soumis à un état de contrainte pluri axial.

I.5.1.3. Le test de pelage

Le test de pelage est communément utilisé lorsque l'un au moins des substrats est souple ou de faible épaisseur. Sa mise en oeuvre est simple. L'essai de pelage peut être réalisé à différents angles θ (figure I-11); les plus utilisés sont le pelage à 90° et 180° .

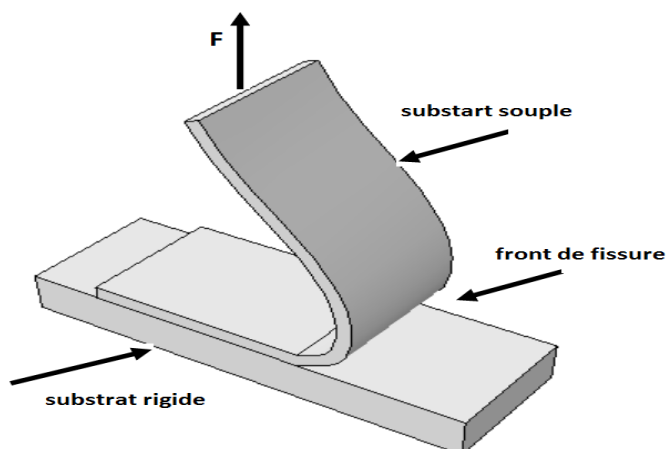


Figure I.11 : Test de pelage sous un angle θ .

Au cours de l'essai, un front de fissure apparaît et se propage le long de l'éprouvette. Les concepts de la mécanique de la rupture et des bilans d'énergie conduisent au calcul du taux de restitution de l'énergie libre G , correspondant à l'énergie de rupture de l'assemblage. G s'écrit comme la somme des variations d'énergie potentielle et d'énergie élastique des matériaux lors de la diminution de l'aire de contact d'une quantité dS sous une charge F :

$$G = \frac{dU_p}{dS} + \frac{dU_E}{dS} = \frac{F}{b}(1 - \cos\theta) + \frac{F^2}{2b^2Eh} \quad (\text{I.7})$$

Avec, h l'épaisseur du substrat souple pelé, b sa largeur et E son module d'Young.

Lorsque la partie souple est supposée indéformable (devant l'adhésif), l'énergie nécessaire pour séparer les deux substrats s'écrit :

$$G = (F/b)(1 - \cos\theta) \quad (\text{I.8})$$

- pelage à 90° : $\cos\theta = 0$ $G = F/b$

- pelage à 180° : $\cos\theta = -1$ $G = 2F/b$

De ce fait, pour répondre aux normes sur le pelage à 90° (par exemple NF EN 1464, NF T 76-096-1) [28] [29] [30], où la résistance au pelage est exprimée par le rapport F/b , le substrat souple doit être indéformable. Cette condition impose, dans de nombreux cas, l'ajout d'un renfort dont la rigidité ne modifie pas la courbure et permet d'éviter la déformation longitudinale de la partie pelée.

Toutefois, en tête de fissure, des phénomènes de dissipation d'énergie au sein de l'adhésif sont rencontrés. La quantification expérimentale de l'énergie de rupture s'avère extrêmement délicate car elle dépend de l'état de contrainte (et donc de déformation), état qui varie dans l'épaisseur de la couche adhésive et qui dépend du comportement viscoélastique ou plastique de l'adhésif.

Dans la littérature, de nombreux travaux portant sur l'influence de l'épaisseur de la couche adhésive, de l'épaisseur du substrat, des conditions de pelage (vitesse, température) et du comportement élastique ou plastique des substrats, sont rapportés.

I.5.1.4. Le test de clivage

Le test de clivage est un test de mécanique de la rupture avec propagation d'une fissure, qui s'applique lorsque les deux substrats sont rigides. Le comportement à la

propagation de la fissure peut être estimé par un test de clivage à charge (figure I-17) ou à déplacement imposé (figure I-13). Trois modes de propagation d'une fissure sont distingués. Le mode I ou d'ouverture en traction du joint, présenté sur la figure I-12, est de très loin le mode le plus important lorsque la fissure se propage dans la couche adhésive. Dans le cas d'un comportement linéaire élastique de la structure collée, le taux de restitution d'énergie du système s'écrit :

$$G = 12 F^2 a^2 / E b^2 d^3 \quad (I.9)$$

Avec, F la force pour créer la rupture, b la largeur de l'éprouvette, a la longueur de la fissure, d l'épaisseur du substrat et E son module d'Young.

La validité de cette équation repose sur les deux suppositions suivantes :

- la déformation des substrats est négligeable par rapport à la déformation du joint adhésif.
- on n'a pas de dissipation d'énergie dans le joint adhésif, en tête de fissure (autrement dit, pas de viscoélasticité, pas de plasticité du joint).

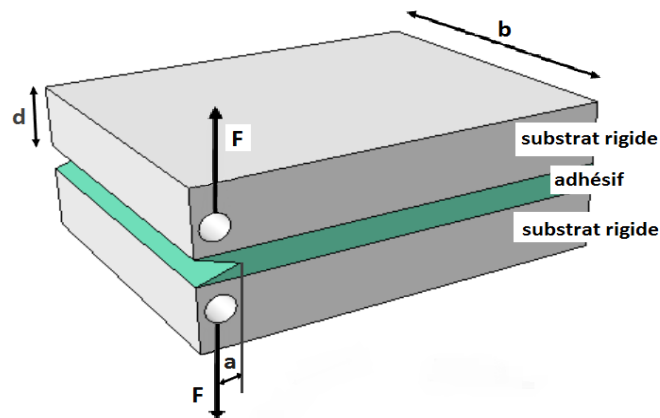


Figure I.12 : Test de clivage à charge imposée

Le test de clivage peut être utilisé afin de prédire la durabilité d'un assemblage collé. Pour cela, le test de clivage au coin (NF T 76-114 pour les adhésifs structuraux), illustré sur la figure I-13, est utilisé.

Le principe de ce test est de créer une fissure par introduction progressive d'un coin de dimensions spécifiées, dans le joint de colle d'une éprouvette à substrats rigides, puis de mesurer la propagation de cette fissure au cours d'une exposition conventionnelle de vieillissement en laboratoire décrite dans la norme NF T 76-109.

Les résultats attendus sont une valeur moyenne de la progression de la fissure Δa , exprimée en millimètres, et une description du type de rupture, en fonction des conditions de vieillissement.

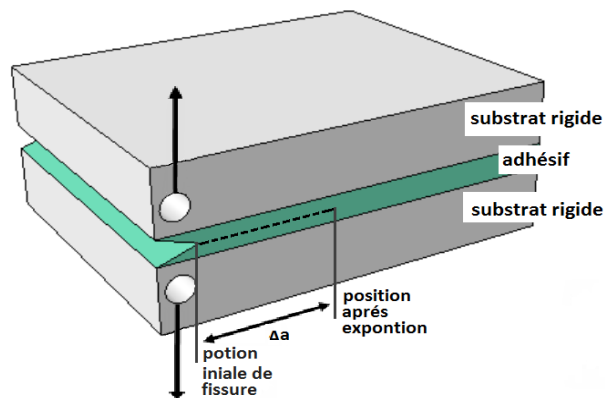


Figure I.13 : Test du clivage aux coins (à déplacement imposé).

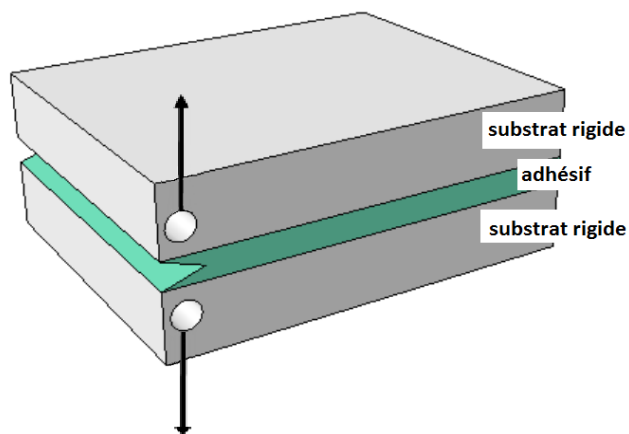


Figure I.14 : schéma du mode I (ouverture en traction).

I.5.1.5. Teste de torsion :

Les essais de torsion sont effectués sur laboratoire, La machine d'essai utilisée a été conçue au laboratoire [31] Elle est représentée dans sa configuration cylindre/plaque sur la Figure I.15.

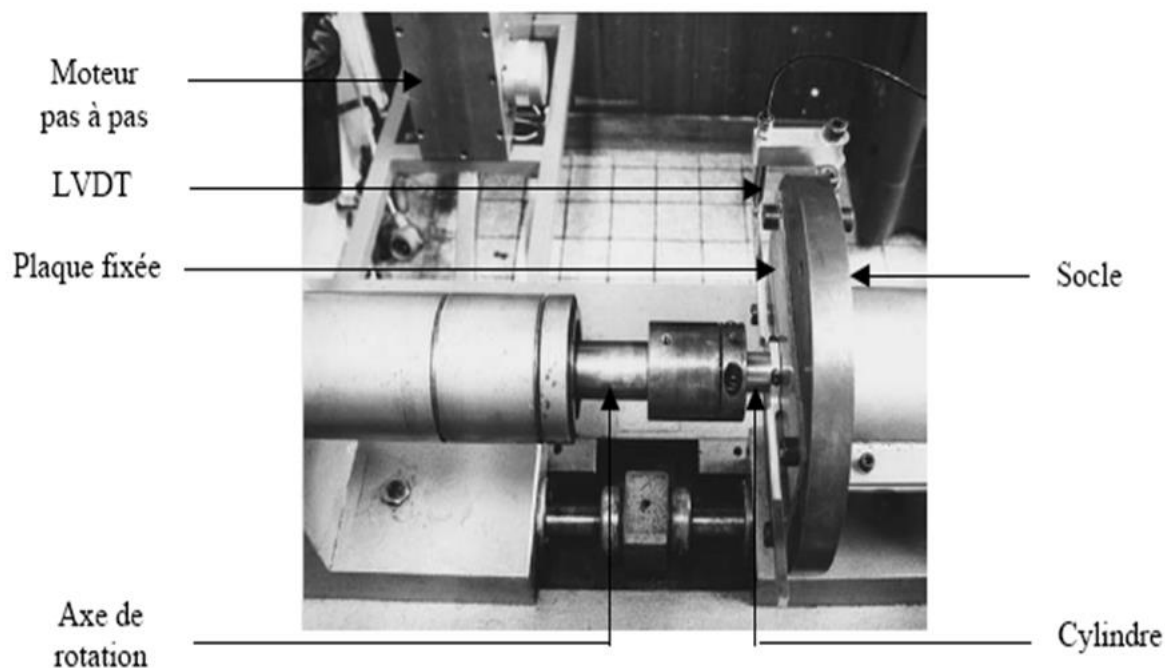


Figure I.15 : Dispositif de test en torsion des assemblages gras collés.

Le principe est le suivant : un axe de rotation est emmanché dans l'extrémité du cylindre D'aluminium tandis que la tôle d'acier est fixée sur un socle, Le couple est appliqué par un système de bras de levier actionné par un moteur pas à pas et mesuré par un ensemble de jauges de déformation placées derrière le socle de la machine.

Le système de mesure de l'angle de rotation est constitué d'un capteur LVDT (Linear Voltage Differential Transformer) mesurant le déplacement relatif de deux tiges : l'une située sur le socle (fixe) et l'autre sur le cylindre à une faible distance du joint de colle.

Un pilotage électronique permet le contrôle de la vitesse moteur ainsi que l'enregistrement du couple, M , et du déplacement du LVDT, δ , entre le début du chargement et la rupture du joint, La fréquence d'acquisition est fixée à 5 Hz pour notre étude, Les incertitudes absolues sur la mesure du couple et du déplacement du LVDT ont été estimées à :
 - $\Delta M = \pm 0,2 \text{ Nm}$ pour le couple , - $\Delta \delta = \pm 7 \mu\text{m}$ pour le LVDT.

De ces grandeurs expérimentales seront déduites des courbes contraintes/déformations, et par voie de conséquence les grandeurs suivantes : le module élastique, la contrainte et la déformation à rupture.

I.5.2. Comportement physico-chimique :

Les adhésifs structuraux (à haut performance), présentent des propriétés physico-chimique qui évoluent dans le temps en fonctions de l'environnement auxquels ils sont soumise, ces phénomènes de vieillissement sont susceptibles d'affaiblir le joint de colle ce qui doivent donc être pris en compte dans la durabilité des assemblages les plus importantes propriétés physicochimique sont :

I.5.2.1. Résistance à l'eau et l'humidité :

L'eau et un agent de dégradation le plus crainte pour les collages il peut être soit a la phase liquide ou vapeur, il peut pénétrer aux niveau de la tranche du joint comme il peut être adsorbé à la surface et provoque le décollement, et si la colle à émulsion qui contiennent des tensioactifs, leur dégradation se fait par ramollissements(Figure I-16) donc on conclu que la résistance à l'eau, dépend du type de colle et beaucoup du traitement de surface[32].

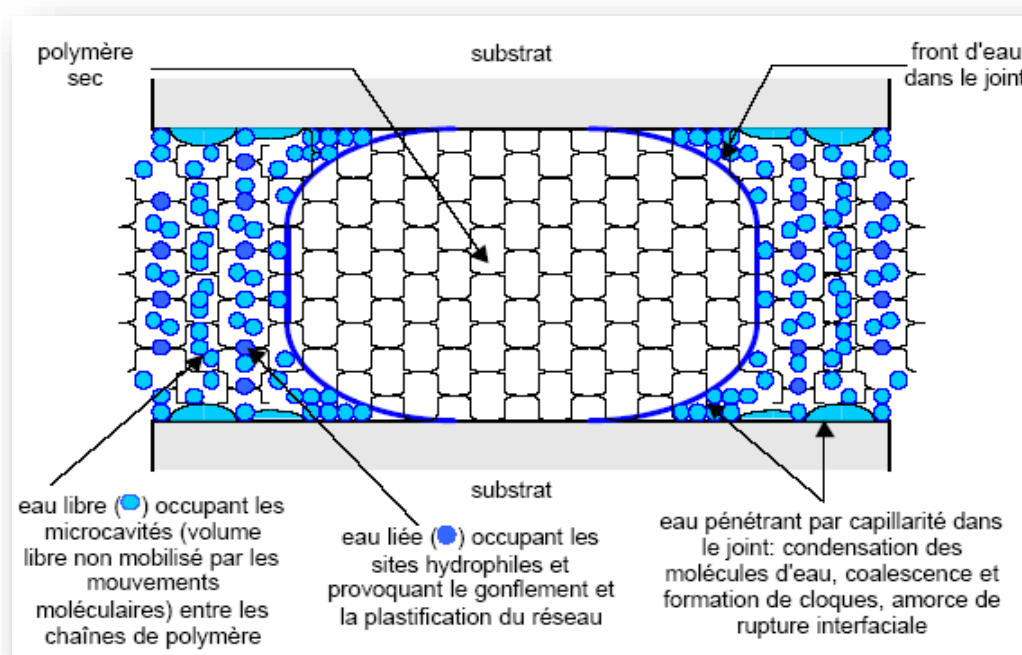


Figure I.16 : Les différents modes de pénétration de l'eau dans un assemblage collé.

I.5.2.2. Résistance à la chaleur ou au froid

La résistance à la chaleur des adhésifs est limitée, elle est de 100 à 150 °C pour la plus part des adhésifs structuraux, et comprise entre 200 à 300°C pour les adhésifs thermostable.

La chaleur influe toujours sur la nature de dégradation, l'adhésif peut se dégradé par ramollissions si la température est élevée ou par cassants si la température est très faible.

I.5.2.3. Résistance au produit chimique

Les différents produits chimiques qui sont sensibles aux joints collés sont : les produits véhiculés, les fluides de dégivrage, huiles, graisses, gras, acides, ces produits peuvent migrer et venir à la surface des pièces au contact du fluide de colle et réduire ainsi considérablement les forces d'adhésion.

I.5.3. Défaut du collage

Lors de la réalisation d'un assemblage collé, de nombreux types de défauts sont susceptibles d'être créés. Ces défauts sont évidemment des sites préférentiels pour l'amorçage de la rupture. La Figure I-17 représente les défauts typiques d'un assemblage collé.

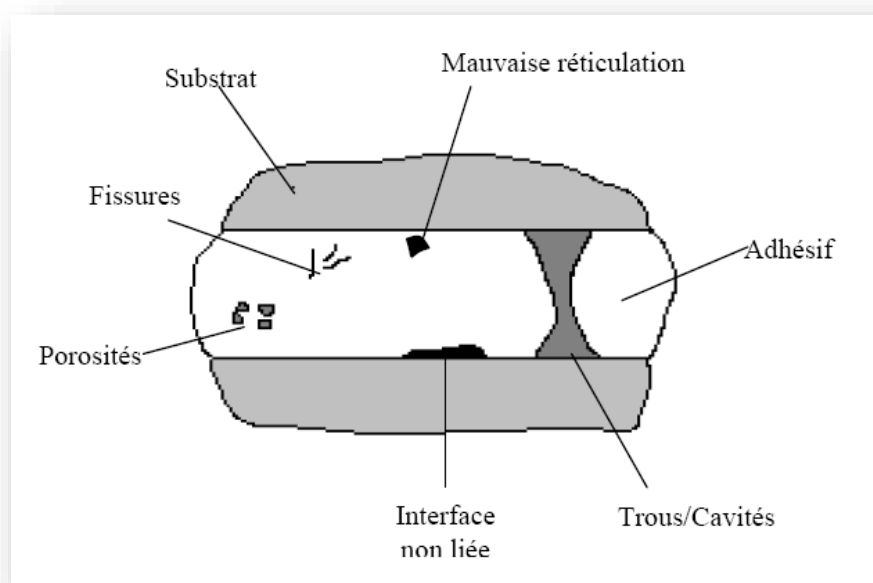


Figure I-17 défauts typiques d'un assemblage collé.

La porosité est causée par le départ de produits volatils et l'existence de bulles d'air au cours de la réticulation. La mise sous pression de l'adhésif au cours du cycle de cuisson est censée réduire ce phénomène. De même, la formulation des adhésifs modernes permet de réduire la quantité de volatils créés au cours de la réticulation.

Avec, La concentration, en une région donnée, de porosités peut conduire à la création de trous ou cavités. Ces trous peuvent aussi s'expliquer par une quantité insuffisante d'adhésif.

Si elles sont localisées à l'interface, les cavités créent des interfaces non liées qui peuvent aussi s'expliquer par une mauvaise préparation de surface du substrat. Il est évident que ces types de défauts sont des zones privilégiées pour la dégradation de l'interface par l'eau ou par l'oxygène. Les fissures au sein de l'adhésif sont dues à l'action de contraintes thermiques au cours de la réticulation. Enfin, les zones de mauvaise réticulation peuvent s'expliquer par un temps de réticulation insuffisant.

I.6. Avantages et inconvénients du collage :

L'utilisation croissante du collage dans l'industrie est due à ses nombreux avantages devant des méthodes classiques d'assemblage. Toutefois, le choix de cette méthode d'assemblage comporte aussi certain inconvénient qui limite encore son application.

1.6.1. Avantages :

- Assemblage des matériaux de nature différente par exemple : métal sur verre, métal sur composite, il permet aussi d'élargir les possibilités de conception de matériaux.
- Assemblage de très petites pièces telles qu'en micromécanique, composants électroniques.
- L'abaissement de poids, ce qui permis par exemple d'alléger 20% les pièces d'avion par rapport aux autres procédé à solidité égal et remplacer ainsi les métaux par matériaux composite.
- Une répartition régulière des contraintes, en évitant les concentrations de contraintes, ce qui n'est pas le cas pour les autres types d'assemblages (rivet, vis).
- Meilleure méthode d'assemblage pour les pièces de révolutions avec une bonne résistance aux couples.
- Offre un meilleur aspect visuel par réalisation des joints non visible et encore améliore l'aérodynamisme en aéronautique
- Simplifier les assemblages par de trous à percer pour les rivets ou vis, tolérance de surface plus larges, pas d'épaulement, bride, clavette ou goupille en mécanique. Mais il faut cependant faire une préparation des surfaces avant collage.
- Les joints collés peuvent être à volonté : conducteur avec des charges conductrices comme il peuvent être isolants de la chaleurs ou de l'électricité, souple avec des bases

polymères ou élastomères, ce qui incidemment permet l'assemblage de matériaux ayant de coefficient de dilation très différent comme par exemple : métaux sur verre, il peuvent être très aussi rigide avec des époxydes, il contribuent à rigidifier les pièces.

I.6.2. Inconvénients :

Le plus sérieux inconvénient jusqu'à ces dernières années était que les techniques de collage étaient mal connues chez les industriels, ingénieurs, bureaux d'études et architectes, parce qu'ils ne les avaient pas étudiés, et parce que le collage à toujours un aspect mystérieux, on ne sait pas pourquoi et comment ça colle, on ne voit pas comment ça colle, on ne sait pas comment calculer un joint collé, alors qu'avec un vis ou un boulon on à confiance, c'est une technique utilisée depuis des siècles, il existe maintenant une science ou une technologie du collage, qui permet de donnée des calculs et dimensionner les pièces et les joints, de contrôler les collages par diverses méthodes.

- Il nécessite une bonne préparation des surfaces des métaux (surfaces plane, propre et traitée), il nécessite aussi une qualification de la part des ouvriers, un contrôle de la part de la maîtrise et une formation adéquate
- La durabilité des adhésifs varie de 5 à 40 ans suivant les types d'adhésifs, l'environnement et la sollicitation.
- Mal travailler en traction pure et clivage ainsi le pelage car les efforts sont trop concentrés sur de petites surfaces.
- Une longue durée de durcissement par fois de 10 à 20heures à température ambiante.
- La nécessité des fois de bonne préparation de surface, car le collage est sensible à l'humidité et au risque de corrosion.
- Le choix d'un adhésif pour un collage donné est un problème complexe car il n'existe pas un adhésif universel qui colle tous, d'autre part parce qu'il faut tenir compte de vingt paramètres différents de même caractéristique chimique et physique de l'adhésif.

I.7. Historique des différentes méthodes d'analyse des joints à simple recouvrement :

La répartition des contraintes peut être obtenue par une analyse par éléments finis (MEF) ou par des méthodes analytiques. Pour les géométries complexes, une analyse par éléments finis est préférable. Cependant, pour une réponse rapide et facile, une analyse par la technique de calcul de taux de restitution d'énergie est plus appropriée. Les joints par recouvrement ont été intensivement étudiés au cours des dernières années et de nombreux modèles analytiques ont été proposés. Le concepteur est donc confronté à une difficulté de longue liste de modèles.

La plupart de ces méthodes sont à deux dimensions ce qui est généralement suffisant car les contraintes dans le sens de la largeur sont sensiblement inférieures à celles dans la direction du chargement. Pour le cas des deux plaques collés, la plupart des analyses sont dans le domaine élastique linéaire et pour les plaques et l'adhésif vu que le comportement non-linéaire d'un matériau rend la solution trop complexe, l'analyse doit être résolue numériquement, le tableau ci-dessous représente un résumé des principales analyses dans le domaine de collage et les conditions d'applicabilité ainsi que les composantes des contraintes pris en compte.

Ce résumé commence par les simples analyses classiques et leurs limites de Völkersen [33] et Goland et Reissner [34]. Seuls les joints à recouvrement avec des plaques plats sont discutés, mais il ya des analyses pour d'autres types de joints comme celles de Lubkin et Eissner [35], Adams et Peppiatt [36], et Nemes et al. [5] pour les joints tubulaires.

Des analyses à deux dimensions, élastiques linéaires, bidimensionnelles, élasto-plastique, tridimensionnelles sont également présentées.

Le présent résumé est consacré à l'étude de l'état de contraintes-déformations des différents modèles, mais il convient de mentionner la mécanique de rupture avec des approches utilisées. Par exemple, la résistance à la propagation des fissures dans un joint d'adhésif peut être quantifiée en termes de l'énergie critique G_c . Toute fois, G_c ne peut pas être considéré comme l'unique paramètre de liaison car il est en fonction du rapport en mode de chargement d'un joint d'adhésif (modes I, II et III).

	Material linearity				Adherends				Adhesive stresses			Solution	
	Adhesive		Adherend		Isotropic	Composite	Similar	Dissimilar	σ_x	σ_y	τ_{xy}	Closed-form	Numerical
	Linear	Nonlinear	Linear	Nonlinear									
									Thickness	Material			
Volkersen	X		X		X		X				X	X	
Goland and Reissner	X		X		X		X			X	X	X	
Wah	X		X		X	X	X				X	X	X
Hart-Smith	X	X	X		X		X			X	X	X	
Pirvics	X		X		X		X	X	X	X	X		X
Grimes and Greimann	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Renton and Vinson	X		X		X	X	X	X	X	X	X		
Srinivas	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	
Allman	X		X		X	X	X			X	X	X	
Ojalvo and Eidinoff	X		X		X		X		X	X	X	X	
Delale et al.	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
Bigwood and Crocombe	X		X		X		X	X	X	X	X		X
Bigwood and Crocombe	X	X	X		X		X	X	X	X		X	
Cheng et al.	X		X		X		X	X	X	X	X		X
Crocombe and Bigwood	X	X	X	X	X		X	X	X	X			X
Adams and Mallick	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
Tong	X	X	X		X		X			X	X	X	
Yang and Pang	X		X		X	X	X	X	X	X	X		X
Frostig et al.	X		X		X	X	X	X	X	X	X		X
Sawa et al.	X		X		X		X	X	X	X	X		X
Mortensen and Thomsen	X	X	X		X	X	X	X			X		
Adams et al.	X	X	X	X	X		X					X	
Wang et al.	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X
Smeltzer and Klang	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X

Tableau I.2 : différentes méthodes d'analyse

I.7.1. Analyses élastiques linéaires à deux dimensions

I.7.1.1. Analyses linéaires élastiques

L'analyse la plus simple considère une forme de joint le plus utilisé qui peut être trouvé dans la pratique, le joint à simple recouvrement (JSR). Dans cette analyse, l'adhésif est supposé se déformer en cisaillement et que les plaques collées étant rigide, la contrainte de cisaillement adhésif est constante sur toute la longueur de recouvrement (Figure 1-18.a), elle est donnée par la relation :

$$\sigma = P/bl \quad (I-9)$$

Où (P) est la charge appliquée, (b) est la largeur du joint et (L) est la longueur de recouvrement.

La valeur de la contrainte de cisaillement peut être interprétée comme la moyenne contrainte de cisaillement agissant sur la couche adhésive, cette analyse n'est pas très réaliste en raison de nombreuses simplifications, mais elle est encore citée comme base pour décrire la

résistance au cisaillement de l'adhésif dans de nombreux tests tels que dans les normes ASTM et ISO.

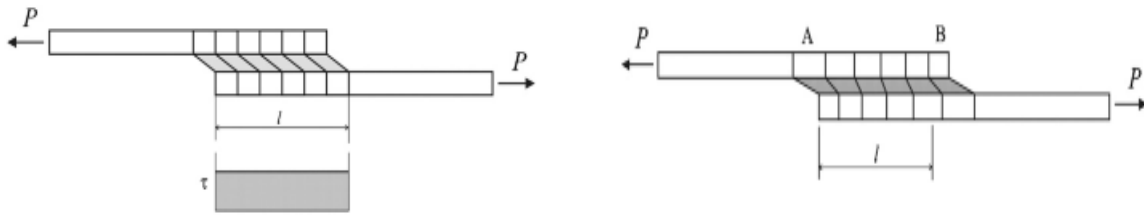


Figure I.18 : a) Déformations avec des plaques rigides b) Déformations avec des plaques élastiques

I.7.1.2. L'analyse de Volkersen :

L'analyse de Volkersen a introduit le concept de différentiel cisaillement, illustré dans la Figure I-18.b.

Il a été supposé que l'adhésif se déforme uniquement en cisaillement mais que les surfaces à coller peuvent se déformer en tension, comme on peut le voir sur la Figure I-19, parce qu'ils sont considérés élastique et non rigide, la contrainte de traction dans la surface adhésive supérieure est maximale en A et (voir Figure I-19) diminue jusqu'à zéro à B (surface libre), de sorte que la déformation se réduit progressivement de A vers B, la réduction de la contrainte dans les surfaces à coller le long du recouvrement et la continuité de l'interface adhésif/adhérent causent une distribution de déformation en cisaillement non uniforme dans la couche adhésive.

La contrainte de cisaillement est maximale au niveau des extrémités de recouvrement et est beaucoup plus faible au milieu, comme le montre la Figure I-20. Cependant, cette analyse ne tient pas compte de l'effet de flexion causée par le chemin excentrique de la charge du Joint à simple recouvrement.

La solution est plus représentative pour un joint à double recouvrement (JDR) que pour un JSR. Puisque pour le JDR, la flexion des surfaces à coller n'est pas aussi importante comme dans le JSR.

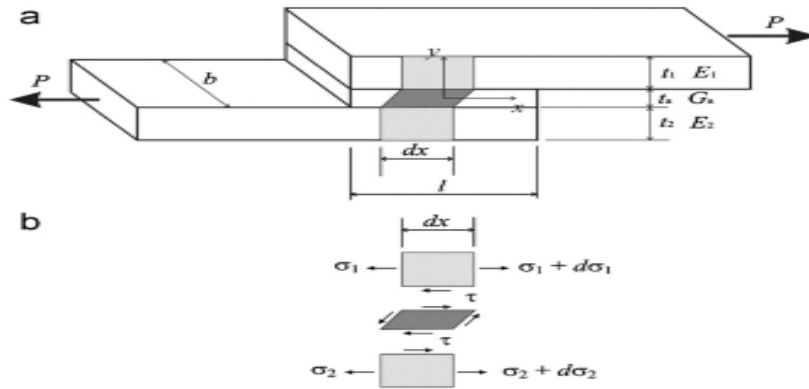


Figure I.19 : Analyse du joint à simple recouvrement par Volkersen

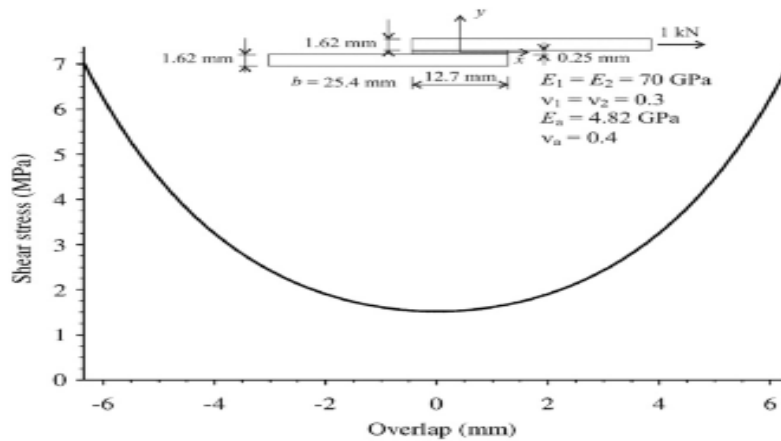


Figure I.20 : Contraintes de cisaillement par l'analyse de Volkersen avec des plaques en aluminiums

I.7.1.3. L'analyse de Goland et Reissner

le chemin excentrique de la charge dans un joint à simple recouvrement provoque un moment de flexion (M), et une force transversale (V) appliquée aux extrémités du joint en plus de la charge de traction appliquée par unité de largeur (P), comme le montre la Figure I-21.

Le premier qui a pris en considération ces effets était Goland et Reissner [34]. Ils ont utilisé un facteur de moment de flexion (k) et un facteur de force transversale (k₀) qui relie la charge de traction appliquée par unité de largeur (P) pour le moment de flexion (M) et la force transversale (V).

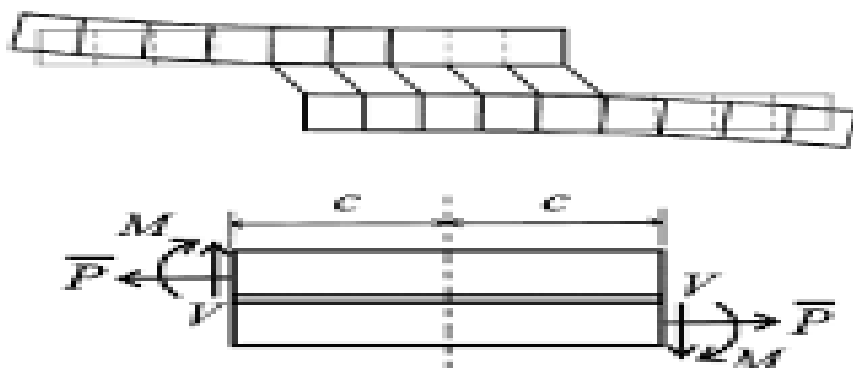


Figure I.21 : Model de Goland et Reissner

I.7.1.4. Limites des analyses classiques

Il ne fait aucun doute que le travail tôt fait principalement par Völkersen [33] et Goland et Reissner [34] a été un grand pas en avant dans l'analyse des contraintes des joints collés. Néanmoins, leur travail a eu plusieurs limites.

- (1) Ils ne tiennent pas compte des variations des contraintes adhésives par la direction de l'épaisseur, en particulier contraintes à l'interface qui sont importantes lorsque la rupture survient à proximité de l'interface.
- (2) La contrainte de cisaillement maximale se produit au niveau des extrémités du joint, comme le montre la Figure I-20. L'analyses qui ignorent l'état de contrainte sans surestimer le contrainte aux extrémités de recouvrement et ont tendance à donner l'échec conservatrice charger des prédictions.
- (3) Enfin, les surfaces à coller sont considérés comme des poutres minces, en ignorant le cisaillement à travers l'épaisseur et les déformations normales. La contrainte de cisaillement est particulièrement importante en cisaillement doux comme surfaces adhésives composites.

I.7.2. Analyses élasto-plastique à deux dimensions

Dans la section précédente, les analyses supposent un comportement élastique pour la couche de l'adhésif, ainsi que pour les plaques, ces analyses sont suffisamment

précises pour les adhésifs fragiles parce qu'ils ont peu ou aucune déformation plastique, lorsque l'adhésifs ayant une forte contrainte plastique telle que un caoutchouc époxy, la plasticité d'adhésif doivent être inclus afin de simuler correctement la contraintes et leur distributions, matériau non-linéarité due à un comportement plastique n'est pas souvent inclus en raison de la complexité accrue de la formulation mathématique. La plupart des analyses présentés ci-dessous supposent un comportement plastique de la colle.

I.7.2.1. Analyse de Hart-Smith

L'une des œuvres les plus importantes compte tenu la plasticité de l'adhésif a été fait par Hart-Smith pour Joint à simple recouvrement [39] et joint à double recouvrement (JDR). Hart-Smith a développé les analyses de Völkersen [33] et De Bruyne [38] pour JDR et le travail effectué par Goland et Reissner [34] pour JSR, pour laquelle il a présenté une expression alternative du facteur de moment de flexion. La solution Hart-Smith représente la plasticité de la colle, si la plasticité d'adhésif est considérée, la prédiction de résistance du joint est plus élevée que pour une analyse élastique.

La résistance maximale du joint à recouvrement a été calculée en utilisant la contrainte maximale de cisaillement comme critère de défaillance.

Toute différence de rigidité entre les plaques à coller provoque une diminution de la résistance du joint.

Pour caractériser le comportement d'adhésif, Hart-Smith a choisi un modèle élasto-plastique de telle sorte que la contrainte ultime de cisaillement et la déformation dans le modèle sont égales à la contrainte ultime de cisaillement et la déformation de l'adhésif, les deux courbes ayant la même énergie de déformation.

I.7.3. Analyse tridimensionnelle

Les méthodes qui ont été présentés jusqu'ici sont à deux dimensions, en supposant que les joints d'adhésives étaient en état de contraintes planes ou déformations planes dans le plan perpendiculaire à la direction de largeur, mais en négligeant les contraintes dans le sens de largeur causée par le coefficient de Poisson, le premier à considérer ces effets étaient Adams et Peppiatt [40] et plus récemment Oterkus et al. [41]. La contrainte de cisaillement dans l'adhésif et la contrainte normale agissant suivant la largeur et la direction longitudinale

ont été examinés par Adams et Peppiatt [40], dans la couche d'adhésif, la contrainte de cisaillement est considérée et l'effet du moment de flexion est négligé.

Deux méthodes numériques ont été présentées pour résoudre certaines équations, une solution analytique approximative (en supposant que la contrainte longitudinale normale dans les plaques collées est constante sur toute la largeur du joint) et une solution de différences finies. Les deux méthodes étaient en accord.

Adams et Peppiatt [40] a montré, sans tenir compte de la flexion du joint d'adhésif, qu'il existe des contraintes dans le sens de la largeur. Cependant, ces contraintes sont plus petites que les contraintes dans la direction longitudinale et une analyse bidimensionnelle est suffisante pour la plupart des cas, il ya une contrainte de traction transversale maximale (en face la largeur) de la section du milieu. Ceci explique pourquoi lors de l'essai en composites unidirectionnels de tension, les fissures longitudinales peuvent se produire dans l'échantillon, des résultats similaires ont été obtenus par Oterkus et al [41].

References bibliographiques

- [1] ADAMS RD. WAK WC. Structure adhesive joints in engineering London: Elsevier Applied Science Publishers Ltd.; 1984
- [2] EYRING, “Viscosity, plasticity and diffusion as examples of absolute reactions rates”, H. Eyring, J. Chem. Phy., 1936, 4, 283–291.
- [3] ADAMS “Structural adhesive joints in engineering”, R. D. Adams; W. C. Wake, 1984, Elsevier Appl. Sci. Publishers, London.
- [4] ANISKEVICH “Prediction of creep of polymer concrete”, K. Aniskevich et J. Hristova, J. Appl. Polym. Sci., 1999, 71, 1949-1952.
- [5] PHILIPPE COGNAN mécanisme et classifications des colles Article BM7615
- [6] PHILIPPE COGNAN généralité et caractéristique Article BM 7620
- [7] G. VINCHES colle et adhésion
- [8] JEAN CLAUDE REVOT Le collage : une technique d’assemblage industriel sur site : [www . agmat . asso .fr](http://www.agmat.asso.fr)
- [9] PETIT J.A. Bases scientifiques de l’assemblage par collage Matériaux et Techniques, 1992, 4-5, pp 3-10
- [10] MAC BAIN J.W., HOPKINS D.G. On adhesives and adhesive action Journal of Physical Chemistry, 1925, 29, 2, pp 188-204
- [11] MONTERNOT H., BENAÏET D., ANCENAY H. Guide du collage du CETIM Paris: Lavoisier, 1978 - 232p
- [12] DERYAGIN B.V., KROTOVA N.A. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1948, 61, p 849
- [13] SKINNER S.M., SAVAGE R.L., RUTZLER I.E. Electrical phenomena in adhesion: electron atmospheres in dielectrics Journal of Applied Physics, 1953, 24, p 438
- [14] PHILIPPE COGNAN Caractéristique – mise en œuvre de la colle par article BM 7616
- [15] GRIFFITH A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids Philosophical Transaction of the Royal Society (London), 1920, A221, pp 163-198
- [16] WILLIAMS M.L. On the stress distribution at the base of a stationary crack Journal of Applied Mechanics, 1957, 79, pp 109-144

- [17] HAIDARA H. Mécanismes fondamentaux du mouillage et de l'adhésion JADH'2001 (8-12 Octobre 2001 ; Lège-Cap Ferret) Société Française du Vide - 11èmes Journées d'Etude sur l'Adhésion, 2001 - Session de Formation - pp 1-19
- [18] CARLACH D., HEMERY Y. Etude prospective sur le collage en France Etude réalisée par Développement et Conseil pour le compte de la Digitp/Simap, décembre 2002, 237p <http://www.industrie.gouv.fr/pdf/collage.pdf>
- [19] LAGRACIE I., SAINT-DRENANT S. Le collage structural Etude réalisée en décembre 1998 http://www.utc.fr/dess/gti/accueil/05_techno_cles/collage_structural/collage.htm
- [20] YOUNG R.J., LOVELL P.A. Introduction to Polymers - Second Edition Londres: Chapman & Hall, 1991, 443p
- [21] PANGRLE “Low temperature relaxation of DGEBA epoxy resins : a thermally stimulated discharge current (TSDC) study”, S. Pangrle, C. S. Wu et P. H. Geil, Polym. Comp., 1989, 10 (3), 173-182.
- [22] PECHERAUX “Influence de la nature de la surface métallique sur la formation d'une interphase dans un système métal-époxyde. Conséquence sur le comportement des joints collés”, V. Pecheraux, Thèse de Doctorat de l'Université de Haute Alsace, 1990.
- [23] HILAIRE “Etude du vieillissement thermique d'une résine polyimide thermostable, l'IP 960”, B. Hilaire, Thèse de Doctorat de l'E.N.S.A.M., Paris, 1991.
- [24] Lu “Thermal degradation of LC epoxy thermosets”, M. G. Lu, M. J. Shim et S. W. Kim, J. Appl. Polym. Sci., 2000, 75, 1514-1521.
- [25] HONG “The modification of epoxy/metal interphases by adsorbed contaminants”, S. G. Hong, N. G. Cave et F. J. Boerio, J. Adhesion, 1992, 36, 265-279.
- [26] MOSS P.J., BATCHELAR M.L. Structural bonding using epoxy resin adhesives New Zealan Engineering, 1975, 15 février 1975, pp 45-52
- [27] SUAREZ J.C., DIEZ DE ULZURRUN I., BIEZMA M.V., et al. Case studies in adhesives selection Journal of Materials Processing Technology, 2003, vol. 143-144, pp 219-
- [28] WILLIAMS M.L., LANDEL R.F., FERRY J.D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glassforming Liquids Journal of the American Chemical Society, 1955, 77, 14, pp 3701-3707
- [29] GIBBS J.H., DI MARZIO E.A. Nature of the glass transition and the glassy state Journal of Chemical Physics, 1958, 28, pp 373-383
- [30] VERDU J. Vieillissement des Plastiques Paris : AFNOR Technique, 1984

- [31] DE'NEVE B. "Etude du vieillissement hygrothermique de joints collés adhésif époxydique/aciers : relations entre l'évolution des propriétés mécaniques et les modifications physico-chimiques de l'adhésif et de l'interface", Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, (1993).
- [32] FERNANDEZ E., VERCHERE D., BALLADON, "Vieillissement hygrothermique des résines époxydiques modifiées à l'impact pour le collage d'aciers revêtus", Rapport IRSID RC 94.602, (1994)
- [33] VOLKERSEN O. *Luftfahrtforschung* 1938;15:41.
- [34] GOLAND M, Reissner E. *J Appl Mech* 1944;66:A17.
- [35] LUBKIN JL, Reissner E. *Trans ASME* 1956;78:1213.
- [36] ADAMS RD, Peppiatt NA. *J Adhes* 1977;9:1.
- [37] NEMES O, Lachaud F, Mojtabi A. *Int J Adhes Adhes* 2006;26:474.
- [38] DE BRUYNE NA. *Aircraft Eng* 1944;16:115.
- [39] HART-SMITH LJ. NASA Contract Report 1973, NASA CR-112235.
- [40] ADAMS RD, Peppiatt NA. *J Strain Anal* 1973;8:134.
- [41] OTERKUS E, Barut A, Madenci E, Smeltzer III SS, Ambur DR. *Int J Solid Struct* 2006.

I. Comportements mécaniques des joints collés

Les assemblages collés sont d'une très grande efficacité. Ils permettent de distribuer les efforts transférés sur une plus grande surface. Nous parlerons alors de mode continu de transfert de charge. Ces assemblages collés sont tels que le joint de colle travaille en cisaillement dans son plan. Les géométries de base sont le recouvrement simple (figure I.1.a) ou le recouvrement double (figure I.1.b).



Figure I.1 : (a) : Liaison simple recouvrement (single-lap joint),
(b) : Liaison double recouvrement (double-lap joint).

I.1. Approches analytiques :

Les premiers calculs ont été effectués par Aronovljevic en 1909 pour des colles qui travaillent élastiquement et en cisaillement. Deux types d'analyse se dégagent ensuite :
Les analyses uniaxiales et les analyses biaxiales. [1]

Nous présentons alors les principales analyses qui permettent d'aboutir à la répartition des contraintes dans la couche de colle. Nous nous appuyerons sur la géométrie du joint à simple recouvrement avec les notations suivantes (figure I.2).

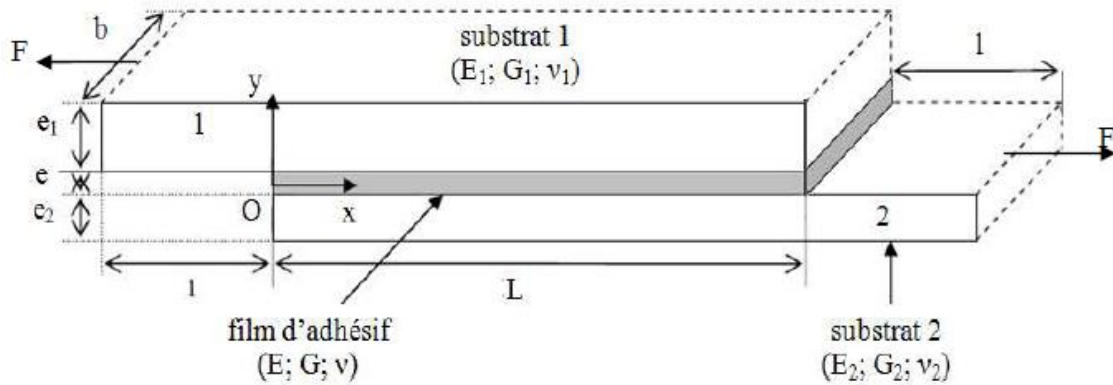


Figure I.2 : géométrie du joint en simple recouvrement

La jonction est chargée par un effort de traction F aux deux extrémités. L'origine du repère O est prise au début du substrat 2, sur la ligne moyenne. Nous indiquons par j les paramètres mécaniques ou géométriques ayant trait au substrat j . pour l'adhésif, aucun indice ne sera employé, pour ces mêmes paramètres. Nous notons respectivement N_0 , V_0 , et M_0 les efforts normaux, efforts tranchants et moments dans le substrat j . nous notons respectivement S (i.e. : σ_{yy}) et T (i.e. : τ_{xy}) les contraintes de pelage et de cisaillement dans l'adhésif. Une telle jonction sera dite équilibrée quand : $E_1 = E_2$ et $e_1 = e_2$ et déséquilibrée dans le cas contraire.

I.1.1. Analyse uniaxiale

Volkersen [2] dans son analyse en 1938 sur l'état de contrainte dans un joint collé à simple recouvrement considère que l'adhésif et les adhérents sont parfaitement élastiques. Il néglige les contraintes de cisaillement dues à la flexion des adhérents et s'intéresse à la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche de colle. Il montre alors que la contrainte de cisaillement est maximale au bord du joint et minimale au centre (figure I.3) :

$$T_{xy}(x) = 0,5\eta \frac{\cosh(\eta(0,5L - x))}{b \sinh(0,5\eta L)} f$$

où

$$\eta = \sqrt{\frac{2G}{e \cdot e_1 \cdot E_1}}$$

En notons T_{moy} la contrainte de cisaillement moyenne appliquée, la contrainte maximale T_{max} s'écrit :

$$T_{\text{max}} = \frac{\eta L}{2 \tanh(\eta L)} T_{\text{moy}}$$

où

$$T_{\text{moy}} = \frac{f}{bL}$$

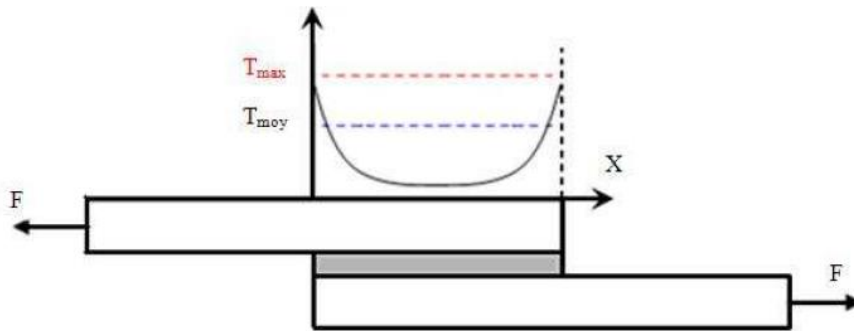


Figure I.3 : Répartition de la contrainte de cisaillement

Il faut donc remarquer que $\eta L \ll 1$ implique :

$$\begin{cases} f_{\text{critique}} = bLT_{\text{moy}} \\ T_{\text{max}} = T_{\text{moy}} \end{cases}$$

$\eta L \gg 1$ implique :

$$\begin{cases} T_{\max} = \frac{\eta L}{2} T_{\text{moy}} \\ f_{\text{critique}} = \frac{2b}{\eta} T_{\text{moy}} \end{cases}$$

Par conséquent pour $\eta L \gg 1$ la charge critique ne dépend plus de la longueur de recouvrement et il existe donc une longueur optimale, L_{opt} telle que :

$$L_{\text{opt}} = 2/\eta$$

Cette analyse néglige le fait que pour un joint à simple recouvrement, le chargement est excentrique et qu'il existe donc un moment fléchissant, qui a pour effet de faire tourner le joint. Cette rotation est à l'origine de l'apparition de contraintes normales dans le joint en plus des contraintes de cisaillement.

I.1.2. Analyses biaxiales

Elles présentent les travaux existants qui prennent en compte la flexion des substrats du fait de l'excentricité du chargement (figure I.4). Un moment de flexion en bord de joint M_0 sera alors introduit. L'adhésif est représenté par une infinité de ressorts travaillant en cisaillement et une infinité de ressort travaillant en traction-compression. Les substrats sont considérés comme des plaques dans la plupart des cas.

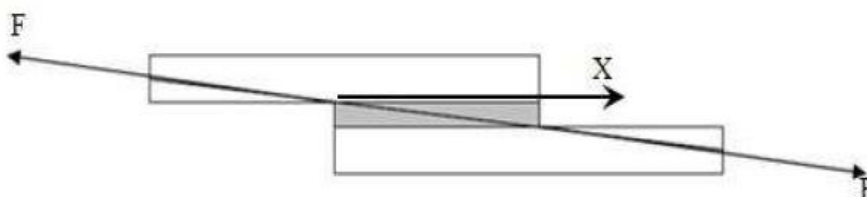


Figure I.4 : Excentricité du chargement.

Goland et Reissner tiennent compte du moment de flexion dans leur analyse [3]. Ils supposent que l'adhésif et les adhérents sont parfaitement élastiques et que la profondeur est grande devant les épaisseurs des adhérents. De cette sorte ils positionnent le problème en contraintes planes. Ils supposent de plus que les contraintes normales dans la colle sont négligeables. De même la contrainte normale dans la colle dans la direction x (figure I.4) est négligeable et la contrainte de cisaillement T ne varie pas dans l'épaisseur. Ils procèdent en deux étapes ; en déterminant dans un premier temps la répartition du chargement sur la section rectangulaire du joint puis dans un second temps les contraintes dans la colle. Pour cela, ils considèrent les substrats et l'adhésif comme un seul bloc. Ils obtiennent des solutions pour deux cas particuliers (cas limite) :

- La couche de colle est fine et de rigidité similaire aux substrats, ce qui se traduit par la relation $e/E \ll e_1/E_1$.
- La couche de colle est fine et ses déformations ne sont pas négligeables ce qui se traduit par la relation $e/E \gg e_1/E_1$.

C'est ce dernier cas qui s'applique aux assemblages métal/colle/métal.

Ils définissent un facteur de moment fléchissant K_{GR} qui relie le moment de flexion M_0 à la charge de traction F appliquée à l'assemblage et un facteur de force k' pour relier l'effort tranchant V_0 en fin de recouvrement à cette même charge de traction.

L'assemblage est équilibré, afin de tenir compte de la flexibilité des substrats et de l'adhésif.

$$M_0 = 0,5 K_{GR} e_1 F$$

$$V_0 = f K_{GR} \sqrt{\frac{3(1 - V_1^2) F}{b E_1 e_1}} = 2 K' \frac{e_1}{L}$$

où

$$K' = 0,5 \frac{L}{e_1} \sqrt{\frac{3(1 - V_1^2)}{E_1 e_1 b}} K_{GR}$$

Ils obtiennent ainsi dans le second cas limite :

$$\tau(x) = -\frac{1}{4bL} \left[(1 + 3K) \frac{\beta L}{2e_1} \frac{\cosh\left(\frac{\beta x}{e_1}\right)}{\sinh\left(0.5 \frac{\beta x}{e_1}\right)} + 3(1 - K_{GR}) \right] F$$

où

$$\beta^2 = 8 \frac{G}{E_1} \frac{e_1}{e}$$

Les contraintes maximales se situent aux extrémités du joint et ont pour valeur :

$$\tau_{\max} = \left(\frac{1 + 3K_{GR}}{4} \eta L \coth(\eta L) + \frac{3(1 - K)}{4} \right) T_{\text{moy}}$$

Dans le cas de substrats indéformables ($K_{GR} = 1$), la contrainte de cisaillement maximale est deux fois plus importante que la valeur prévue par Volkersen ; d'où l'importance de tenir compte de la rotation du joint.

Hart-Smith [4] a fourni un travail volumineux sur les jonctions collées à simple recouvrement, à double recouvrement, en escalier et biseautées. Ses solutions analytiques incorporent les effets thermiques, les effets de déséquilibre de rigidité. De plus, Hart-Smith s'intéresse au comportement non linéaire de l'adhésif et a développé une approche plastique.

Il considère la colle comme un matériau élastique puis parfaitement plastique au-delà d'une déformation critique (figure I.5).

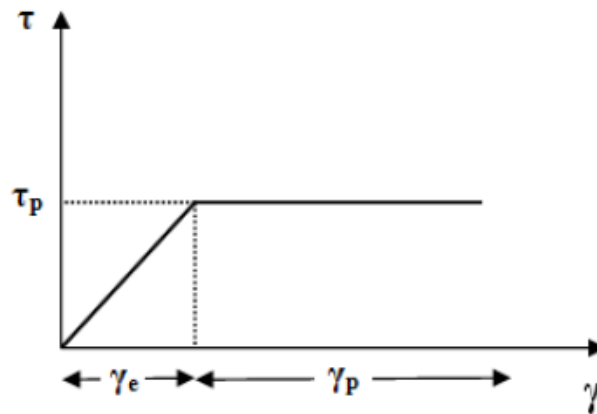


Figure I.5 : Matériau à comportement élastique parfaitement plastique.

Les approches analytiques fournissent des expressions prêtes à l'emploi. L'exactitude de ces formules doit être reliée à la validité des hypothèses simplificatrices faites, vis-à-vis du problème posé. Les facteurs influençant la tenue mécanique d'un assemblage collé en simple recouvrement sollicité au cisaillement sont :

A. La surface de collage

D'une manière générale, la résistance de l'assemblage collé augmente en fonction de la surface de collage. Toutefois, cette progression ne se fait pas d'une manière linéaire et nous avons vu qu'il existait de fortes concentrations de contraintes aux deux extrémités du recouvrement. Ce sont ces concentrations qui gouvernent la résistance mécanique de l'assemblage. Il y a donc lieu d'optimiser les dimensions de l'assemblage pour diminuer les concentrations et ainsi améliorer la tenue mécanique du joint. Deux paramètres conditionnent la surface de collage :

A.1) La longueur de recouvrement :

En pratique la résistance à la rupture du joint croît avec la longueur de recouvrement ; linéairement pour les faibles valeurs de recouvrement, puis de moins en moins rapidement jusqu'à atteindre une valeur optimale. Cette longueur optimale dépend directement de l'épaisseur moyenne des matériaux à assembler.

A.2. La largeur de recouvrement :

Pour un assemblage plan, il n'existe pas d'effets de bords dans le sens de la largeur, la résistance augmente donc proportionnellement à la longueur de recouvrement.

Harth-Smith [4] montre que la capacité de chargement augmente avec la longueur de recouvrement et est constante au-delà d'une certaine longueur. Au dessus de cette longueur, aucune charge plus importante ne peut être transférée. La charge est essentiellement transférée dans deux zones ; celles proches des deux extrémités du joint de colle.

La charge transférée dans la zone intermédiaire, où la colle est élastique, est faible. L'extension des deux zones aux extrémités de la jonction est limitée, et au-delà d'une certaine longueur de recouvrement, cette longueur ne dépend plus de la longueur de recouvrement. La contrainte moyenne est alors définie par :

$$\tau_{\text{moy}} = \left[\left(1 - \frac{d}{L}\right) + \frac{\tanh(0,5\eta_{\text{HS}} d)}{0,5\eta_{\text{HS}} L} \right] \tau_p,$$

avec

$$\eta_{\text{HS}} = \sqrt{\frac{G}{e} \left(\frac{1}{e_1 E_1} + \frac{1}{e_2 E_2} \right)},$$

Et

$$[0,5\eta_{\text{HS}} (L - d) + \tanh(0,5\eta_{\text{HS}} d)]^2 = \tanh^2(0,5\eta_{\text{HS}} d) + 2 \frac{\gamma_p}{\gamma_e}.$$

En faisant l'hypothèse d'un long recouvrement, il vient :

$$(L - d) = \frac{2}{\eta_{\text{HS}}} \sqrt{\tau_p e \left(\frac{\gamma_e}{2} + \gamma_p \right)}$$

La longueur limite de plastification ne dépend donc plus que des caractéristiques mécaniques des matériaux. Plus précisément, la longueur de recouvrement limite au-delà de laquelle il existe une zone élastique est donnée par :

$$(0,5 \eta_{HS} L)_{\text{transition}} = \sqrt{2 \frac{\gamma_p}{\gamma_e}}$$

D'où en considérant les cas où l'adhésif est totalement élastique ou totalement plastique :

- Dans le cas totalement élastique ($0,5 \eta_{HS} L \rightarrow \infty$ et $\gamma_p = 0$), il apparait $T_{\text{moy}} (0,5 \eta_{HS} L \rightarrow \tau_p$ ce qui conduit à la solution de Volskersen (puisque $\eta_{HS} \gg 1$) ;
- Dans le cas totalement plastique ($0,5 \eta_{HS} L \rightarrow 0$), $\tau_0 \rightarrow \tau_p$

Les approches analytiques fournissent de nombreuses expressions qui demandent la validation des hypothèses simplificatrices, comme par exemple les hypothèses de contraintes qui, dans l'épaisseur du film adhésif, sont constantes ou varient linéairement, ou la prise en compte ou non de la rotation de jonction. Les approches numériques permettent d'éviter certaines de ces hypothèses simplificatrices. Cependant, vu les gradients de déformations élevés, un maillage fin est nécessaire. Par conséquent, l'approche numérique demande vite des temps de calcul importants et faire une étude paramétrique devient fastidieux.

A.3. L'épaisseur du joint collé

Les propriétés mécaniques de l'adhésif peuvent varier beaucoup changer entre un état massif et un film d'adhésif dans un joint collé, analytiquement les effets de l'épaisseur sur la tenue mécanique du joint collé restent inexpliqués, d'où l'intérêt des études expérimentales.

O. Mario [5], a étudié l'effet de l'épaisseur sur les caractéristiques mécaniques de l'adhésif et a trouvé pour un adhésif donné qu'au-delà d'une certaine épaisseur les propriétés élastiques de l'adhésif chutent brutalement.

D'après le guide du collage [40], il existe une épaisseur de colle optimale qui fournit la résistance la plus importante, cet optimum varie selon la famille chimique de l'adhésif. Par exemple l'épaisseur optimale de l'époxy se situe entre 0,1 à 1,5 mm.

I.2. Approches numériques

I.2.1. Analyse de Harris et Adams

Harris et Adams [6], se sont intéressés aux modes de rupture d'une jonction à simple recouvrement, en prenant en compte la rotation de la jonction quand elle est chargée. Ils montrent que les facteurs de moments fléchissant de Goland et Reissner [37] ne correspondent pas à ceux trouvés numériquement et ils attribuent les écarts aux hypothèses simplificatrices prises dans ces méthodes analytiques. De plus, ils ont introduit un comportement non linéaire des matériaux. Ils montrent alors qu'un faible degré de plastification des substrats entraîne une concentration de contrainte plus importante au bord du bourrelet de colle, qui peut être à l'origine d'une rupture prématurée de la jonction. Deux types de rupture sont alors mis en évidence au niveau du bourrelet ou entre le substrat et l'adhésif en bord de joint, selon la limite élastique des substrats. Ils montrent de plus que si l'adhésif plastifie, la résistance de la jonction augmente puisque la distribution de contrainte tend à s'uniformiser le long du recouvrement.

I.2.2. Analyse de Tsai et Morton

Tsai et Morton [7], proposent une analyse par éléments finis tridimensionnelle linéaire, incluant les grands déplacements et la présence d'un bourrelet en bord de joint. Par comparaison avec un modèle éléments finis bidimensionnel et le modèle de Goland et Reissner, ils montrent que si la contrainte de cisaillement n'est pas sensible au passage à la troisième dimension, il n'en est pas de même pour la contrainte de pelage. Ils révèlent également qu'une analyse bidimensionnelle en déformation plane est valable pour connaître la distribution de contrainte loin des surfaces libres ($2x/L > 1,1$). Ils confirment de plus que la présence du bourrelet diminue les contraintes maximales de cisaillement et de pelage.

- Utilisation d'éléments finis spéciaux

Amijima et Fujii, présentent un programme informatique qui permet d'étudier les contraintes développées au sein de la jonction collée dans le cas biaxial et élastique. Les substrats sont supposés élastiques et les auteurs se placent dans le cadre de la théorie des poutres. Les auteurs divisent la structure substrat-adhésif-substrat en élément finis à quatre

nœuds, soit douze degrés de liberté par élément. Les déplacements nodaux sont interpolés par des fonctions classiques et la matrice de rigidité est calculée. L'effet de la température est introduit en termes d'efforts nodaux. L'exemple de la jonction à simple recouvrement est traité et les résultats sont en accord avec les résultats de Goland et Reissner.

Adams et Mallick, développent une méthode pour le calcul des contraintes au sein de la jonction collée dans la configuration de simple ou double recouvrement sous un chargement normal. Les substrats sont élastiques mais leurs épaisseurs ne sont pas forcément égales l'adhésif est hyperélastique ou élastoplastique. De plus, ils ajoutent les déformations hygrothermiques dans les substrats et l'adhésif. Leur solution satisfait la condition des contraintes de cisaillement nulles en bord libre. Elle est basée sur la méthode des éléments finis, afin de profiter de manière aisée de la précision de cette méthode.

Carpenter et Barsoum, développent deux éléments finis spéciaux à deux ou quatre nœuds, selon le type d'hypothèses retenues sur le joint, pour simuler l'adhésif. Les substrats sont considérés comme étant des éléments poutre. Les nœuds des éléments poutre et des éléments spéciaux coïncident, puisque les auteurs ont utilisé des nœuds à offset pour leurs éléments spéciaux. La matrice de rigidité des éléments spéciaux est calculée. Ils montrent que leur solution donne le même résultat que celui de Delale et Erdogan.

Yadagiri, Papi Reddy et Sanjeeva Reddy, proposent un élément quadratique à six nœuds pour la formulation viscoélastique des éléments de la couches adhésive. Des éléments quadratiques huit nœuds sont utilisés pour les substrats. Un modèle de Zener modifié est utilisé pour l'adhésif. Ils retrouvent les résultats de Delale et Erdogan.

Némès, pour la modélisation 3D par Eléments Finis d'assemblages collés, utilise deux types d'éléments : des éléments quadrangles de degré 2 (10 éléments dans l'épaisseur sont recommandés) et des éléments d'interfaces de degré 2. Il montre que les distributions des contraintes sont quasi identiques ; elles diffèrent cependant en deux points :

- Les éléments d'interface ne permettent pas de donner une contrainte de cisaillement nulle en bord libre.
- Le temps de calcul est bien plus rapide par l'utilisation des éléments d'interface que par l'utilisation des éléments quadrangles.

Kilic, Madenci et Ambur, utilisent un élément global (spécial) couplé à des éléments finis traditionnels. Cet élément global tient compte des singularités de comportement à l'interface entre substrat et adhésif, dues aux discontinuités géométriques et mécaniques. Des éléments globaux sont disposés dans les zones sensibles en bord de jonction entre les substrats et l'adhésif. Ailleurs, ce sont des éléments traditionnels. La matrice de rigidité de cet élément est établie comme pour les éléments classiques : seules les fonctions d'interpolation diffèrent et sont calculées à partir des champs de contraintes et de déplacements dans la zone concernée. Cette approche permet de ne plus raffiner le maillage en bord de jonction.

Farhad Tahmasebi propose une approche numérique par éléments finis développés pour un modèle d'un joint collé (figure I.6). Des exemples traités par cette approche numérique ont montré une bonne concordance avec les solutions classiques. Pour modéliser l'épaisseur de l'adhésif, la méthode utilise deux éléments rigides et trois éléments ressort de longueur nulle. Les ressorts relient les deux éléments rigides par les deux nœuds coïncidents. Par mesure de clarification, l'auteur a fait séparer les deux nœuds rigides.

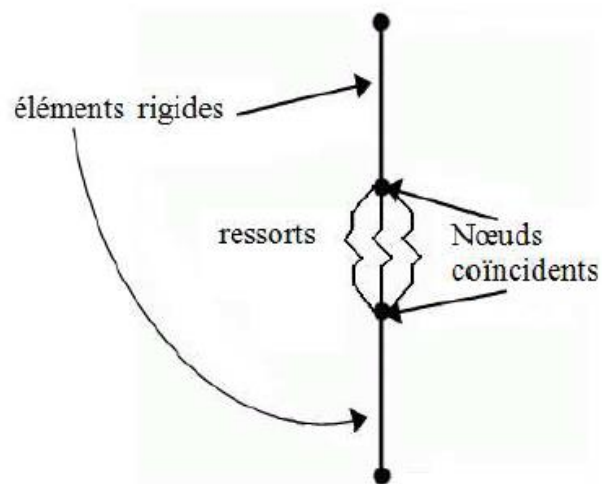


Figure I.6 : Modèle du joint collé utilisant des ressorts pour l'adhésif.

- **Synthèse :**

Les travaux de Goland et Reissner et de Hart-Smith apparaissant comme étant des travaux références. En effet, Goland et Reissner sont les premiers à prendre en compte la flexion des substrats, tandis que Hart-Smith, sur la base des travaux de Goland et Reissner, analyse les assemblages collés sous toutes leurs configurations. Par conséquent, ces travaux offrent assez simplement, la possibilité d'être considérés comme référent à d'autres analyses.

De ces analyses nous pouvons dégager l'influence sur le comportement général des paramètres suivants : la longueur de recouvrement ; la rigidité (épaisseur et module d'élasticité) des substrats et de l'adhésif ; le comportement mécanique de l'adhésif.

a. La longueur de recouvrement

La contrainte maximale en bord de joint augmente quand la longueur de recouvrement augmente ; l'effort se transfère préférentiellement aux extrémités du joint. La charge moyenne à la rupture augmente la longueur de recouvrement jusqu'à atteindre un plateau ; d'où l'existence d'une valeur optimale de recouvrement. Celle-ci donne la longueur de recouvrement qui permet de supporter un effort maximal pour une surface collée minimale.

b. La rigidité des substrats :

L'augmentation de l'épaisseur des substrats diminue la concentration de contrainte de cisaillement et augmente la concentration de contrainte de pelage.

L'augmentation de la rigidité de flexion permet de diminuer la concentration des contraintes de cisaillement aux extrémités du joint en augmentant la rigidité des substrats par une augmentation de leur épaisseur ou de leur module d'Young. Un facteur important est le rapport de la rigidité relative du substrat sur la rigidité relative de la colle :

$$R = \frac{E_i e}{e_i E}$$

Plus ce rapport sera élevé, plus les contraintes de pelage seront faibles.

c. La rigidité de l'adhésif :

Théoriquement, la résistance du joint collé augmente avec l'épaisseur de l'adhésif, pourtant, les résultats expérimentaux montrent que la charge moyenne à la rupture augmente puis décroît au-delà d'une certaine épaisseur jusqu'à une certaine limite. Ceci est expliqué par le développement des contraintes d'arrachement aux extrémités du joint, croissant avec l'épaisseur de l'adhésif, ce qui entraîne une diminution de la résistance au cisaillement. Cette étude met en évidence qu'aux extrémités du joint, il existe des zones à très fort gradient de contraintes de pelage, accompagnant l'annulation des contraintes de cisaillement aux bords libres. Il apparaît par ailleurs que les ruptures du joint de colle tendent à être adhésives et non cohésives quand l'épaisseur augmente. Aussi, la résistance au cisaillement diminue lorsque le module de l'épaisseur augmente. Aussi, la résistance au cisaillement diminue lorsque le module de cisaillement de l'adhésif augmente, ce qui peut être expliqué par une augmentation de la fragilité des adhésifs quand leur module augmente.

II. Le comportement mécanique des adhésifs :

Sous les hypothèses simplificatrices prises par Hart-Smith, il est montré que la prise en compte du comportement plastique de l'adhésif permet d'accorder résultats théoriques et expérimentaux. Cela montre donc l'importance du comportement adhésif considéré. De plus, cela indique que des modélisations, pour lesquelles l'adhésif est simulé par des ressorts agissant dans le plan et hors plan, sont suffisantes même si l'état de contrainte nulle en bord libre n'est pas vérifié. La prise en compte du comportement visqueux des adhésifs permet de traduire l'évolution au cours du temps des assemblages collés.

III. Analyse mécanique des joints collés :

Les paramètres déterminant la force et l'efficacité d'un collage sont extrêmement nombreux puisqu'il faut tenir compte des matériaux, des préparations de surface, de la durée de vie, des effets de fatigue et du vieillissement. Généralement, la performance d'un assemblage collé est soit obtenue par la détermination des caractéristiques de la colle, soit par des tests menés sur le joint jusqu'à la rupture, soit par les deux ensembles. Dans l'analyse d'un joint collé, il est fortement recommandé de déterminer le module élastique, le module de

cisaillement, le coefficient de poisson, la déformation et la contrainte de cisaillement ultime. La résistance à la rupture d'un joint collé dépend, en partie, de la nature de l'environnement et des efforts qu'il subit sous sollicitation. Les quatre principaux types de chargement auxquels il peut être soumis sont : la traction, le cisaillement, le clivage et pelage (figure I.7).

III.1. Essai de cisaillement par traction :

Dans le cas d'un joint travaillant sous tension (figure I.7.a), les contraintes sont perpendiculairement au plan du joint et les forces sont ainsi distribuées uniformément sur l'intégralité de la surface. L'application des contraintes de cisaillement a également pour effet une répartition uniforme des forces sur la totalité de la surface du joint, mais dans ce cas, elles s'exercent parallèlement au plan du joint. Ainsi tout l'adhésif contribue à la résistance de la structure collée.

Le joint à simple recouvrement constitue un type d'essai normalisé qui demeure un outil de comparaison entre les adhésifs puisque la distribution des contraintes n'est pas uniforme le long de recouvrement et à travers l'épaisseur de l'adhésif. Par ailleurs, plusieurs facteurs ont une influence sur la résistance en cisaillement par traction de cet assemblage. En plus des méthodes de mise en œuvre, de préparation des surfaces et des caractéristiques physico-chimiques de l'adhésif, la résistance du joint dépend d'autres variables liées aux dimensions de l'assemblage et à l'épaisseur du joint collé.

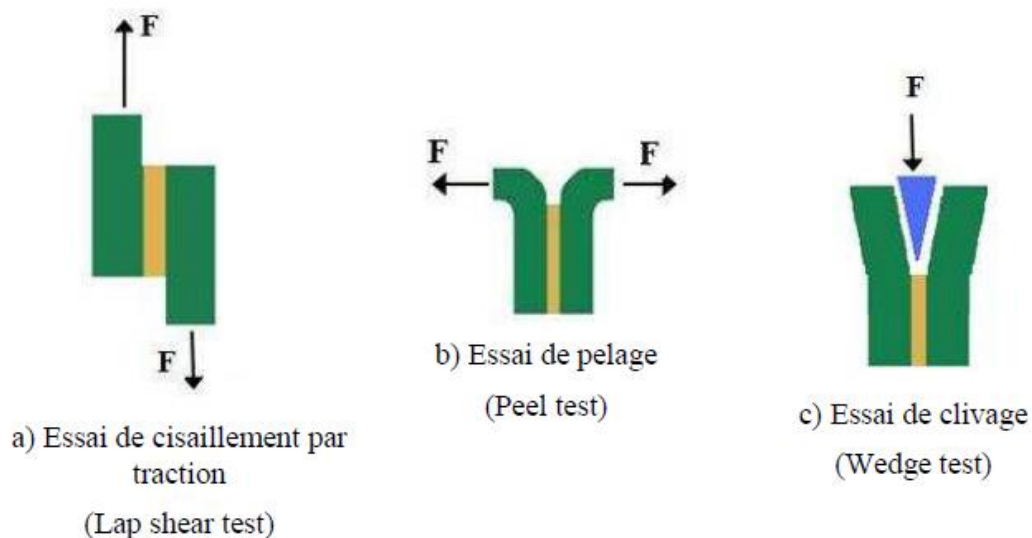


Figure I.7 : Essais expérimentaux sur des joints collés :

a) cisaillement par traction, b) pelage, c) clivage.

III.2. Essai de pelage :

Plusieurs formes de pelage existent pour déterminer la performance des adhésifs structuraux. L'essai de pelage en T est le plus utilisé. Comme le clivage, le pelage favorise la concentration de contraintes sur une mince ligne d'adhésif et ainsi seule une faible partie de celui-ci supporte la charge, le reste ne supportant aucun effort. Il représente ainsi l'essai le plus utilisé pour prédire la durabilité des assemblages collés et pour contrôler la qualité des traitements de surface (figure I.7.b).

III.3. Essai de clivage :

Ce type d'essai qui consiste en l'introduction d'un coin entre les substrats de sorte de générer une ouverture. L'essai de clivage par insertion d'un coin, connu sous le nom « Boeing wedge Test » simule d'une manière quantitative les forces et les effets d'environnement d'un joint collé à l'interface substrat-adhésif. Cependant, il est plus pratique de tester l'adhésif en clivage pour déterminer sa résistance à supporter des contraintes d'arrachement et sa durabilité avant l'assemblage final (figure I.7.c). L'intérêt du test de clivage est surtout, par son caractère sévère, de discriminer les couples adhésif structuraux / traitements de surface avant et après vieillissement.

III.4. Essai de cisaillement par torsion :

Dans l'essai de cisaillement en torsion (figure I.8), le joint est soumis à une contrainte de cisaillement pure, sans les complications apportées par des contraintes bi-axiale et triaxiales additionnelles. En effet, le spécimen ne subit pas de chargements dimensionnels engendrés par des déformations différentes du substrat et de l'adhésif et l'effet de poisson. Le joint annulaire bout à bout est considéré comme le plus précis pour déterminer la résistance et la rigidité en cisaillement d'adhésifs structuraux. Pour des raisons pratiques, le joint tubulaire est appelé à un grand développement dans le domaine du Génie Civil car il permet de remplacer les techniques de liaison de tubes de distribution de fluides telles que le brassage, le soudage ou le soudo-brasage. Plusieurs ouvrages techniques ont été consacrés à l'étude de premiers à étudier le joint tubulaire en torsion. Les contraintes ont été analysées de la même manière que celles d'un joint à simple recouvrement.

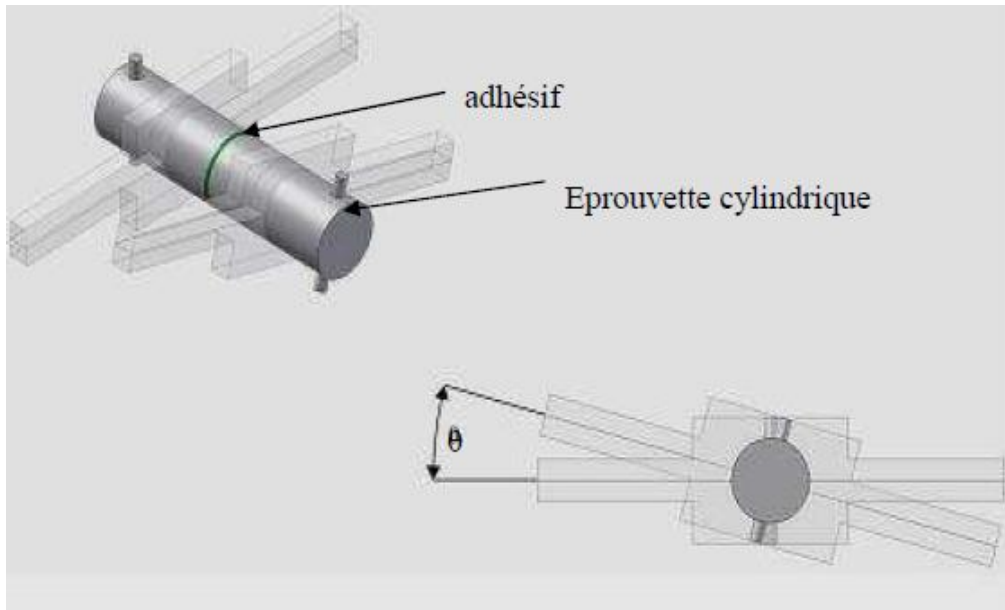


Figure I.8 : Dispositif de mesure de l'angle de torsion sur les éprouvettes cylindriques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J.M Giraud (1980) Quelle épaisseur de colle choisir pour un assemblage collé, Matériaux et Techniques.
- [2] Volkersen O. (1938)
- [3] M.Goland, E.Reissner (1944), the stress in cemented joints, journal mechanics.
- [4] L. J. Hart-Smith and E.W. Thrall, (1985) Adhésive Bonding of Aluminium Alloys, ed. E. W. Thrall and R. W. Shanon, Marcel Dekker.
- [5] O. Mario, S. Joannes, J. Renard. (2006), Influence de la microstructure sur les propriétés mécaniques des joints collés, Matériaux 2006, Dijon, France.
- [6] CETIM Centre Technique des Industrie Mécaniques, (2006) le collage en production et ses contraintes, guide du collage.
- [7] Harris J. A., Adams R.D. (1984) Strength prediction of bonded single lap joints by non linear finite elements, International Journal of Adhesive.
- [8] M. Y .Tsai, J. Morton (1994) Three-Dimensional deformations in a single-lap joint, Journal of Strain Analyse.

I. Introduction :

Un joint adhésif collé est une structure composée de deux adhérents jointifs par un adhésif. Adams et Wake [1] définissent l'adhésif en tant que "un matériel polymère qui, une fois appliqué aux surfaces, peut les joindre ensemble et résister à la séparation" et adhérents comme membres d'une structure qui sont joints ensemble par un adhésif (figure III.1). Il y a deux approches de base pour analyser les joints adhésifs collés : forme close et solutions numériques. [34]

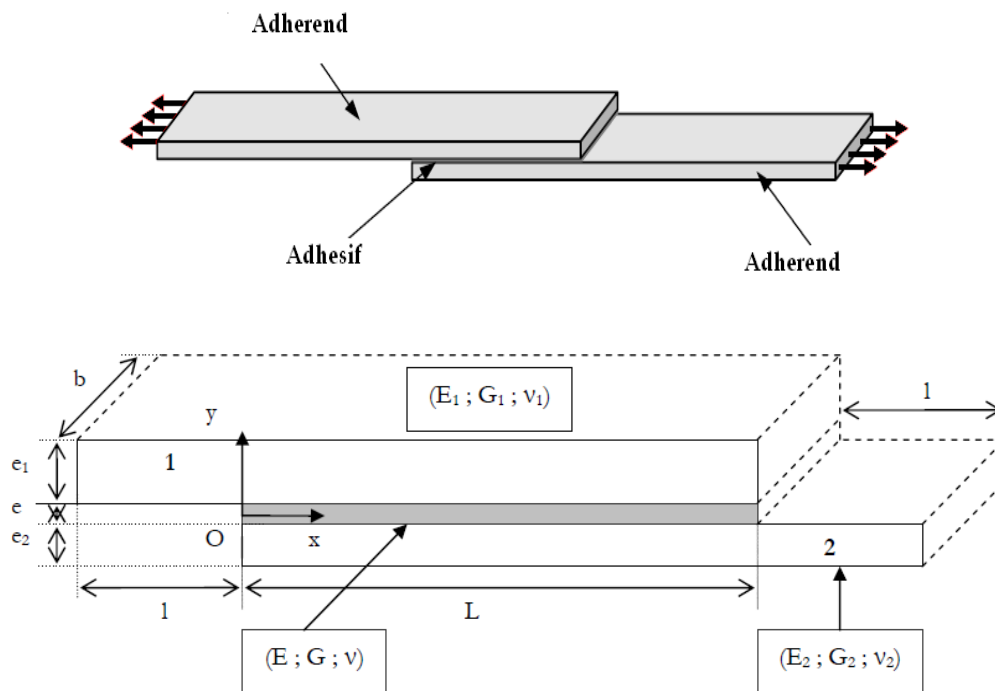


Figure III.1 : Joint à simple recouvrement (Single Lap Joint) [33].

Dans la première approche, un ensemble d'équations et d'états de frontière est formulé. Les solutions de ces équations sont des expressions analytiques qui donnent des valeurs des efforts à un point quelconque du joint. Par contre dans la deuxième approche, des solutions des équations sont obtenues par des méthodes numériques.

Des configurations d'un joint à simple recouvrement ont été étudiées pendant environ soixante années et de nombreux modèles analytiques et numériques ont été développés. Volkersen [2] a proposé une première approche, pour analyser ce genre de structure. Il a considéré seulement la déformation de cisaillement dans l'adhésif et des déformations axiales dans les adhérents. Demarkles [3] a amélioré ce modèle en incluant la déformation de cisaillement des adhérents. Ces analyses n'incluent pas le moment de flexion produit par le chemin excentrique de la charge. L'effet du moment de flexion résulte dans les efforts

normaux par rapport au plan de l'adhésif, appelées efforts de pelages, qui sont important aux niveaux des bords du joint.

Goland et Reissner [4] étaient les premiers à inclure l'effet du chemin excentrique de la charge en appliquant des moments aux bords du joint. Ces moments ont été calculés en tenant compte de la géométrie, des propriétés des matériaux, et de la charge appliquée.

L'influence de la couche de l'adhésif a été négligée dans le calcul des moments au niveau du bord, ainsi les propriétés de l'adhésif n'apparaissent pas dans l'expression proposée par Goland et Reissner [5]. Hart-Smith [6] a formulé un modèle qui a fondamentalement les mêmes prétentions que Goland et Reissner [7] mais les déformations des adhérents supérieurs et inférieurs sont considérés séparément comme si elles étaient des poutres sur une base élastique. Ce modèle néglige l'influence des grands déplacements dans le joint de recouvrement. Oplinger [8] a inclus de grandes déformations des adhérents supérieurs et inférieurs. [34]

Tous ces modèles ont la contrainte de cisaillement maximale aux bords du joint en communs, qui n'est pas réaliste puisque les bords communs sont en traction libres. Ce problème a été résolu par Renton et Vinton [9] qui ont développé un modèle dont les contraintes de cisaillement sont zéro aux bords du joint. Allman [10] a produit un modèle qui permet la variation linéaire de l'effort de pelage suivant l'épaisseur de l'adhésif et donne la contrainte de cisaillement zéro aux bords du joint de recouvrement. Chen et Cheng [11] ont également formulé un modèle bidimensionnel donnant des contraintes de cisaillement zéro aux bords communs.

Récapitulant, les solutions de forme close, comme ceux présentés ici pour le joint à simple recouvrement, fournissent une bonne perspicacité dans le comportement des joints collés par adhésif. Ils sont également utiles pour l'analyse et la planification des essais et pour l'analyse paramétrique qui peut mener à l'établissement des critères de conception. Cependant, l'utilisation de ces méthodes dans de vraies applications est très limitée parce qu'elles sont basées sur des prétentions restrictives et un nombre très limité de géométries. La plupart de ces méthodes ne sont pas directement applicables aux situations où l'analyse tridimensionnelle est exigée.

Le développement rapide des ordinateurs rend l'utilisation des techniques numériques plus attrayant et faisable. Des méthodes numériques peuvent être employées pour analyser des

modèles avec n'importe quelles géométries et conditions de charge. Ils conviennent plus particulièrement à l'analyse des structures composées de différents matériaux.

Des méthodes numériques peuvent être appliquées pour résoudre les équations qui représentent le comportement structural. Bigwood et Crocombe [12] ont employé la méthode de différence finie pour résoudre l'équation qui représente les efforts de pelage et de cisaillement dans la couche d'adhésif. Bigwood et Crocombe [13] ont inclus des effets non-linéaires dans les travaux précédents et ont développé une analyse élasto-plastique dans les joints collés par l'adhésif, en employant les mêmes approches. Un autre procédé de discrétisation consiste à diviser la structure en petites parties et à formuler le modèle de chacune de ces parties et rassembler ensuite ces petites parties pour modéliser la structure entière. Cette méthode d'élément fini est largement répandue dans la technologie et son application à la détermination des contraintes dans les structures assemblées par adhésif présente un grand avantage.

Un grand nombre d'analyses bidimensionnelles par éléments finis sur les assemblages collés ont été exécutés. Tandis que ces analyses produisent des résultats précis pour quelques situations et exigent moins d'effort pour la modélisation que les analyses tridimensionnelles, elles peuvent exiger une quantité considérable de temps machine pour générer les données.

L'analyse par élément finis bidimensionnels des assemblages collés peut être portée en employant des éléments conventionnels en contrainte plane ou en déformation plane. Quand cette approche est bien suivie, un maillage très fin est exigé, en particulier dans la couche d'adhésif, pour obtenir une exactitude raisonnable.

Wooley et Carver [14] ont fait une des premières analyses par élément finis d'un assemblage à simple recouvrement. Ils ont employé des éléments à l'état de contrainte plane et leurs résultats étaient comparables à ceux des solutions de Goland et de Reissner [15]. Wooley et Carver [16] ont montré des concentrations de contraintes aux bords du joint de recouvrement. Cooper et Sawyer [17] ont exécuté une analyse d'élément finie bidimensionnelle d'un joint à simple recouvrement en employant des éléments non-linéaires en contrainte plane. Ils ont modélisé la couche d'adhésif en utilisant cinq rangées d'éléments. Adams et Peppiatt [18] ont employé un modèle d'éléments finis bidimensionnels. Ils ont constaté qu'une couche d'adhésif avec un épanchement provoque des concentrations de contrainte inférieure qu'une couche adhésif avec un bord carré, Harris et Adams [19] ont développé une méthode d'éléments finis non linéaire et ont inclus la réponse élasto-plastique

des composants de l'adhésif et d'adhérent. Des éléments quadrilatéraux en contrainte plane ont été employés pour cette analyse. Ils ont exécuté cette analyse à un assemblage à simple recouvrement standard et à un joint à simple recouvrement avec des filets aux bords du joint. Des conditions de rupture ont été considérées en utilisant le critère de Von Mises pour les adhérents et le critère modifié de Von Mises pour la couche d'adhésif.

Dans les structures collées, les efforts sont transmis d'un substrat à un autre à travers les couches d'adhésifs dans la surface de recouvrement, c'est-à-dire que l'adhésif joue le rôle de moyen de transfert des efforts. La différence majeure entre les structures assemblées par collage et celles assemblées par fixation mécanique est la surface de contact. Qui dans le cas du collage est beaucoup plus large que dans le cas des fixations mécaniques. Les concentrations des contraintes sont donc minimisées et leur distribution devient plus uniforme dans la région de recouvrement.

II. Essai de cisaillement par traction:

Dans le cas d'un joint travaillant sous tension (Figure III.1), les contraintes sont perpendiculaires au plan du joint et les forces sont ainsi distribuées uniformément sur l'intégralité de la surface. L'application des contraintes de cisaillement a également pour effet une répartition uniforme des forces sur la totalité de la surface du joint, mais dans ce cas, elles s'exercent parallèlement au plan du joint. Ainsi tout l'adhésif contribue à la résistance de la structure collée.

Le joint à simple recouvrement constitue un type d'essai normalisé qui demeure un outil de comparaison entre les adhésifs puisque la distribution des contraintes n'est pas uniforme le long de recouvrement et à travers l'épaisseur de l'adhésif. Par ailleurs, plusieurs facteurs ont une influence sur la résistance en cisaillement par traction de cet assemblage. En plus des méthodes de mise en œuvre, de préparation des surfaces et des caractéristiques physico-chimiques de l'adhésif, la résistance du joint dépend d'autres variables liées aux dimensions de l'assemblage et à l'épaisseur du joint collé. [33]

Bien que la propriété physique de l'assemblage collé soit son énergie de fracture, la résistance à la rupture en cisaillement (τ_c) des joints en recouvrement simple est la valeur la plus largement utilisée par les constructeurs, comme les fournisseurs, pour décrire les propriétés d'un collage. D'une part la plupart des collages se fait en recouvrement et les utilisateurs considèrent que cet essai représente bien les conditions d'utilisateurs, d'autre part la

construction de l'éprouvette d'essai est simple. Pourtant, la mécanique de l'essai n'est pas maîtrisée et la signification de la valeur mesurée est relative à la géométrie de l'essai et au procédé d'assemblage. En collage faible, τ_c se déduit de G_0 . Ce n'est plus le cas en collage fort, les déformations étant si grandes que l'on se sait plus à quel paramètre les attribuer.

III. But de l'analyse numérique :

L'un des objectifs principaux de ce chapitre est d'analyser par la méthode des éléments finis l'effet de la géométrie du bord du joint d'adhésif et de l'adhérent sur la réduction des contraintes de pelage, Von mises, ainsi que les contraintes de cisaillement dans la couche d'adhésif.

III.1. Propriétés de l'alliage d'aluminium 2024-T3 :

La désignation normalisée de l'aluminium selon les différentes normes s'écrit comme suit :

- Aluminum 2024-T3; USN A92024; ISO AL-Cu 4Mg1; NF A-U4G1 (France).
- DIN AL Cu Mg2; AA2024-T3; ASME SB 211; CSA CG425 (Canada). [21].

L'alliage d'aluminium 2024-T3 a une masse volumique égale à 2700 Kg/m^3 , soit à peu près trois fois moins que celle des aciers, leur utilisation s'impose, donc quand il faut réduire au maximum la masse des systèmes et des structures.

Tous les alliages d'aluminium résistent relativement bien à la corrosion grâce à la couche d'oxyde d'alumine (Al_2O_3) qui se forme a leur surface mais la sévérité de l'attaque dépend du type d'alliage utilisé et de son état (recuit ou écroui, traité ou non), comme dans notre cas c'est un alliage de série 2000 (AL-Cu) et (AL-Cu-Mg) et leur état métallurgique est donné par la lettre T3 qui indique la trempe ou l'écrouissage. L'alliage 2024-T3 est par sa nature très ductile qui donne l'avantage des bonnes propriétés de mise en forme par déformation plastique en état solide ou par opération des fonderies grâce à la température de fusion relativement basse, environ de 650°C . [34]

III.1.1 Composition chimique :

La composition chimique de l'alliage 2024-T3 est donnée dans le tableau suivant :

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
Min %	90.7	-	-	3.8	0.3	1.2	-	-
Max %	94.7	0.5	0.5	4.9	0.9	1.8	0.1	0.25

Tableau III.1: Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2024-T3. [34]

III.1.2. Propriétés mécaniques du 2024-T3 :

L'alliage 2024-T3 présente de bonnes propriétés mécaniques selon sa courbe de traction présentée dans la figure suivante :

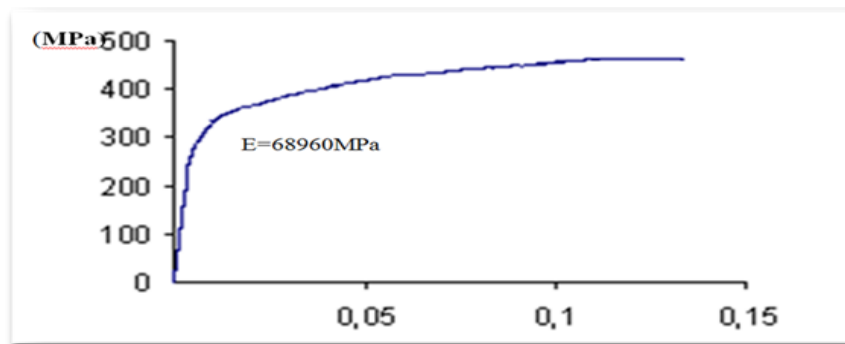


Figure III.2 : Courbe de traction pour l'Aluminium (contrainte/déformation). [34]

	R 0.2 (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	E (Gpa)	G (GPa)	v
Aluminium 2024-T3	391.97	496	2.4	69	26.46	0.33

Tableau III.2 : Propriétés mécanique de l'alliage d'aluminium (MPa). [34]

III.2. Propriétés de l'adhésif (ADEKIT-a-140) :

L'adhésif utilisé dans notre étude est un adhésif époxyde bi-composants de type **ADEKIT-A-140** ou ces propriétés mécaniques sont donnés par la courbe de traction (contraintes déformations) et la fiche technique AXSON ADEKIT A-140 structurale époxydes (24) cités dans les tableaux **III.3** et **III.4**. L'ADEKIT A-140 est un adhésif époxyde de haute résistance pour des applications structurales. Les demandes typiques de ce produits incluent dans l'assemblée des structures en métal, y compris les emballes des véhicules, et les assemblées aéronautiques. Cela fonctionne également bien sur des insertions et des structures de composés. En outre, les utilisateurs commodes de moyens de cartouches obtiennent la bonne quantité d'adhésif parfaitement mélangé exactement où ils ont besoin d'elle. [34]

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES				
Composition		Résine	Durcisseur	Mélangé
Rapport de mélange - en poids		100	90	
Rapport de mélange -en volume		100	100	
Couleur		Gris, brun, noir	Beige	Beige, brun, noir, gris
Densité à 77°F/25°C	psi	1.38	1.23	1.30
Viscosité de Brookfield RVT (sp6 1 t/mn)	Pa.s.	400	450	430
La vie de pot 25°C sur 100g	Minutes	-	-	30
Durcissement initial	Heures			15
Ouvrir Temps à 25°C	Minutes			40
La température fonctionnant	°F			-40°F - 140°F

Tableau III.3: Propriétés physique de l'ADEKIT A-140.[34]

PROPRIÉTÉS de RÉSISTANCE MÉCANIQUE ET THERMIQUE			
Temps pour obtenir 1 résistance au cisaillement de recouvrement de MPa à 25°C	ISO 4587-95	Heures	4 heures 30 min
Temps pour obtenir la résistance au cisaillement finale de recouvrement de 50% à 25°C	ISO 4587-95	Hours	20
Cisaillement de recouvrement sur l'aluminium	ISO 4587-95	psi/MPa	3.045/21 CF
Résistance flottante de peau de rouleau	ISO 4587-97	kN/m	5 CF

Tableau III.4: Propriétés mécaniques et thermiques de l'ADEKIT A-140.[34]

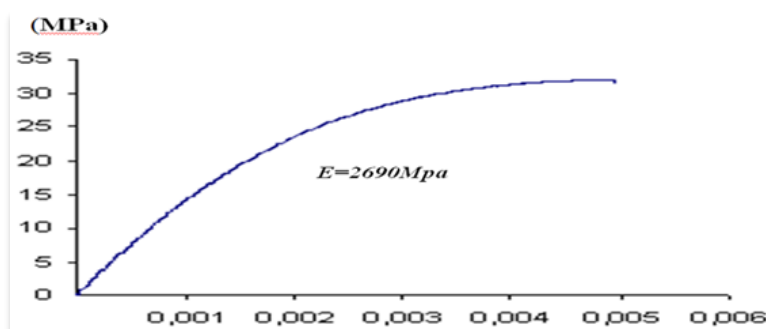


Figure III.3: Courbe de traction pour l'adhésif ADIKIT A 140 (contraintes déformations) [34]

On observe que la courbe est linéaire jusqu'à une déformation de 0.007 environ, ce qui traduit l'élasticité de l'adhésif. La pente de cette partie linéaire permet d'obtenir le module d'Young.

Le module d'Young calculé dans la partie linéaire de la courbe est de 2.69 GPa, la contrainte moyenne à la rupture est de 26 MPa environ et le coefficient de poisson a été pris directement de la fiche technique envoyé par le fournisseur est égale à 0.3.

Le module de cisaillement de l'adhésif est égale à : $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{2.69}{2(1+0.3)} = 1.034 \text{ GPa}$

III.3. Modèles numériques 3D non linéaires :

Nous pouvons simuler des essais et obtenir numériquement des résultats à l'aide du code de calcul ABAQUS® afin d'avoir des modèles numériques en utilisant la méthode des éléments finis. Les méthodes numériques permettent de tenir compte des effets de flexion, du cisaillement dans l'adhésif, des effets de bords dans le joint et n'est pas limitée aux configurations simples d'assemblages sollicités par des efforts unidirectionnels comme les méthodes analytiques. On pourra ainsi étudier la répartition des contraintes dans le cas de joints de formes quelconques ou dans le cas de chargements complexes ou multidirectionnels.

III.4. La géométrie :

La géométrie adoptée est celle de l'assemblage collé en simple cisaillement. Elle correspond aux essais effectués en statique. Il y a deux zones dans ce modèle :

- La première zone est celle des substrats (correspond au recouvrement). Dans cette zone, deux parties se distinguent : les substrats et le film de l'adhésif.
- La deuxième zone correspond aux substrats hors recouvrement.

III.5. Maillage :

Le maillage est automatiquement généré à partir de la construction de domaines correspondant aux zones géométriques. Pour le maillage, l'élément choisi est l'élément volumique (brick). Les substrats, hors et sur le recouvrement, sont modélisés par des éléments à 8 nœuds (24 degrés de liberté). Le maillage est raffiné sur les deux extrémités de la longueur de recouvrement (Figure III.4)

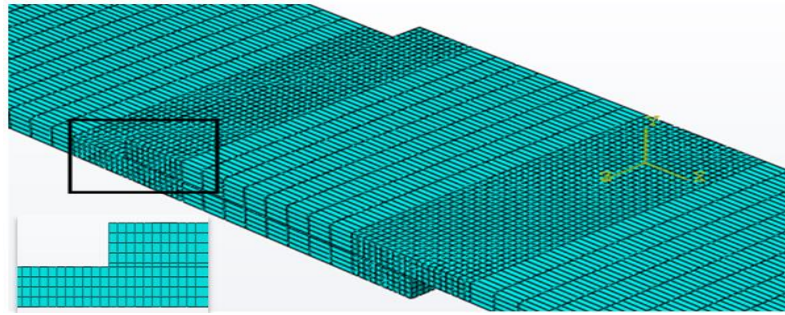


Figure III.4 : maillage de l'assemblage.

La figure III.4 représente le maillage et comme les concentrations de contraintes se situent aux extrémités du joint, ce maillage d'adhésif et les zones extrêmes de la longueur de recouvrement doit être fin afin d'avoir des résultats bien précis.

III.6. Modèles géométriques:

Dans cette partie de ce chapitre, nous présenterons les propriétés essentielles des matériaux utilisées dans notre étude, grâce à leurs fiches techniques, et des essais de tractions réalisés par Monsieur K. Madani [20] dans le cadre de l'élaboration de sa thèse de, à savoir l'Aluminium 2024-T3, aussi bien nous présentons la géométrie du modèles utilisés durant l'étude (Figure III-5). Ces matériaux sont utilisés dans de nombreuses applications parmi lesquelles on cite en priorité l'aéronautique et l'aérospatiale. On essaye de donner ensuite les particularités ainsi les caractéristiques les plus remarquables de chacun des ces matériaux. [34]

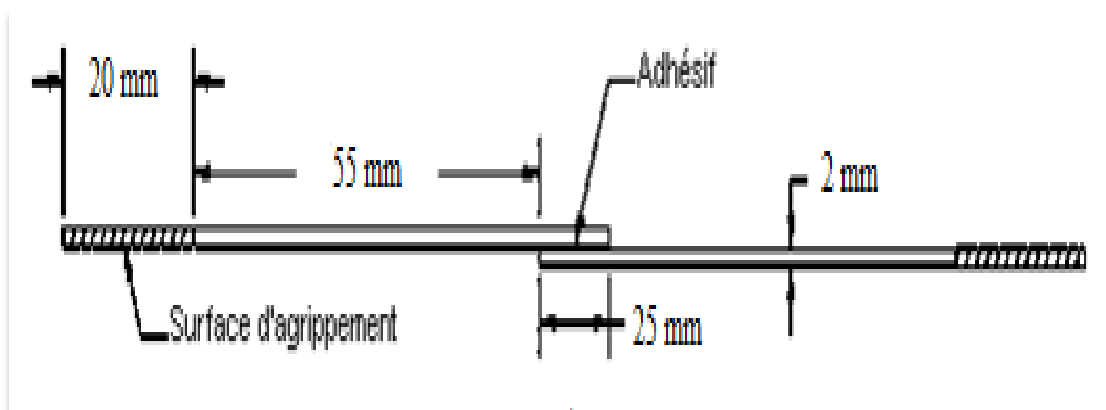


Figure III.5: Représentation du modèle géométrique.

IV. Analyse des résultats:

Notre but dans cette étude est de comparer les comportements des joints. Pour cela, nous avons étudiés deux formes de géométrie : biseautage du substrat alliage d'aluminium 2024-T3 et bourrelet de l'adhésif en matière de polymère époxy ADEKIT-A-140 ont été utilisés respectivement comme adhésif et adhérent. Un joint équilibré a été considéré dans cette étude avec une épaisseur d'adhérents (e_s) de 2mm et une largeur (b) de 25mm d'une part et avec une épaisseur de l'adhésif (e_a) de 0.2mm, de longueur de recouvrement de 25mm. L'éprouvette est soumise à un chargement de traction dirigé suivant l'axe « x ».

V. Influence de la géométrie du joint à simple recouvrement sur la répartition de l'intensité du champ de contraintes :

Toute modification de la géométrie ou du dimensionnement de l'assemblage induit une variation des contraintes dans l'adhésif comme dans les substrats. [34]

Dans ce type d'assemblage, trois paramètres fondamentaux influent directement le comportement mécanique ; il s'agit :

- De la longueur de recouvrement « l »
- De l'épaisseur des substrats « e_s »
- De l'épaisseur du joint de colle « e_j »

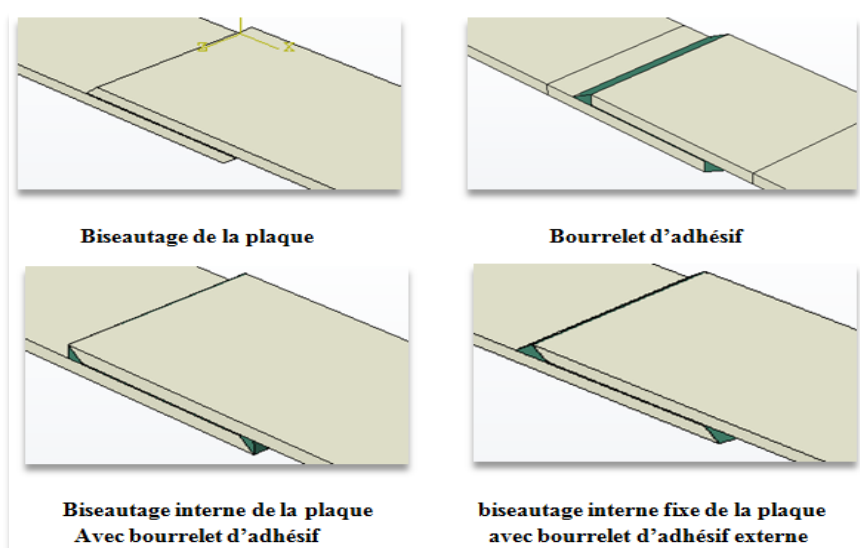


Figure III.7 : Représentation des modèles géométriques

Dans cette étude l'alliage d'aluminium 2024-T3 et le polymère époxy ADEKIT A 140 ont été utilisés respectivement comme adhésif et adhérents. Un joint équilibré a été considéré dans cette étude avec une épaisseur d'adhérence (e_s) de 2 mm et une largeur (b) de 25 mm d'une part et avec une épaisseur de l'adhésif (e_a) de 0.2 mm de longueur de recouvrement (L) de 25 mm. D'autre part le joint est soumis à un chargement de traction dirigé suivant l'axe x ou parallèle à la longueur de recouvrement. La figure III.7 représente les formes géométriques étudiées du substrat et de l'adhésif en utilisant trois angles différents $\theta = 10^\circ$, $\theta = 40^\circ$, $\theta = 70^\circ$, ces géométries qu'on va essayer de les modéliser sur le code ABAQUS et voir l'effet de chaque géométrie sur la distribution de contraintes, et voir l'effet de la géométrie de l'adhésif et des substrats d'aluminium sur la possibilité de réduire les concentrations des contraintes à savoir les contraintes équivalentes de décollement et les contraintes de cisaillement.

❖ Conditions aux limites :

Les conditions aux limites appliquées sont classiques pour les modèles de traction de joints simple recouvrement. Le joint est orienté suivant la direction x , z est la direction de la largeur, y est la direction normale au plan de joint.

- **Blocage à gauche** : les nœuds situés sur la face extrême gauche du joint sont bloqués en translation dans les directions X , Y et Z , et en rotation dans la direction z .
- **Traction à droite** : les nœuds situés sur la face extrême droite du joint sont bloqués en translation dans les directions Y et Z , et en rotation dans la direction Z . La sollicitation de traction de 15 MPa est appliquée dans la direction X .

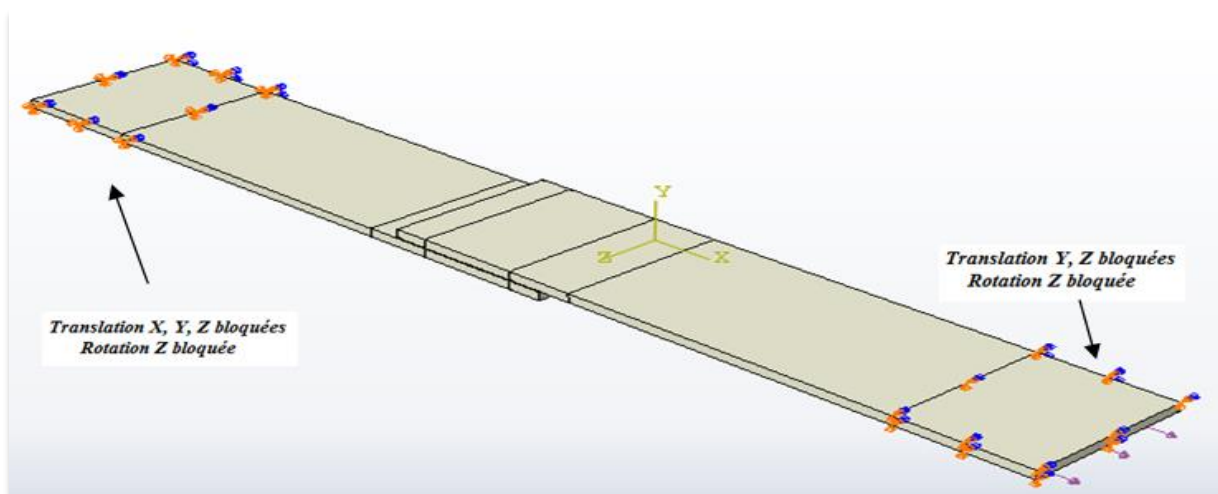


Figure III.8: Condition aux limites.

V.1. éprouvette simple (sans modification):

Au premier, nous appliquons nos conditions aux limites et nos calculs sur l'éprouvette en gardant la forme sans biseautage du substrat ou bourrelet d'adhésif (figure III.9).

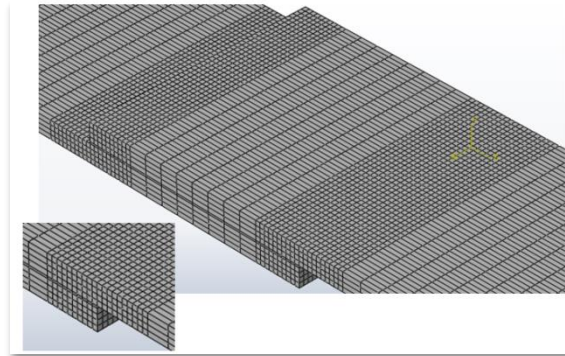


Figure III.9: représentation le maillage d'une éprouvette à simple recouvrement.

- **Gestion des calculs et exploitation des résultats :**

Le lancement du calcul est effectué par la création d'une étape de chargement (Step). Le nombre d'incrémentations doit être précisé, le non linéarité géométrique doit être activé. La charge appliquée est de 15 MPa, c'est l'effort à la rupture extrait des courbes de comportements des joints collés en cisaillement (Figure III.10). Nous présentons sur la figure suivante une illustration de la déformée obtenue par la modélisation numérique de l'assemblage collé en simple cisaillement.

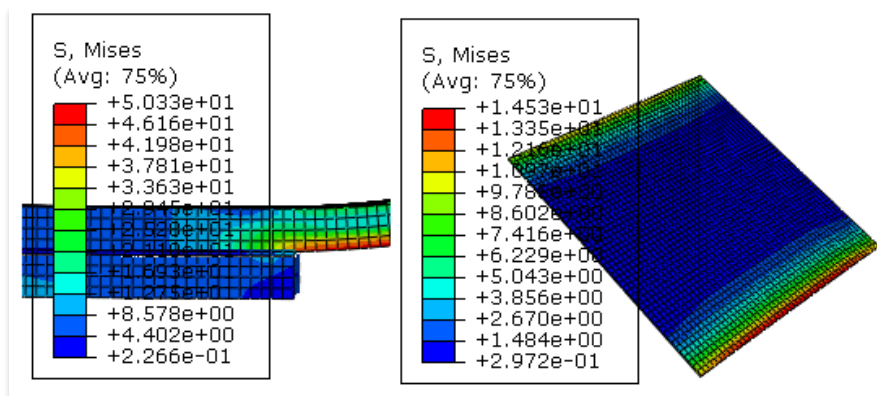


Figure III.10: la contrainte équivalente de Von mises pour l'assemblage collé en simple cisaillement

Joint	σ_{Mises}	σ_{xy}	σ_{yy}
Eprouvette simple recouvrement	14.53	7.76	10.75

Tableau III.5: valeurs des contraintes Von mises, cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement du joint (MPa).

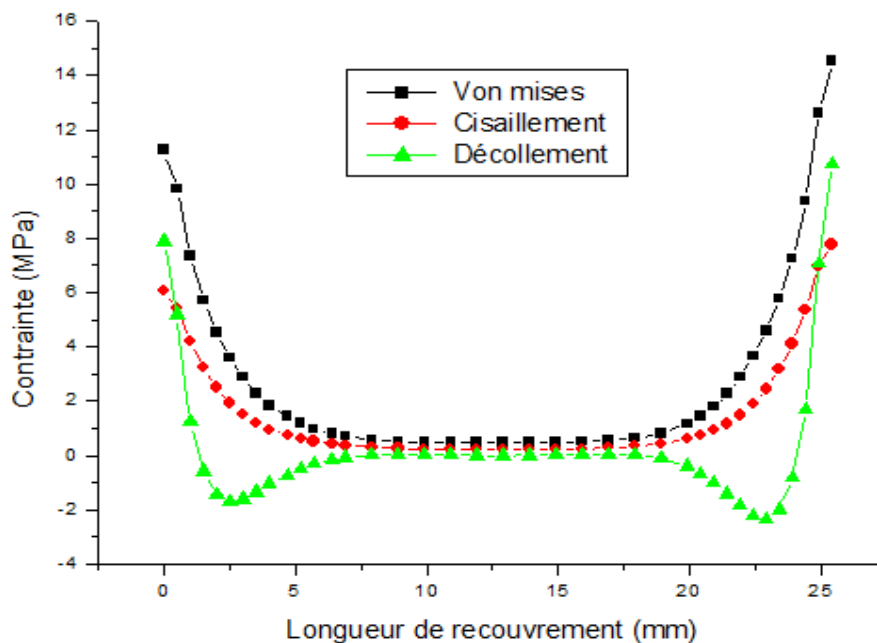


Figure III.11 : Distribution des contraintes (Von mises, cisaillement, décollement) suivant la longueur de recouvrement.

Les contraintes équivalentes (σ_{Mises}), de décollement (σ_{yy}) et de cisaillement (σ_{xy}) suivant la longueur et la largeur du joint d'adhésif $L = l = 25\text{mm}$ sont représentées par la figure III.10. D'après la figure III.12, on remarque bien que les contraintes maximales se situent aux extrémités du joint et que la plastification de l'adhésif commence dans cette zone où la résistance est la plus faible.

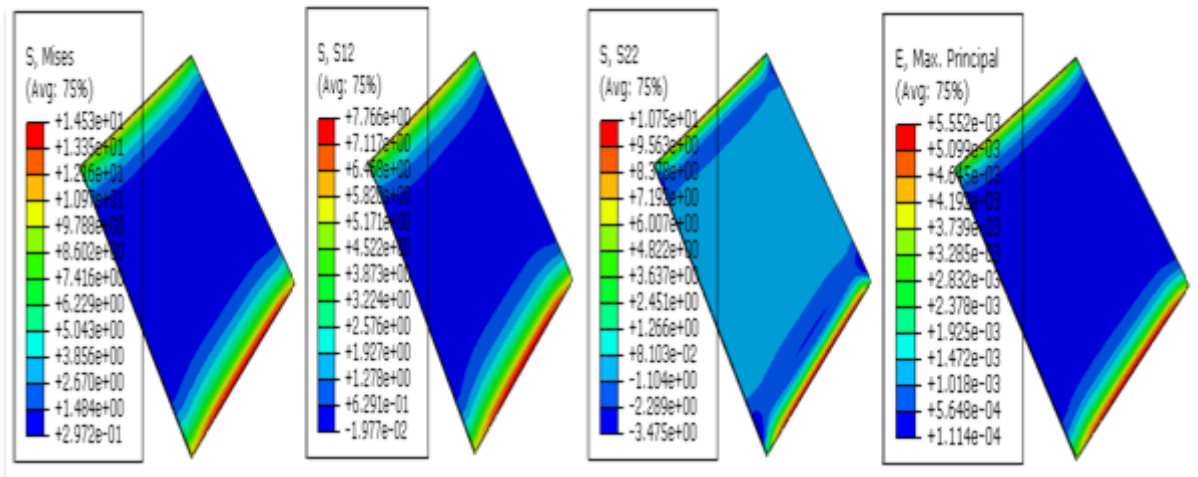


Figure III.12 : Distributions des contraintes σ_{eq} , σ_{22} , σ_{12} , E_{max} dans le joint

V.2. Biseautage de la plaque :

Le biseautage des substrats aux extrémités du recouvrement peut être une solution envisageable car une diminution d'épaisseur à cet endroit minimise le moment de flexion et ainsi provoque une diminution des contraintes de pelage. En fait, il a été montré qu'un bourrelet d'adhésif améliore d'avantage la tenue mécanique de l'assemblage que le biseautage des supports. Cependant, la combinaison d'un biseau interne et d'un bourrelet procure une résistance maximale lorsque l'un des substrats est en composite. Ce procédé permet non seulement de faire chuter les contraintes transverses de 38 MPa à 5 MPa mais aussi de modifier le type de rupture qui ne se produit plus dans le composite (comme c'est souvent le cas !) mais plutôt dans la colle. De même, il est possible de faire varier l'épaisseur du joint et des substrats afin d'obtenir un cisaillement uniforme dans l'adhésif et enfin de s'affranchir des effets de bords. [34]

Adams [25] a montré que la modification de la forme du bord de la plaque peut entraîner une réduction du moment de flexion pour cela en s'est proposer de modifier la géométrie de bord libre de la plaque tout en variant l'angle de biseautage en considérant $\theta = 10^\circ$, $\theta = 40^\circ$, $\theta = 70^\circ$.

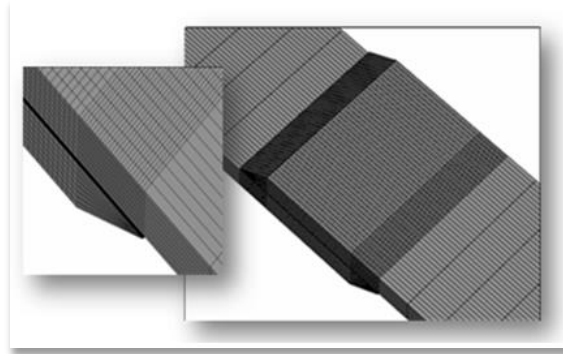


Figure III.13 : Présentation du premier modèle géométrique [biseautage].

La modélisation du modèle géométrique, figure III-13, permet de remarquer clairement qu'un maillage fin est introduit au bord de la plaque.

La figure III.14, III.15 et III.16 présentent la variation de la contrainte équivalente de Von mises, cisaillement et décollement suivant la longueur et la largeur de recouvrement pour différents angles de biseautage de la plaque en aluminium.

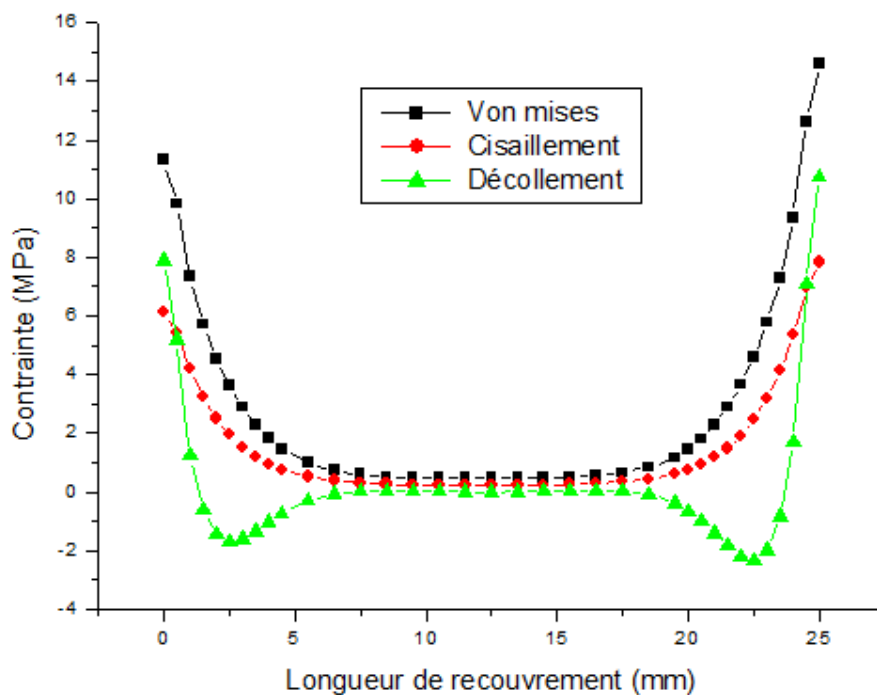


Figure III.14 : Distribution des contraintes équivalentes (Von mises, Cisaillement et décollement) suivant la longueur de recouvrement pour un angle $\theta = 10^\circ$.

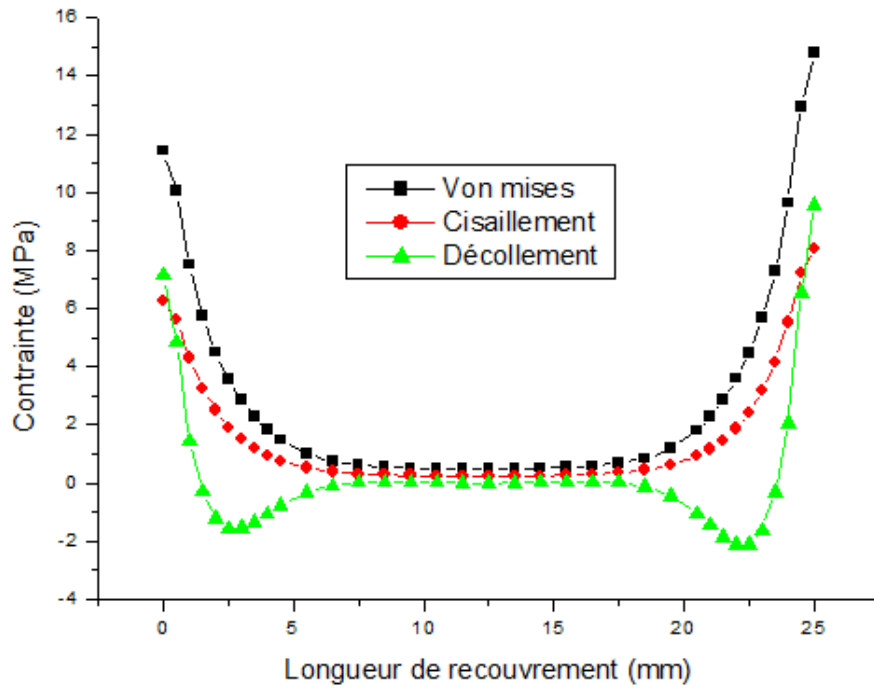


Figure III.15 : Distribution des contraintes équivalentes (Von mises, Cisaillement et décollement) suivant la longueur de recouvrement pour un angle $\theta = 40^\circ$.

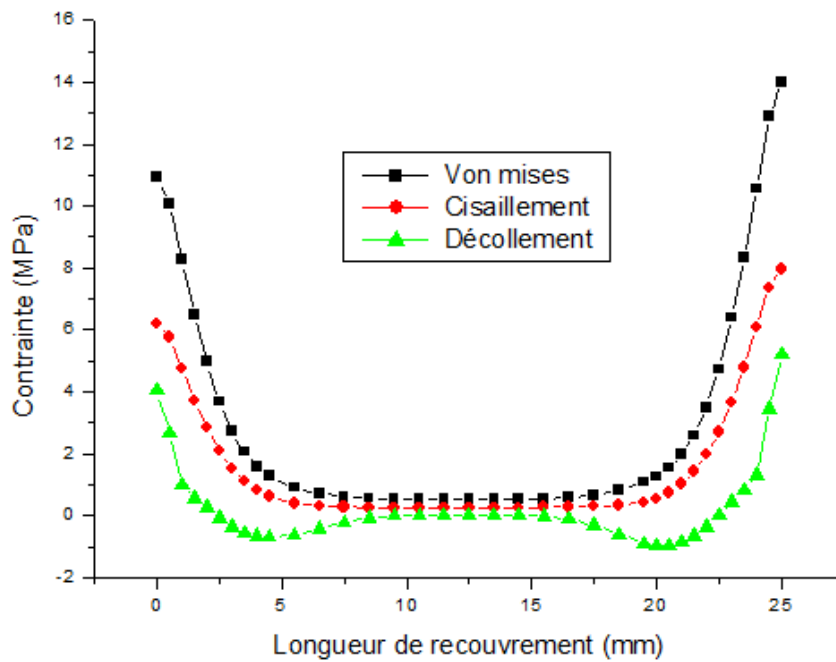


Figure III.16 : Distribution des contraintes équivalentes (Von mises, Cisaillement et décollement) suivant la longueur et la largeur de recouvrement pour un angle $\theta = 70^\circ$.

joint	σ_{Mises}	σ_{xy}	σ_{yy}
Eprouvette simple	14.53	7.76	10.75
Biseautage de la plaque $\theta = 10^\circ$	14.61	7.83	10.73
Biseautage de la plaque $\theta = 40^\circ$	11.75	6.35	7.39
Biseautage de la plaque $\theta = 70^\circ$	14	7.96	5.21

Tableau III.5: résultats des contraintes suivant la longueur du joint (MPa).

D'après le tableau III.5 qui présente les résultats trouvés avec l'aide du code de calcul ABAQUS, on remarque bien qu'avec l'application d'un biseautage de 40° et 70° au niveau des substrats, on aura une baisse des contraintes par rapport à une géométrie sans modification. Par contre pour un angle de 10° on remarque que les résultats trouvés sont égaux aux résultats d'une éprouvette simple car il n'y a pas une grande différence de géométrie.

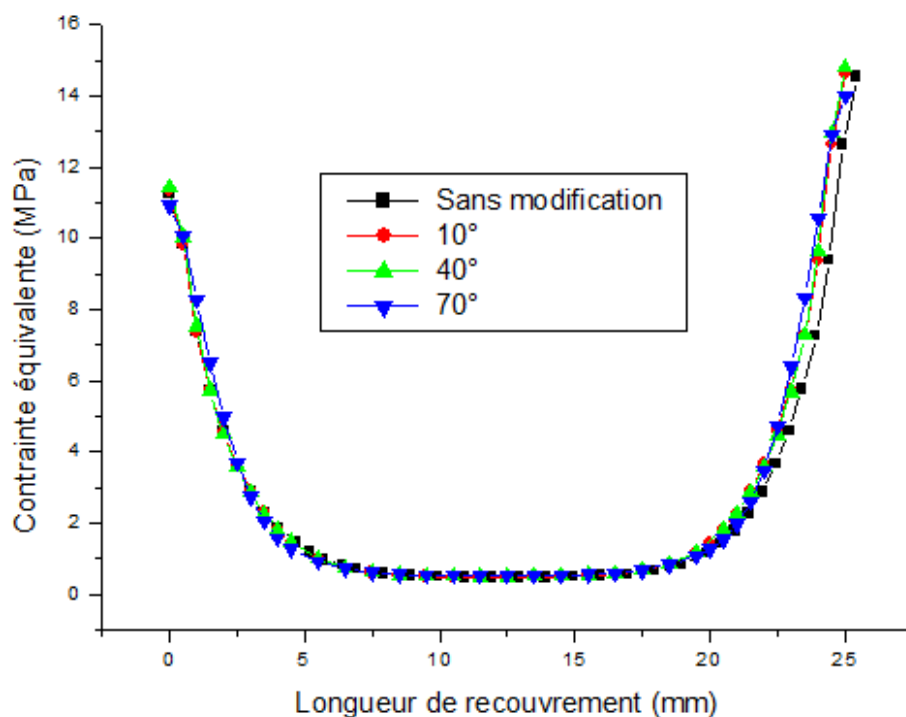


Figure III.17 : Distribution des contraintes équivalentes Von Mises suivant la longueur de recouvrement pour les deux formes géométriques simple et biseautage de la plaque 10° , 40° , 70° .

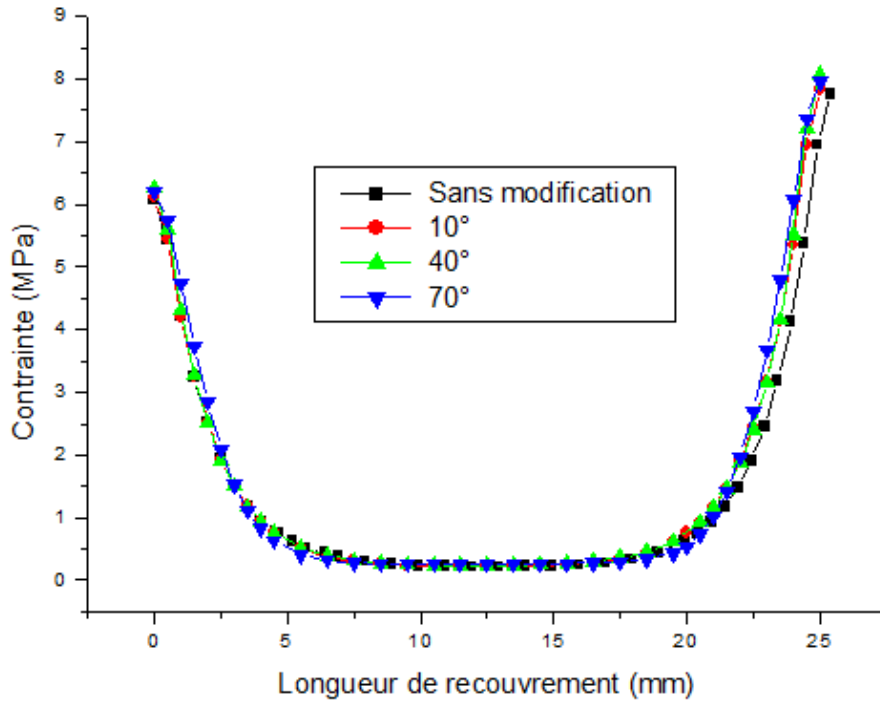


Figure III.18 : Distribution des contraintes de cisaillement suivant la longueur de recouvrement pour les deux formes géométriques simple et biseautage de la plaque 10°, 40°, 70°.

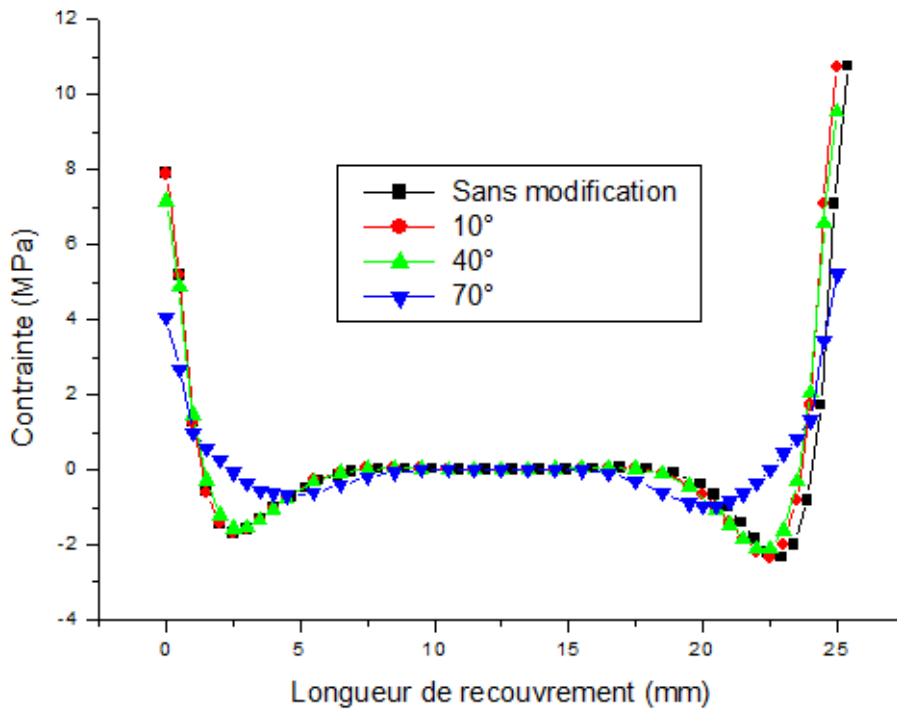


Figure III.19 : Distribution des contraintes de cisaillement suivant la longueur de recouvrement pour les deux formes géométriques simple et biseautage de la plaque 10°, 40°, 70°.

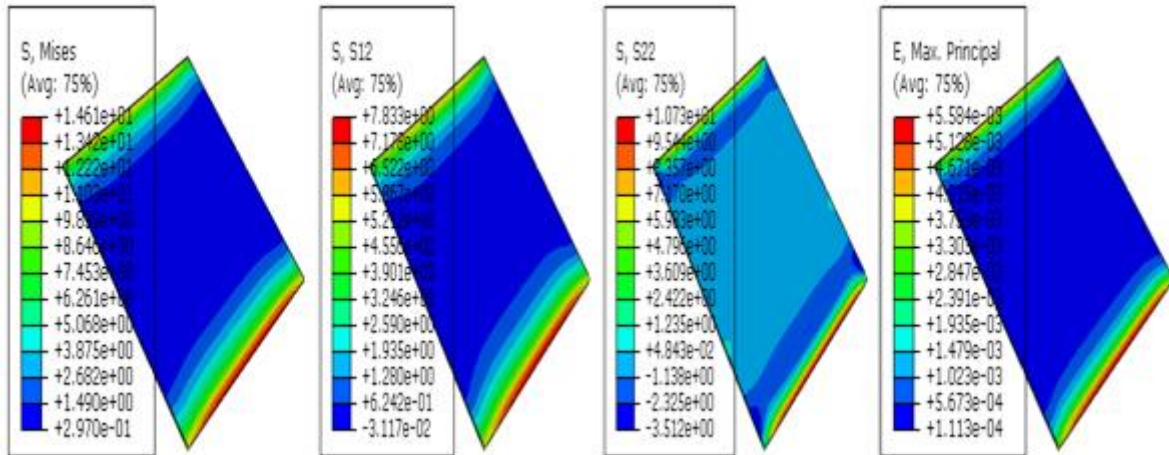
Les figures III.17, III.18 et III.19 représentent la variation des contraintes de Von mises, contraintes de cisaillement et contraintes de décollement suivant la longueur du joint, on

remarque que pour les quatre formes , les valeurs maximales se situent toujours aux extrémités du joints.

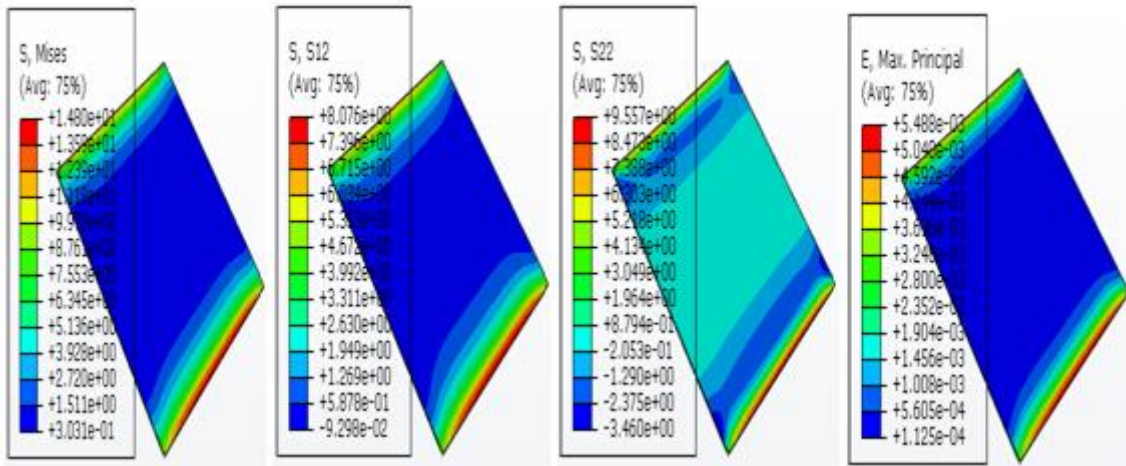
Pour les contraintes de décollement qui sont représentées dans la figure III.19 on remarque bien que la symétrie de la distribution des contraintes est bien présentée. Selon le graphe, suivant la longueur, on voit bien qu'avec un angle de $\theta = 40^\circ$, nous avons obtenu les contraintes minimales.

La figure III.20, représente les niveaux des contraintes équivalentes (Von mises, cisaillement, décollement) dans le joint d'adhésif. On remarque clairement les zones où les contraintes sont maximales et minimales.

- pour un angle $\theta = 10^\circ$



- pour un angle $\theta = 40^\circ$



- pour un angle $\theta = 70^\circ$

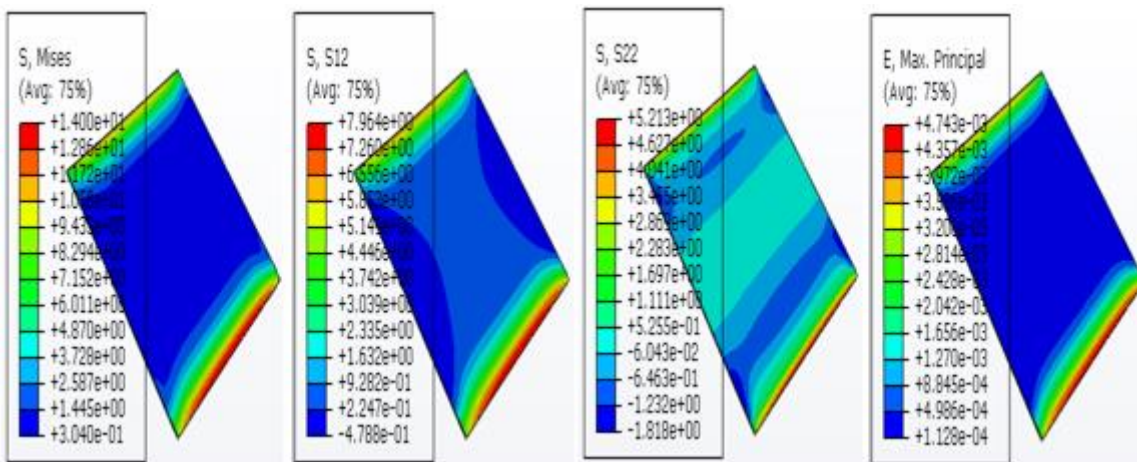


Figure III.20 : Distributions des contraintes σ_{eq} , σ_{22} , σ_{12} , σ_{max} dans le joint.

V.3. Bourrelet d'adhésif :

La présence d'un bourrelet d'adhésifs aux extrémités du recouvrement a fait l'objet d'étude détaillé par Adams [26]. Ainsi, la présence d'un bourrelet de colle peut améliorer considérablement la tenue mécanique de l'assemblage en réduisant les concentrations de contraintes aux extrémités du joint. Les autres ont montré que celui-ci réduisait les pics de surcontrainte au bord du joint, mais qu'il était bien souvent, du fait de l'existence de contraintes de traction importantes, le lieu d'initiation privilégié de la rupture. Expérimentalement, la corrélation avec les études numériques menées a été faite dans Tsai and Morton [27]. Une figure de cette étude est reprise en figure III.21. Il s'agit de franges de Moiré représentant les champs de déformation du joint. On remarque bien les variations en déformation sont moins brusques lorsqu'un bourrelet de colle est présent. [34]

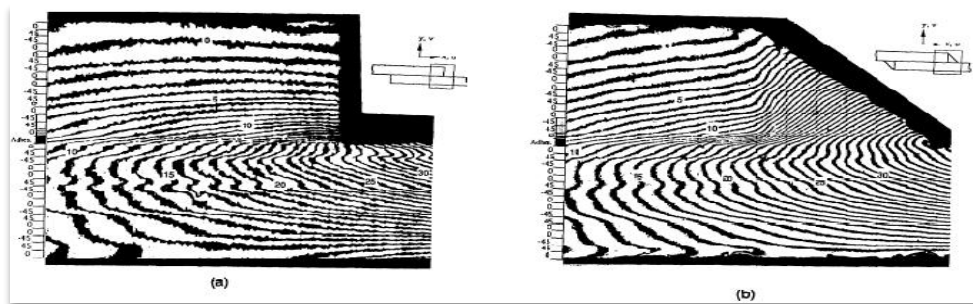


Figure III.21: Observations de Moiré de l'extrémité d'un joint soumis à du cisaillement a) pour un cas ne présentant pas de bourrelet de colle b) pour un cas présentant un bourrelet de colle Tsai et Morton.

Dans Belingardi et al [28], il est conseillé de faire en sorte que le bourrelet de colle recouvre le côté entier de l'adhérent comme en figure III.21.b. L'étude adopte une hypothèse de bord droit du bourrelet, et l'angle optimal est déterminé égal à 45 degrés.

Dans Lang and Mallick [29], les auteurs se sont intéressés à toutes les formes possibles de bourrelet de colle. La forme elliptique y est déterminée comme optimale et il est noté que la présence du bourrelet de la colle diminue davantage la contrainte d'arrachement que la contrainte de cisaillement. Plus récemment, Andreassi et al. [30] se sont intéressés à la fois à la modélisation de la formation de ce bourrelet de colle par des aspects de mécanique des fluides, et à l'influence du bourrelet formé sur les champs de contraintes. Une réduction de la contrainte maximale de 20% est observée lorsque le bourrelet est de forme elliptique.

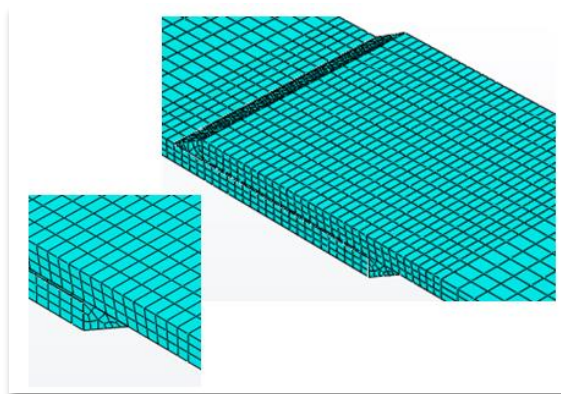


Figure III.22 : Représentation du bord libre de l'adhésif

Pour étudier l'influence du bourrelet d'adhésif sur les distributions des contraintes on a pris toujours les mêmes conditions présent auparavant. On note clairement la modification du bord de l'adhésif avec différents angles du bourrelet de l'adhésif. Un maillage fin a été introduit au bord libre dans le but d'obtenir des résultats précis.

Les figures III.22, III.23 et III.24 représentent les distributions des contraintes équivalentes de Von mises, décollement ainsi que les contraintes de cisaillement suivant la longueur et la largeur du joint d'adhésif au niveau de l'interface adhésif/adhérent.

Joint	σ_{Mises}	σ_{xy}	σ_{yy}
Eprouvette simple	14.53	7.76	10.75
Bourrelet de l'adhésif $\theta = 10^\circ$	12.08	6.71	7.37
Bourrelet de l'adhésif $\theta = 40^\circ$	8.33	4.64	3.24
Bourrelet de l'adhésif $\theta = 70^\circ$	6.52	3.61	2.23

Tableau III.6: résultats des contraintes suivant la largeur du joint.

D'après le tableau III.6 les résultats de simulation trouvés nous fait remarquer que pour ce modèle géométrie, on trouve des contraintes minimales avec un angle de 70° qui appliqué sur le substrat (biseautage) et l'adhésif (bourrelet). On voit aussi que pour cet angle de 70° , on trouve une contrainte de décollement aussi faible par rapport aux autres angles. Les figures III.22, III.23 et III.24 représentent la variation des contraintes Von mises, les contraintes de cisaillement et les contraintes de décollement suivant la longueur de recouvrement.

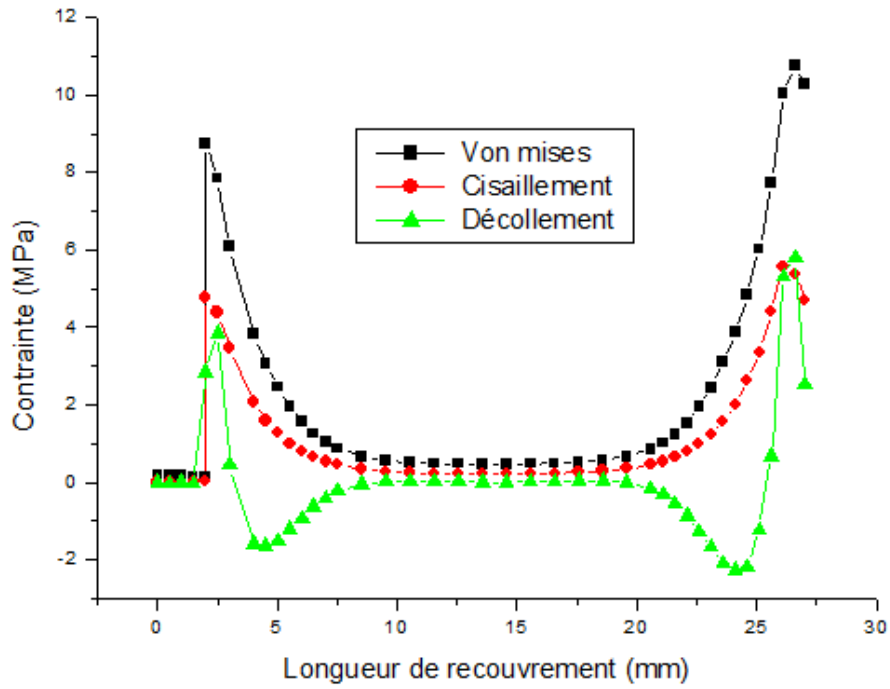


Figure III.22 : Distribution des contraintes (Von mises, Cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement pour un angle de 10°.

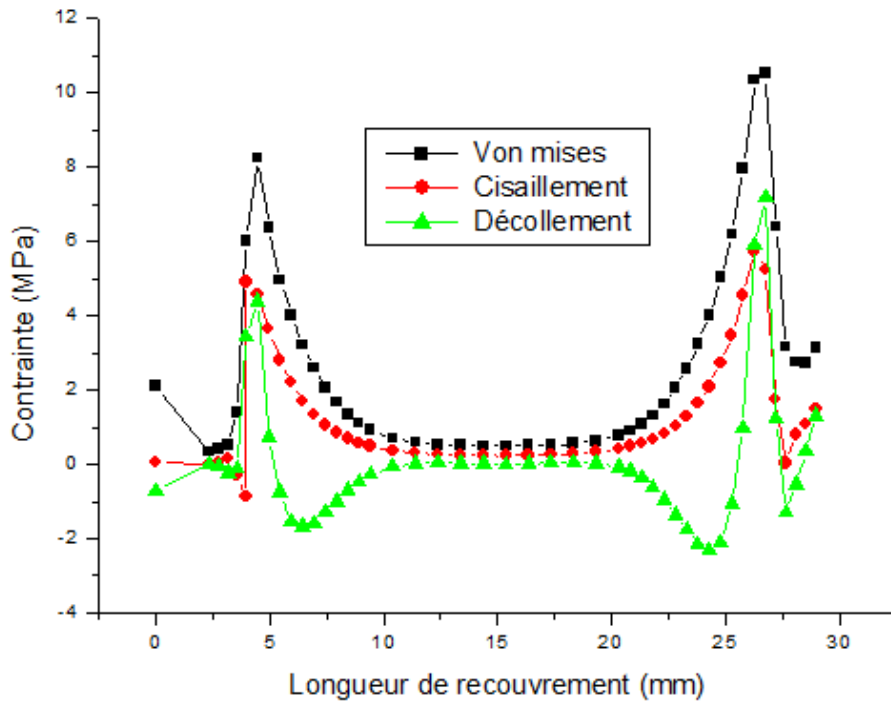


Figure III.23 : Distribution des contraintes (Von mises, Cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement pour un angle de 40°.

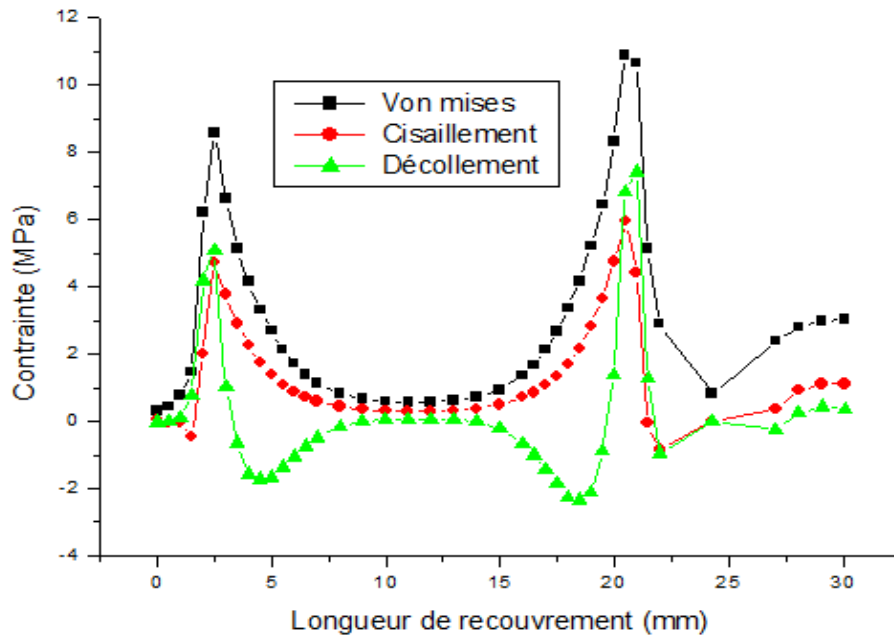


Figure III.24 : Distribution des contraintes (Von mises, Cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement pour un angle de 70°.

D’après les figures III.25, III.26, III.27 représentent la variation des contraintes Von mises, cisaillement et décollement pour les trois angles de bourrelet. On remarque bien que l’augmentation d’angle de bourrelet crée une diminution de contrainte.

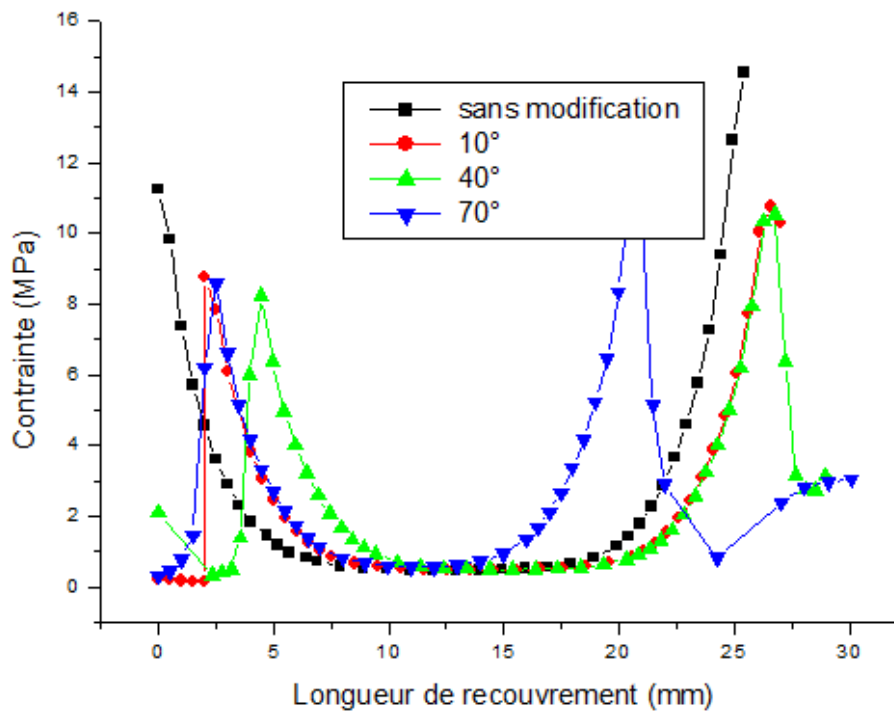


Figure III.25 : Distribution des contraintes équivalentes Von mise suivant la longueur de recouvrement pour les trois angles de bourrelet d’adhésif.

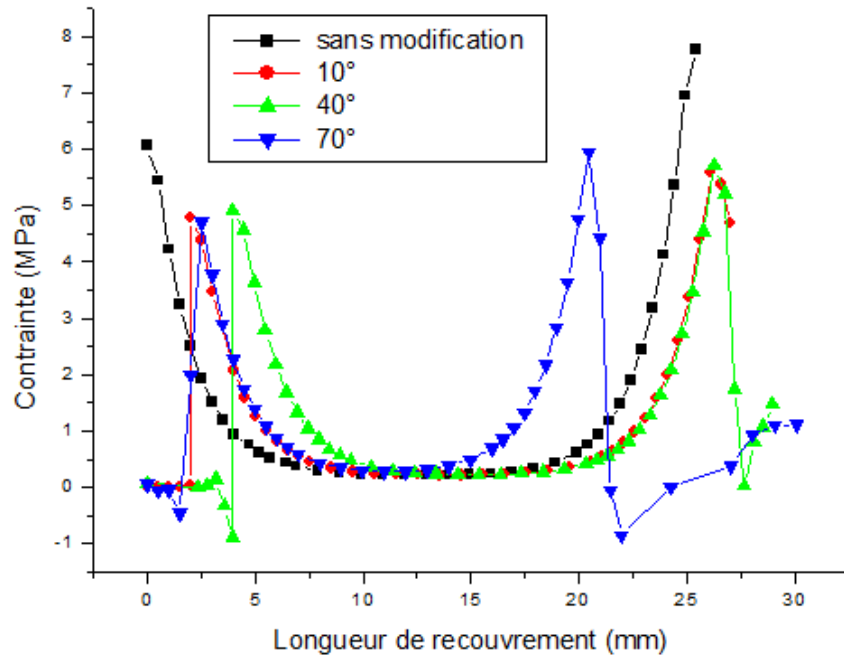


Figure III.26 : Distribution des contraintes de cisaillement suivant la longueur de recouvrement pour les trois angles de bourrelet d'adhésif.

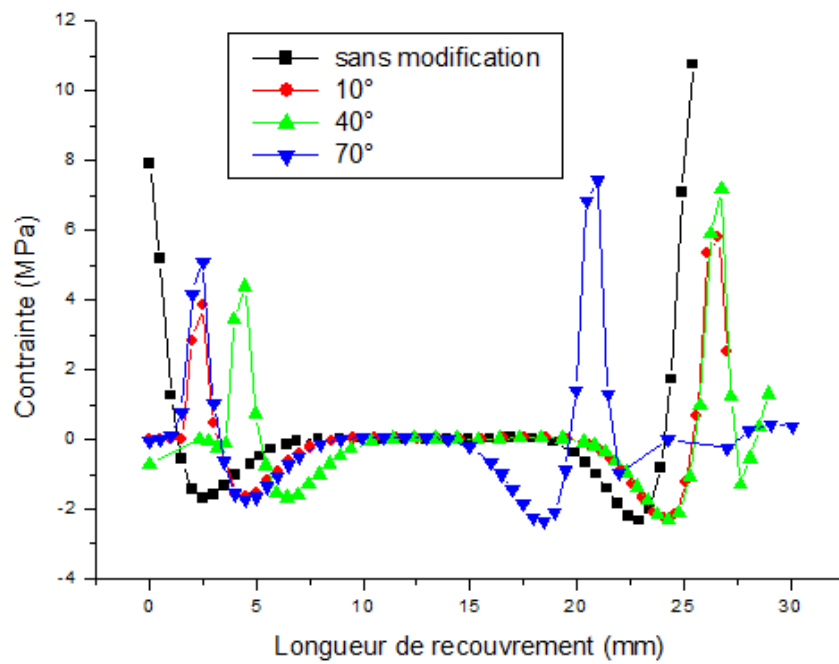
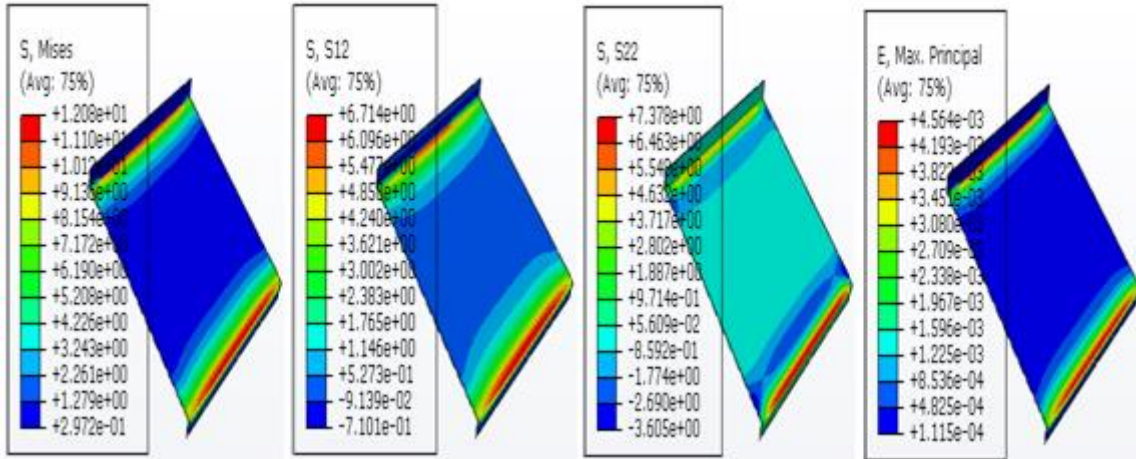
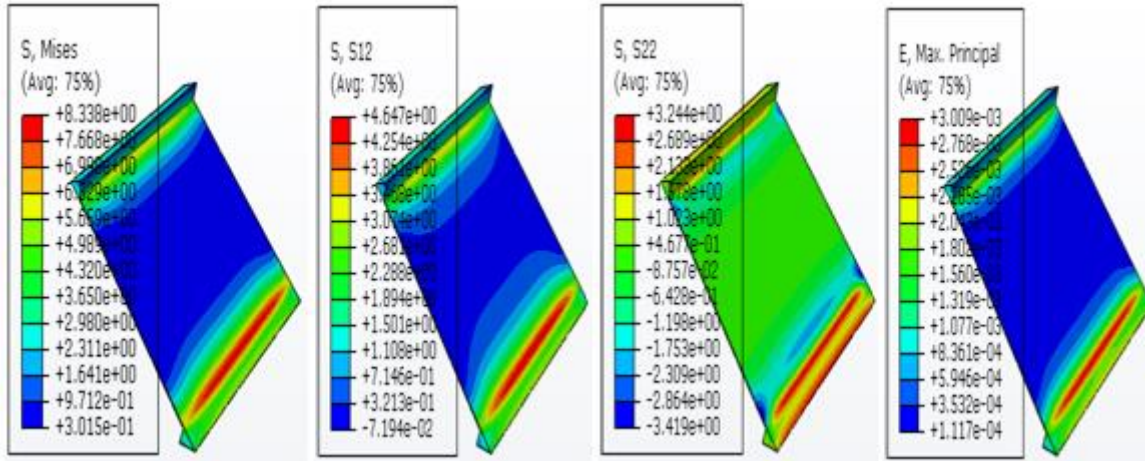


Figure III.27 : Distribution des contraintes de décollement suivant la longueur de recouvrement pour les trois angles de bourrelet d'adhésif.

- pour un angle $\theta = 10^\circ$



- pour un angle $\theta = 40^\circ$



- pour un angle $\theta = 70^\circ$

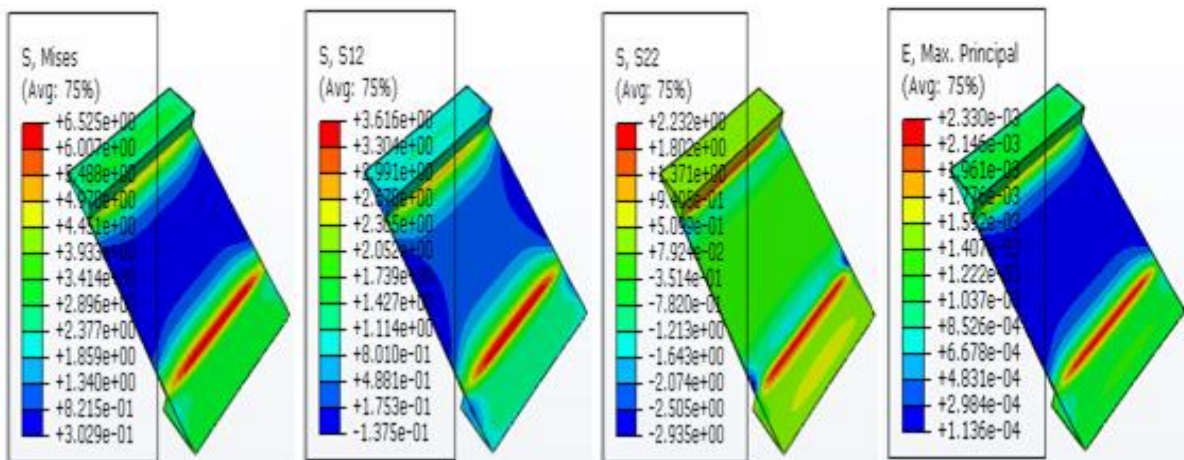


Figure III.28 : Distributions des contraintes σ_{eq} , σ_{22} , σ_{12} , σ_{max} dans le joint.

V.4. biseautage interne de la plaque avec bourrelet de l'adhésif :

Le biseautage des supports aux extrémités du recouvrement peut paraître intéressant, car une diminution de l'épaisseur à ce niveau minimise le moment de flexion autour du joint entraînant ainsi une diminution des surcontraintes de décollement σ_{22} .

En effet, Hart Smith ainsi que R. Adams montrent qu'un bourrelet d'adhésif autour du joint améliore la tenue mécanique de l'assemblage que le biseautage des supports ; cependant la combinaison d'un biseautage interne avec un bourrelet conduit à une résistance maximale de l'assemblage. [34]

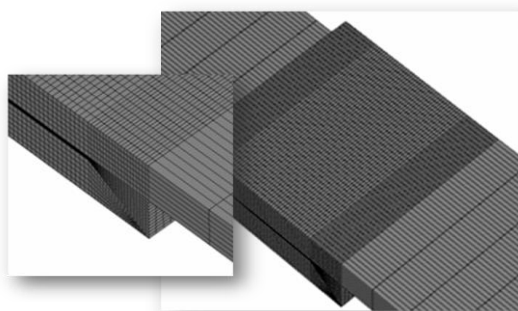


Figure III.29 : Représentation des bords libres et non libres pour un modèle avec biseautage interne du plaque et bourrelet d'adhésif.

La figure III.29 montre le maillage d'un assemblage en présence d'un bourrelet de l'adhésif et d'un biseautage du substrat.

Un maillage fin a été introduit aux deux bords de la plaque et de l'adhésif pour avoir des résultats précis.

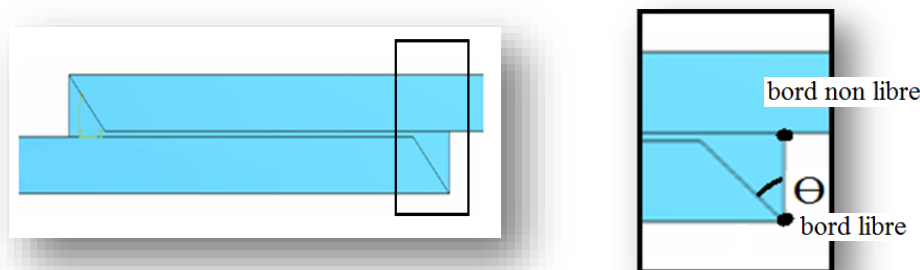


Figure III.30: représentations de bord libre et non libre de l'adhésif [34]

Les deux modifications géométriques du bord de l'adhésif et de la plaque à la fois ont présenté un effet important aux niveaux du bord de recouvrement, dans cette première étude la variation de l'angle de biseautage entraîne automatiquement la variation de d'angle de bourrelet de l'adhésif.

Les figures III.31, III.32, et III.33 présentent la variation des contraintes équivalentes, cisaillement et décollement suivant la longueur et la largeur de recouvrement.

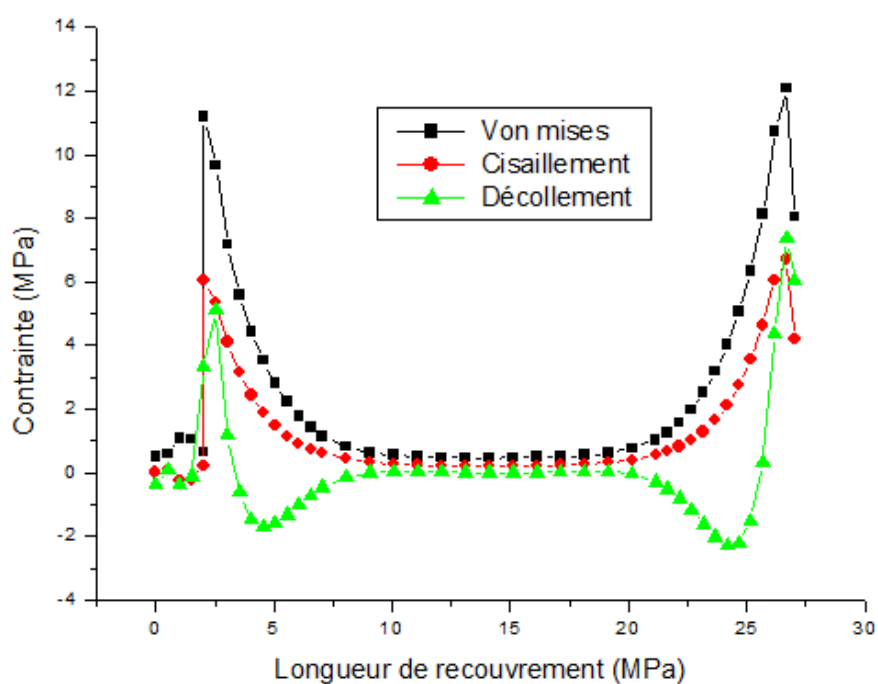


Figure III.31: Distribution des contraintes (Von mises, Cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement un biseautage interne de la plaque et le bourrelet d'adhésif avec un angle 10° .

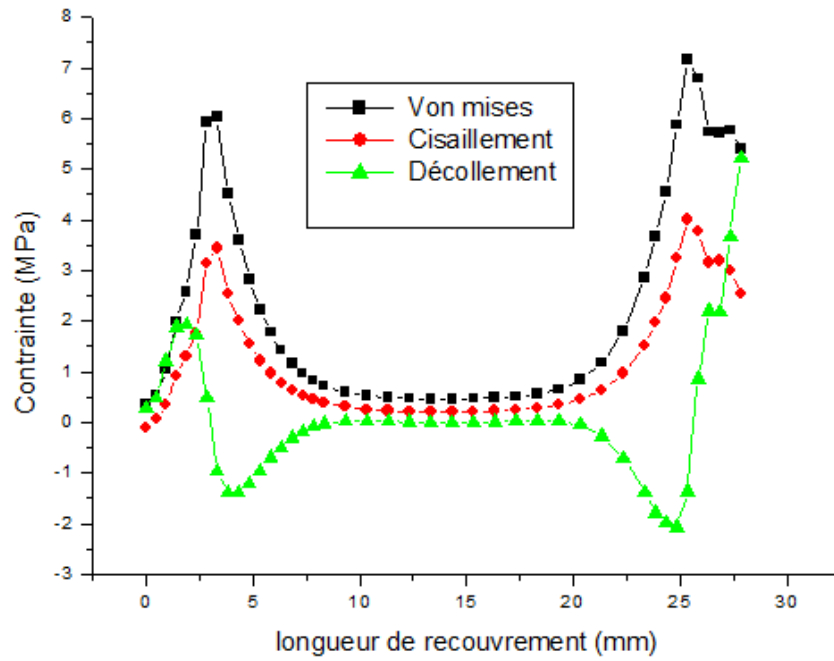


Figure III.32 : Distribution des contraintes (Von mises, Cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement un biseautage interne de la plaque et le bourrelet d'adhésif avec un angle 40°.

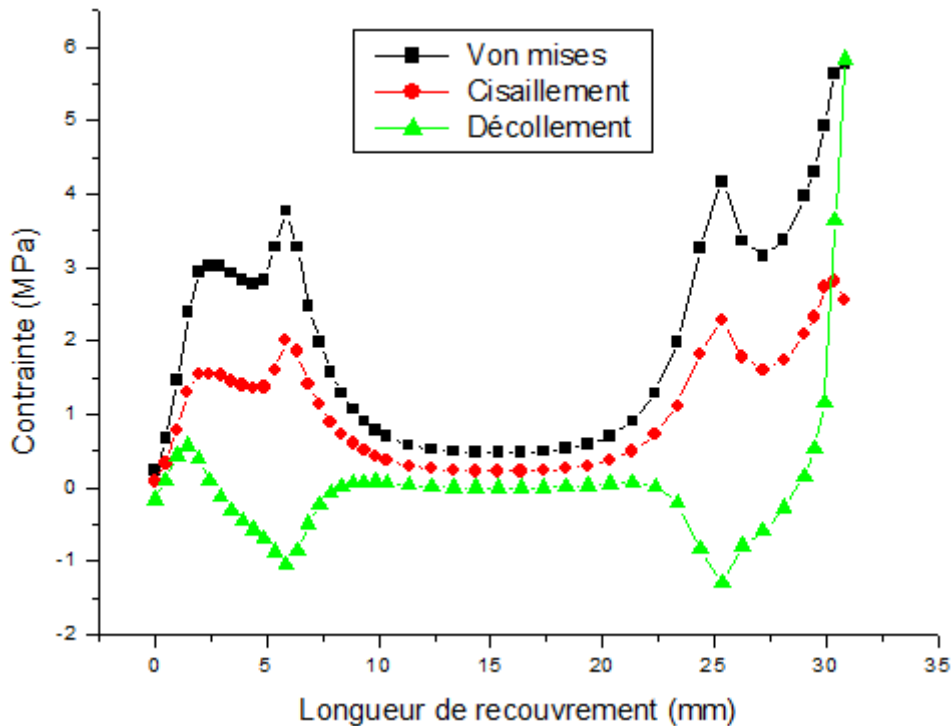


Figure III.33 : Distribution des contraintes (Von mises, Cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement un biseautage interne de la plaque et le bourrelet d'adhésif avec un angle 70°.

Joint	σ_{Mises}	σ_{xy}	σ_{yy}
Eprouvette simple	14.53	7.76	10.75
Biseautage interne de la plaque avec bourrelet d'adhésif $\theta = 10^\circ$	12.08	6.71	7.37
Biseautage interne de la plaque avec bourrelet d'adhésif $\theta = 40^\circ$	7.61	4.33	5.21
Biseautage interne de la plaque avec bourrelet d'adhésif $\theta = 70^\circ$	5.76	3.08	5.83

Tableau III.7 : résultats des contraintes pour le joint (MPa).

D'après le tableau III.7 qui représente les valeurs des contraintes de Von mises, de cisaillement et de décollement, on voit clairement que les valeurs minimales trouvés sont avec un angle de 70° .

Les figures III.34, III.35 et III.36, nous montrent la variation des contraintes Von mises, cisaillement et décollement.

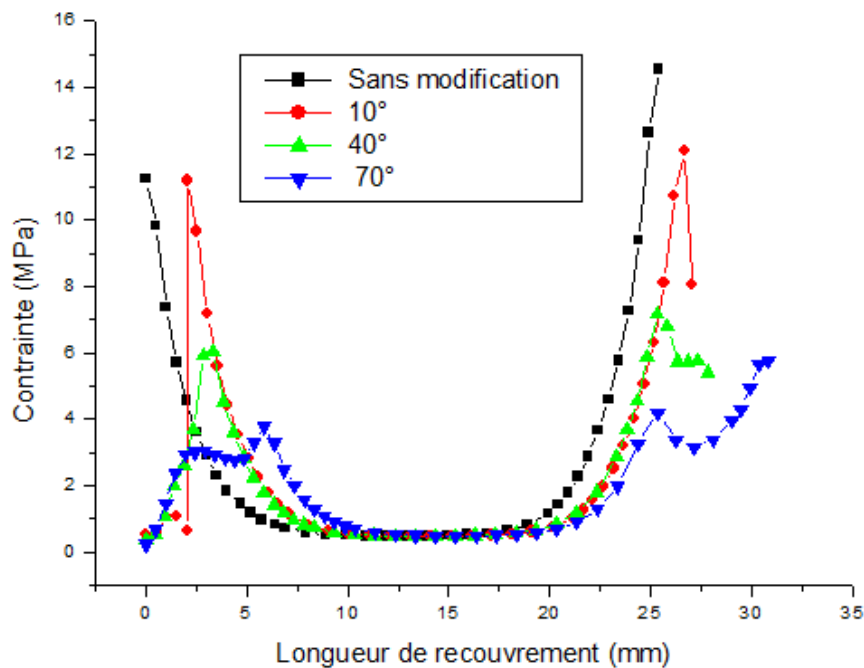


Figure III.34 : Distribution des contraintes de Von mises suivant la longueur de recouvrement pour les trois angles de bourrelet d'adhésif.

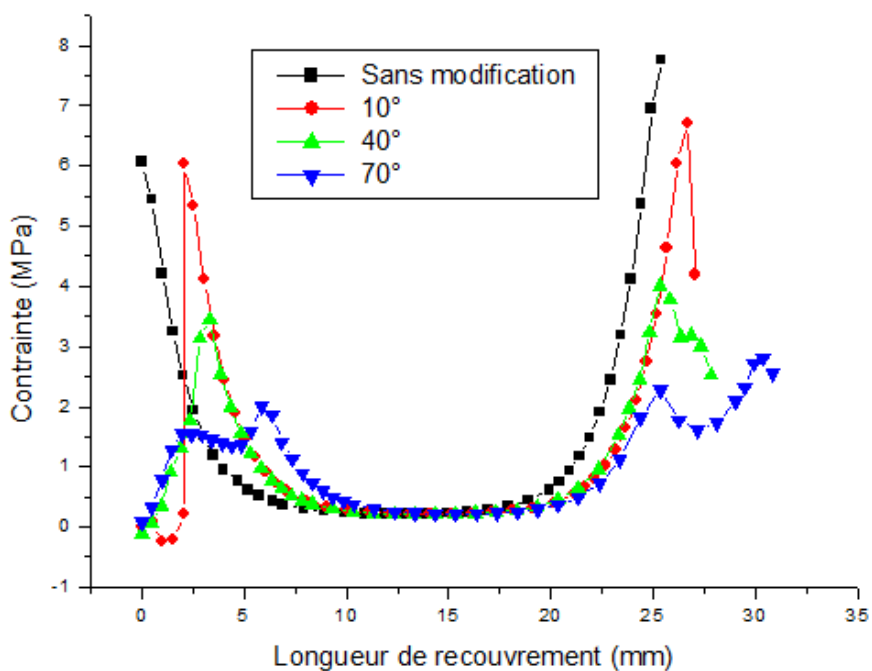


Figure III.35 : Distribution des contraintes de Cisaillement suivant la longueur de recouvrement pour les trois angles de bourrelet d'adhésif.

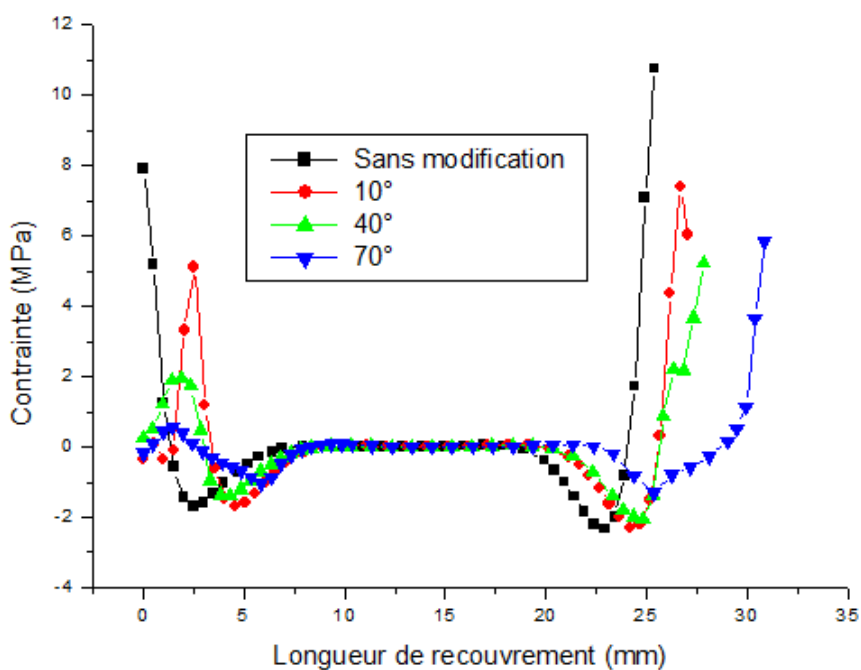
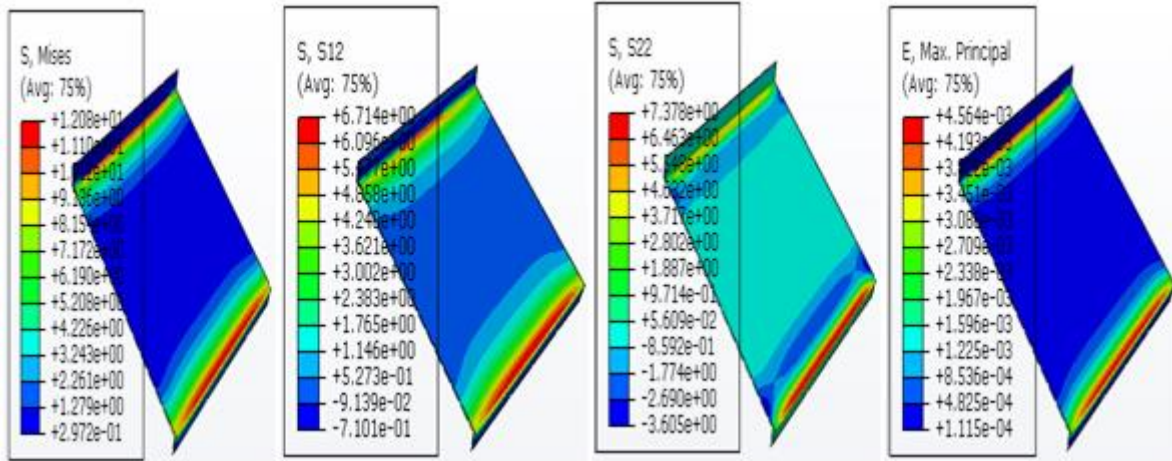
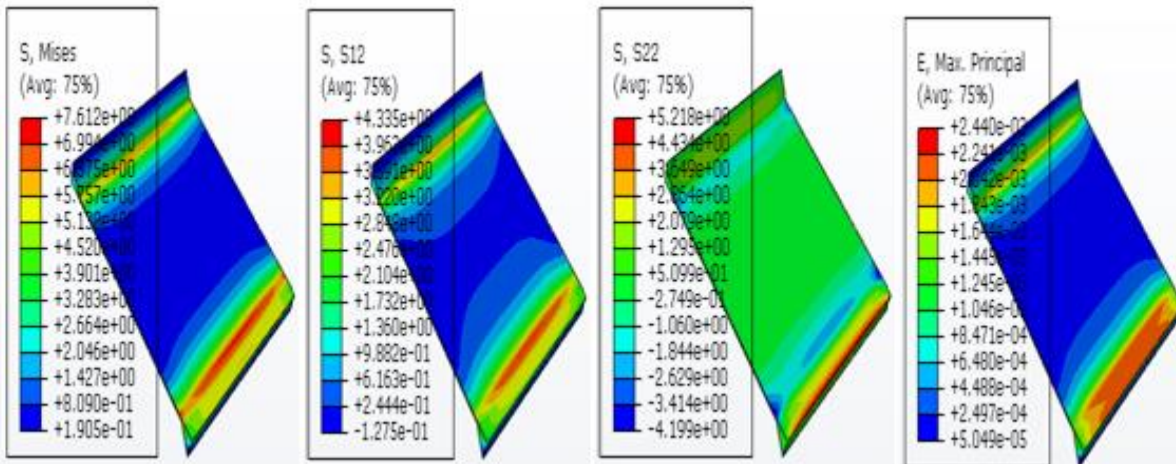


Figure III.36 : Distribution des contraintes de Décollement suivant la longueur de recouvrement pour les trois angles de bourrelet d'adhésif.

- pour un angle $\theta = 10^\circ$



- pour un angle $\theta = 40^\circ$



- pour un angle $\theta = 70^\circ$

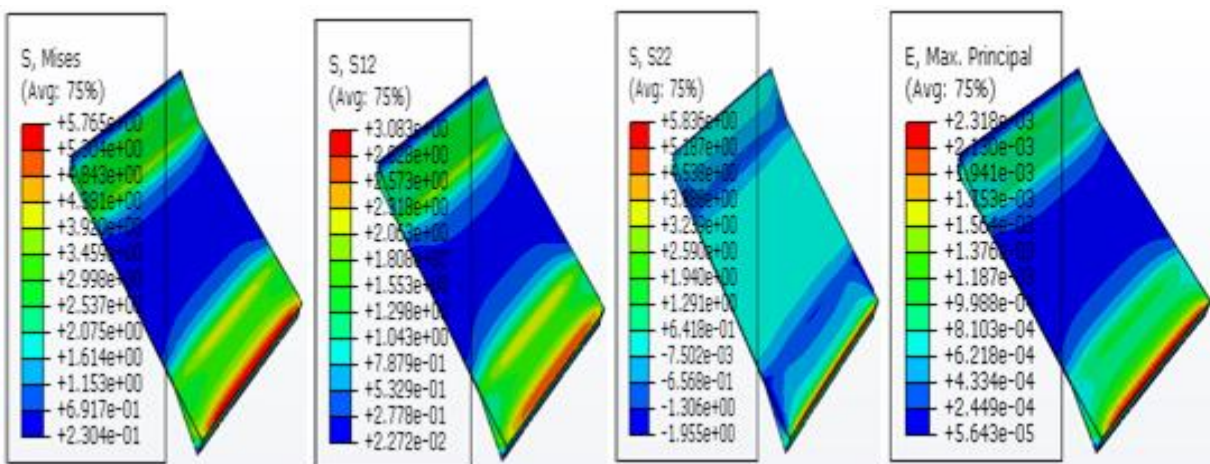


Figure III.37: Distributions des contraintes σ_{eq} , σ_{22} , σ_{12} , σ_{max} dans le joint.

La figure III.37 représente la distribution des contraintes équivalentes (Von mises, cisaillement et décollement) sur le joint et montre les zones maximales et minimales des contraintes.

V.5. biseautage interne fixe avec bourrelet d'adhésif externe :

La dernière conception choisie dans cette modélisation est un couplage entre un biseautage interne de la plaque et un bourrelet externe de l'adhésif.

La géométrie de la plaque étant fixe on a fait varier seulement l'angle de bourrelet de l'adhésif. Dans Le but d'avoir une réduction des concentrations de contraintes au niveau des bords.

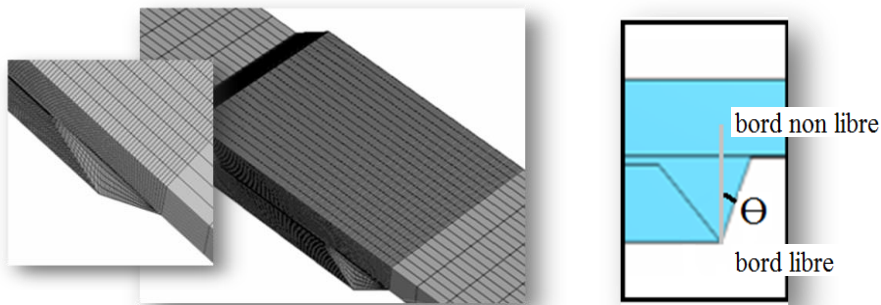


Figure III.38 : Représentation de bord libre et non libre pour un modèle de biseautage interne fixe avec bourrelet d'adhésif externe.

La figure III.38 montre le maillage d'un assemblage en présence d'un bourrelet de l'adhésif et du biseautage du substrat. Un maillage fin a été introduit au niveau des deux bords de la plaque ainsi que l'adhésif pour obtenir des résultats significatifs.

D'après les modèles analysés précédemment (bourrelet avec biseautage interne de la plaque), on a fixé l'angle de biseautage intérieure de la plaque avec un angle $\theta=45^\circ$; par contre l'angle du bourrelet de la colle varie dans notre étude figure (III.39).

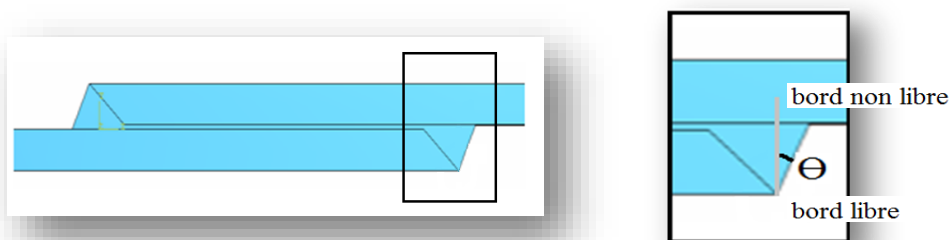


Figure III.39 : Représentation du bord libre et non libre de l'adhésif

Les figures III.40, III.41 et III.42 représentent la distribution des contraintes équivalentes de Von mises, de décollement et de cisaillement suivant la longueur et la largeur de recouvrement, il est bien noté que plus en augmente l'angle du bourrelet d'adhésif, le volume de l'adhésif augmente à l'extrémité du joint. Cette augmentation du volume donne une longueur de recouvrements plus importants donc une absorption des contraintes considérables. Ce qui nous donne par la suite une diminution des contraintes équivalente, ce qui nous ramène finalement à dire que cette modifications géométrique présente toujours un avantage mais seulement avec des angles faible.

Au niveau du bord libre la variations de l'angle donne pratiquement la même valeur de contrainte de Von mises par contre au niveau du bord libre l'augmentation de l'angle θ réduite clairement la contrainte de Von mises .

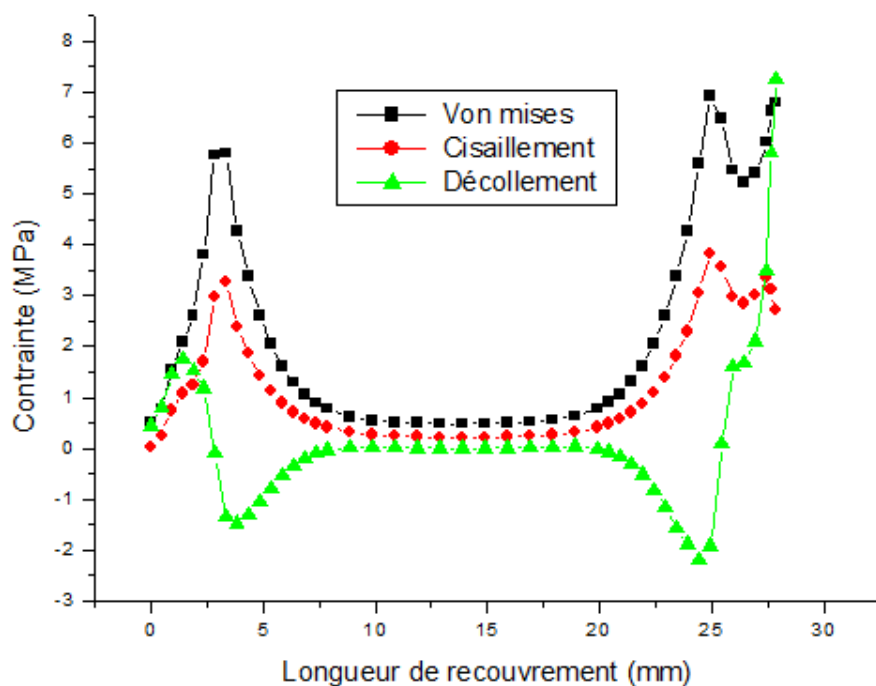


Figure III.40 : Distribution des contraintes (Von mises, Cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement un biseautage interne de la plaque fixe avec bourrelet d'adhésif externe avec un angle 10° .

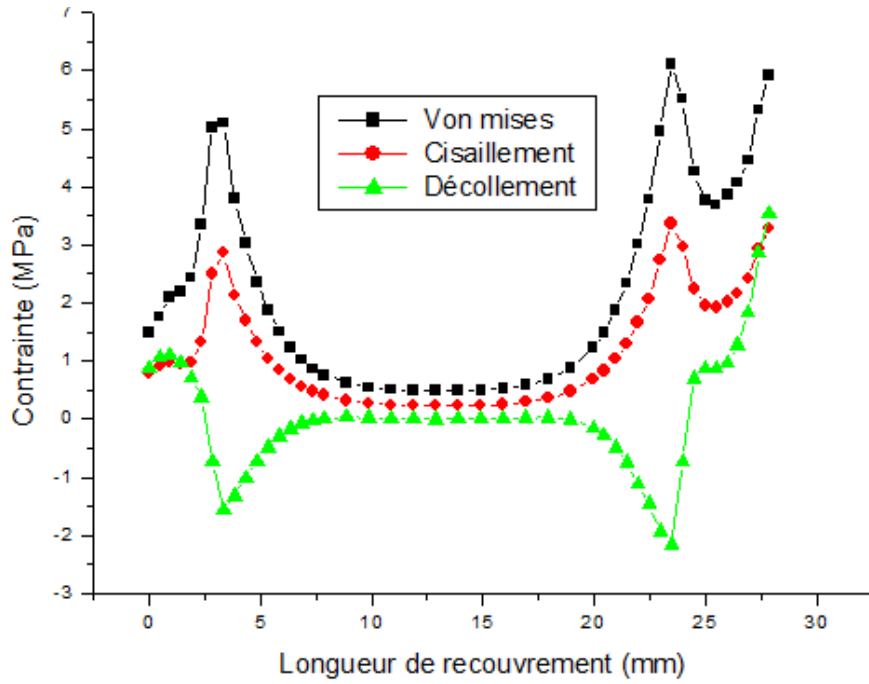


Figure III.41 : Distribution des contraintes (Von mises, Cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement un biseautage interne de la plaque fixe avec bourrelet d'adhésif externe avec un angle 40°.

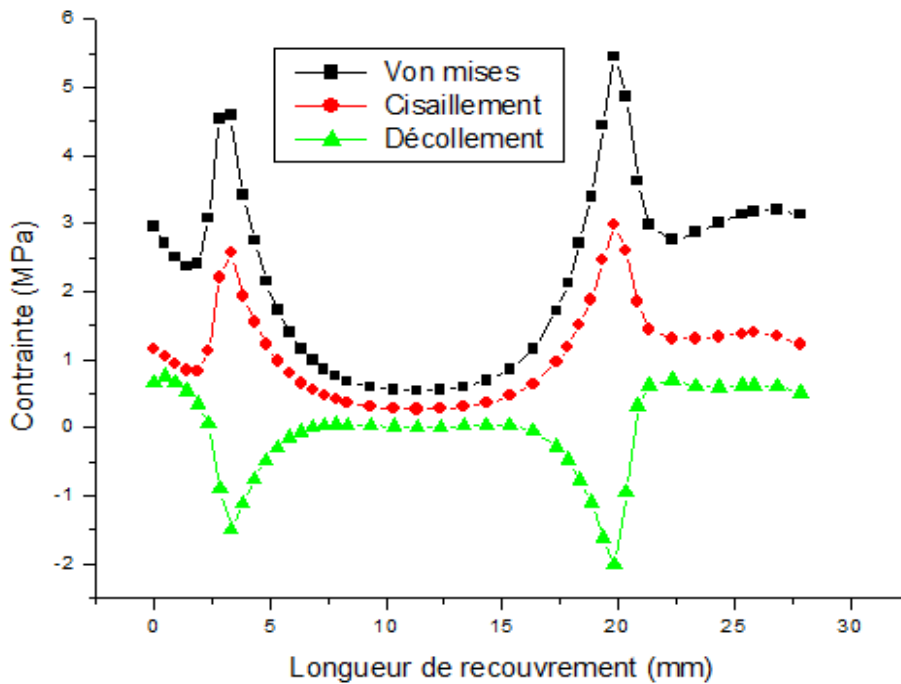


Figure III.42 : Distribution des contraintes (Von mises, Cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement un biseautage interne de la plaque fixe avec bourrelet d'adhésif externe avec un angle 70°.

D'après le tableau III.8, on remarque clairement que l'augmentation de l'angle de la géométrie entre biseautage du substrat et bourrelet d'adhésif entraîne une diminution des contraintes de Von mises, cisaillement et de décollement.

Joint	σ_{Mises}	σ_{xy}	σ_{yy}
Eprouvette simple	14.53	7.76	10.75
Biseautage interne de la plaque fixe avec bourrelet d'adhésif externe $\theta = 10^\circ$	7.29	4.12	7.26
Biseautage interne de la plaque fixe avec bourrelet d'adhésif externe $\theta = 45^\circ$	6.35	3.56	3.53
Biseautage interne de la plaque fixe avec bourrelet d'adhésif externe $\theta = 60^\circ$	5.64	3.15	1.06

Tableau III.8 : résultats des contraintes pour le joint (MPa).

Les figures III.43, III.44 et III.45 représente la comparaison des courbes (Von mises, cisaillement et décollement) suivant la longueur et la largeur du joint pour les trois angles $\theta = 10^\circ$, $\theta = 40^\circ$, $\theta = 70^\circ$.

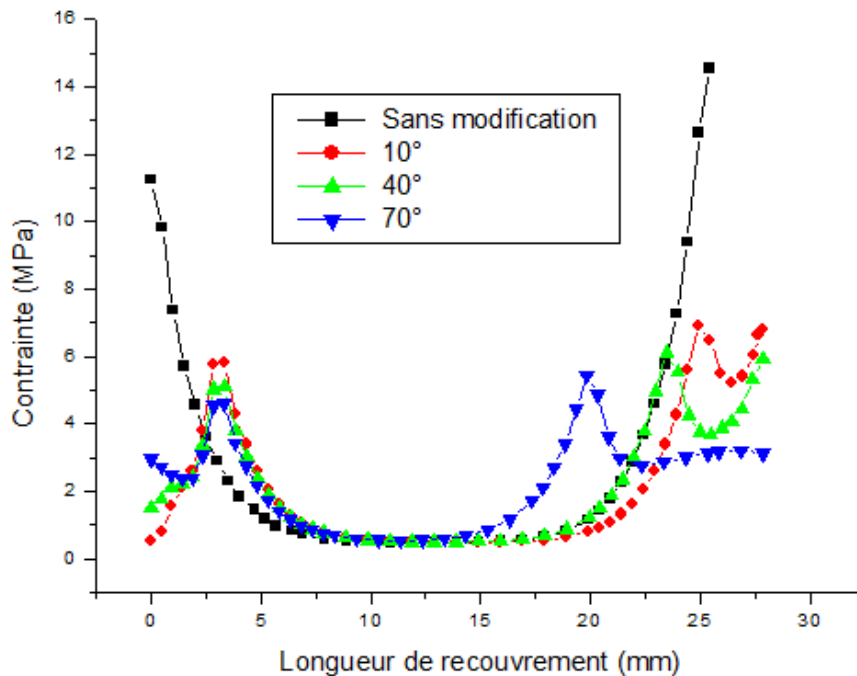


Figure III.43 : Distribution des contraintes de Von mises suivant la longueur de recouvrement pour les trois angles de biseautage interne de la plaque fixe avec bourrelet d'adhésif externe.

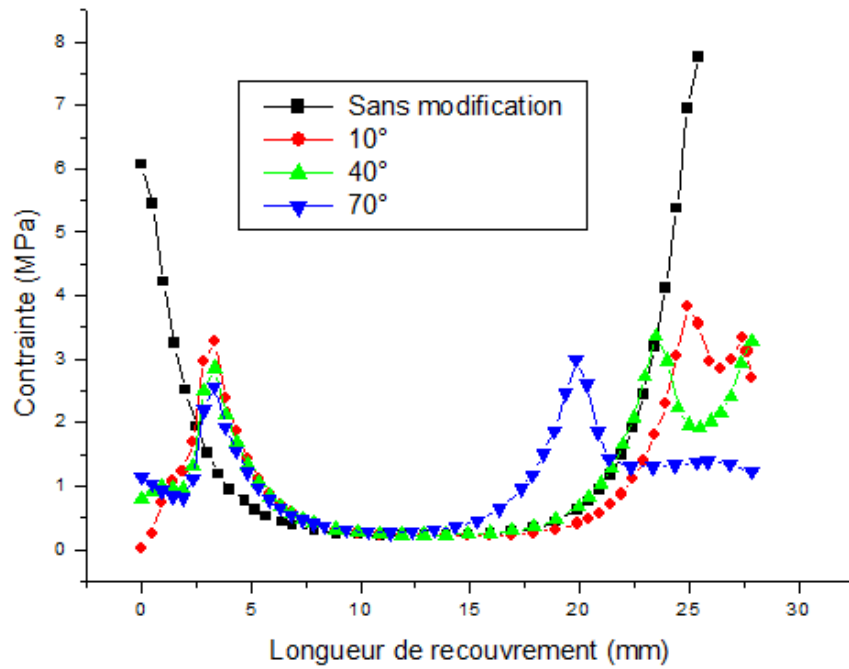


Figure III.44 : Distribution des contraintes de Cisaillement suivant la longueur de recouvrement pour les trois angles de biseautage interne de la plaque fixe avec bourrelet d'adhésif externe.

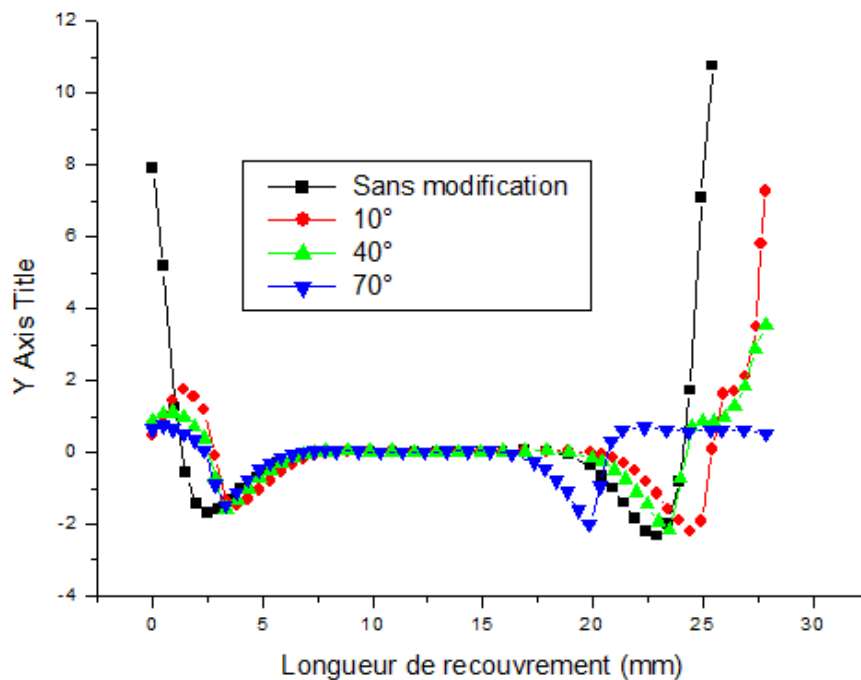
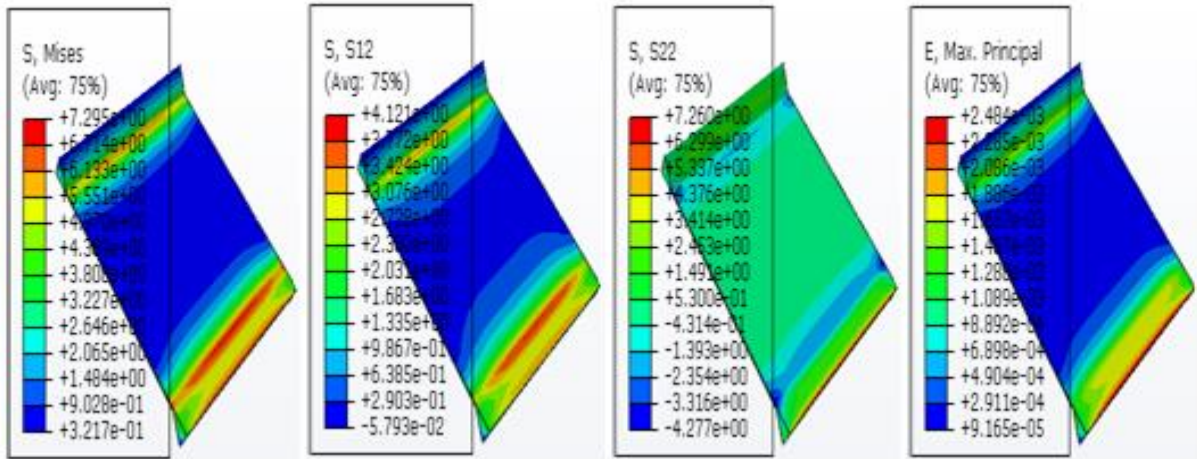


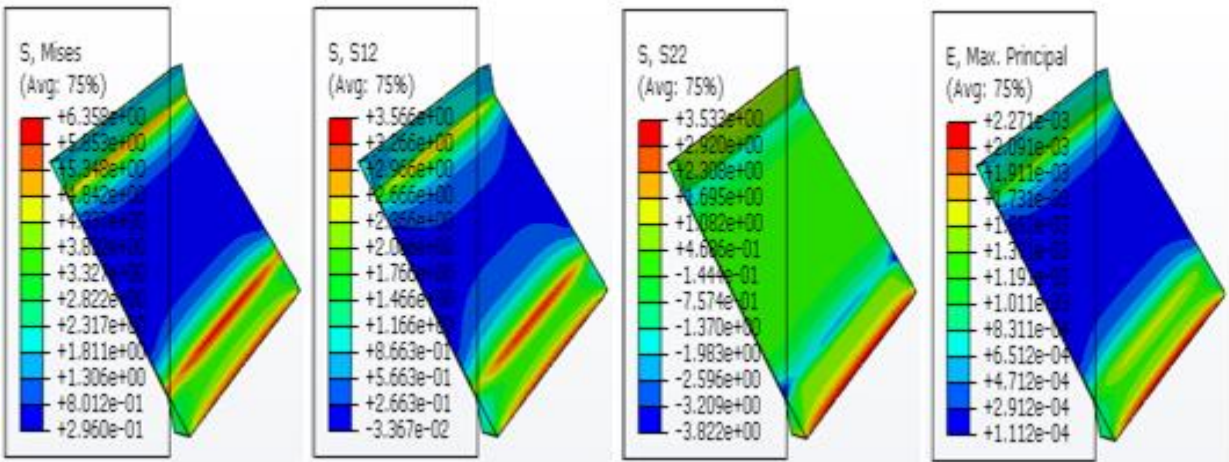
Figure III.45 : Distribution des contraintes de Décollement suivant la longueur de recouvrement pour les trois angles de biseautage interne de la plaque fixe avec bourrelet d'adhésif externe.

La figure III.46 représente les zones où se trouvent les contraintes maximales et les contraintes minimales de Von mises, cisaillement et de décollement sur le joint pour les différents angles appliqués.

- pour un angle $\theta = 10^\circ$



- pour un angle $\theta = 40^\circ$



- pour un angle $\theta = 70^\circ$

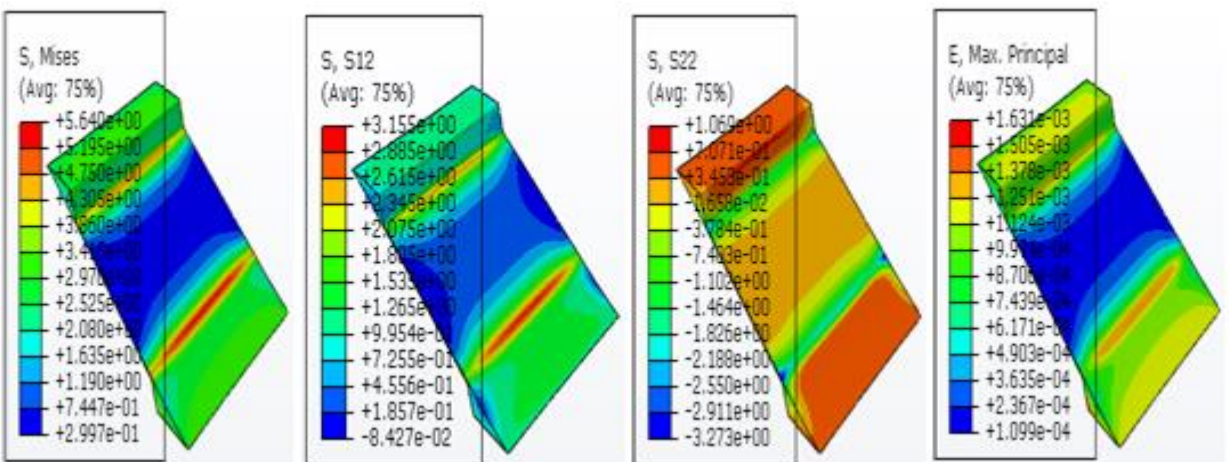


Figure III.46 : Distributions des contraintes σ_{eq} , σ_{22} , σ_{12} , σ_{max} dans le joint.

VI. L'effet de la présence des défauts dans le joint d'adhésif :

La nature des défauts que l'on peut rencontrer dans un assemblage collé varie selon le phénomène à l'origine de ce défaut. On peut ainsi trouver :

- une porosité due à des gaz de polymérisation ou de l'air emprisonné pendant la fabrication de l'assemblage.
- Des micro fissures dues à un fluage de l'adhésif, des contraintes résiduelles ou à des phénomènes de fatigue.
- Des zones de faible polymérisation causées par exemple par un mauvais mélange de l'adhésif, un mauvais dosage des composants ou un temps de polymérisation.
- Des zones de décollements pouvant être conséquentes et provenant généralement d'une déficience de la préparation de surface du substrat, de phénomènes de condensation à l'interface, ou à la présence de contaminants lors du collage. [34]

La géométrie et les dimensions de l'éprouvette à simple recouvrement sont représentées dans la figure III.47.

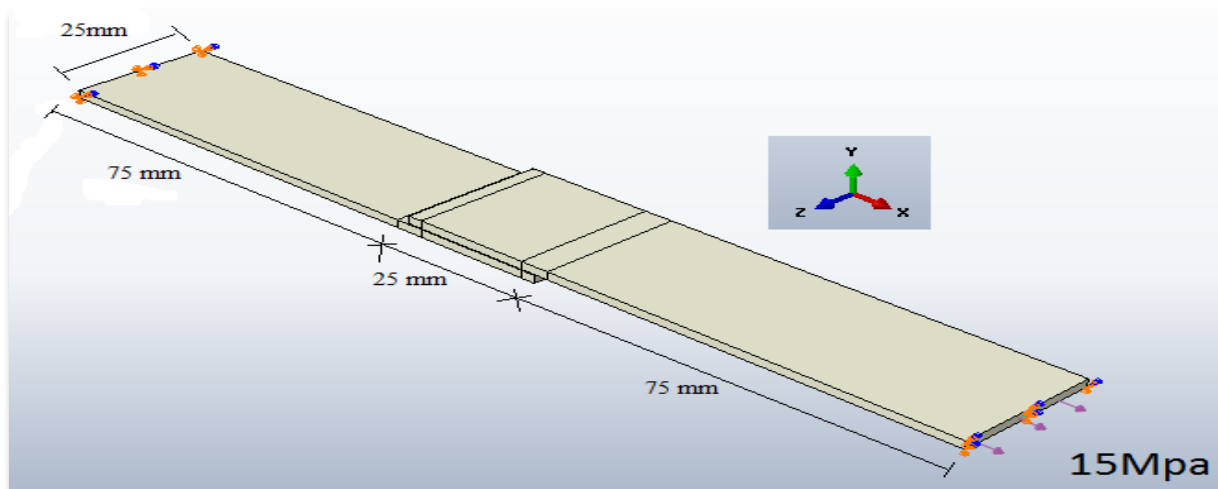


Figure III.47 : géométrie et dimensions du modèle simple recouvrement.

Les conditions aux limites appliquées sont classiques pour les modèles de traction de joints simple recouvrement. Le joint est orienté suivant la direction x, z est la direction de la largeur, y la direction normale au plan de joint.

- **Blocage à gauche** : les nœuds situés sur la face extrême gauche du joint sont bloqués en translation dans les directions X, Y et Z, et en rotation dans la direction z.

- **Traction à droite** : les nœuds situés sur la face extrême droite du joint sont bloqués en translation dans les directions Y et Z, et en rotation dans la direction Z. La sollicitation de traction de $\sigma = 15$ MPa est appliquée dans la direction X.

Les différents défauts appliqués sur le joint d'adhésif sont représentés sur la figure III.48 :

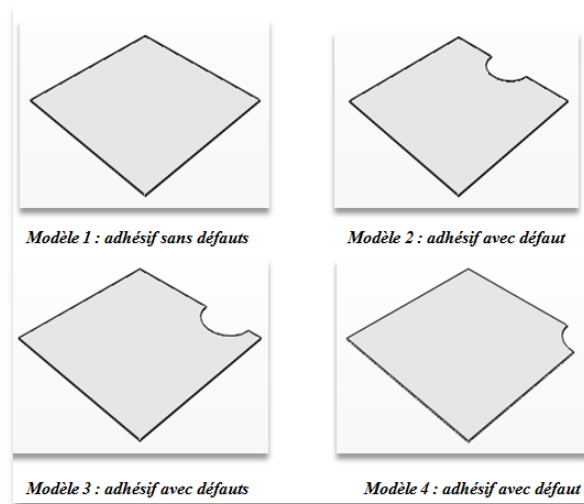


Figure III.48 : modèle de géométrie de l'adhésif et les dimensions des défauts.

- **Modèle 1** : présente un joint parfait et sans défaut de collage.
- **Modèle 2** : présente un joint avec un défaut d'une forme d'un demi-cercle sur le côté et au milieu de la surface.
- **Modèle 3** : présente le même défaut et plus proche de l'extrémité du joint.
- **Modèle 4** : présente un défaut qui se situe sur l'extrémité du joint

A partir de ces défauts, on va voir leurs effets sur la variation de contraintes suivant la largeur du joint et aussi leurs effets sur la concentration de contraintes aux extrémités du joint.

La figure III.49 présente le défaut au sein de l'assemblage.

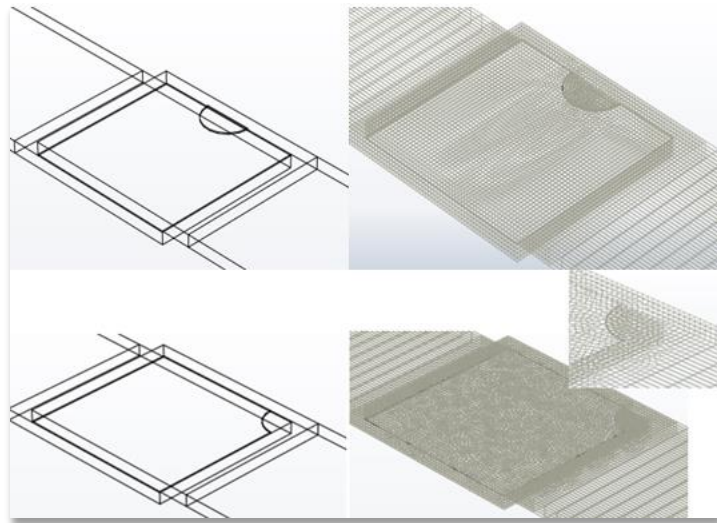


Figure III.49 : représentation du défaut dans l'assemblage.

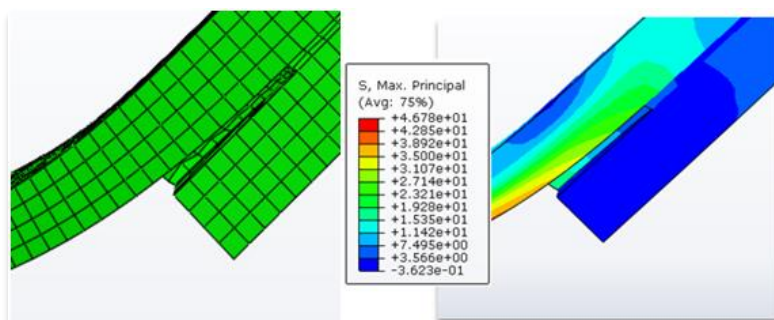


Figure III.50 : représentation du défaut dans l'assemblage après la modélisation.

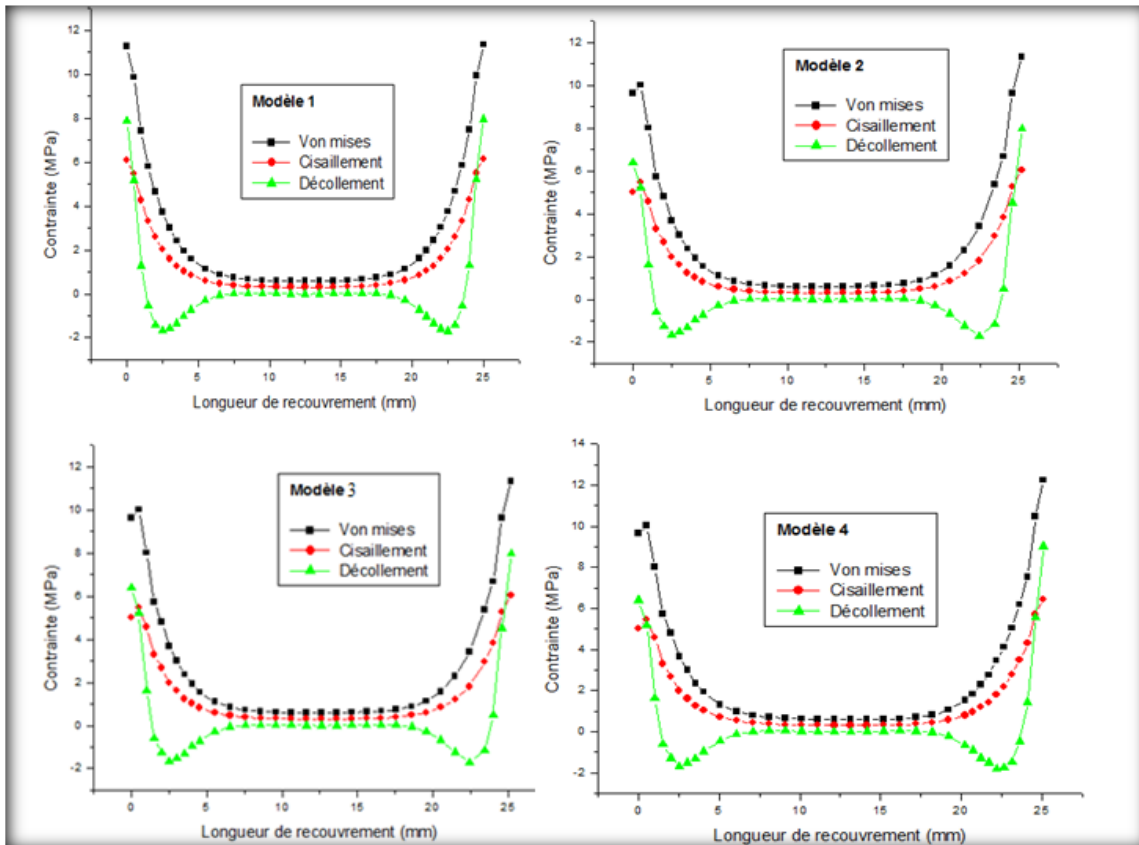


Figure III.51 : Distribution des contraintes de Von mises, cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement (Modèle 1, Modèle 2, modèle 3 et modèle 4)

La figure III.51 nous présente la variation des contraintes Von mises, cisaillement et de décollement suivant la longueur de recouvrement pour les quatre modèles.

Figure III.52 : Distribution des contraintes de Von mises, cisaillement et décollement suivant la largeur de recouvrement (Modèle 1, Modèle 2, modèle 3 et modèle 4)

Du fait que les zones extrêmes du joint sont celles qui supportent essentiellement le chargement appliqué, la surface de collage n’a pas une grande influence sur la résistance du joint.

En effet sur la base des résultats de notre étude, les chargements provoquant la rupture :

Joint	σ_{Mises}	σ_{xy}	σ_{yy}
Eprouvette simple	11.35	6.12	7.95
Modèle 1	11.79	6.22	8.57
Modèle 2	11.76	6.19	8.57
Modèle 3	17.30	8.65	12.59

Tableau III.9: résultats des contraintes pour le joint (MPa).

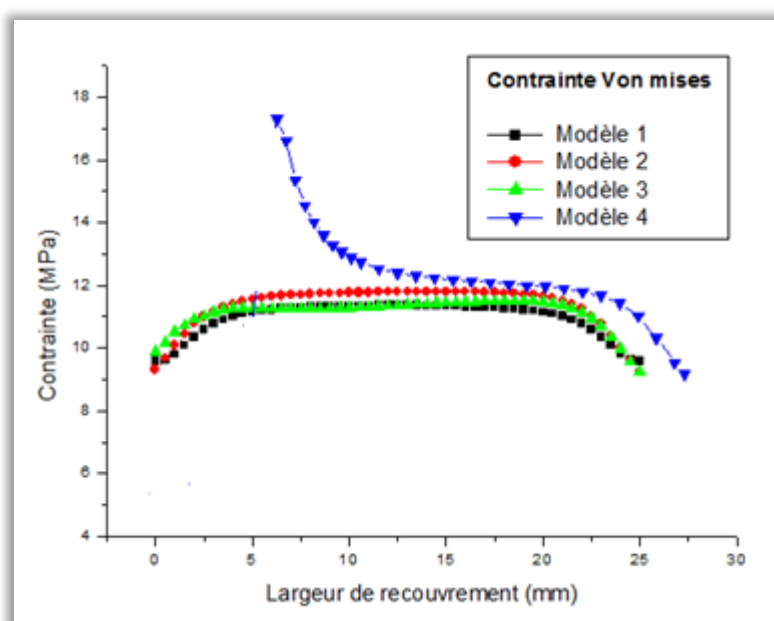


Figure III.53 : Distribution des contraintes équivalentes suivant la largeur de recouvrement (Von mises)

La figure III.53, III.54 et III.55 représente la variation des contraintes équivalente de Von mises, cisaillement et de décollement suivant la largeur du joint pour les différents cas des défauts appliqués sur le joint d'adhésif, on remarque qu'il y a une augmentation de contrainte en fonction de l'approche du défaut à l'extrémité du joint.

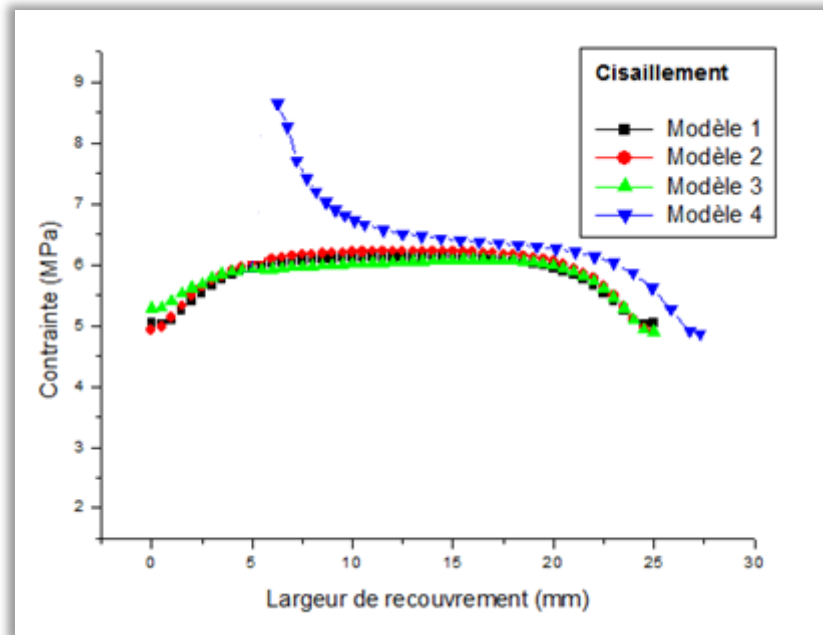


Figure III.54 : Distribution des contraintes équivalentes suivant la longueur de recouvrement (Cisaillement)

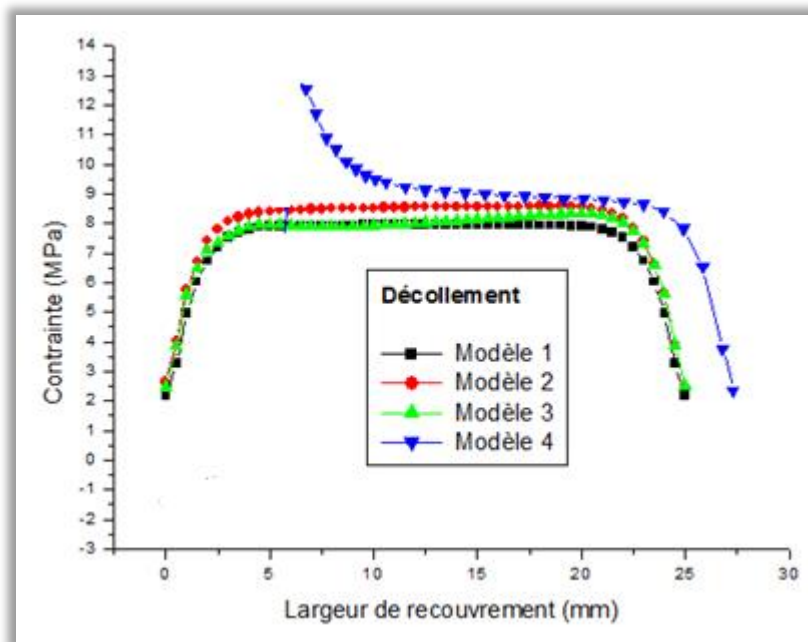


Figure III.55 : Distribution des contraintes équivalentes suivant la longueur de recouvrement (Décollement)

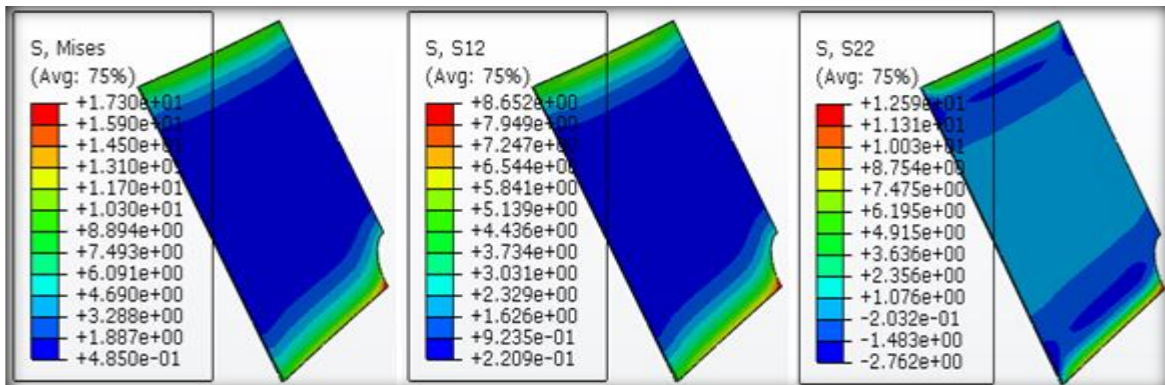
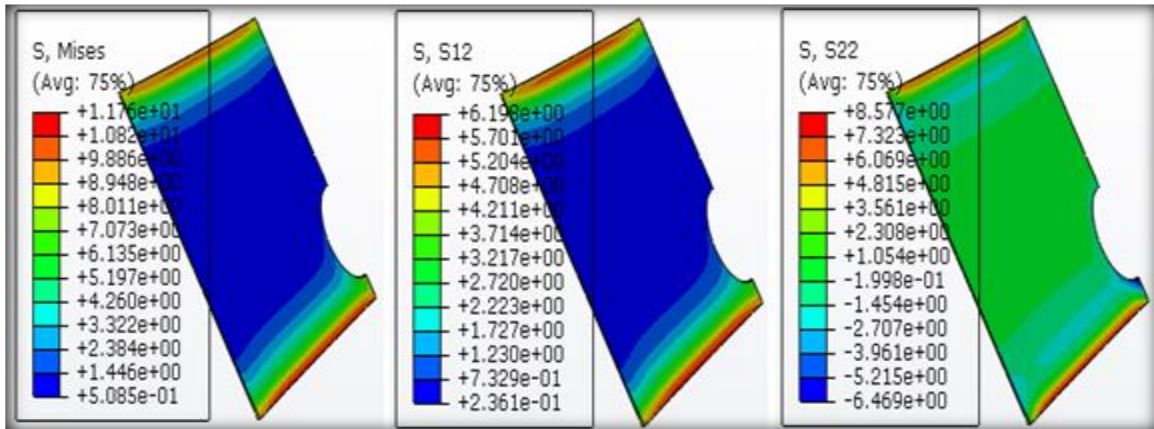
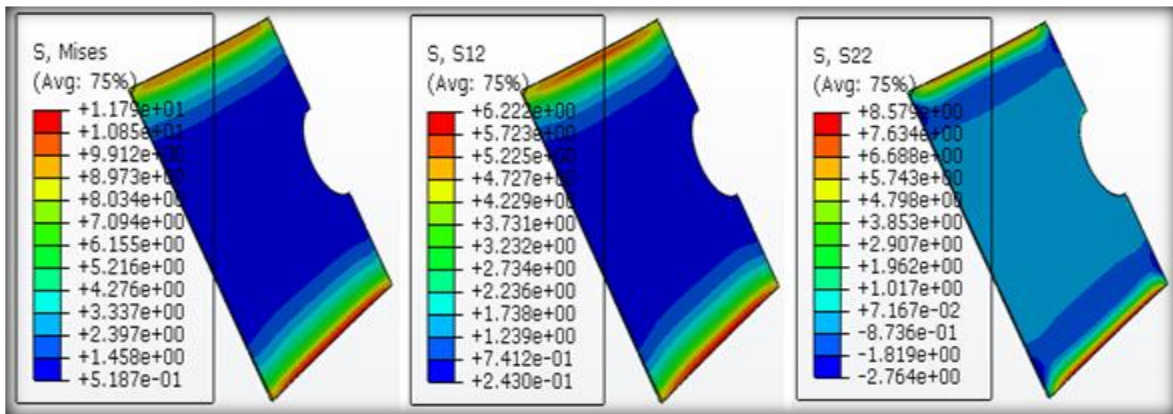
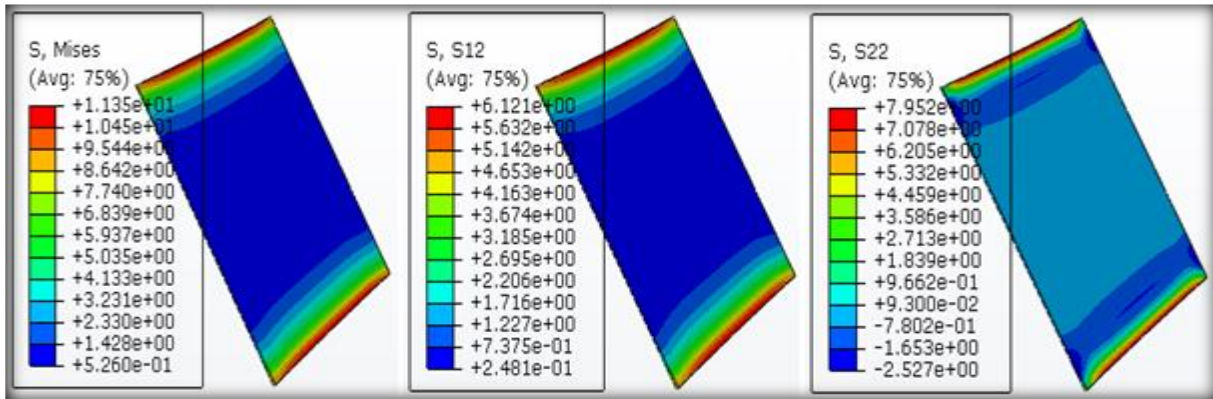


Figure III.56: Distributions des contraintes σ_{eq} , σ_{22} , σ_{12} , dans le joint.

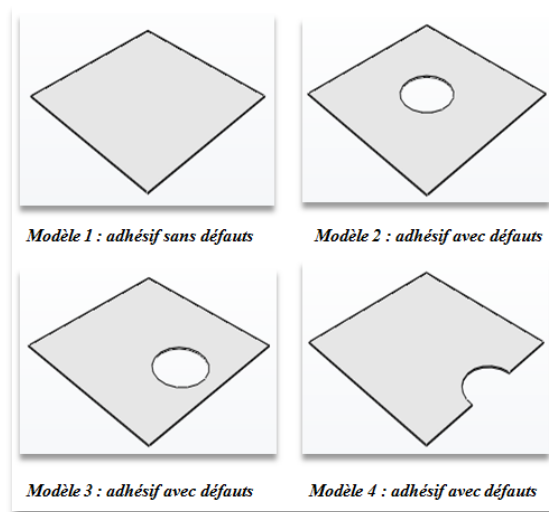


Figure III.57 : modèle de géométrie de l'adhésif et les dimensions des défauts.

- **Modèle 1 :** présente un joint parfait et sans défaut de collage.
- **Modèle 2 :** présente un joint avec un défaut d'une forme d'un cercle au milieu de la surface.
- **Modèle 3 :** présente le même défaut et plus proche de l'extrémité du joint.
- **Modèle 4 :** présente un défaut qui se situe sur l'extrémité du joint.

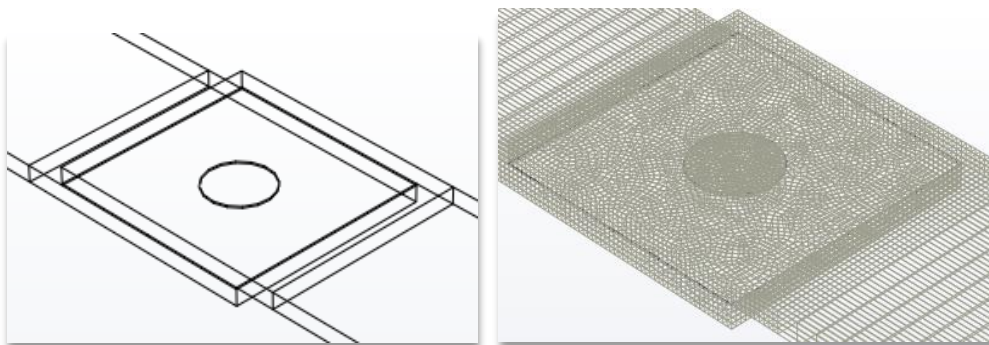


Figure III.58 : représentation du défaut dans l'assemblage.

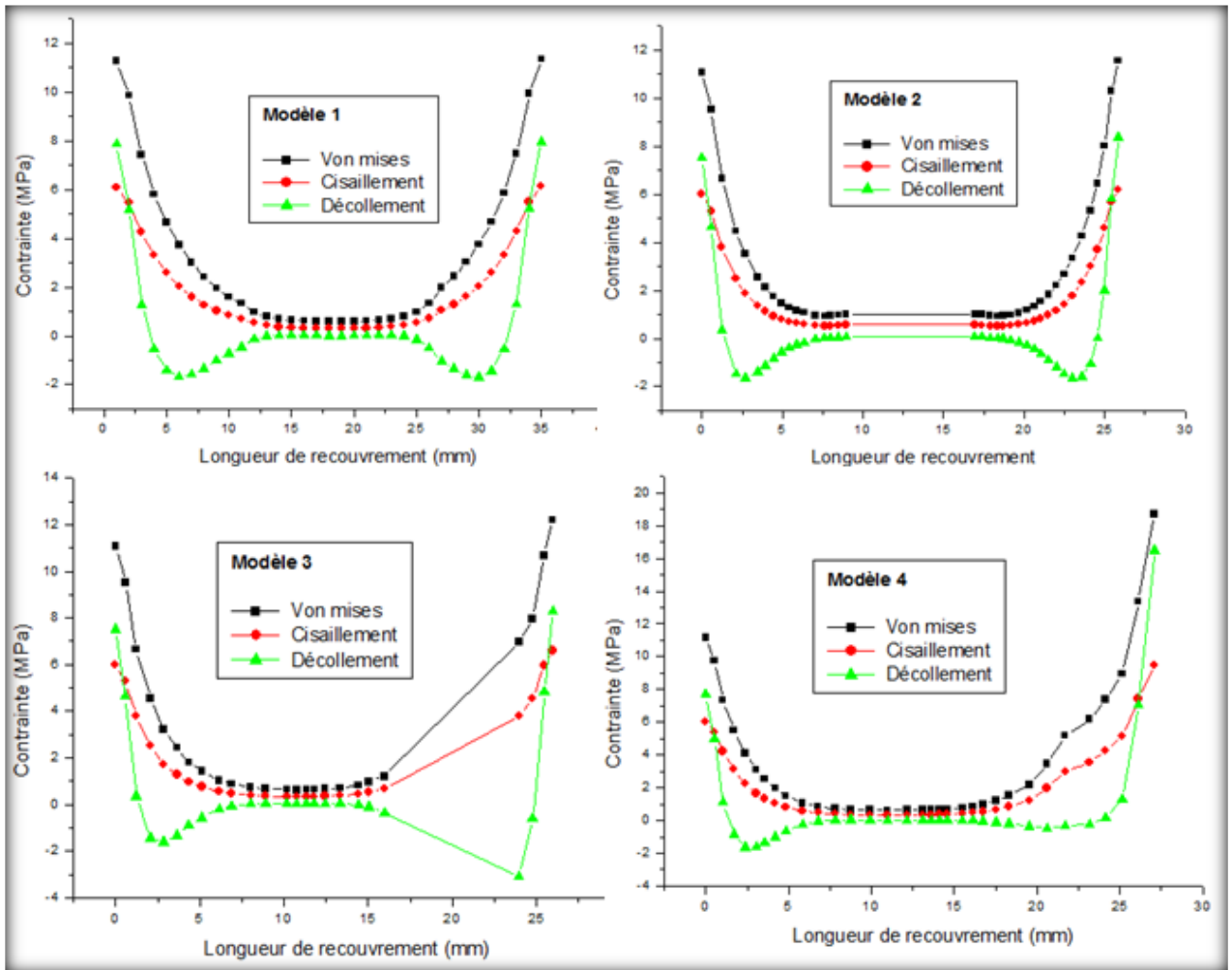


Figure III.59 : Distribution des contraintes de Von mises, cisaillement et décollement suivant la longueur de recouvrement (Modèle 1, Modèle 2, modèle 3 et modèle 4)

Figure III.60 : Distribution des contraintes de Von mises, cisaillement et décollement suivant la largeur de recouvrement (Modèle 1, Modèle 2, modèle 3 et modèle 4)

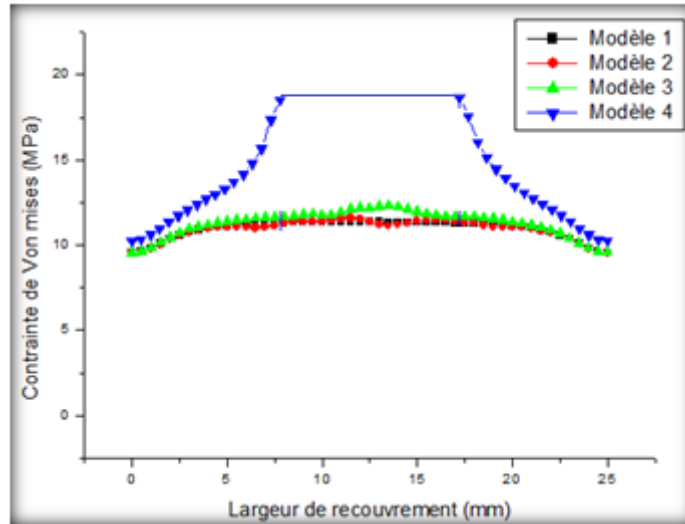


Figure III.61 : Distribution de contrainte de Von mises suivant la largeur de recouvrement.

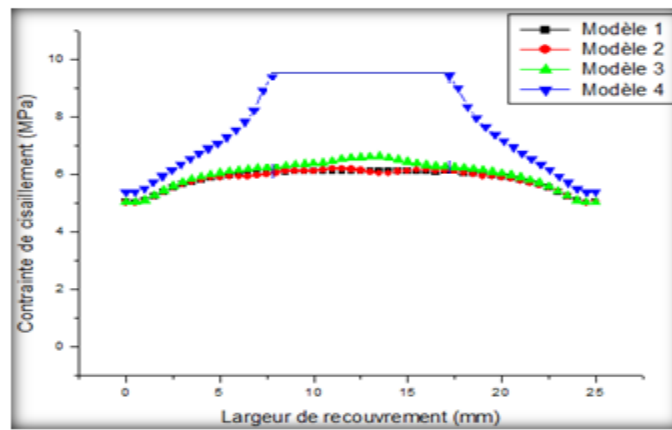


Figure III.62 : Distribution de contrainte de Cisaillement suivant la largeur de recouvrement.

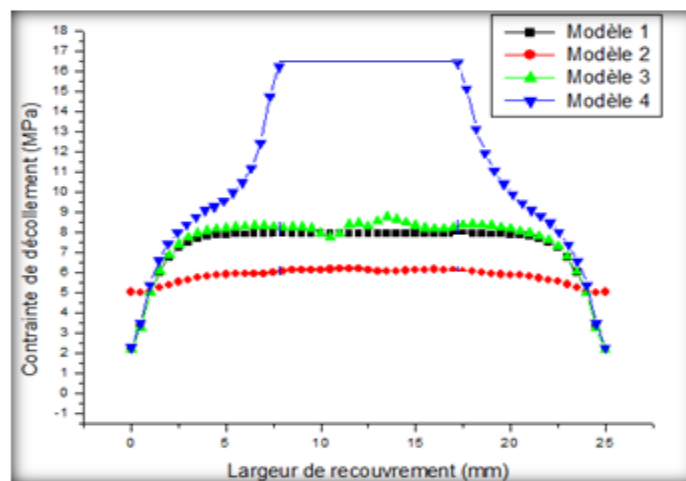


Figure III.63 : Distribution de contrainte de Décollement suivant la largeur de recouvrement.

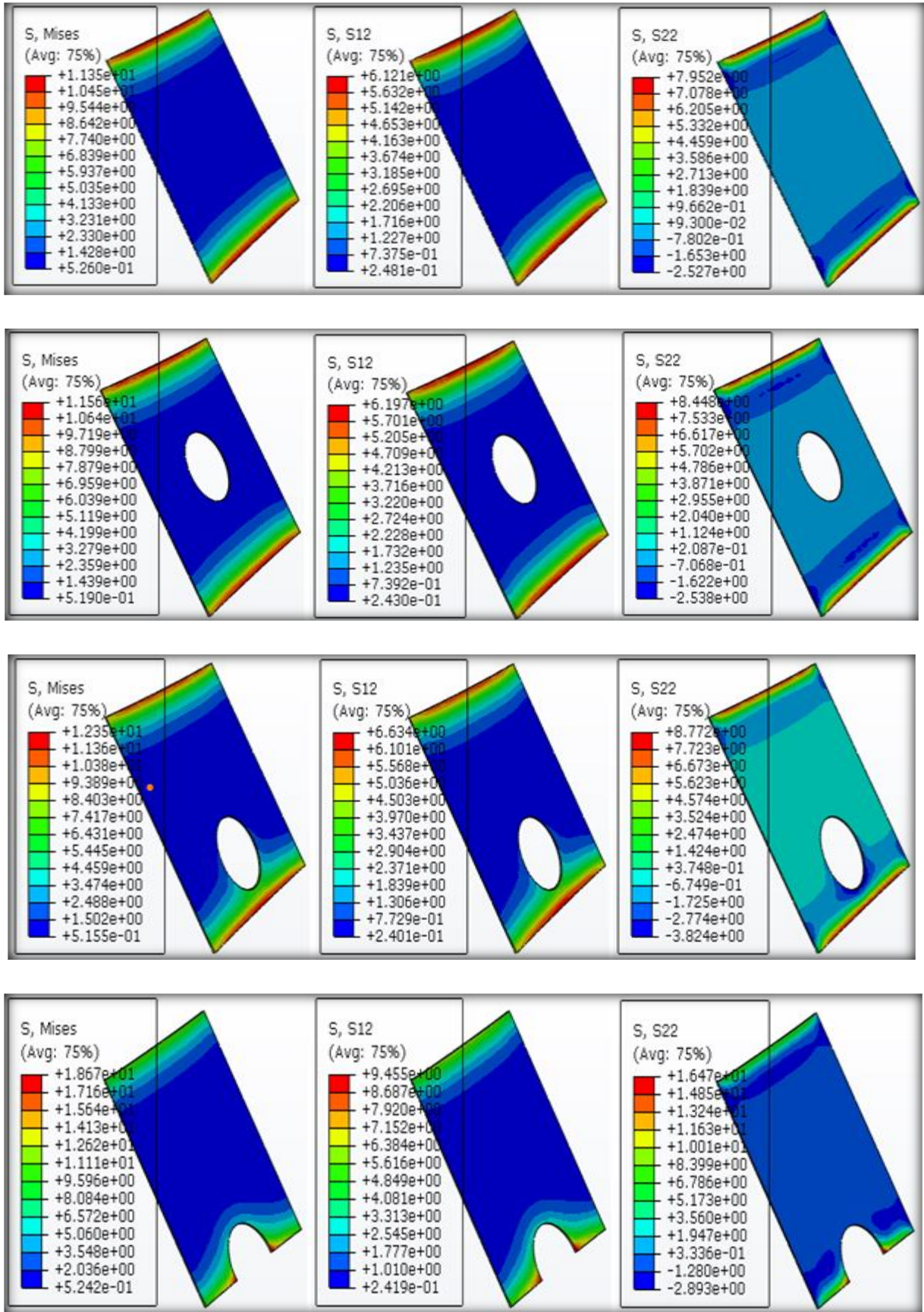


Figure III.64: Distributions des contraintes σ_{eq} , σ_{22} , σ_{12} , dans le joint.

VII. Influence de la longueur de recouvrement :

L'augmentation de la longueur de recouvrement provoque une augmentation de la charge à rupture par l'accroissement de la surface collée. Cependant, il existe une longueur de recouvrement optimale car pour une longueur trop importante, seules les extrémités du joint subissent la sollicitation alors que le centre ne supporte aucun effort. De même, une analyse des contraintes aux extrémités du joint montre que lorsque la valeur de la longueur de recouvrement passe de 20 à 45 mm, la valeur des contraintes de cisaillement τ_{xz} et normales σ_{zz} doublent. [34]

Augmenter l'épaisseur des supports a pour conséquences deux effets contradictoires ; d'une part, ceci entraîne une aggravation de l'excentricité des efforts et une augmentation du moment fléchissant induit et d'autre part une augmentation de la rigidité des plaques qui tend à atténuer le clivage. Mais l'influence de l'épaisseur des substrats n'est pas un phénomène à considérer indépendamment. Ainsi, pour de faibles longueurs de recouvrement, (<20 mm), augmenter l'épaisseur de substrat provoque une diminution de la charge transmise par le joint donc néfaste du moment de flexion l'emporte sur le gain en rigidité. De même, pour des longueurs de recouvrements importantes, le phénomène s'inverse et l'augmentation de l'épaisseur des supports entraîne une augmentation de la charge transmise par le joint. [34]

La résistance de l'assemblage augmente avec l'épaisseur du joint de colle pour de très faibles épaisseurs, passe par un optimum puis décroît ensuite très rapidement. Ce phénomène est expliqué par l'augmentation des surcontraintes (notamment des contraintes de pelage) lorsque l'épaisseur du joint augmente. L'épaisseur optimale est donc le moment où ces surcontraintes sont moindres. [34]

$$\tau_{xy} = \frac{G_c}{e_c \cdot \lambda} \cdot \frac{\sigma_{xx}(x=0)}{E_s} \left(\left(\frac{E_s \cdot e_s}{E_a \cdot e_a} + \cosh(\lambda \cdot L) \right) \frac{\cosh(\lambda \cdot x)}{\sinh(\lambda \cdot L)} - \sinh(\lambda \cdot x) \right)$$

$$\lambda^2 = \frac{G_c}{e_c} \cdot \left(\frac{1}{E_s \cdot e_s} + \frac{1}{E_a \cdot e_a} \right)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{p}{b \cdot e_s}$$

$$\tau = G_c \gamma$$

$$\tau(x) = \frac{0.5 \eta_v}{b} \cdot \frac{\cosh(\eta_v (0.5L - x))}{\sinh(0.5 \eta_v L)} p \quad \text{où} \quad \eta_v = \sqrt{\frac{2G_c}{e_a e_s E_s}}$$

$$\tau_{\max} = \frac{\eta_v L}{2 \tanh(0.5 \eta_v L)} \tau_{\text{moy}} \quad \text{où} \quad \tau_{\text{moy}} = \frac{P}{b \cdot L}$$

Avec : P : Charge appliquée

L : Longueur de recouvrement

b : Largeur du joint

τ : Contrainte de cisaillement de l'adhésif.

Pour notre cas, nous avons considéré un joint symétrique avec une épaisseur d'adhérents en aluminium 2024T3 $e_s = 2\text{mm}$, une épaisseur d'adhésif en ADEKIT-A-140 $e_a = 0.2\text{mm}$, une largeur de 25mm et une longueur de recouvrement variante de 10mm à 35mm.

Le module d'Young d'aluminium 2024T3 est de 69000 MPa et $\nu = 0.33$, pour l'ADEKIT-A-140, le module de d'Young est de 2696 MPa et $\nu = 0.3$.

On remarque que quand la longueur de recouvrement augmente, les contraintes maximales dans le joint diminuent

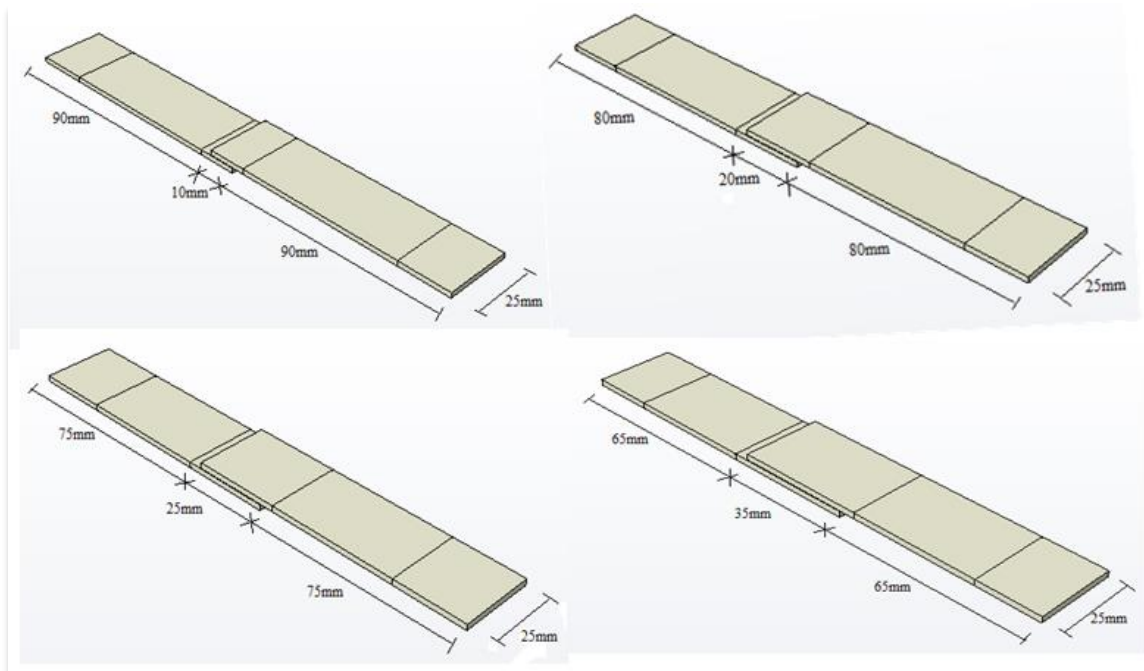


Figure III.65 : géométrie et dimensions du modèle simple recouvrement.

La figure III.65 présente le modèle de l'éprouvette utilisé avec une longueur de recouvrement de 10mm, 20mm, 25mm et 35mm.

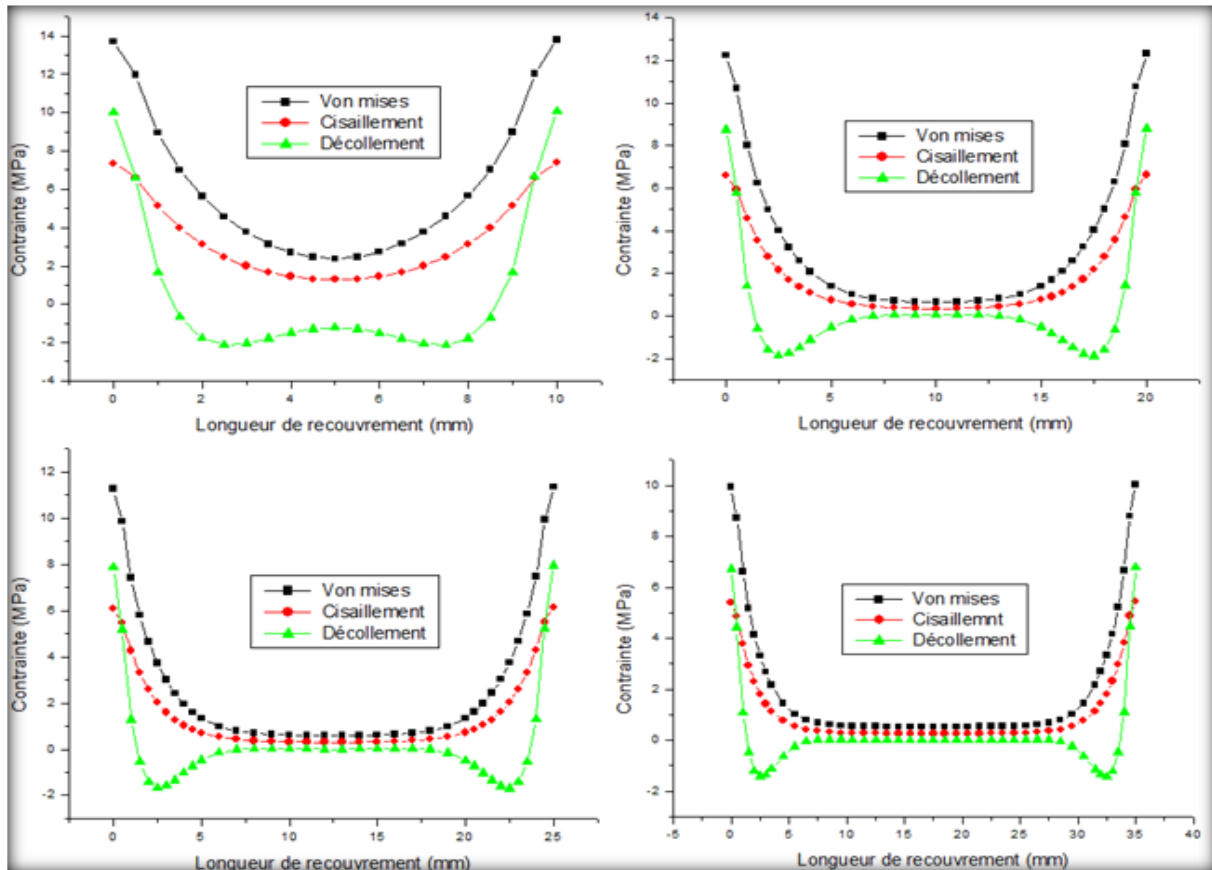


Figure III.66 : variation des contraintes de Von mises, cisaillement et décollement pour les trois longueurs de recouvrement.

La figure III.66 présente la variation des contraintes Von mises, cisaillement et décollement pour chaque longueur de recouvrement.

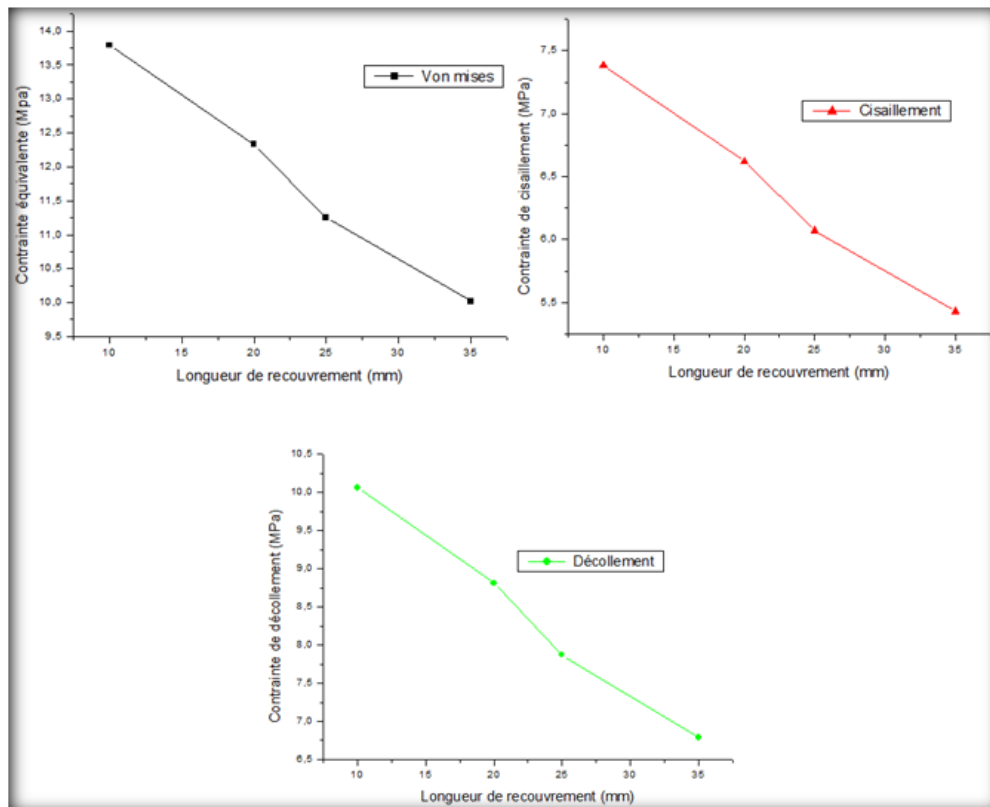


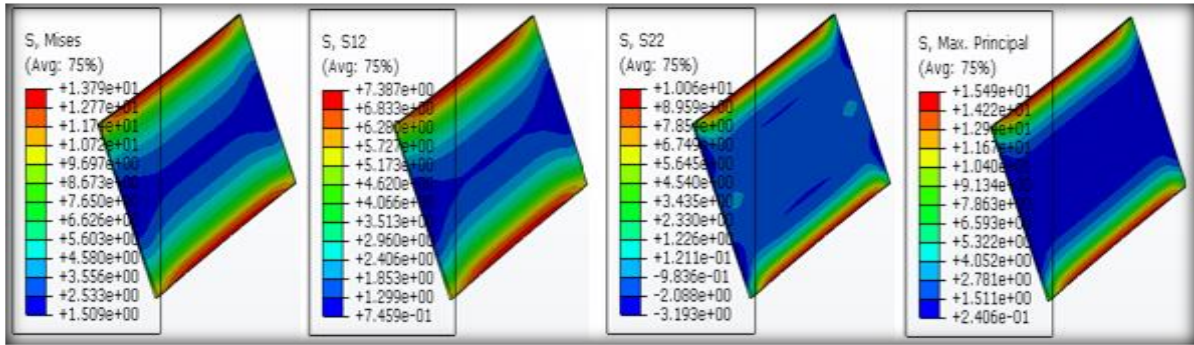
Figure III.67 : variation des contraintes de Von mises, cisaillement et décollement en fonction de la longueur de recouvrement.

Joint	σ_{Mises}	σ_{xy}	σ_{yy}
10mm	13.79	7.38	10.06
20mm	12.33	6.62	8.81
25mm	11.35	6.12	7.95
35mm	10.02	5.43	6.79

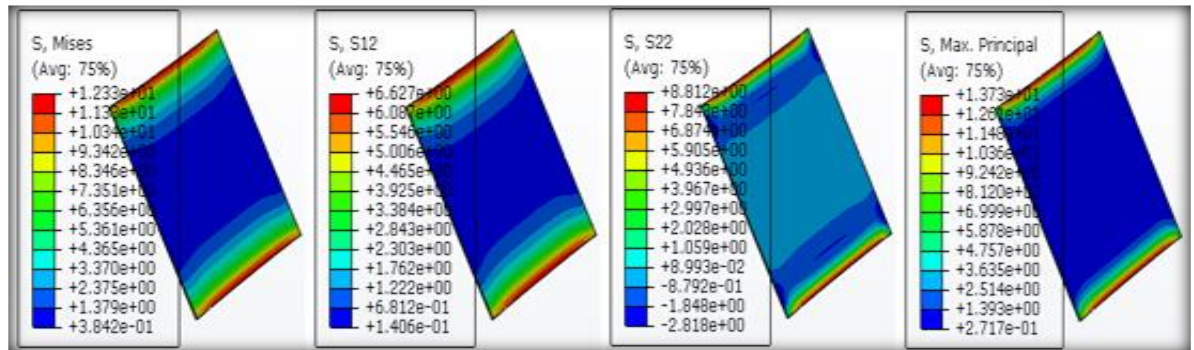
Tableau III.10 : résultats des contraintes pour le joint (MPa).

D'après le tableau III.10, on voit que la diminution de la les contraintes Von mises, cisaillement et décollement diminuent en fonction de l'augmentation de la longueur de recouvrement.

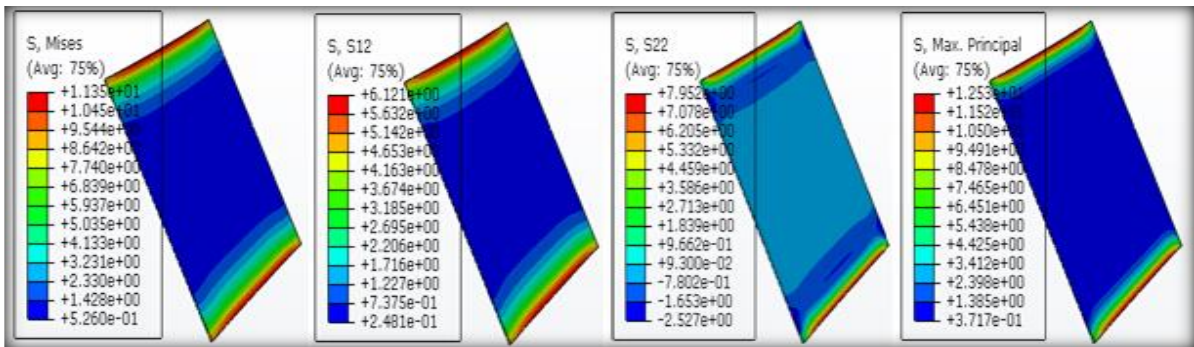
- Pour une longueur de recouvrement $l = 10\text{mm}$



- Pour une longueur de recouvrement $l = 20\text{mm}$



- Pour une longueur de recouvrement $l = 25\text{mm}$



- Pour une longueur de recouvrement $l = 35\text{mm}$

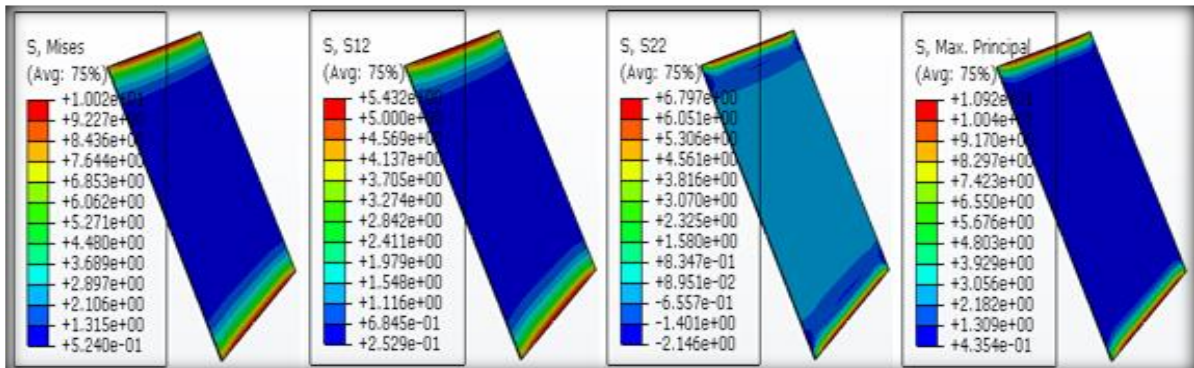


Figure III.68: Distributions des contraintes σ_{eq} , σ_{22} , σ_{12} , σ_{max} dans le joint.

VIII. Conclusion:

Après une étude bibliographique sur les assemblages structuraux et leurs caractérisations mécanique, qui a fait l'objet de la première partie de cette étude.

Nous avons abordé dans la deuxième partie une étude générale sur la mécanique de la rupture, son historique, les différents modes rupture, ses auteurs et son objectif. Ainsi, nous avons cités quelques essais mécaniques, en donnant des brèves définitions.

La troisième partie de ce mémoire était l'étude des différentes formes de géométries entre un biseutage des substrats et bourrelet d'adhésif. Après l'évaluation de tous ces différentes géométrie de l'adhésif aux extrémités de recouvrement, et afin d'aboutir à notre objectif majeur d'avoir une réduction considérable de concentrations du contraintes aux niveaux de ces zones, nous avons regroupé l'effet de ces différentes géométries dans des graphes uniques pour permettre la comparaison de ces effets de cette étude paramétrique.

Pour les contraintes équivalente la forme du substrat biseauté aux extrémités, prendre la même nature de distributions du contrainte avec des niveaux rapprocher cela explique que la surface du collage reste la même et que les résultats sont provoquer seulement par les substrats assembler, tandis que les résultats des autres forme sont provoqués non seulement par les surfaces en contacte mais aussi par leur propre forme de l'adhésif analyser. En fixant l'angle selon l'optimums de résultats, Il est bien constater que l'effet de la forme du bourrelet d'adhésif est très importante du faite qu'elle donne des valeurs reste très inférieur que se soit pour les contraintes équivalente ou de décollement même pour les contrains de cisaillement.

Nous avons donc donné plusieurs formes aux extrémités de recouvrement pour déterminer les contraintes concentrées dans l'assemblage considéré. Ces formes sont basées sur l'approche numérique qui peut être fort utile ou en offrant la possibilité d'intégrer des non linéarités sous différentes formes. Nous avons constater en première lieux et avec des mesure importante que le taux de transfert des contraintes associés à ces formes analyser aux niveaux des extrémité de recouvrement est bien inférieure aux c'elle de simple joint sans modifications. Cela peut s'expliquer par le fait que le modèle modifier soit par l'augmentations de volume de l'adhésif à l'extrémité ou par la diminutions pour les substrats assemblés minimise les contraintes concentrés avec des mêmes variations pour les contrainte de décollement que de cisaillement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Germain P., Nguyen Q.S., Suquet P. Continuum thermodynamics Journal of Applied Mechanics, 1983, 3, pp 1010-1020
- [2] Dugdale D.S. Yielding of steel sheets containing slits Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8, pp 100-104
- [3] Barenblatt G.I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture Advances in Applied Mechanics, 1962, 7, pp 55-129
- [4] Monerie Y. Fissuration des matériaux composites: Rôle de l'interface fibre/matrice Th: Mécanique, Université d'Aix-Marseille II, 2000
- [5] Palmer A.C., RICE J.R. The growth of slip surfaces in the progressive failure of over consolidated clay Proceedings of the Royal Society of London, 1973, A332, pp 527-548
- [6] Needleman A. A continuum model for void nucleation by inclusion debonding Journal of Applied Mechanics, 1987, 54, pp525-531
- [7] Needleman A. An analysis of tensile decohesion along an interface, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1990.
- [8] Tvergaard V. Effect of fiber debonding in a whisker-reinforced metal Materials Science and Engineering, 1990, A125, pp 203-213
- [9] Michel J.C., SUQUET P., THEBAUD F. Une étude théorique et numérique de la décohésion d'interface dans les composites à matrice métallique et renfort particulaire
- [10] Michel J.C., SUQUET P., THEBAUD F. Une modélisation du rôle des interfaces dans le comportement des composites à matrice métallique Revue Européenne des Elements Finis, 1994, 3, 4, pp573-595
- [11] Allix o., LADEVEZE P., CORIGLIANO A. Damage analysis of interlaminar fracture specimens Composites Structures, 1995, 31, 1, pp 61-74
- [12] Fremond M. Adhérence des solides Journal de Mécanique théorique et Appliquée, 1987, 6, 3, pp 383-407

- [13] Cangemi L., COCU M., RAOUS M. Adhesion and friction model for the fiber/matrix interface of a composite In: Third Biennial Joint Conference on engineering system design and analysis - volume 4 (1996,
- [14] Cangemi L. . Frottement et adhérence: modèle, traitement numérique et application à l'interface fibre/matrice Th: Mécanique des Solides, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II, 1997
- [15] Raous M., CANGEMI L., COCU M. Un modèle couplant adhérence et frottement pour le contact entre deux solides déformables Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1997, t.325, Série Iib, pp 503-509
- [16] Raous M. Quasistatic Signorini Problem with Coulomb friction and coupling to adhesion
- [17] Raous M., CANGEMI L., COCU M. A consistent model coupling adhesion, friction and unilateral contact Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, 177, pp 383-399
- [18] Raous M., MONERIE Y. Unilateral contact, friction and adhesion : 3D cracks in composite materials
- [19] Raous M. Friction and Adhesion A paraître dans: Theoretical and Numerical Nonsmooth Mechanics.
- [20] M. MADANI KUIDER Etude numérique expérimentale de la technique de réparation des défauts cas aluminium avec composite carbone-epoxyde
- [21] D. S. DUGDALE, Journal of Mechanic and Physic Solids 8, 100-104 (1960).
- [22] G. I. BARENBLATT, Advances in Applied Mechanic 7, 55-129 (1962).
- [23] W. DÖLL, U. SEIDELMANN, and L. KÖNCZÖL, Journal of Materials Science 15, 2389-2394 (1980).
- [24] z.-h. Jin and r. C. Batra, Materials Science and Engineering A216, 117-124 (1996).
- [25] Adams,R.D.,Chambers,S.H.,DelStrother,P.H.A.,andPeppiatt,N.A.(1973). Rubber model for adhesive lap joints. The journal of strain analysis for engineering design, 8(1):52–57.

- [26] Adams, R. D. and Peppiatt, N. A. (1973). Effect of Poisson's ratio strains in adherends on stresses of an idealized lap joint. *The journal of strain analysis for engineering design*, 8(2) :134–139.
- [27] Tsai, M. Y. and Morton, J. (1995). The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints. *Composite Structures*, 32 :123–131.
- [28] Belingardi, G., Goglio, L., and Tarditi, A. (2002). Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22 :273–282.
- [29] Lang, T. P. and Mallick, P. K. (1998). Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18 :167–177.
- [30] Andreassi, L., Baudille, R., and Biancolini, M. E. (2007). Spew formation in a single lap joint. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27:458–468.
- [31] Hart-Smith, L. J. (1973). Adhesive-bonded double lap joints. Langley contract report NASACR-112235, NASA.
- [32] Adams, R. D. and Wake, W. C. (1984). *Structural Adhesive Joints in Engineering*. Elsevier applied science.
- [33] Ali Mohamed. *Assemblages structuraux des convertisseurs de puissance*.
- [34] Simon FREDERIC. *Endommagement et rupture des joints collés, sollicités en traction ou cisaillement, application au collage industriel*.