



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES
SIDI BEL-ABBES
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat ès

Spécialité : **GENIE MECANIQUE**

Option : Mécanique de construction

THÈME

**INFLUENCE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LE
COMPORTEMENT MECANIQUE ET EN RUPTURE D'UN ASSEMBLAGE
COLLE SOUS CHARGEMENT MECANIQUE**

Par :

Mr. AIT KACI Djafar

Devant le jury :

Mr ELADJRAMI Mohamed	Professeur à l'U.D.L de Sidi Bel Abbes	Président
Mr. MADANI Kouider	Professeur à l'U.D.L de Sidi Bel Abbes	Directeur de thèse
Mr OULD Chikh Elbahri	Professeur à l' U M S de Mascara	Examineur
Mr ZIADI Abdelkader	Professeur au C.U.B.B de Ain Temouchent	Examineur
Mr BOUCHAM Belhadj	M.C.A à l'U.D.L de Sidi Bel Abbes	Examineur
Mr REZGANI Laid	M.C.A à l'U M T de Saida	Examineur

Année universitaire 2017/2018

Résumé

La technique de collage est très utilisée ces dernières années dans plusieurs domaines à savoir génie civil, aéronautique, sport...etc. Pendant sa durée en service, l'adhésif est exposé à des conditions environnementales sévères (température, humidité, UV ...).

L'objectif de cette étude est d'analyser par la méthode des éléments finis la durabilité des assemblages collés sous l'effet de chargement mécanique couplé à des conditions environnementales (absorption d'eau et/ou température).

Une partie de cette étude est consacrée aux assemblages à simple joint ou la méthode des éléments finis a été utilisée pour analyser la distribution des contraintes dans le joint adhésif vieilli en immersion dans l'eau et sollicité sous chargement mécanique.

L'effet de type de sollicitation, la valeur du déplacement imposée, l'orientation des fibres et la durée d'immersion ont été mis en évidence.

La deuxième partie de notre étude est basée sur la technique de réparation où les mêmes paramètres de la première partie ont été pris en considération afin de voir le comportement de l'adhésif dans le transfert de charge d'une plaque endommagée vers le patch de réparation.

L'intégrale J a été mis en évidence en fonction des paramètres cités dans la première partie. Les résultats montrent clairement que la prise de masse en eau ainsi que l'augmentation de la température provoquent une dégradation des propriétés mécaniques du joint adhésif, ce qui entraîne une augmentation de sa plastification qui est bénéfique pour la résistance de l'assemblage. Par contre, la dégradation des propriétés de l'adhésif suite à son vieillissement dans la réparation entraîne un mauvais transfert de charge de la zone endommagée vers le patch.

L'utilisation d'un patch hybride apporte une meilleure réparation si on optimise la position des différentes couches ainsi que leurs orientations.

Mots clés : Prise de masse, Température, Joint à simple Recouvrement, Patch, Intégrale J.

Abstract

The technique of bonding is very used these last years in several fields (civil engineering, aeronautics, sport ... etc). During its service life, the adhesive is exposed to severe environmental conditions (temperature, humidity, UV ...).

The objective of this study is to analyze by finite element method the durability of bonded assemblies under the effect of mechanical loading coupled with environmental conditions (water absorption and / or temperature).

The first part of this study is devoted to single-joint assemblies where the finite element method has been used to analyze the stress distribution in the adhesive joint exposed to the absorption of water under the effect of mechanical loading.

The effect, the value of the applied load, the fibers orientation the and the duration of immersion were highlighted.

The second part of our study is based on the repair technique or the same parameters of the first part were considered in order to see the behavior of the adhesive in the load transfer from damaged plate to the patch.

The J integral has been highlighted in terms of the stacking sequence, the shape and nature of the patch.

The results show clearly that the increase in water mass and in temperature cause degradation of the mechanical properties of the adhesive joint, which leads to an increase in its plasticization which is beneficial for the strength of the assembly. On the other hand, the degradation of the properties of the adhesive used as a result of its aging in the repair causes a bad load transfer from the damaged zone to the patch.

The use of a hybrid patch provides a better repair if we optimize the position of the different layers and their orientations.

Key words: mass uptake, temperature, single lap joint, patch, J integral.

تقنية خدمته، يتعرض الهدف الميكانيكي ويخصص لتحليل توزيع تسليط ويستند

هذه الماضية بيئية شديدة) هو التحليل البيئية) هذه

الهندسة المدنية، الطيران، الرياضة ... (البنفسجية ...) .

تأثير التحميل

المشترك البسيط حيث طريقة تأثير التحميل الميكانيكي.

وتوجه الألياف حيث

تأثير نوع وقيمة تقنية التصحيح.

تسليط أظهرت

J الزيادة يؤدي زيادة نتيجة لشيخوخة التصحيح الهجين يوفر المفتاحية:

والميكانيكية تدهور ناحية التصحيح وتوجهاتها. J .

طبيعة التصحيح. والزيادة يسبب ريد تحسين، التصحيح، J .

Remerciements

Je remercie tout d'abord le bon dieu le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin.

Je remercie mon encadreur Monsieur Dr. K. MADANI, directeur de Thèse qui m'a guidé et soutenu pour la réalisation de ce travail.

Je remercie infiniment aussi les membres de jury et enseignants pendant mes études.

Mes remerciements pour l'ensemble des membres de ma famille, Je remercie vivement et chaleureusement: Mon père que je le souhaite longue vie et bon santé, mes frère et mes sœurs, je les remercie pour tous l'aide qu'ils m'ont accordés le long de mes études.

Sans oublier de remercier aussi mes collègues de laboratoire mécanique physique des matériaux (LMPM), Je tiens à exprimer ma gratitude aux enseignants membres de ce laboratoire, qui par leur aide scientifique ont permis la réalisation de ce travail.

Je remercie infiniment aussi Mr Mokhtari. M et Mr Sahli.A pour leur aide.

A tout qui m'ont aidé de près ou de loin je tiens à exprimer mes sincères remerciements.

AIT KACI .D.

Dedicaces

Une pensée émue à mon père, c'est pour toi, et grâce à toi que j'ai fait ce parcours et je regrette de ne pas t'avoir parmi nous en ce moment tant attendu. J'espère que tu sois fier de moi là où tu es, dans mon cœur et mon esprit en toute circonstance

A ma très chère mère, Sans elle rien n'aurait pu être fait

A ma femme

*A mes enfants : Mohamed Amine, Omar F. Harouk et
Abderahmane,*

A mes frères Abdelhafid et Seddik et mes sœurs

A ma belle famille Loucif.

Liste des figures

Liste des figures chapitre I

Figure I-1 : Exemple d'un mouillage pour l'ancrage mécanique (a) bon mouillage, (b) mauvais mouillage.	7
Figure I-2: Attraction électrostatique adhésif et substrat.	8
Figure I-3 : Mécanisme réactionnel entre un adhésif époxyde et un métal.	9
Figure I-4 : Mouillage d'un solide par une goutte de liquide.	9
Figure I-5: Définition de l'angle de mouillage	10
Figure I-6: Interdiffusion de chaînes à l'interface entre deux polymères.	10
Figure I-7: Interaction entre les différentes couches de faible cohésion, l'adhésif et le substrat.	12
Figure I-8: Décomposition du processus de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion mis en jeu.	13
Figure I-9: Représentation schématique de différentes géométries d'assemblage.	14
Figure I-10: Mode de sollicitation d'un joint collé.	15
Figure I.11. Représentation schématique de la géométrie d'un joint à simple recouvrement.	16
Figure I.12. Répartition des contraintes de cisaillement dans le joint à simple recouvrement (Volkersen, 1938).	17
Figure I.13. Distribution de contraintes selon Goland et Reissner	18
Figure I.14 Essai de double torsion.	19
Figure I.15. Principe de test de torsion/cisaillement.	19
Figure I.16. Représentation schématique du pelage.	20
Figure I.17. Essai de flexion.	21
Figure I.18. Essai de traction en bout	22
Figure I.19. Essai de clivage.	23
Figure I-20: Le joint adhésif collé (à simple recouvrement).	23
Figure I-21: Contraintes dans l'adhésif.	25
Figure I-22: Modèle de Goland et de Reissner.	26
Figure I-23: Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésive de cisaillement et de pelage (a)- Volkersen; (b)-Goland et Reissner pour des adhérents d'alliage d'aluminium et un adhésif époxyde.	27
Figure I-24: Le comportement de plasticité dans l'adhésif selon Hart-Smith.	28
Figure I-25: Distribution des contraintes de cisaillement avec ou sans prise en compte de l'effet de bords libres.	30
Figure I-26: Dans le bleu le défaut initial, en rouge la propagation des fissures (a) Joint déformé ; (b) chemin de fissure du côté d'avancement.	32
Figure I-27: Maillage par l'élément fini.	33
Figure I-28: Défauts typiques présents dans un joint de colle.	37
Figure I-29: Différents modes de ruptures.	37
Figure I-30: Différents modes de sollicitations mécaniques.	39

Liste des figures chapitre II

Figure II-1 Courbe de traction pour l'adhésif ADIKIT A140 (contraintes déformations)....	44
Figure II- 2.Modèle géométrique.....	44
Figure II.3: Présentation du modèle simulé par bloc.....	45
Figure II.4: Présentation géométrique du composite en bloc et multicouche.....	45
Figure II.5 La configuration du joint à simple recouvrement avec les conditions aux limites étudiées.....	46
Figure II.6 Maillage du joint adhésif collé à simple recouvrement utilisé dans le modèle 1..	47
Figure II.7 Présentation des modèles avec les path utilisés.....	48
Figure II.8: Représentation du modèle d'assemblage composite/composite (seul bloc).....	48
Figure II.9:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour un composite aramide (kevlar)/époxyde.....	50
Figure II.10:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour carbone/époxyde.....	51
Figure II.11: Présentation géométrique des composites (multi couches).....	52
Figure II.12:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour aramide (kevlar)/époxyde.....	53
Figure II.13:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour carbone/époxyde.....	54
Figure II.14:Distribution des contraintes a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans la couche d'adhésif pour les différents mode de simulation du matériau composite pour la séquence d'empilement [08C]s.....	55
Figure II.15 Différentes formes de simulation des matériaux hybrides.....	56
Figure II.16:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour cas hybride [0 _{2C} /X _{2A} /-X _{2A} /90 _{2A}]S.....	57
Figure II.17:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas hybride [0 _{2A} /X _{2C} /-X _{2A} /90 _{2A}]S.....	58
Figure II.18:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas hybride [0 _{2A} /X _{2A} /-X _{2C} /90 _{2A}]S.....	59
Figure II.19:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas hybride [0 _{2A} /X _{2A} /-X _{2A} /90 _{2C}]S.....	60
Figure II.20:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour le cas hybride [0 _{2C} /X _{2A} /-X _{2A} /90 _{2A}]S.....	62
Figure II.21 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas hybride [0 _{2A} /X _{2C} /-X _{2A} /90 _{2A}]S.....	64
Figure II.22:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour hybride cas[0 _{2A} /X _{2A} /-X _{2C} /90 _{2A}]S.....	64
Figure II.23:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas hybride [0 _{2A} /X _{2A} /-X _{2A} /90 _{2C}]S.....	65
Figure II.24 : Augmentation des contraintes en pourcentage entre séquence d'empilement en % au niveau des bords pour les deux modes de simulation du composite.....	66
Figure II.25 : Augmentation des contraintes en pourcentage entre séquence d'empilement en % au niveau de centre pour les deux cas de modélisation.....	66
Figure II.26:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans	

l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour cas hybride $[0_{2C}/X_{2A}/-X_{2C}/90_{2C}]_S$	68
Figure II.27:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour cas hybride $[0_{2C}/X_{2C}/-X_{2A}/90_{2C}]_S$	69
Figure II.28:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour cas hybride $[0_{2C}/X_{2C}/-X_{2C}/90_{2A}]_S$	70
Figure II.29:Distribution des contraintes de a)-Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour carbone/époxyde modélisation par bloc.....	71
Figure II.30:Distribution des contraintes de a)-Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas hybride modélisation par bloc.....	72
Figure II.31:Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement modélisation par multicouches.....	73
Figure II.32 Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement modélisation par multicouches.....	74
Figure II.33 Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de Von Mises en fonction du type de modélisation du composite et la séquence d'empilement.....	74
Figure II.34: Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de cisaillement en fonction du type de modélisation du composite et la séquence d'empilement.....	74
Figure II.35: Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de pelage en fonction du type de modélisation du composite et la séquence d'empilement.....	75
Figure II.36 Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de cisaillement en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modéliser par bloc.....	76
Figure II.37: Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de pelage en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modéliser par bloc.....	77
Figure II.38 Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de Von Mises en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modélisé par bloc.....	77
Figure II.39 Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de Von Mises en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modélisé par multicouches.....	78
Figure II.40 Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de cisaillement en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modélisé par multicouches.....	78
Figure II.41 Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de pelage en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modélisé par multicouches.....	79
Figure II.42 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif pour différentes séquences d'empilement.....	79
Figure II.43 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif pour différentes séquences d'empilement.....	80
Figure II.44 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif pour différentes séquences d'empilement.....	82
Figure II.45 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour fibre de carbone/époxyde avec séquence d'empilement $(S1=[0_{8C}]_s, S6=[0_{2C}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2C}]_s)$	82
Figure II.46 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif cas fibre de verre	

séquence d'empilement ($S1=[0_{8C}]_s$, $S2=[0_{2C}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2C}]_s$).....	84
Figure II.47:Distribution des contraintes a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour aramide/époxyde avec séquence d'empilement ($S1=[0_{8A}]_s$, $S6=[0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s$).....	84
Figure II.48 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif cas fibre de verre séquence d'empilement ($S1=[0_{8A}]_s$, $S6=[0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s$).....	85
Figure II.49:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-pelage dans l'adhésif pour cas hybride séquence d'empilement ($S1=[0_{2C}/0_{2A}/0_{2A}/0_{2A}]_s$, $S6=[0_{2C}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s$).....	85
Figure II.50 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif cas hybride pour séquence d'empilement ($S1=[0_{2C}/0_{2A}/0_{2A}/0_{2A}]_s$, $S6=[0_{2C}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s$).....	86
Figure II.51 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif [cas hybride pour séquence d'empilement ($S1=[0_{2C}/0_{2A}/0_{2A}/0_{2A}]_s$, $S6=[0_{2C}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s$.)].....	86
Figure II.52:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-pelage dans l'adhésif cas hybride séquence d'empilement ($S1=[0_{2A}/0_{2A}/0_{2A}/0_{2C}]_s$, $S2=[0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2C}]_s$).....	87
Figure II.53: Transfert de charge d'une plaque a une autre à travers l'adhésif cas hybride séquence d'empilement ($S1=[0_{2A}/0_{2A}/0_{2A}/0_{2C}]_s$, $S2=[0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2C}]_s$).....	87
Figure II.54:Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif cas hybride pour séquence d'empilement ($S1=[0_{2A}/0_{2C}/0_{2C}/0_{2C}]_s$, $S6=[0_{2A}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2C}]_s$).....	88
Figure II.55: Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif cas hybride séquence d'empilement ($S1=[0_{2A}/0_{2C}/0_{2C}/0_{2C}]_s$, $S6=[0_{2A}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2C}]_s$).....	88
Figure II.56 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b) -pelage dans l'adhésif pour cas hybride de séquence d'empilements ($S1 = [0_{2C}/0_{2C}/0_{2C}/0_{2A}]_s$, $S2=[0_{2C}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2A}]_s$).....	89
Figure II.57 Transfert de charge d'une plaque à une autre travers l'adhésif cas hybride séquence d'empilement ($S1 = [0_{2C}/0_{2C}/0_{2C}/0_{2A}]_s$, $S2=[0_{2C}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2A}]_s$).....	89
Figure II.58 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour verre/époxyde ($S1=[0_{8V}]_s$, $S2=[0_{2V}/75_{2V}/-75_{2V}/90_{2V}]_s$).....	90
Figure II.59 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif cas fibre de verre séquence d'empilement ($S1=[0_{8V}]_s$, $S2=[0_{2V}/75_{2V}/-75_{2V}/90_{2V}]_s$).....	90
Figure II.60 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)- pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour carbone/époxyde. ($S1=[0_{8C}]_s$, $S2=[0_{2C}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2C}]_s$).....	91
Figure II.61: Transfert de charge d'une plaque à une autre travers l'adhésif cas fibre de carbone séquence d'empilement ($S1=[0_{8C}]_s$, $S2=[0_{2C}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2C}]_s$).....	91
Figure II.62 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour bore/époxyde.....	92
Figure II.63 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif cas hybride séquence d'empilement ($S1=[0_{8B}]_s$, $S2=[0_{2B}/75_{2B}/-75_{2B}/90_{2B}]_s$).....	92
Figure II.64 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-pelage dans l'adhésif cas de fibre d'aramide avec séquence d'empilement ($S1=[0_{8A}]_s$, $S2=[0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s$).....	93
Figure II.65 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif cas de fibre d'aramide séquence d'empilement ($S1=[0_{8A}]_s$, $S2=[0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s$).....	93
Figure II.66 Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas hybride.....	94

Figure II.67 Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas hybride.....	95
--	----

Liste des figures chapitre III

Figure III-1: Courbe de diffusion de type Fick.....	106
Figure III-2: Schéma récapitulatif des différents modes de pénétration de l'eau dans un assemblage collé [37].....	107
Figure III.3 : réalisation des éprouvettes en traction.....	109
Figure III.4 : bac pour immerger les éprouvettes et enceinte climatique.....	110
Figure III.5 : balance pour les mesures de masse des échantillons de l'adhésif.....	110
Figure III. 6. Fixation de l'éprouvette adhésive sur la machine de traction.....	112
Figure .III.7. Courbe de contrainte / déformation de l'adhésif non vieilli [38].....	112
Figure .III.8. Courbes de contrainte / déformation de l'adhésif pour différents temps d'immersion dans de l'eau distillée à 20 ° C.....	114
Figure .III.9. Courbes de contrainte / déformation de l'adhésif pour divers temps d'immersion dans de l'eau distillée à 40 ° C.....	115
Figure .III.10. Courbes de contrainte / déformation de l'adhésif pour divers temps d'immersion dans de l'eau distillée à 60 ° C [39].....	116
Figure .III.11. Module d'Young pour diverses conditions de vieillissement.....	116
Figure III-12 Représentation du modèle géométrique.....	117
Figure III.13 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes durées de Vieillissement à 20°C.....	118
Figure III.14 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes durées de vieillissement à 40°C.....	120
Figure III.15 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes durées de Vieillissement à 60°C.....	121
Figure III.16. Courbe Traction contrainte-déformation	122
Figure III.17 : Modèle géométrique avec et sans biseautage des bords de la plaque et de l'adhésif.....	123
Figure III.18 Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 20° sans vieillissement de l'adhésif.....	124
Figure III.19 Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 20° durant la 1ère semaine de vieillissement.....	125
Figure III.20 Variation de la contrainte de Von Mises suivant la longueur de recouvrement pour 16ème semaine de vieillissement a la température 20°	126
Figure III.21 Variation de la valeur maximale de la contrainte de Von Mises en fonction de la durée de vieillissement (Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 20°).....	127
Figure III.22 Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 40° durant Sans vieillissement.....	128
Figure III.23 Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 40° durant la 1e semaine de vieillissement.....	128
Figure III.24 Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 40° durant la 16ème semaine de vieillissement.....	129
Figure III.25 Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 40°.....	130
Figure III.26 Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 60° durant Sans vieillissement.....	130
Figure III. 27 Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 60° durant la 1e semaine de vieillissement	131

Figure III.28 Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 60° durant la 16ème semaine de vieillissement.....	132
Figure III.29 Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 60°.....	133
Figure III.30 Comparaison de la contrainte de cisaillement entre la forme biseauté et normale à la température 20° avant et après vieillissement	133
Figure III.31 Comparaison du cisaillement entre la forme biseauté et normale à la température 20° avant et après vieillissement.....	134
Figure III.32 Comparaison du cisaillement entre la forme biseauté et normale à la température 40° avant et après vieillissement.....	135
Figure III.33 Comparaison du cisaillement entre la forme biseauté et normale à la température 40° avant et après vieillissement.....	136
Figure III.34 Comparaison du cisaillement entre la forme biseauté et normale à la température 60° avant et après vieillissement.....	136
Figure III.35 Comparaison du cisaillement entre la forme biseauté et normale à la température 60° avant et après vieillissement.....	137

Liste des figures chapitre IV

Figure IV.1 Modèle géométrique de la plaque réparée	146
Figure IV.2. Courbe Traction contrainte-déformation pour.....	146
Figure IV.3 : Représentation des différentes géométries du patch.....	148
Figure IV. 4: Différentes configurations du composite (2 couches en carbone et 6 couches en aramide).....	149
Figure IV.5. Détails du maillage de la plaque réparée a) zone de patch et b) de fissure.....	149
Figure IV.6. Comparaison des distributions de contraintes dans les différentes couches pour les trois modèles de patch (séquence d'empilement choisi [08]).....	152
Figure IV.7 : flexion de la plaque réparée en fonction des différentes configurations du patch [08].....	153
Figure IV.8. Comparaison de la distribution des contraintes pour les modification des trois géométries du patch de à l'interface plaque / adhésif (composite carbone / époxyde avec une séquence d'empilement de [0 °]8).....	154
Figure IV.9 : Niveau de contraintes dans la plaque réparée pour chaque configuration du patch (séquence d'empilement choisi [08]).....	154
Figure IV.10 : variation de l'intégrale J en fonction des différentes séquences d'empilement pour les différentes configurations du patch de réparation (carbone/époxyde).....	156
Figure IV.11 : Variation de l'intégrale J en fonction des différentes séquences d'empilement pour les différentes configurations du patch de réparation (aramide/époxyde).....	157
Figure IV.12. variation de la contrainte équivalente de Von Mises dans la couche d'adhésif en fonction des différents séquences d'empilement pour les différentes configurations géométriques du patch.....	158
Figure IV. 13 : distribution des contraintes dans les différentes couches du composite de réparation (Cas du composite de réparation hybride : aramide/époxyde renforcé par carbone/époxyde).....	159
Figure IV. 14: Différentes configurations du composite hybride	160
Figure IV.15 : variation de l'intégrale J en fonction des différentes séquences d'empilement pour les différentes configurations du patch de réparation (aramide/époxyde).....	162
Figure. IV.16 Variation de la contrainte de Von Mises pour les différents modèles de composite hybride basés sur différentes séquences d'empilement.	164
Figure .IV. 17 Répartition de la contrainte de Von Mises suivant la longueur du patch dans	

les différentes couches dans les différents types de composite hybride ((0 / -45 / 45/90) S) (toutes les couches du patch ont la même épaisseur).....	166
Figure. IV. 18 Répartition de la contrainte de Von Mises sur toute la longueur du patch dans les différentes couches selon les types du composite hybride [0]8 (toutes les couches du patch ont la même épaisseur).....	167

Liste des figures chapitre V

Figure V.1 : Montage de l'éprouvette sur la machine de traction.....	178
Figure V.2 : Courbe de traction pour l'adhésif à l'état sec.....	179
Figure V. 3: Courbe contrainte /déformation pour différentes durées d'immersion dans l'eau distillée à 20°C	180
Figure V.4 : Courbe contrainte /déformation pour différentes durées d'immersion dans l'eau distillée à 40°C.....	181
Figure .V.5. Courbes de contrainte / déformation de l'adhésif pour divers temps d'immersion dans de l'eau distillée à 60 ° C [17].....	181
Figure V.6 : Modèle géométrique de la plaque réparée.....	183
Figure IV.7 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch avec différentes séquences d'empilement.[cas de patch de configuration N°1]	185
Figure IV.8 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°2].a) Température 20°C, b) Température 40°C, Température 60°C.....	187
Figure IV.9 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°3].....	189
Figure V.10 Présentation d'un patch de réparation hybride	190
Figure IV.11 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°1 à T=20°C].....	191
Figure IV.12 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°1 à 40°C].....	192
Figure V.13 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée de vieillissement pour différentes séquences d'empilement du composite hybride [configuration 1 à 60°C].....	194
Figure IV.14 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°2 à 20°C].....	195
Figure IV.15 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°2 à 40°C].	197
Figure V. 16 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée de vieillissement pour différentes séquences d'empilement du composite hybride [configuration 2 à 60°C].....	198
Figure IV.17 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°3 à 20°C].....	200
Figure IV.18 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°3 à 40°C].....	201
Figure V.19 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée de vieillissement pour	

différentes séquences d'empilement du composite hybride [configuration 3 à 60°C].....	203
Figure V.20 Variation de l'intégrale J en fonction de la configuration du patch pour différentes températures de vieillissement [durée 10 semaines].....	204
Figure V. 21 Variation de l'intégrale J en fonction de la configuration du patch pour différentes températures de vieillissement [durée 10 semaines].....	206
Figure V.22 : Variation de l'intégrale J pour différentes configurations pour une durée d'immersion en eau de 10 semaines.....	208

Liste des tableaux

Tableau I-1: Energies des différents types de liaisons intermoléculaires.....	12
Tableau III-1: Différentes actions de l'eau sur un polymère	108
Tableau III.2 Propriétés mécaniques des fibres et matrice.....	117
Tableau III.1: propriétés mécaniques de l'aluminium 2024-T3 et de l'adhésif A140.....	123
Tableau IV.1: propriétés mécaniques de l'aluminium 2024-T3 et de l'adhésif A140.....	147
Tableau IV. 2 : propriétés mécaniques du composite.....	147
Tableau IV. 3 : Configuration du composite hybride.....	148

SOMMAIRE

Résumé.....	i
Remerciement.....	ii
Dédicaces.....	iii
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I

Généralités sur les assemblages collés

I-1. Introduction.....	6
I-2. Les mécanismes d'adhésion.....	6
I-2.1. L'adhésion mécanique.....	7
I-2.2. L'adhésion spécifique	7
I-2.3. L'adhésion massique.....	11
I-3. Les assemblages collés.....	13
I-3. 1. Différentes sollicitations sur les assemblages.....	14
I-4. Contrôle mécanique des assemblages collés.....	16
I-4.1 Essai à simple recouvrement.....	16
I-4.2 Mesures en torsion.....	18
I-4.3 Essai à double torsion.....	18
I-4.4 Essai de torsion annulaire	19
I-4.3 Pelage.....	20
I-4.4 Essais en flexion	21
I-4.5 Essai de traction en bout (ISO 6922-1987).....	21
I-4.6 Essai de clivage.....	22
I-5. Différents travaux scientifiques.....	23
I-5.1. Approches analytiques.....	24
I-5.2. Approches numériques	30
I-6. Le comportement des assemblages collés.....	35
I-6.1. La longueur de recouvrement.....	35
I-6.2. La rigidité des substrats.....	35
I-6.3. La rigidité de l'adhésif	36
I-6.4. Le comportement mécanique des adhésifs	36
I-7. Les défauts dans les assemblages collés.....	36

I.7.1. Procédés non destructifs de contrôle des assemblages collés.....	37
I.7.2. Procédés destructifs de contrôle des assemblages collés.....	38
I-7. Les avantages et les inconvénients du collage	39
I-7.1. Avantages de collage.....	39
I-7.2. Inconvénients de collage.....	40

CHAPITRE II

Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du patch sur le comportement du joint de l'adhésif

II.1 Introduction.....	43
II.2. Modèle géométrique et propriétés mécaniques.....	43
II.3 Conditions aux limites.....	46
II.4. Analyse et résultats	48
II.4.1. Modélisation du joint adhésif collé à simple recouvrement.....	48
II.4.1.1.Modélisation par bloc.....	48
II.4.1.2.Modélisation du composite par multi couches.....	51
II.4.2. Effet d'utilisation d'un assemblage composite/composite [hybride].....	56
II.4.2.1.Renforcement des couches d'aramide par des couches de carbone.....	56
A. Modélisation par bloc.....	57
B. Modélisation par multi couches.....	61
II.4.2.2.Renforcement des couches de carbone par aramide.....	67
II.4.3.Etude de transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif.....	80
A- Cas de composite en fibres de carbone et matrice époxyde.....	81
B-Cas hybride avec 4 couches de carbone et 12 couches d'aramide $C_2A_2A_2A_2$	82
C- Cas hybride avec 4 couches d'aramide et 12 couches de carbone $A_2C_2C_2C_2$	82
II.4.4 Cas d'un déplacement imposé 0.1mm.....	83
A-Modélisation par bloc.....	83
B-modélisation par multicouches.....	90
II.4.5 Analyse du transfert de charge suivant l'épaisseur	96
Conclusion.....	97
REFERENCES.....	99

CHAPITRE III

Effet de vieillissement de l'adhésif sur la résistance d'un assemblage collé

III-1. Introduction.....	100
III-2. Généralités sur les types de vieillissement.....	103
III-3. Les facteurs influençant la durée de vie des joints collés.....	104
III-4. L'eau et ses mécanismes de diffusion.....	104
III-4.1. Diffusion de l'eau dans un adhésif.....	104
III-4.2. Conséquences de l'absorption d'eau.....	106
III-5. Analyse et résultats.....	109
III-5.1 Préparation de l'adhésif.....	109
III-5.2. Méthodes d'étude du vieillissement de l'adhésif en immersion dans l'eau.....	111
III.5.3. Caractérisation de l'adhésif non vieilli.....	112
III.5.4. Caractérisation de l'adhésif vieilli.....	113
III.5.4.1. Vieillissement dans de l'eau distillée à 20 ° C.....	113
III.5.4.2. Vieillissement dans de l'eau distillée à 40 ° C.....	114
III.5.4.3. Vieillissement dans de l'eau distillée à 60 ° C.....	115
III.5.5. Variation du module d'Young en fonction de la durée d'immersion.....	116
III.5.6. Assemblage composite/composite	117
III.5.6.1 Modèle géométrique et propriétés mécaniques.....	117
III.5.6.2 Caractérisation de l'adhésif vieilli	118
III.7. Cas d'un assemblage Aluminium/Aluminium.....	122
III.5.7.1- Modèle géométrique et propriétés mécaniques.....	122
III.5.7.2 Comparaison entre la forme biseautée et normale pour différentes températures avec et sans vieillissement de l'adhésif	124
Conclusion.....	137
Références.....	139

CHAPITRE IV

Technique de réparation d'une structure endommagée

IV.1. Introduction.....	142
IV.2. Modèle géométrique et présentation des propriétés des matériaux.....	145
IV.3. Modélisation par éléments finis.....	149
IV.4. Analyse et résultats.....	150

IV.4.1. Effet du modèle géométrique du patch sur la distribution des contraintes.....	150
IV.4.1.1. Distribution des contraintes de Von Mises dans chaque couche du composite.....	150
IV.4.2 Variation de l'intégrale J.....	155
IV.4.2.1 Effet des modifications géométriques du patch sur la valeur de l'intégrale J	155
IV.4.2.2. Effet de l'utilisation d'un composite hybride.....	158
IV.4.2.3 Distribution des contraintes dans la couche adhésive.....	164
IV.5. Comparaison des résultats.....	167
Conclusion.....	170
References.....	172

CHAPITRE V

Effet de vieillissement de l'adhésif sur la durabilité des structures réparées

V.1 Introduction.....	175
V.2 Effet de la température et l'absorption en eau sur le vieillissement de l'adhésif	178
V. 3 Caractérisation de l'adhésif à l'état sec.....	178
V.4 Caractérisation de l'adhésif vieilli.....	179
V.4.1 vieillissement à T=20°C.....	179
V.4.2 l'adhésif vieilli dans l'eau à 40°C	180
V.4.2 l'adhésif vieilli dans l'eau à 60°C.....	181
V.5 Partie Modélisation numérique.....	183
V.5.1 Modèle géométrique et maillage utilisé.....	183
V.5.2 Influence de la température sur le vieillissement de l'adhésif	184
V.5.2.1. cas 1 Patch configuration N°1.....	184
V.5.2.2 cas 2 Patch configuration N°2.....	186
V.5.2.3. cas 1 Patch configuration N°3.....	188
V.5.3 Utilisation d'un composite hybride.....	190
V.5.3.1. Variation de l'intégrale J.....	190
V.5.4. Comparaison de l'intégrale J pour différentes configurations du patch et séquences d'empilement après le vieillissement.....	203
V.5.4.1 Effet de la température pour les différentes configurations du patch.....	203
V.5.4.2 Effet de la séquence d'empilement pour les différentes températures.....	205
Conclusion.....	209
REFERENCES.....	211
Conclusion générale.....	213

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, le collage connaît un grand développement dans plusieurs domaines industriels tels que l'aéronautique, l'automobile, le génie civil,...etc. Le collage présente de nombreux avantages en concurrence directe avec d'autres techniques d'assemblage, telles que le rivetage ou le soudage. Le collage est de plus en plus employé dans l'industrie, aussi bien pour les liaisons entre pièces métalliques qu'entre pièces composites. Les assemblages collés sont parfois plus intéressants que les méthodes classiques. Grâce à de nombreux avantages, le collage remplace souvent les procédés traditionnels d'assemblages tels que le boulonnage, le rivetage, le vissage, l'agrafage ou bien même le soudage, (les concentrations de contraintes dues aux trous et les éléments de liaison), les tensions sur les extrémités sont aussi réduites car la colle remplit tout l'espace entre les deux éléments rassemblés, ce qui favorise la répartition des efforts, un amortissement des vibrations dans la structure grâce aux propriétés de l'adhésif, un allègement des structures, une amélioration de l'esthétique, un prix de revient souvent inférieur aux techniques d'assemblages classiques, une bonne résistance à la fatigue, l'atténuation du choc et la facilité pour rassembler les formes les plus complexes.

L'assemblage par collage est utilisé depuis plusieurs milliers d'années et n'a cessé de se développer au cours du temps où l'homme réalise des assemblages par collage pour créer des objets utilitaires ou décoratifs.

Au cours de l'histoire, l'adhésif a subi diverses transformations jusqu'à la conception aujourd'hui de résines synthétiques, qui sont largement employées dans de nombreux procédés de fabrication. Ces résines offrent, entre autres, la possibilité de rassembler des matériaux qui jusqu'alors ne pouvaient pas être collés. A partir du milieu du vingtième siècle, les avancées dans le domaine des sciences des matériaux qui nécessitent de disposer de structures plus performantes, plus légères, plus résistantes et plus fiables, ont motivé le développement de nouvelles méthodes d'assemblage structural.

Les domaines d'application du collage exigent des performances de plus en plus élevées des adhésifs. Il devient donc important de définir et de décrire la durabilité des

assemblages structuraux qui est un problème récurrent et d'une importance capitale pour les industriels du secteur aéronautique, mais les scientifiques ont toujours du mal à l'appréhender en raison notamment de l'hétérogénéité intrinsèque liée aux mécanismes de dégradation.

En conditions de service, les assemblages collés structuraux sont généralement soumis à deux types de sollicitations, statiques (les contraintes mécaniques), ou périodiques (sollicitations cycliques et/ou les sollicitations environnementales, principalement l'humidité et la température). L'effet individuel ou combiné de ces sollicitations modifie non seulement le comportement de l'adhésif dans l'assemblage mais agit également sur les interactions inter-faciales et les forces d'adhésion. Ces sollicitations sont donc les principaux facteurs de la diminution de la résistance mécanique des assemblages, de la perte de la fonction adhérence et éventuellement d'une diminution de la durée de vie des assemblages collés.

L'adhésif époxyde est sensible aux attaques d'humidité car il a des groupes hydrophiles qui attirent les molécules d'eau. Certains effets, tels que la plastification et le gonflement, sont réversibles. La diminution des propriétés mécaniques de l'adhésif lors de l'absorption de l'humidité s'accompagne également d'une perte de résistance articulaire. La force articulaire n'est pas complètement perdue mais devient constante à un certain niveau.

En plus des sollicitations mécaniques et environnementales, la non colinéarité des charges appliquées provoque une concentration des contraintes aux bords du joint adhésif qui reste toujours l'inconvénient majeur dans le sens de résistance et durée de vie des joints, la résolution de ce problème est basée sur l'une de ces deux méthodes ; changement des propriétés mécaniques des éléments constituant l'assemblage et modification de la géométrie de l'assemblage ; ce qui est le contexte d'une partie de notre travail.

De nos jours, les pièces en matériaux composites à matrice polymère occupent une grande place dans notre univers quotidien selon qu'il s'agisse de la construction automobile, navale ou aéronautique...etc. Leur pénétration dans ces secteurs est dû aux nombreux avantages qu'ils présentent, à savoir : la légèreté, le coût, la résistance, la facilité de mise en œuvre...etc. Ainsi, ils permettent de répondre à des besoins parfois contradictoires que les matériaux classiques ne peuvent satisfaire.

Les matériaux composites offrent des propriétés très intéressantes pour la fabrication des pièces structurales. Mais, comme toute application industrielle, la question de leur durabilité se pose. Cela implique la conservation des caractéristiques fonctionnelles du produit

qui, en service, sera soumis à diverses sollicitations mécaniques et environnementales.

Pour mieux comprendre le comportement des assemblages collés telles que la longévité, la résistance à la fatigue, et la résistance au vieillissement, il existe beaucoup de modèles qui ont été développés par des méthodes numériques pour analyser et expliquer le comportement des joints adhésifs collés. Parmi les méthodes numériques, la méthode des éléments finis bidimensionnels et tridimensionnels qui ont été fortement développées aux cours de ces dernières années grâce à l'amélioration des performances des moyens informatiques et des codes de calcul (ABAQUS , ANSYS, ...etc) et elles permettent de modéliser des géométries complexes et la prise en compte d'un nombre important de phénomène physique offrant des perspectives intéressantes par rapport aux modèles analytiques.

Notre travail est divisé en deux grandes parties, une partie concernant les assemblages collés et l'autre est consacré à la technique de réparation.

L'objectif est d'analyser par la méthode des éléments fins la résistance d'un joint adhésif sollicité à des charges mécaniques couplées à l'effet de vieillissement.

Plusieurs paramètres ont été mis en évidence à savoir l'effet de la charge et la durée de vieillissement.

Ce manuscrit est structuré en cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique. Il nous a paru utile de présenter un état de connaissances actuelles sur la technologie du collage et des assemblages collés, en rappelant la nature d'adhésion et les techniques de mise en œuvre qui sont couramment utilisées. Nous rappellerons les différentes théories qui sont généralement invoquées pour expliquer les mécanismes d'adhésion. On a présenté une description générale des études sur les joints adhésifs collés dans les premiers travaux dans le domaine du comportement des joints adhésifs collés, avec les deux approches analytique et numérique. Enfin, la dernière partie fera l'état de l'art sur le comportement mécanique des assemblages collés.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse par la méthode des éléments finis tridimensionnels sur la distribution des contraintes de Von Mises, de pelage et de cisaillement dans le joint d'adhésif utilisé pour le collage de deux plaques en composite. Ce chapitre a pour but d'étudier le comportement mécanique de l'assemblage composite/composite en déterminant la distribution des contraintes en fonction de plusieurs paramètres à savoir la rigidité des matériaux ; en prenant en considération deux principaux types de matériaux tels que le carbone-époxyde et l'aramide-époxyde dans le but de voir l'effet de la rigidité des matériaux sur le transfert de charge dans la couche adhésif, puis, on a considéré l'effet de la séquence d'empilement pour voir quel type de stratifié qui transmis moins de charge à la couche d'adhésif. On a ensuite essayer de voir l'effet de l'utilisation d'un composite hybride sur la réduction des contraintes dans la couche d'adhésif.

Le troisième chapitre est consacrée à l'étude par la méthode des éléments finies de l'effet de dégradation des propriétés mécaniques de l'adhésif époxyde bi-composant type ADEKIT A140 suite à l'absorption d'eau sur la distribution des contraintes dans le joint adhésif utilisé pour assembler deux plaques en composite/composite et aluminium/aluminium sollicités en traction. L'effet de la durée de vieillissement en eau et la température de l'adhésif ont été mis en évidence. Les propriétés mécaniques de l'adhésif vieilli ont été déterminées expérimentalement à l'aide des essais de traction sur des échantillons de l'adhésif massique après chaque durée de vieillissement et pour chaque température.

Le chapitre quatre a pour objectif d'analyser par la méthode des éléments finis la variation de l'intégrale J en tête de fissure pour une plaque endommagée et réparée par un patch en composite, la distribution de la contrainte de Von Mises dans la couche d'adhésif et les différentes couches du composite en fonction de la séquence d'empilement et la forme du composite ont été mises en considération. L'analyse a été consacré plus sur l'effet de l'orientation des fibres dans le patch composite spécialement la position des couches qui ont un angle différent de 0^0 après les premières couches sur l'intégrale J et sur la distribution des contraintes dans les différents substrats.

On a essayé par la suite de voir l'effet des propriétés mécaniques du patch et par conséquent, l'utilisation d'un patch hybride sur la réduction des contraintes et l'intégrale J dans la structure réparée.

Le chapitre cinq a pour objectif d'analyser le comportement d'une plaque fissurée et réparée par composite sous l'effet de vieillissement de l'adhésif. L'effet de la durée de vieillissement et la température ont été mis en évidence.

L'utilisation du composite hybride et la variation de l'angle et la séquence d'empilement du patch ont été mis en évidence dans l'analyse de l'intégrale J.

Chapitre I

Généralités sur les assemblages collés

I-1. Introduction

Les collages sont de plus en plus employés dans l'industrie, aussi bien pour les liaisons entre pièces métalliques qu'entre pièces composites. Les assemblages collés sont parfois plus intéressants que les méthodes classiques car il élimine les concentrations de contraintes dues aux trous et les éléments de liaison. Les tensions sur les extrémités sont aussi réduites car la colle remplit tout l'espace entre les deux éléments rassemblés, ce qui favorise la répartition des efforts. Grâce à de nombreux avantages, le collage remplace souvent les procédés traditionnels d'assemblages tels que le boulonnage, le rivetage, le vissage, l'agrafage ou bien même le soudage. Une brève énumération des avantages de l'assemblage par collage met en évidence une répartition plus régulière des contraintes, la possibilité d'assembler des matériaux de nature différente grâce aux progrès constants de l'industrie chimique, un amortissement des vibrations dans la structure grâce aux propriétés de l'adhésif, un allègement des structures, une amélioration de l'esthétique, un prix de revient souvent inférieur aux techniques d'assemblages classiques [1].

D'un point de vue industriel donc, si le collage est intéressant en termes de coûts et d'allègement des structures, il est encore difficile d'évaluer avec précision la fiabilité, dans le temps et en service, des joints collés. L'incertitude est amplifiée si les assemblages sont soumis à des environnements agressifs (forte humidité, température élevée, produits corrosifs...). Ce constat provoque toujours, par conséquent, une certaine réticence dans les bureaux d'études vis-à-vis de cette technique d'assemblage [2].

I-2. Les mécanismes d'adhésion

On retrouve une difficulté au niveau des considérations théoriques, puisqu'il n'existe pas de théorie unifiée de l'adhésion mais de nombreux modèles dans lesquels l'approche du problème est différente. Ainsi, si les chimistes, par exemple, justifient l'adhésion par la création de liaisons covalentes fortes, les physiciens considèrent, quant à eux, les dissipations d'énergie. Quelques auteurs ont essayé de regrouper ces modèles selon différentes approches, par exemple, la revue de Shanahan qui a proposé une classification en considérant l'adhésion mécanique, spécifique et massique :

I-2.1. L'adhésion mécanique

Cette théorie, également appelée théorie de "*l'ancrage mécanique*", il y a phénomène d'adhérence car l'adhésif va se loger dans les pores, les aspérités du substrat. Cette théorie fait donc intervenir la rugosité du substrat et la notion du mouillage (aptitude qu'à un liquide à occuper la plus grande surface possible quand nous l'étendons sur une surface solide). La rugosité paraît donc être un facteur favorable quand l'adhésif mouille bien (augmentation de la surface de contact et meilleur ancrage mécanique) dans une certaine limite. Plus précisément, le mouillage qui n'est pas réalisé dans les creux peut constituer des amorces de rupture de l'assemblage ; de plus, il y a concentration de contraintes au sommet des aspérités. Il semble qu'une surface obtenue par grenailage ou sablage (rayon de courbure faible des aspérités) soit préférable.

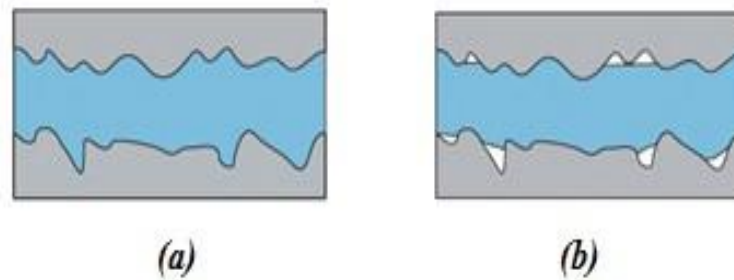


Figure I-1 : Exemple d'un mouillage pour l'ancrage mécanique (a) bon mouillage, (b) mauvais mouillage.

I-2.2. L'adhésion spécifique

- *L'attraction électrostatique (Deryagin et Krotova)*

Ce modèle, proposé en 1948, assimile l'assemblage collé à un condensateur plan et suppose des dissipations de charges électriques entre les deux matériaux. Si ce modèle semble peu crédible aujourd'hui, il a le mérite d'introduire la notion de forces à longue distance, de nature dipolaire, susceptibles d'induire l'adhésion. Elle suppose qu'adhésif et substrat forment les plaques d'un condensateur. L'énergie d'adhésion est alors équivalente au travail nécessaire pour séparer les plaques d'un condensateur plan. Cependant la provenance des charges électriques n'est pas indiquée, et il semblerait qu'elles soient plutôt une conséquence de l'adhésion et non la cause [3].

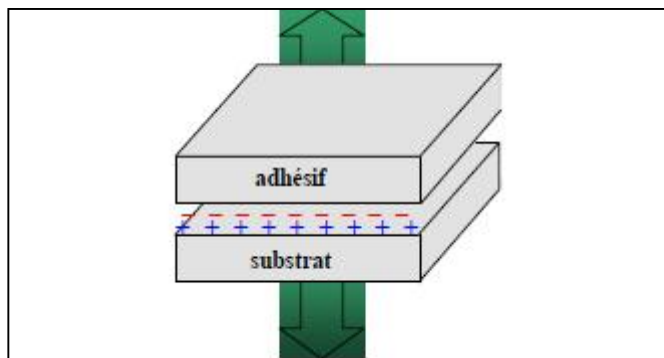


Figure I-2 : Attraction électrostatique adhésif et substrat [2].

- **L'adhésion chimique**

Cette théorie explique l'adhésion par la création de liaisons covalentes entre le substrat et l'adhésif. S'il est évident que cette contribution est majoritaire pour certains systèmes, lors de l'utilisation d'un primaire d'adhésion par exemple, cette théorie ne suffit pas à elle seule pour expliquer l'adhésion en général. L'adhésion s'explique ici par la formation de liaisons chimiques entre adhésif et substrat. C'est le cas pour certaines résines époxydes et certains métaux, ou entre le laiton et le caoutchouc.

En présence d'eau, les molécules H₂O se greffent aux oxydes pour former des groupes hydroxyles. Il y a donc en surface une molécule contenant un atome d'hydrogène et un atome oxygène électronégatif. La surface se présente comme fortement polarisée et va pouvoir interagir avec les groupes polaires de la résine époxyde (Figure I-3).

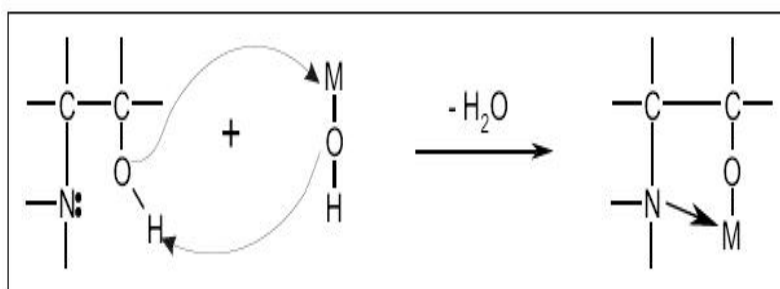


Figure I-3 : Mécanisme réactionnel entre un adhésif époxyde et un métal.

- **La théorie de l'adsorption ou du mouillage (Zisman)**

Pour qu'il y ait adhésion, la mouillabilité de l'adhésif sur le substrat doit être aussi bonne que possible. Dans ce cas, des interactions à courte distance pourront alors se développer (liaison de Van der Waals par exemple) : il y aura adhérence. Elle fait intervenir

les notions suivantes. L'énergie superficielle d'un liquide ou tension superficielle caractérise l'aptitude de la surface d'un liquide à prendre la plus petite surface possible ; elle caractérise également la cohésion du liquide puisqu'il faut vaincre les forces de cohésion internes de celui-ci pour accroître cette surface. L'énergie de surface d'un solide représente la quantité de travail qu'il a fallu dépenser pour créer cette surface, ce qui revient au travail correspondant à la rupture des liaisons atomiques, à pression et température constantes. Soit alors une goutte de liquide sur une surface solide (Figure I-4).

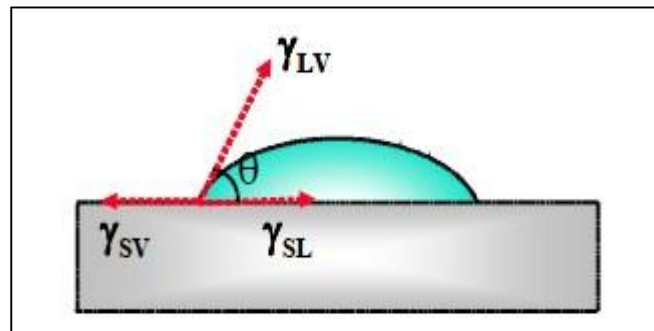


Figure I-4 : Mouillage d'un solide par une goutte de liquide.

L'équilibre des forces au point A donne l'équation suivante (équation de Young) :

$$\gamma_S - \gamma_{SL} = \gamma_L \cos \theta \quad (\text{I-1})$$

Où γ_S est l'énergie de surface du solide, γ_L est l'énergie superficielle du liquide et γ_{SL} est l'énergie interfaciale liquide-solide. Le liquide est alors parfaitement étalé quand θ est nul, ce qui correspond à une valeur critique γ_c de l'énergie superficielle du solide :

- si $\gamma_L < \gamma_c$ alors $\theta = 0$: *Le mouillage est bon* ;
- si $\gamma_L > \gamma_c$ alors $\theta > 0$: *Le mouillage est mauvais*.

Les énergies superficielles des principales colles donnent des valeurs comprises entre 25 et 50mN/m ; les métaux ont tous des valeurs d'énergie superficielle critique supérieures.

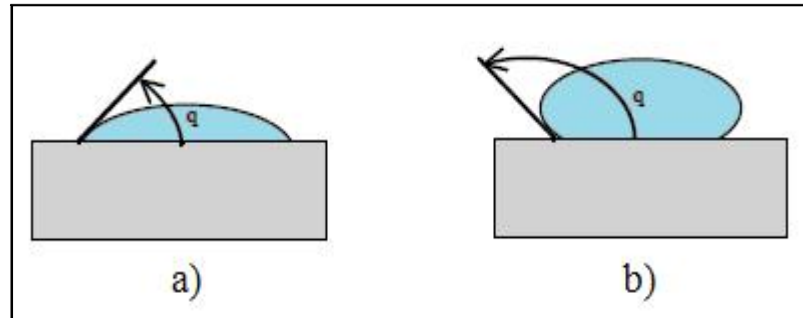


Figure I-5 : Définition de l'angle de mouillage.

- Bon mouillage (a) : L'étalement est caractérisé par un petit angle de contact entre la goutte et la surface.
- Mauvais mouillage (b) : L'étalement est caractérisé par un grand angle de contact entre la goutte et la surface.
- **La théorie de la diffusion (Voyutskii)**

Selon cette théorie, limitée essentiellement aux matériaux macromoléculaires, l'adhésion serait due à la diffusion de segments moléculaires de part et d'autre de l'interface. L'enchevêtrement des chaînes, qui peut aller jusqu'à la disparition de l'interface, assure la cohésion des deux solides. Cette théorie se limite évidemment au collage de polymères chimiquement compatibles.

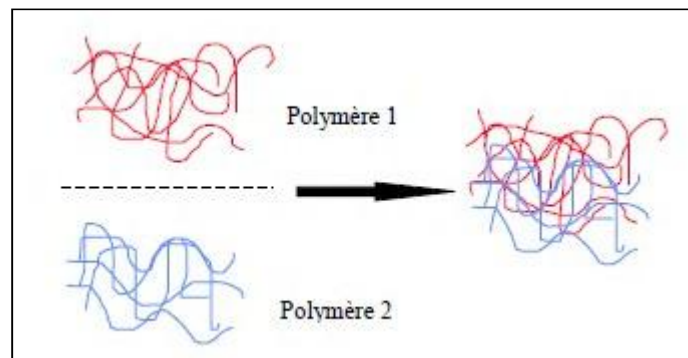


Figure I-6 : Interdiffusion de chaînes à l'interface entre deux polymères.

I-2.3. L'adhésion massique

- *La théorie rhéologique (Lake, Schultz et Gent)*

Cette théorie prend en compte les phénomènes de dissipation d'énergie au cours des tests mécaniques, tel le pelage, et essaie de les quantifier afin de pouvoir revenir à l'énergie d'adhésion.

L'énergie nécessaire W_{adh} pour séparer réversiblement 1cm^2 d'interface solide/liquide s'écrit :

$$W_{adh} = (1 + \cos \theta) \gamma_L \quad (\text{I-2})$$

Cette énergie ne dépend que des propriétés de surface des substrats, Il y a adhérence si :

$$W_{adh} \geq (1 + \cos \theta) \gamma_L \quad (\text{I-3})$$

L'énergie de rupture W_{rupt} d'un assemblage est reliée à l'énergie d'adhésion réversible par :

$$W_{rupt} = W_{adh} f(V, T, \dots) \quad (\text{I-4})$$

Où :

f est une fonction des propriétés de l'adhésif qui dépend de la vitesse V de séparation, de a température T , ... Elle décrit l'énergie dissipée irréversiblement dans le processus de séparation. Ce modèle élargit et complète le modèle thermodynamique précédent.

- *La théorie de la "couche de faible cohésion"*

Cette théorie, appelée " Théorie des couche faible", a été initialement proposée en 1961 par Bikermann. Cette théorie n'explique pas l'adhésion mais émet des hypothèses pour expliquer la rupture de joints collés. Lors de la séparation de surface collée, la rupture ne se propage pas strictement à l'interface mais suit un chemin près de l'interface, où une des deux surfaces est localement mécaniquement faible. Ces faiblesses correspondent à la présence de bulles d'air piégées, d'impuretés à l'interface ou de réactions entre les composants et le milieu: ce sont les couches interfaciales de faible cohésion [3].

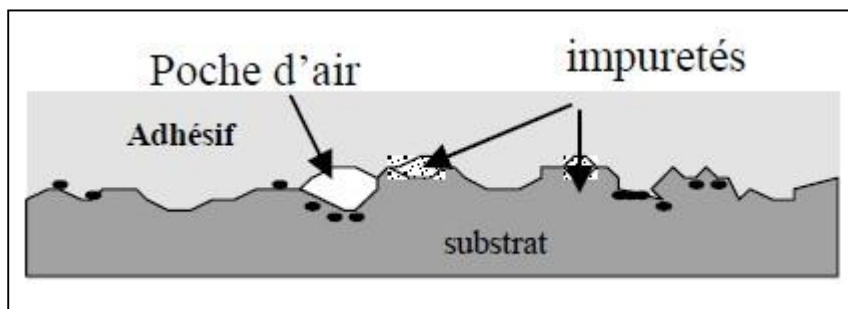


Figure I-7: Interaction entre les différentes couches de faible cohésion, l'adhésif et le substrat.

- **Les principaux mécanismes d'adhésion**

Chacune des théories présentées rend compte de phénomènes particuliers, mais ne permet pas à elle seule de décrire la globalité des mécanismes de l'adhésion.

On peut cependant considérer que le processus de collage se déroule en plusieurs grandes étapes qui font intervenir ces différents mécanismes de l'adhésion (Figure I-8):

- Mise en contact des substrats avec la colle
- Création de liaisons plus ou moins fortes et de portées variables, qui vont maintenir la cohésion de l'assemblage. Les énergies des différents types de liaisons sont rapportées dans le tableau (I-1).

Type de liaison		Energie (kcal/mol)
Liaisons chimiques	ionique	100-250
	covalente	15-170
	métallique	27-83
Liaisons intermoléculaires	liaison hydrogène ou acide/base	<12
	dispersion (London)	<10
	dipôle-dipôle (Keesom)	<5
	dipôle-dipôle induit (Debye)	<0,5

Tableau I-1 : Energies des différents types de liaisons intermoléculaires.

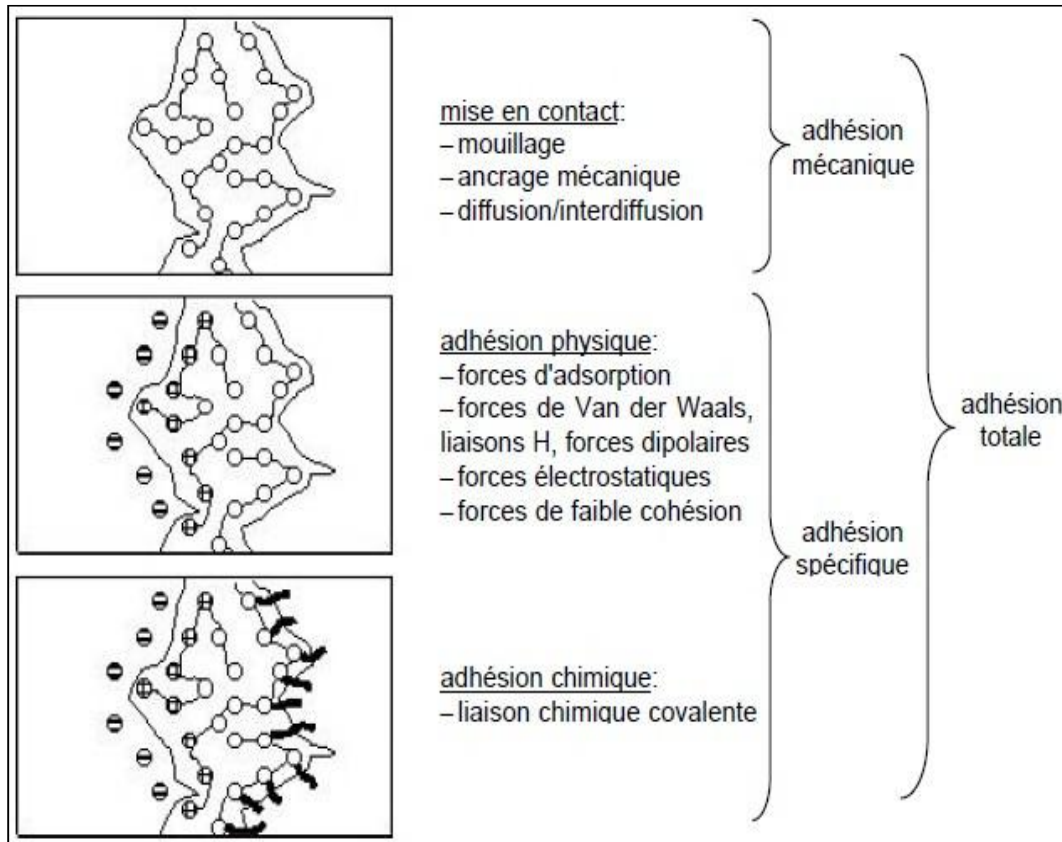


Figure I-8: Décomposition du processus de collage suivant les principaux mécanismes d'adhésion mis en jeu.

I-3. Les assemblages collés

Les assemblages collés ont une très grande efficacité. Ils permettent de distribuer les efforts transférés sur une plus grande surface. Les joints collés peuvent être entre deux métaux ou entre une structure composée en stratifié et en métal. Pour les applications aéronautiques qui nous intéressent, ces assemblages collés sont tels que le joint de colle travaille en cisaillement dans son plan. La géométrie de base est le recouvrement simple ou double. Pour atténuer les contraintes de pelage, deux géométries peuvent être utilisées plus particulièrement : la jonction en escalier et la jonction biseautée. Nous notons que ces jonctions peuvent être simples ou double (Figure I.9).

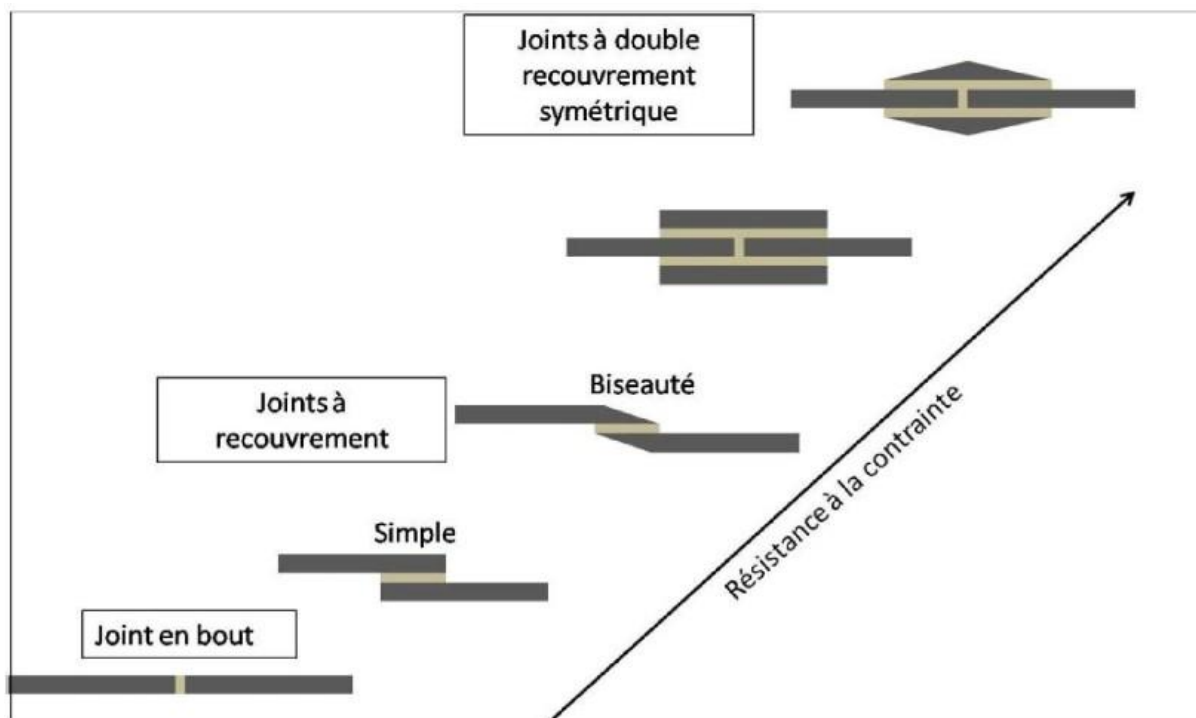


Figure I-9 : Représentation schématique de différentes géométries d'assemblage.

Le joint à simple recouvrement avec les caractéristiques de la simplicité et efficacité a été appliqué largement dans beaucoup d'applications et devient un spécimen standard d'essai pour déterminer les propriétés mécaniques des adhésifs [4].

I-3. 1. Différentes sollicitations sur les assemblages

Un assemblage collé dans une structure industrielle peut être sollicité mécaniquement par de nombreuses manières (Figure I.10). Ces sollicitations peuvent être classées en fonction de l'état de contraintes qu'elles génèrent dans la couche de colle. Le cisaillement qui consiste à appliquer à un substrat un effort axial de traction, permet d'obtenir une répartition des contraintes de cisaillement assez homogènes. La traction, obtenue en tirant un substrat perpendiculairement au plan de collage, génère principalement des contraintes de traction mais également un peu de cisaillement à cause de l'effet Poisson sur la colle. Pour obtenir du clivage, on considère que les substrats sont très rigides par rapport à la colle et ne se déforment pas. On tire alors sur l'extrémité d'un substrat tout en bloquant l'autre. On obtient un moment de flexion générant un état de contrainte assez complexe dans l'adhésif. Le pelage quant à lui se rapproche fortement du clivage à l'exception près qu'un des substrats peut se déformer. Sur une structure industrielle, ces sollicitations n'apparaissent jamais seules et on

rencontre plutôt une superposition de ces efforts ce qui rend l'étude très complexe. Il est reconnu que les efforts de traction provoquent des ruptures prématurées des assemblages, notamment par ouverture des microcavités existantes dans la couche de colle ou à l'interface (bulle d'air dans l'adhésif, mauvais collage,...).

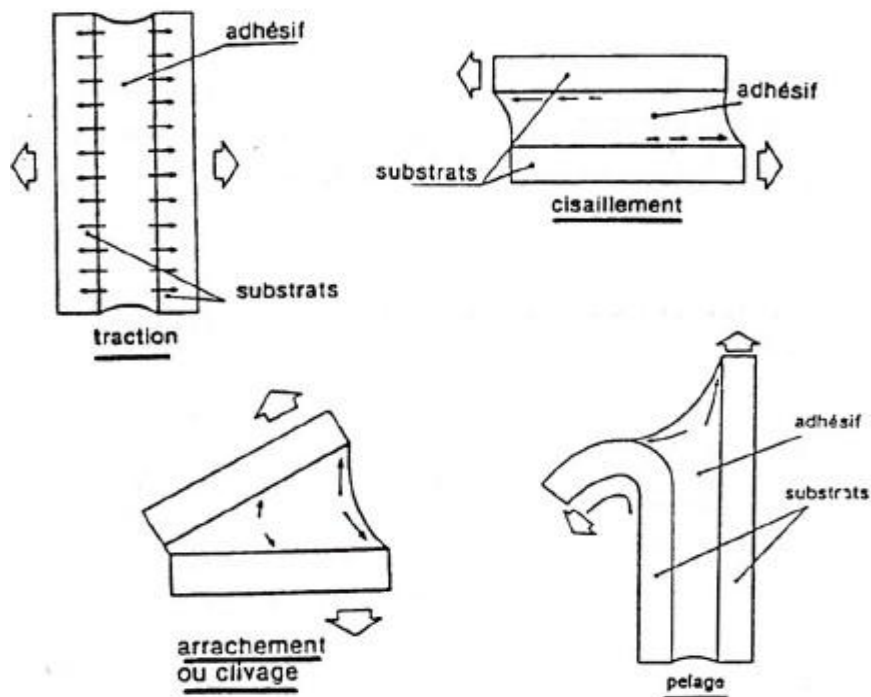


Figure I-10 : Mode de sollicitation d'un joint collé.

La rupture dans un assemblage collé est également très complexe du fait de la nature hétérogène de l'assemblage collé (/adhésif/métal). La rupture peut s'effectuer dans la colle ou dans un des substrats, on parle alors de rupture cohésive. Mais on peut également casser à l'interface entre la colle et un des substrats, soit par décollement soit par rupture de l'interphase qui est la zone de transition entre l'adhésif et le substrat et qui possède ses propriétés propres, on parlera alors de rupture interfaciale ou adhésive. Dans certains cas, la rupture peut s'amorcer dans la colle et se propager à l'interface ou dans le substrat, on parle de mode mixte de rupture [5].

I.4. Contrôle mécanique des assemblages collés

Parmi les différentes approches permettant d'obtenir des informations ou des critères de durabilité, l'approche expérimentale, basée sur les essais mécaniques, permet de prédire le comportement des joints collés. La plupart des tests mécaniques sollicitent l'ensemble du système (substrats, adhésif et interfaces). La rupture ne se faisant pas sans déformation, il paraît important de rester dans des domaines de déformation élastique. Les résultats, exprimés sous forme de force, de contrainte de rupture ou de taux de restitution critique d'énergie, sont représentatifs du comportement mécanique de l'assemblage. En général les tests destructifs favorisent la rupture interfaciale substrat/adhésif par des concentrations de contrainte maximales à l'interface [6].

I.4.1 Essai à simple recouvrement

Les essais de cisaillement sont probablement les essais les plus utilisés en raison de leur simplicité de mise en œuvre et du fait qu'ils permettent de reproduire des conditions de sollicitation proches de celles des joints dans leurs fonctions usuelles.

Parmi les essais de cisaillement, les plus répandus sont les essais à simple ou double recouvrement. La géométrie de l'essai du joint à simple recouvrement est présentée Figure I.11.

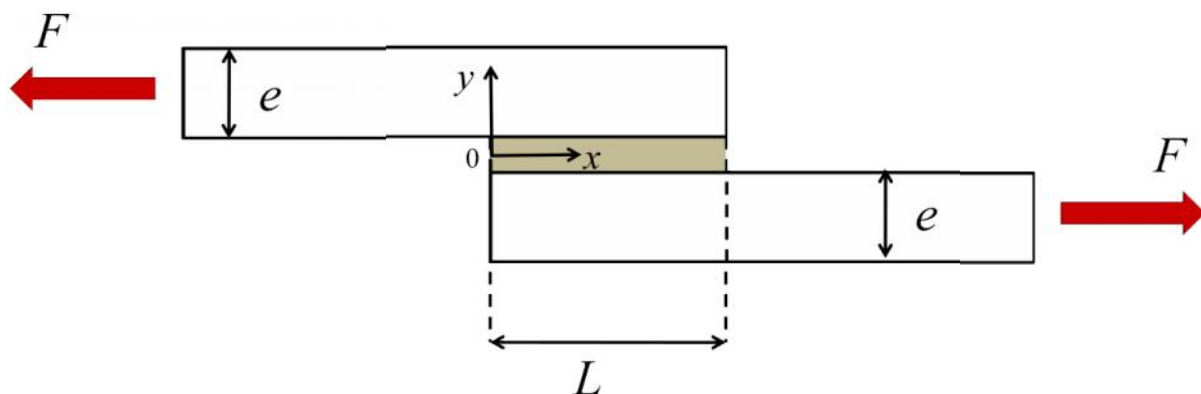


Figure I.11. Représentation schématique de la géométrie d'un joint à simple recouvrement.

L'approche la plus simple consiste à considérer que les substrats sont rigides et que seul l'adhésif se déforme en cisaillement. Pour un échantillon de largeur b , d'épaisseur e et de longueur de recouvrement L , la contrainte de cisaillement est donnée par :

$$\tau = \frac{F}{bL} \quad \text{I.5}$$

Cependant la distribution de contrainte dans le joint n'est pas uniforme en raison de l'élongation des substrats qui augmente dans la zone de recouvrement à partir des extrémités. L'effet observé, représenté dans la figure II.16, est une forte concentration de contrainte en cisaillement proche des

extrémités de la zone de recouvrement.

L'analyse de Volkersen [7] permet d'exprimer la distribution de contraintes en cisaillement dans l'adhésif :

$$\tau(x) = \tau_m \frac{wL}{2} \left[\frac{\cosh(wx)}{\sinh(\frac{wL}{2})} + \frac{E_1 e_1 - E_2 e_2}{E_1 e_1 + E_2 e_2} \cdot \frac{\sinh(wx)}{\cosh(\frac{wL}{2})} \right] \quad \text{I.6}$$

Où τ_m est la contrainte de cisaillement moyenne, E_1 et E_2 sont les modules de Young des substrats, e_1 et e_2 , leurs épaisseurs, et :

$$w = \sqrt{\frac{G}{e} \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2} \right)} \quad \text{I.7}$$

Avec e , l'épaisseur de joint, et G , le module de cisaillement de l'adhésif.

Dans le cas où les substrats sont de même nature, $E_1 = E_2$, l'équation I.6 peut être simplifiée en prenant $e_1 = e_2$ (Équation I.8). Dans ces conditions, le système est dit équilibré et la contrainte de cisaillement maximale τ_{max} est donnée par :

$$\tau_{max} = \tau_m \frac{wL}{2} \coth\left(\frac{wL}{2}\right) \quad \text{I.8}$$

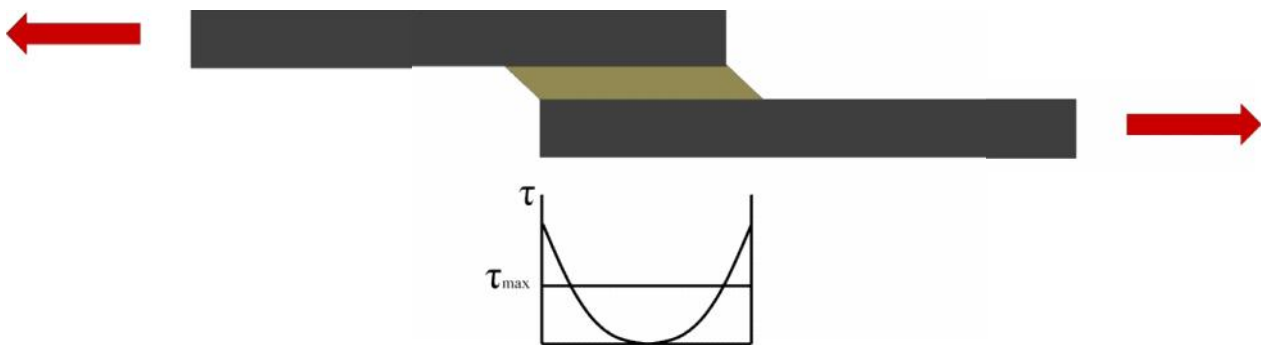


Figure I.12. Répartition des contraintes de cisaillement dans le joint à simple recouvrement (Volkersen, 1938).

Cependant, pour un joint à simple recouvrement, l'application de la force est excentrée. Il existe donc un moment de flexion M_f qui provoque la rotation du joint à l'origine de l'apparition de contraintes de pelage normales au joint qui viennent s'additionner aux contraintes de cisaillement. Goland et Reissner [8] ont introduit la contrainte de pelage à l'analyse de Volkersen (Figure I.12).

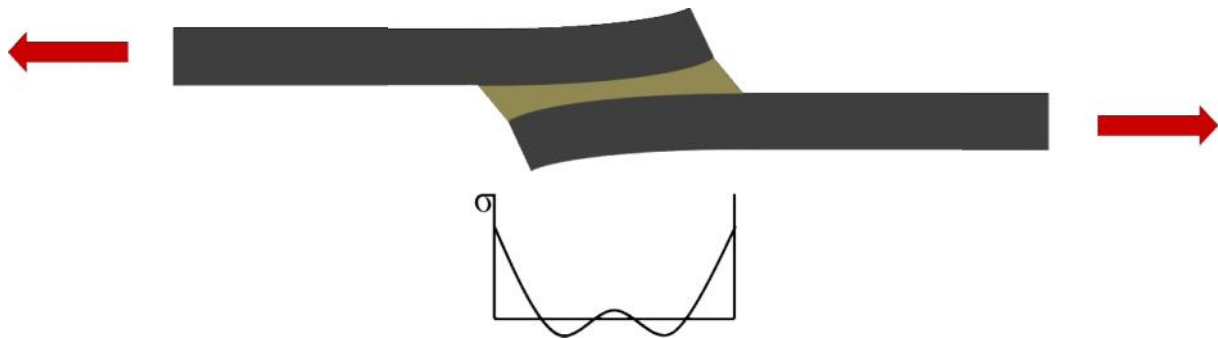


Figure I.13. Distribution de contraintes selon Goland et Reissner [8].

L'analyse de Ferlund et Spelt [9] permet de définir les taux de restitution d'énergie en mode 1 et 2 :

$$G_1 \approx \frac{e \sigma_{max}^2}{2 E_a} \quad \text{I.9}$$

Et

$$G_2 \approx \frac{e \tau_{max}^2}{2 \mu_a} \quad \text{I.10}$$

Avec E_a et μ_a , respectivement le module d'élasticité et le module de cisaillement de l'adhésif. On peut alors déduire la valeur critique du taux de restitution d'énergie associée à l'énergie de rupture :

$$G_c = \sqrt{G_1^2 + G_2^2} \quad \text{I.11}$$

I.4.2 Mesures en torsion

Une autre méthode de caractérisation des joints adhésifs est l'utilisation des essais de torsions. Parmi les mesures de torsion, nous présentons deux essais qui sont l'essai à double torsion et l'essai de torsion annulaire. La méthode à double torsion est très utilisée pour l'étude de fractures lentes grâce à sa stabilité mécanique. Ensuite, la méthode de torsion annulaire est généralement utilisée pour étudier les réponses des adhésifs au cisaillement ou aux contraintes de traction et compression.

I.4.3 Essai à double torsion

L'essai à double torsion a été introduit à la fin des années 60 [10], [11] et a été fortement développé notamment pour l'analyse des joints de colle. La configuration d'un essai à double torsion fait intervenir l'assemblage de deux pièces rectangulaires, d'épaisseur e (Figure II.14). Ces

pièces sont collées en laissant une longueur de fissure initiale, a_0 . Ensuite une force F est appliquée sur la ligne de fissure produisant un couple sur chaque bras formé par pré-fissuration. L'énergie de rupture est donnée par l'expression suivante [12] :

$$G = \frac{1}{2} \frac{F^2}{ke} \tag{I.12}$$

où k est la rigidité en torsion, et e , l'épaisseur des substrats.

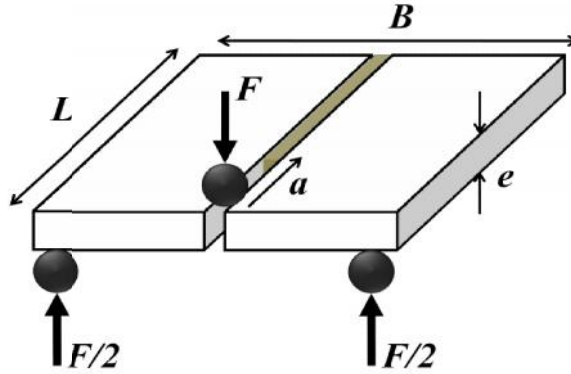


Figure I.14 Essai de double torsion [12].

I.4.4 Essai de torsion annulaire

Alors que la plupart des essais de cisaillement présentent des distributions de contrainte non uniformes dans les adhésifs, l'essai de torsion annulaire permet d'obtenir une distribution de contrainte uniforme. Ce test permet de mesurer les contraintes de cisaillement ainsi que la déformation. L'essai consiste à assembler deux tubes de rayon interne R_i et externe R_e (Figure I.15), ou un tube et une plaque par un adhésif d'épaisseur [13]. Ensuite, un couple M est appliqué sur l'axe du tube. Si le comportement est purement élastique, la contrainte de cisaillement à une distance radiale R de l'axe central est donnée par la relation suivante :

$$\tau = \frac{2MR}{\pi(R_e^4 - R_i^4)} \tag{I.13}$$

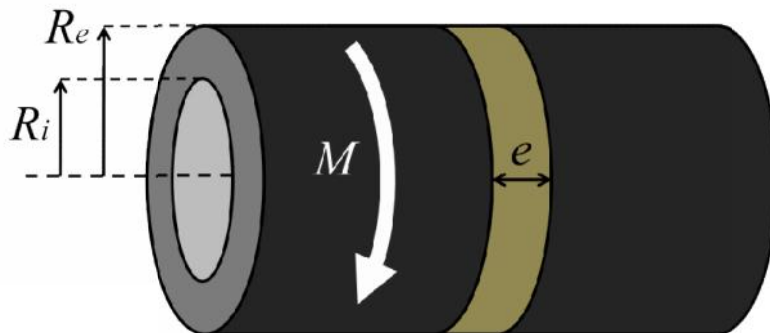


Figure I.15. Principe de test de torsion/cisaillement.

I.4.3 Pelage

Les essais de pelage sont réputés très sévères, et sont très utilisés. Ils permettent de caractériser l'adhérence de revêtements minces. Les essais de pelage consistent à mesurer une force nécessaire au décollement d'un substrat mince assemblé à un substrat rigide.

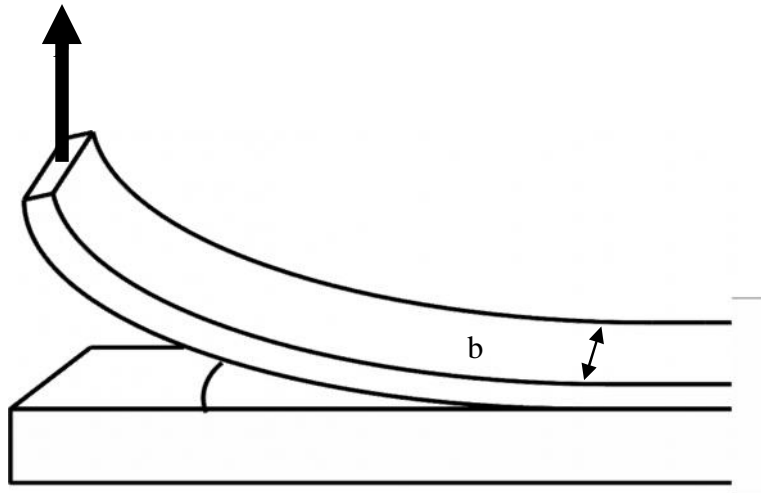


Figure I.16. Représentation schématique du pelage.

Dans le cas où les déformations sont élastiques, l'énergie de fracture d'un joint de largeur b est reliée à la force F de pelage sous un angle ϑ et est exprimée par la relation suivante [14] :

$$G = \underbrace{\frac{F}{b}(1 - \cos\theta)}_{\text{énergie de déplacement de la force}} - \underbrace{\frac{F^2}{2b^2eE}}_{\text{énergie d'allongement du film mince}} \quad \text{I.14}$$

Avec e , l'épaisseur du substrat mince et E le Module de Young pour ce même substrat. Le premier terme de G correspond à l'énergie fournie pour déplacer la force F . Le second terme correspondant à l'énergie nécessaire pour allonger élastiquement le film. Ce dernier devient négligeable lorsque le film mince est considéré comme indéformable (ou inextensible) [15]. L'équation est simplifiée pour devenir :

$$G = \frac{F}{b}(1 - \cos\theta) \quad \text{I.15}$$

L'énergie de fracture peut donc être simplement obtenue par mesure de la force de pelage. Cependant, cette relation n'est valable que dans des cas de faible adhésion, car en pratique l'extension du film et les mécanismes de déformation plastique et/ou viscoélastique interviennent et les énergies de déformation peuvent devenir prédominantes.

I.4.4 Essais en flexion

Une autre méthode d'évaluation de l'énergie d'adhésion est l'utilisation des essais de flexion, dans lequel la rupture est induite par l'extension élastique d'un substrat au voisinage d'un film adhésif. Pour un essai de flexion trois points, un joint collé repose sur deux appuis et une force, F , est appliquée en son centre (Figure I.17). L'assemblage subit une déformation en mode II [16] et par la théorie des poutres on obtient l'expression de l'énergie de fissuration suivante :

$$G = \frac{4,5l^2 F^2}{Eb^2 e^3} \quad \text{I.16}$$

où l est la longueur de fissure, E , le module du substrat et e , son épaisseur.

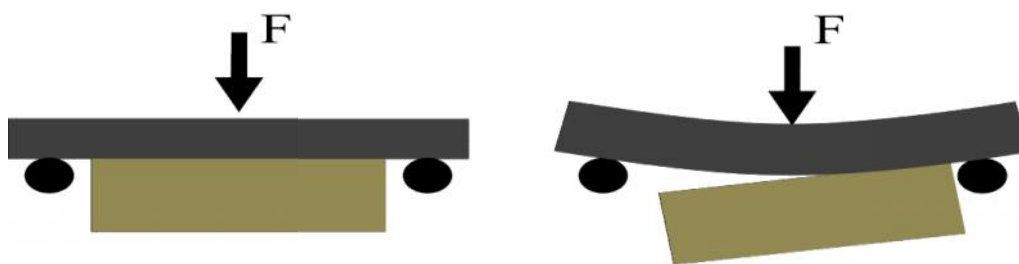


Figure I.17. Essai de flexion.

I.4.5 Essai de traction en bout (ISO 6922-1987)

Parmi les essais mécaniques, l'essai de traction est l'un des plus fondamentaux. Il permet de déterminer de nombreux paramètres mécaniques. L'utilisation d'éprouvettes collées en bout ou « Butt Joint » permet de tester des joints adhésifs. Le principe de l'essai consiste à assembler deux cylindres bout à bout par un joint adhésif d'épaisseur e (Figure I.17). Les deux cylindres subissent ensuite une force de traction, F . La difficulté de cet essai réside dans la préparation des échantillons, mais aussi le maintien de conditions de traction axisymétriques. Sous la tension imposée, la fracture peut être initiée en différents points, notamment si la fracture naît en bordure [17], l'essai devient un essai de clivage à force constante. Lorsque la fracture naît au centre de l'adhésif, la séparation se fait par cavitation. Ces phénomènes donnent lieu à des résultats dispersés.

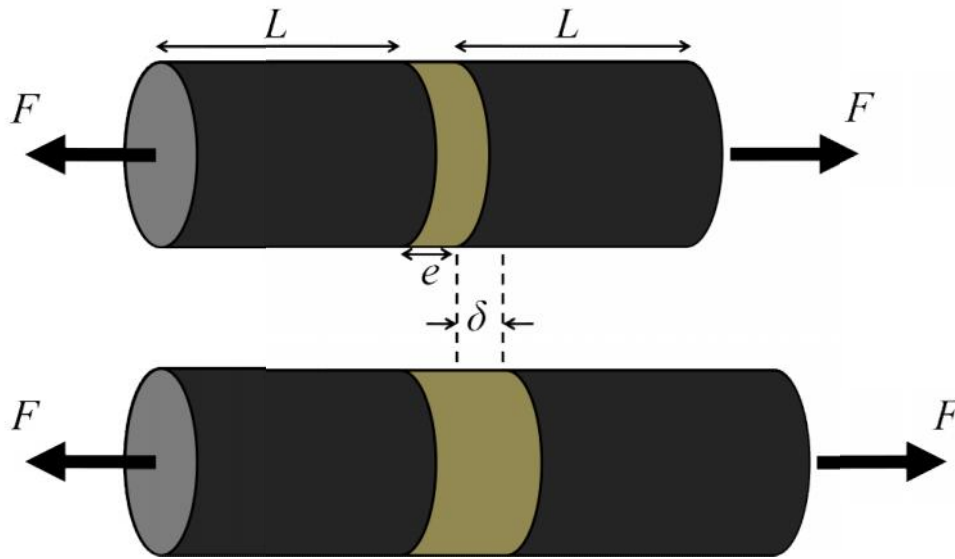


Figure I.18. Essai de traction en bout

Dans des conditions idéales, la contrainte en traction est donnée par l'expression suivante :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{I.17}$$

Où A est l'aire de la section du cylindre. La déformation est donnée par :

$$\delta = \frac{FL}{AE} \quad \text{I.18}$$

Où L est la longueur initiale et E, le module de Young.

L'énergie emmagasinée, U, est donnée par l'expression suivante [18]:

$$U = \frac{Ea}{2} \left(\frac{\delta}{e} \right)^2 \quad \text{I.19}$$

I.4.6 Essai de clivage

Parmi les contrôles destructifs de l'adhésion, le dernier que nous présentons est l'essai de clivage qui est le mode utilisé dans le cadre de ce travail. Il s'agit d'un test de mécanique de la rupture avec propagation de fissure entre deux substrats (Figure I.19). Le comportement de la propagation de fissure est généralement estimé par un test de clivage à charge ou à déplacement imposé.

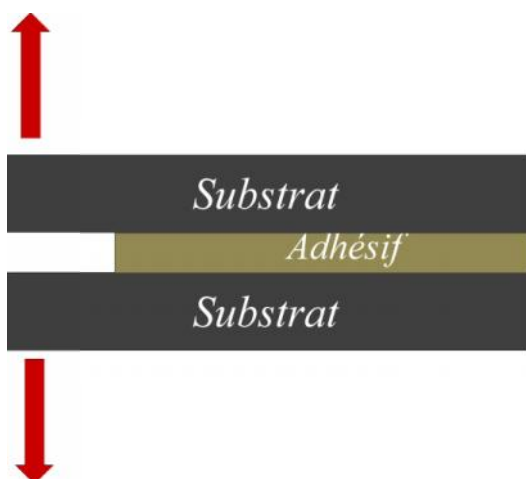


Figure I.19. Essai de clivage.

I.5. Différents travaux scientifiques :

Un joint adhésif collé est une structure composée de deux adhérents jointifs par un adhésif. **Adams et Wake** définissent l'adhésif en tant que « un matériau 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.

Beaucoup de modèles pour les joints adhésif collés ont été développés les géométries des joints à simple recouvrement (Figure I-20). Cette configuration a été adoptée par la société américaine des matériaux d'essai comme essai mécanique standard pour la détermination de la résistance au cisaillement [19].

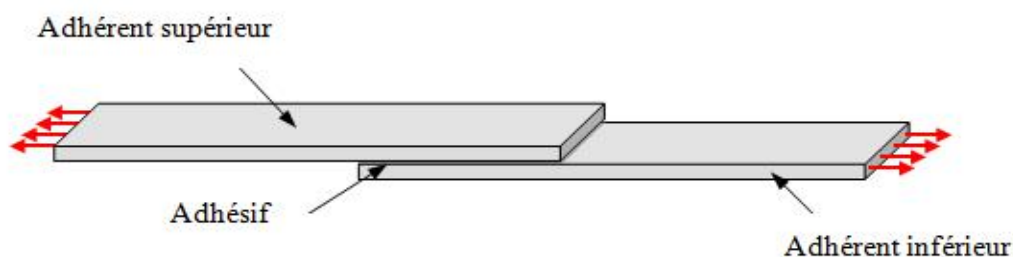


Figure I-20: Le joint adhésif collé (à simple recouvrement).

Il y a deux approches de base pour analyser les joints adhésifs collés : analytique et numérique. 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 contraintes à un point quelconque du joint. En la deuxième approche, des solutions des équations sont obtenues par la méthode numérique est représenté par un modèle discret au départ. Dans ce dernier, un système des équations algébriques est dérivé, généralement des fonctions d'énergie.

I.5.1. Approches analytiques

Les méthodes analytiques de détermination des contraintes se justifient pour plusieurs raisons. Elles peuvent tout d'abord s'imposer par manque d'outils de calcul. Utilisées dans des cas simples, elles permettent aussi de valider des modèles de détermination des contraintes sophistiqués. En homogénéisant les caractéristiques des substrats de joint collés de matériaux composites, ces méthodes donnent également la possibilité d'estimer, avec plus ou moins de précision, le niveau de contrainte auquel est soumis l'adhésif. Ce cas d'application, fréquent pour des études de pré-dimensionnement, est loin d'être négligeable. La caractéristique commune aux nombreux modèles analytiques est la simplicité de leurs hypothèses. Il en découle, comme nous allons le voir, une description plus ou moins précise et réaliste de l'état de contrainte recherché. La majorité des études analytiques classiques choisissent une approche bidimensionnelle de l'état de contraintes, pour des raisons évidentes de simplicité. Cette approche peut présenter des limitations, notamment dans le cas des substrats composites. Une autre hypothèse fréquente suppose qu'il n'y a pas de variation des contraintes dans l'épaisseur ni dans la largeur de la couche d'adhésif. Cette hypothèse est fondée sur la très faible épaisseur de cette couche devant celle des substrats. La seule variation des contraintes est considérée est suivant l'axe longitudinal (axe de chargement).

L'état de contrainte supposé dans l'adhésif se résume donc le plus souvent aux composantes suivantes (Figure I-21) :

- La contrainte de cisaillement, τ_{xy}
- La contrainte normale, dite de pelage, σ_{yy}
- Et parfois la contrainte longitudinale, σ_{xx}

La dernière composante citée est dans les faits souvent négligée. Cette simplification se justifie par la grande différence de module d'Young entre l'adhésif et les substrats ($E_s \gg E_a$), qui entraîne de très faibles contraintes longitudinales dans l'adhésif.

On citera tout d'abord la plus simple des formules de dimensionnement, qui n'est pas réaliste mais qui est largement employée pour des estimations rapides, et qui est retenue dans un certain nombre de normes. Elle consiste à évaluer la contrainte moyenne de cisaillement dans l'adhésif, en considérant les substrats comme parfaitement rigides.

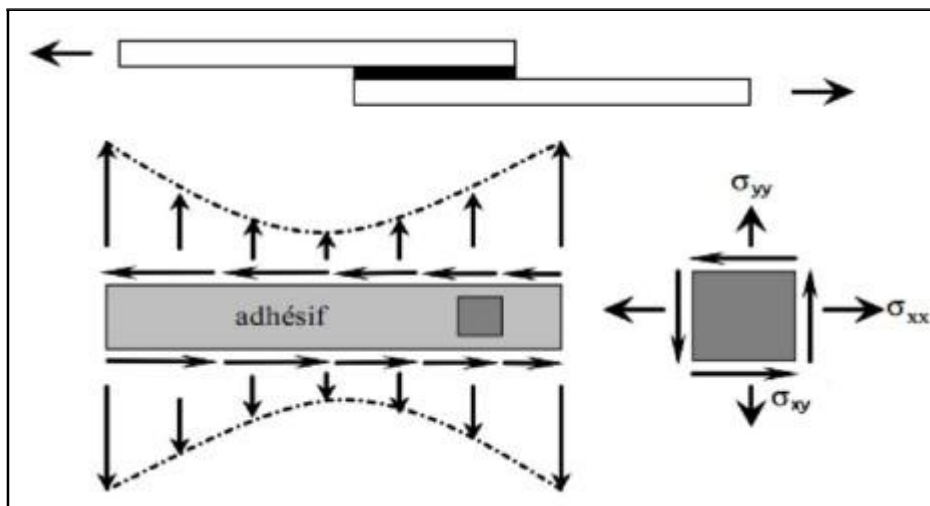


Figure I-21 : Contraintes dans l'adhésif.

Les premiers calculs ont été effectués par **Volkersen**, a proposé la première approche en 1938 de l'état de contrainte dans un joint collé à simple recouvrement. Volkersen considère que l'adhésif et les substrats sont parfaitement élastiques et isotropes. Il néglige les contraintes de cisaillement dues à la flexion des substrats, supposés alors travailler en contraintes planes, et s'intéresse à la distribution des contraintes de cisaillement dans la couche de colle [20]. Volkersen exprime ainsi la distribution des contraintes de cisaillement dans l'adhésif :

$$\tau(x) = \tau_m \frac{\omega l}{2} \left(\frac{\cosh \omega X}{\sinh \omega l/2} + \frac{|E_1 e_1 - E_2 e_2|}{E_1 e_1 + E_2 e_2} \frac{\sinh \omega x}{\cosh \omega l/2} \right) \quad (I-20)$$

Dans laquelle on a :

$$\omega = \sqrt{\frac{G_c}{e_c} \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2} \right)} = \sqrt{\frac{E_c}{2e_c(1+\nu)} \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2} \right)} \quad (I-21)$$

Dans laquelle E_1 , e_1 et E_2 , e_2 correspondent respectivement au module d'Young et à l'épaisseur de chaque substrat, G_c et e_c au module de Coulomb et à l'épaisseur de l'adhésif et l à la longueur du recouvrement.

Goland et Reissner proposent que le chemin excentrique de charge d'un joint adhésif collé à simple recouvrement cause un moment de flexion (M), et une force transversale (V) être appliqué au joint en plus de la charge de tension appliquée par largeur d'unité (P), suivant les indications de la figure (I-22). En raison de ce moment de flexion, le joint tournera, changeant la direction de la ligne de charge avec la tendance des forces de tension appliquées d'hériter la ligne. Car le joint tourne, le moment de flexion diminuera, provoquant un problème géométrique non linéaire où les effets des grands débattements des adhérents doivent être expliqués. Les premiers pour considérer ces effets étaient Goland et Reissner. Ils ont employé un facteur de moment de flexion (k) et un facteur de force transversal (k') qui rapportent la charge de tension appliquée par largeur d'unité (P) au moment de flexion (M) et à la force transversale (V) aux extrémités de recouvrement.

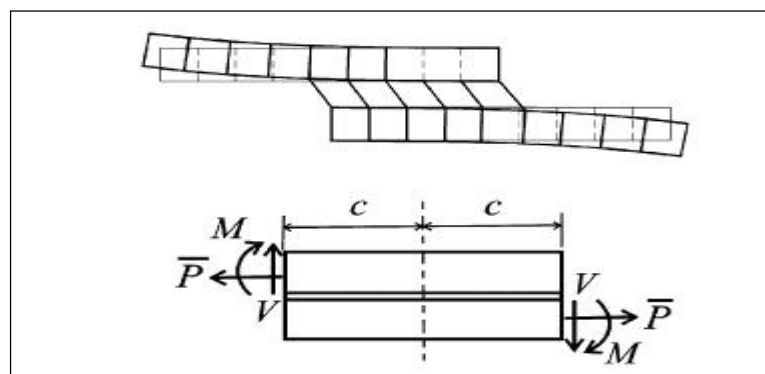


Figure I-22 : Modèle de Goland et de Reissner.

Il n'y a aucun doute que les premiers travaux effectués principalement par Volkersen et Goland et Reissner étaient un grand pas en avant dans l'analyse des contraintes des joints adhésifs collés. Néanmoins, leur travail a eu plusieurs limitations.

- Ils n'expliquent pas des variations des contraintes adhésifs par la direction d'épaisseur, particulièrement l'interface soumet à une contrainte ce qui sont importants quand l'échec se produit près de l'interface.
- Les contraintes de cisaillement maximal se produit aux fins du recouvrement, qui viole l'état libre du contrainte, suivant les indications de la figure I-23.
- En conclusion, les adhérents ont été considérés en tant que faisceaux minces, ignorant le cisaillement traversant d'épaisseur et les déformations normales. Le cisaillement d'adhérents est particulièrement important dans les adhérents mous de cisaillement tels que les composites [23].

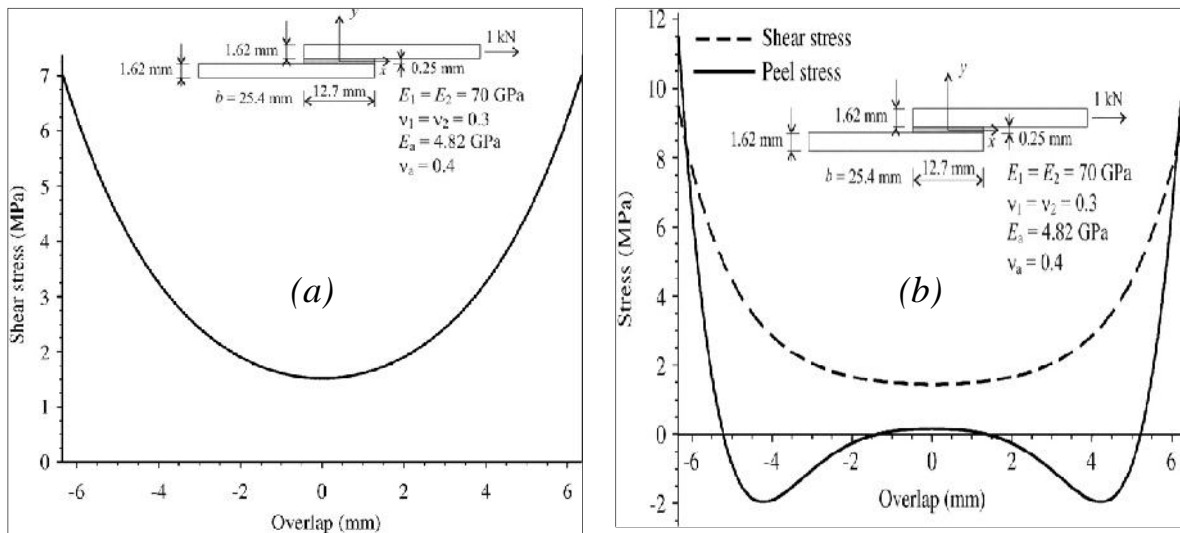


Figure I-23 : Distribution des contraintes de cisaillement de l'adhésive de cisaillement et de pelage (a)- Volkersen; (b)-Goland et Reissner pour des adhérents d'alliage d'aluminium et un adhésif époxyde.

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

$$T_{\max} = \left(\frac{1 + 3k_{GR}}{4} \eta_V L \coth(\eta L) + \frac{3(1 - k)}{4} \right) T_{\text{moy}} \quad (\text{I-22})$$

Et :

$$S_{\max} = \frac{e_1}{bL^2\Delta} \left(0.5\lambda^2 k_{GR} (\sinh(2\lambda) - \sin(2\lambda)) - \lambda k' (\cosh(2\lambda) + \cos(2\lambda)) \right) \quad \text{I-23}$$

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 a édité une série de documents concernant des joints à simple recouvrement, double recouvrement, en escalier et biseautés, et faire un modèle de mécanique des continus dans lequel les adhérents étaient élastique isotrope ou anisotrope, et l'adhésif a été modélisé comme l'élastique, l'élastique-plastique, ou bi-élastique. Fondamentalement, la théorie classique de plaque a été adoptée pendant la dérivation de Hart-Smith. Cependant, les effets de la déformation transversale de cisaillement, qui s'est avérée importante quand le module transversal de cisaillement est petit. De plus, Hart-Smith s'intéresse au comportement non linéaire de l'adhésif : il a développé une approche élastique-plastique parfait (Figure I-24) [20].

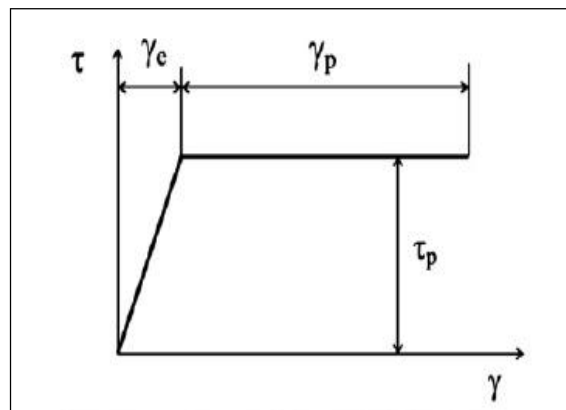


Figure I-24 : Le comportement de plasticité dans l'adhésif selon Hart-Smith.

Comme dans le cas précédent les zones en bord de joint assure la plus grande part du transfert ; cependant pour de longs recouvrements, la zone intermédiaire est plus efficace que pour le double recouvrement. La contrainte de cisaillement s'écrit :

$$T(x) = A_a \cosh\left(2\lambda'\left(x - \frac{L}{2}\right)\right) + C_a \quad (\text{I-24})$$

Où :

$$C_a = \frac{f}{bL} - \frac{A_a}{\lambda'L} \sinh(L\lambda') \quad \lambda' = \frac{\eta_{HS}}{2} \sqrt{1 + 3\left(1 + \frac{e}{e_1}\right)} \quad (\text{I-25})$$

$$A_a = \frac{\lambda'}{b \sinh(\lambda'L)} \frac{1 + 3\left(1 + \frac{e}{e_1}\right)k_{HS}}{1 + 3\left(1 + \frac{e}{e_1}\right)f} \quad (\text{I-26})$$

Oplinger a fourni une analyse alternative de Harf-Smith que la modification pour le joint à simple recouvrement en considérant de grands débattements des adhérents et les effets des contraintes de cisaillement adhésifs et en ignorant les effets de la déformation d'épaisseur. De cette manière, on permet à des débattements adhésifs de découpler les deux moitiés du joint dans l'analyse de recourbement de débattement et l'analyse des contraintes d'adhésif. Là existent une bonne corrélation dans le facteur k de moment de bord entre les prévisions d'Oplinger et ceux de Goland et de Reissner [24]. La distribution de la contrainte de cisaillement s'exprime ainsi :

$$T(x) = \frac{\mu_1}{2e_1} \Delta_{h1} \frac{\cosh\left(\mu_1 \frac{x-L}{e_1}\right)}{\sinh\left(\mu_1 \frac{\lambda}{2}\right)} + \frac{\mu_2}{2e_1} \Delta_{h2} \frac{\cosh\left(\mu_2 \frac{x-L}{e_1}\right)}{\sinh\left(\mu_2 \frac{\lambda}{2}\right)} \quad (\text{I-27})$$

Où :

$$\Delta_{hj} = \frac{2\beta^2 \mu_j^2}{\mu_j^2 - 2\beta^2} \frac{E_1}{1-\nu^2} \frac{e_1}{2} k_{2j} \quad (\text{I-28})$$

$$k_{21} = \frac{1 + R^2 C_2 - k_0}{1 + R^2 C_1} \quad k_{22} = R^2 C_1 \frac{1 + R^2 C_2 - k_0}{1 + R^2 C_1} - R^2 C_2 \quad (\text{I-29})$$

Pour la contrainte de pelage, Oplinger obtient quasiment la même équation que Goland et Reissner, de sorte que seule la modification du facteur de moment fléchissant est nécessaire. Il conclue que l'analyse de Goland et Reissner reste valable pour des substrats épais, ce qui n'est pas vrai pour des substrats plus minces, car plus sensibles à la flexion.

Delale et Erdogan incluent un modèle Zener à la loi de comportement de l'adhésif pour simuler l'effet de la viscoélasticité tandis que les substrats restent élastiques. Ils montrent que les contraintes de pelage ont tendance à se relaxer plus lentement que les contraintes de cisaillement ce qui les rend particulièrement néfastes pour la tenue de la structure en fatigue par exemple [25].

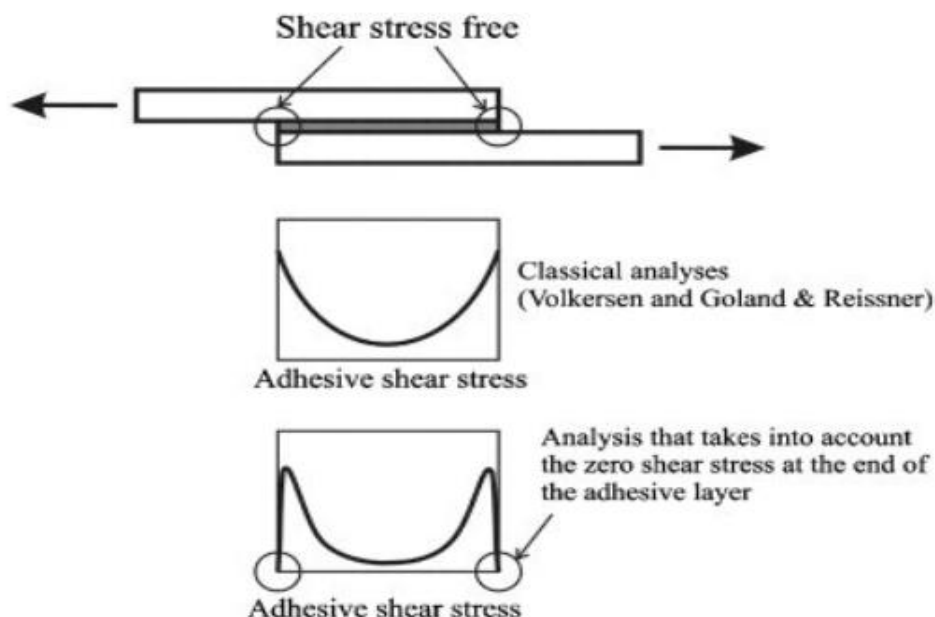


Figure I-25 : Distribution des contraintes de cisaillement avec ou sans prise en compte de l'effet de bords libres.

I.5.2. Approches numériques

Une grande variété de modèles a été développée pour analyser les joints adhésifs collés. Certaines de ces techniques rapportent les méthodes numériques, qui fournissent un outil général pour analyser les géométries et des conditions de charge arbitraires. Parmi les

méthodes numériques, l'analyse par éléments finis a été intensivement employée avec le succès ; cependant, ce genre d'analyse exige de la génération d'un grand ensemble de données afin d'obtenir des résultats raisonnablement précis.

- **Analyse par éléments finis**

L'analyse par éléments finis a été employée dans beaucoup de domaines scientifiques et de technologie comprenant le flux de fluide, la conduction de chaleur, et l'analyse structurale. Cette revue est confinée à l'utilisation de la méthode d'élément fini pour les joints adhésif collés. Les premiers calculs par éléments finis (EF) ont été réalisés en 2D avec des éléments très simples (triangulaire ou rectangulaire et linéaire) et pour des comportements purement élastiques. Avec l'amélioration des méthodes EF, les modèles deviennent plus complexes : 3D, augmentation des degrés de liberté, couplages mécanique – thermique, intégration des critères de rupture...

- *Analyse bidimensionnelles (2D)*

Un grand nombre d'analyses par éléments finis bidimensionnelles des joints adhésif collés ont été exécutées. Tandis que ces analyses produisent des résultats précis pour quelques situations et exigent moins d'effort de modélisation que des analyses tridimensionnelles, elles peuvent encore exiger une quantité considérable de temps de machine et de génération des données. L'analyse par éléments finis bidimensionnelle des joints adhésifs collés peut être effectuée des éléments de contrainte plane conventionnelle ou des contraintes planes. Quand cette approche est suivie, des mailles très fines sont exigées, en particulier dans la couche adhésive, afin d'obtenir une exactitude raisonnable [22]. Une des premières analyses par éléments finis de joint à simple recouvrement a été éditée par plusieurs auteurs.

Bigwood et Crocombe ont présenté une analyse élastique complète du joint adhésif qui calcule le cisaillement d'adhésif et les contraintes de traction dans la région de recouvrement. Et cette analyse a été validée pour une gamme des cas de charge utilise un programme d'élément fini. Dans leurs analyses, le joint adhésif est modelé comme sandwich à adhésif-adhérent avec n'importe quelle combinaison du chargement de tension, de cisaillement et de moment appliqué aux extrémités des deux adhérents [26].

Wooly et Carver Ils ont employé la méthode d'élément fini élastique linéaire pour l'analyse de joint à simple recouvrement. Ils ont employé les triangles constants de contrainte

idéalisant les joints en tant que cas de contrainte plane. Ils ont conclu que la concentration de contrainte s'est produite sur les extrémités de recouvrement [27].

Penado, afin d'augmenter l'efficacité informatique, a présenté une approche basée sur la technique substrat-structure. Dans cette approche, la réponse générale du joint collé à simple recouvrement est obtenue analytiquement à partir de la solution des états d'équilibre de force-moment. Les valeurs analytiquement évaluées de force-moment aux extrémités de recouvrement sont alors employées comme état de frontière normale pour une analyse par éléments finis bidimensionnelle fortement détaillée du joint de recouvrement dans la prétention que les extrémités de recouvrement sont simplement soutenues [28].

Une conclusion semblable a été obtenue par **Silva et Adams** dans le cas des joints à simple recouvrement. On le sait que la résistance au cisaillement de recouvrement diminue à mesure que l'épaisseur adhésive augmente, mais la gamme des épaisseurs adhésives étudiées dépasse rarement 1 millimètre. Les résultats présentés montrent ce qui se produit jusqu'à une épaisseur très épais (3 millimètre), avec et sans filet d'épanchement. La raison de la diminution de la force commune comme augmentations de l'épaisseur d'adhésifs est encore controversée [29].

Sheppard, Anderson et Ban ont proposé la théorie de zone de dommages (Figure I-26), qui peut prévoir les charges d'échec de joint à simple recouvrement utilisé un critère d'échec approprié de référence. a prévu les charges d'échec des joints adhésifs en employant la théorie de mécanique de rupture et les défauts dans l'adhésif dû à de petits vides, a suggéré le rapport de zone de dommages pour prévoir des forces communes d'échec d'adhésifs [30].

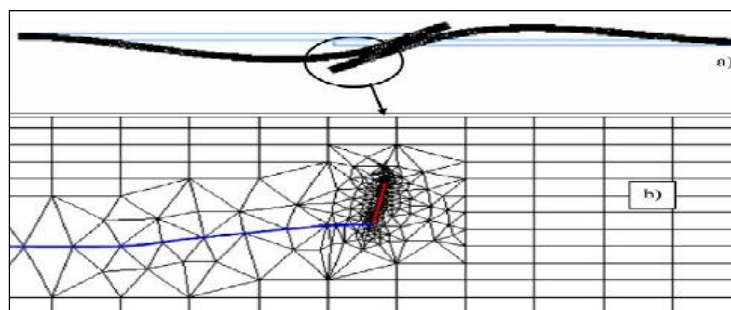


Figure I-26 : Dans le bleu le défaut initial, en rouge la propagation des fissures (a) Joint déformé ; (b) chemin de fissure du côté d'avancement [30].

- *Analyse tridimensionnelles (3D)*

Des contraintes dans les joints adhésifs sont parfois obtenus avec l'exactitude raisonnable d'une ou les analyses bidimensionnelles. Cependant, il y a beaucoup de cas où une analyse bidimensionnelle ne s'applique pas ou ne produit pas l'exactitude acceptable. Même pour le joint à simple recouvrement, une analyse tridimensionnelle peut être exigée si la détermination précise des variations des contraintes à travers la largeur est désirée (Figure I-27). Dans les cas où une analyse tridimensionnelle est exigée, les modèles d'élément fini sont le meilleur outil disponible. L'avantage principal en employant cette méthode est qu'aucune prétention spéciale n'est nécessaire. L'inconvénient principal est l'augmentation de la préparation de données et du temps de machine. Des études tridimensionnelles notamment sont entreprises.

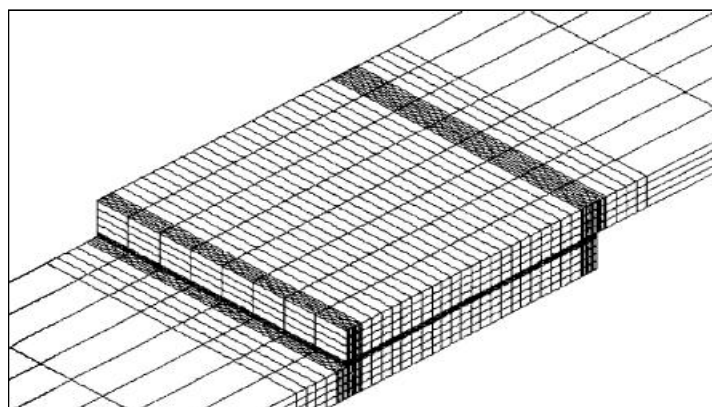


Figure I-27 : Maillage par l'élément fini [31].

Adams, Peppiatt, Adams et Harris ont employé des critères pour prévoir la force commune avec le succès. Cependant, en raison de la singularité des contraintes aux coins de réentrée des joints, les contraintes dépendent de la grosseur de maillage utilisée et comment près des points de singulier les contraintes sont absorbées. Des valeurs des contraintes calculées aux points de gauss près de la singularité ou de l'extrapolation des valeurs de point de gauss à la singularité ont été en fait employées. Par conséquent, le soin doit être pris en employant ce critère. Bien que le critère soit sensible à la grosseur de maille utilisée, l'aperçu physique du procédé d'échec est clair, et c'est des contraintes principales maximum qui sont le plus responsable de l'échec des joints métalliques avec les adhésifs fragiles puisque les fissures lancent et propagent la normale à ces contraintes principales maximum [30].

Andruet et al a développé un modèle pour l'analyse tridimensionnelle des joints adhésifs basés sur la coquille et les éléments pleins. Les éléments de coquille sont employés pour modéliser les adhérents et la couche adhésive est modélisée comme élément plein avec des nœuds d'excentrage dans les adhérents. La formulation d'élément inclut des non-linéarités géométriques, et des effets de courant ascendant et d'humidité. En plus de considérer la nature tridimensionnelle des joints adhésifs, le calcul des contraintes précises aux interfaces d'adhérent-adhésif est concerné primaire. L'échec des joints adhésifs se produit habituellement dans l'adhésif (échec cohésif) ou aux interfaces d'adhérent-adhésif (échec adhésif). D'ailleurs, l'échec cohésif se produit habituellement près de l'interface d'adhérent-adhésif. Cependant, les éléments finis conventionnels basés sur des déplacements ne satisfont pas la continuité du vecteur de contrainte aux interfaces [26].

Ding, Kumosa, Ding et al a appliqué cette méthode pour déterminer le champ de contrainte singulier près de l'intersection d'une interface bi-matériel avec les bords libres dans les joints adhésifs. Bien qu'efficace pour une interface bi-matériel avec ou sans des fissures, cette approche souffre du nombre d'itérations exigées pour la convergence et de l'incapacité d'imposer la continuité des composants de traction à travers l'interface. En outre, le taux de convergence et l'exactitude des résultats dépendent des propriétés matérielles et de la graduation des déplacements pendant les itérations. La force du champ de contrainte singulier devient imprécise aux distances très étroitement à la jonction des matériaux différents ; un endroit commun de déclenchement d'échec. Cette inexactitude peut être attribuée à la limitation des éléments finis utilisés dans cette analyse [32].

Taylor a développé un modèle tridimensionnel simplifié d'un joint adhésif collé. Les adhérents ont été représentés par des éléments de plaques de neuf-nœud et l'adhésif a été modélisé par les éléments spéciaux de brique avec dix-huit nœuds excentrés. Analogie au modèle bidimensionnel, à l'adhésif et aux adhérents partager les nœuds, réduisant le nombre de degrés de liberté du joint. Les déplacements des adhérents et l'adhésif étaient compatibles aux interfaces, ainsi un trou ne s'est pas produit pendant la déformation. En conséquence, les mailles brutes ont donné des résultats précis. Le joint à simple recouvrement et les géométries de fente-pièce rapportée ont été analysées avec cette technique. Les résultats ont montré clairement la variation des contraintes de pelages et de cisaillement le long de la largeur du spécimen [32].

I.6. Le comportement des assemblages collés

Les travaux de Goland et Reissner et de Hart-Smith apparaissent 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 ses configurations. Par conséquent, ces travaux offrent la possibilité assez simplement d'être considéré comme référant à d'autres analyses. De ces analyses, nous pouvons dégager le comportement général en fonction des paramètres suivants :

- Ñ La longueur de recouvrement ;
- Ñ La rigidité (épaisseur et module d'élasticité) des substrats ;
- Ñ La rigidité (épaisseur et module d'élasticité) de l'adhésif ;
- Ñ Le comportement mécanique de l'adhésif.

I.6.1. La longueur de recouvrement

Les contraintes adhésives maximales en bord de joint augmentent quand la longueur de recouvrement augmente ; l'effort est donc transféré préférentiellement aux extrémités du joint. La charge moyenne à rupture augmente avec la longueur de recouvrement jusqu'à atteindre un plateau ; d'où l'existence d'une valeur optimale de recouvrement : c'est la longueur de recouvrement qui permet de supporter un effort maximal pour une surface collée minimale.

I.6.2. La rigidité des substrats

L

L'augmentation de l'épaisseur des substrats diminue la concentration des contraintes de cisaillement et augmente la concentration de contrainte de pelage. De Bruyne, montre que la résistance au cisaillement et le rapport $\frac{V_e}{L}$ sont liés.

L'augmentation de la rigidité de flexion permet de diminuer la concentration des contraintes de cisaillement aux extrémités du joint. Cependant, l'augmentation de la rigidité des substrats par une augmentation de leur épaisseur ou de leur module d'Young augmente le facteur de moment fléchissant et donc une augmentation des contraintes de pelage. Un facteur important est le rapport de la rigidité relative du substrat sur la rigidité relative de la colle : E_{je} / E_{ei} . Plus ce rapport sera élevé, plus les contraintes de pelage seront faibles.

1.6.3. 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 rupture augmente puis décroît au-delà d'une certaine épaisseur jusqu'à une certaine limite. Dans [32], l'auteur explique que c'est le développement des contraintes d'arrachement aux extrémités du joint, croissant avec l'épaisseur de l'adhésif, qui entraîne une diminution de la résistance au cisaillement. Son 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 montre par ailleurs que les ruptures du joint de colle tendent à être adhésives et non cohésives quand l'épaisseur augmente (ce n'est donc pas la structure interne de la colle qui s'affaiblit quand l'épaisseur croît) : les contraintes sont d'autant plus élevées à l'interface substrat/adhésif que le joint est épais. Quand le module de cisaillement de la colle augmente, la résistance au cisaillement diminue ; ceci pourrait être expliqué par l'augmentation des contraintes maximales adhésives des adhésifs quand leur module augmente.

1.6.4. Le comportement mécanique des adhésifs

Sous les hypothèses simplificatrices prises par Hart-Smith, l'auteur montre 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 montre que des modélisations, pour lesquelles l'adhésif est simulé par des ressorts agissant dans le plan et hors plan, suffisent, même si l'état de contrainte nulle en bord libre n'est pas vérifié. La prise en compte du comportement visqueux, des adhésifs montre l'évolution au cours du temps des assemblages collés. Par conséquent, la prise en compte de la variation temporelle des propriétés mécaniques des matériaux au cours du temps permet alors de prédire le comportement de l'assemblage collé au cours du temps.

1.7. Les défauts dans les assemblages collés

L'adhérence des assemblages collés est généralement mesurée à l'aide d'essais mécaniques de séparation de l'assemblage mais peut aussi être évaluée soit par des procédés de contrôle destructifs et 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 microfissuration 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.

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 **micros 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 insuffisant.
- Des **cavités** dues à une mauvaise application de l'adhésif ou à des dégagements gazeux durant la 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.

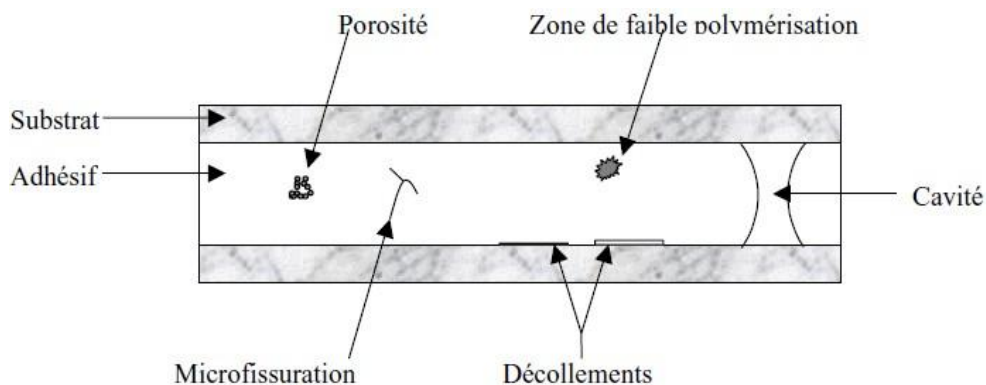


Figure I-28 : Défauts typiques présents dans un joint de colle.

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-28 représente les défauts typiques d'un assemblage collé.

I.7.1. Procédés non destructifs de contrôle des assemblages collés

L'objectif de tels procédés de mesure est de déterminer une corrélation directe entre la

résistance mécanique du joint et des grandeurs mécaniques, physiques ou chimiques du joint sans toutefois l'endommager ou le détruire comme précédemment. De telles méthodes sont capables de localiser ou d'identifier des défauts qui peuvent diminuer les performances ou la durée de vie de l'assemblage. Il existe deux zones bien distinctes d'examen des propriétés de l'adhésif : la partie cohésive de l'assemblage qui permet d'évaluer les propriétés intrinsèques du joint et la zone interfaciale qui permet d'identifier la résistance du joint entre l'adhésif et le substrat. De plus, les cavités, les décollements localisés et la porosité créent une classe de défauts supplémentaire qui doit être inspectée. Avant d'étudier les méthodes d'identification non destructives des défauts pouvant entamer la résistance du joint, il est nécessaire d'identifier la nature de ces défauts.

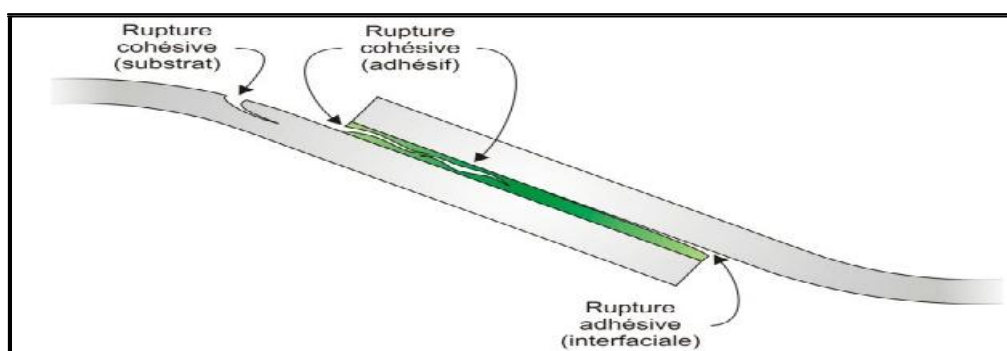


Figure I-29 : Différents modes de rupture dans un assemblage collé.

I.7.2. Procédés destructifs de contrôle des assemblages collés :

Même si ces méthodes permettent d'identifier des paramètres pouvant affecter la résistance intrinsèque de l'assemblage et son vieillissement, les essais de contrôle les plus usités restent les essais de séparation des substrats. Avec le choix du test s'impose en réalité la nature des contraintes mises en jeu. On peut imposer à un joint de colle les sollicitations suivantes :

- Des contraintes normales au plan du joint (traction, compression).
- Des contraintes tangentielles au plan du joint (cisaillement).

- Des contraintes de pelage lorsque au moins l'un des matériaux est souple.
- Des contraintes de clivage qui résultent de l'application de la force à l'extrémité d'un assemblage de matériaux rigides [33](Figure I-30).

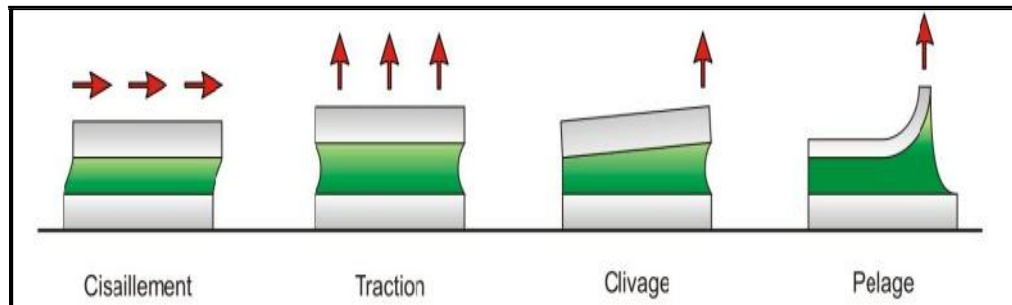


Figure I-30: Différents modes de sollicitations mécaniques.

I-7. Les avantages et les inconvénients du collage

I-7.1. Avantages du collage

Le collage est une technique d'assemblage performante et les avantages sont nombreux. Cette technique est utilisée par de nombreuses industries : automobile, bâtiment, électroménager, électronique, loisirs, aéronautique, mécanique ...

- Le collage est une technique universelle puisqu'à priori il est possible de tout coller, si nous conditionnons convenablement les surfaces à assembler.
- Le collage altère peu les substrats puisque seul le traitement de surface des substrats intervient (dans le sens où le décapage dégrade la surface mais moins que le perçage).
- Le collage permet d'obtenir une meilleure répartition des contraintes, due au transfert de charge continu, ceci implique une meilleure tenue aux chocs, aux vibrations.
- Le collage permet d'assembler des matériaux composites, sans en rompre les fibres.
- Le collage diminue le risque de corrosion galvanique entre deux métaux différents.
- Le collage permet de réduire le poids de la structure assemblée (comparée à une structure boulonnée).
- Le collage permet d'obtenir des structures lisses (avantage aérodynamique).

- Le collage permet d'assembler entre eux des matériaux différents sans précaution particulière (corrosion).

I-7.2. Inconvénients du collage

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

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

Références

- [1]. Thèse Frédéric Simon, Endommagement et rupture des joints collés sollicités en traction ou cisaillement application au collage du bois (2001).
- [2]. Céline GROS, Durabilité de joints adhésifs silicone sous conditions environnementales sévères : application au packaging en électronique de puissance(2006).
- [3]. Thèse Eric Paroissien, Contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés)- application aux jonctions aéronautiques (2006).
- [4]. Shih-Chuan Her. L'analyse des contraintes de joint adhésif à simple recouvrement, Structures Composite 47 (1999) 673–678.
- [5]. Thèse Romain LEGER. Contribution à l'étude de la durabilité des structures collées soumises à des efforts mécaniques après vieillissement humide (2010).
- [6]. Petit, J., Baziard, Y., Nassiet, V., & Hassone-Rhabbour, B. (2006). Durabilité des assemblages collés : Approche prédictive. *Techniques de l'ingénieur*, BM 7 667.
- [7]. Volkersen, O. (1938). Die nietkraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15, 41-47.
- [8]. Goland, M., & Reissner, E. (1944). The stresses in cemented joints. *J. appl. mech.*, A17-A26.
- [9]. Ferlund, G., & Spelt, J. (1994). Mixed-Mode Energy Release Rates for Adhesively Bonded 218 Beam Specimens. *J. Comp. Tech. Res.*, 16 (3), 234-243.
- [10]. Outwater, J., & Gerry, D. (1969). On the Fracture Energy, Rehealing Velocity and Refracture Energy of Cast Epoxy Resin. *J. Adhesion*, 1 (4), 290-298.
- [11]. Kies, J., & Clark, B. (1969). Dans P. Pratt, *Fracture* (p. 483). London: Chapman and Hall.
- [12]. Cho, K., & Gent, A. (1985). An improved torsional method for determining the fracture toughness of stiff materials and of adhesive joints. *Int. J. Frac.*, 28 (4), 239_244.
- [13]. Zanni-Deffarges, M., Shanahan, M. (1993). Evaluation of adhesive shear modulus in a torsional joint: influence of ageing. *Int. J. Adhesion Adhesives*, 13 (1), 41-45.
- [14]. Kendall, K. (1971). The adhesion and surface energy of elastic solids. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 4 (8), 1186.
- [15]. Kendall, K. (1973). The Shapes of Peeling Solid Films . *J. Adhesion*, 5 (2), 105-117.
- [16] Chai, H. (1988). Shear fracture. *Int. J. Frac.*, 37 (2), 137-159.
- [17]. Cognard, J. (2000). Science et Technologies du Collage. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [18]. Costa Mattos, H., Sampaio, E., & Monteiro, E. (2010). Static failure analysis of axially loaded aluminium–epoxy butt joints. *Int. J. Adhesion Adhesives*, 30 (8), 774-780.
- [19]. Adams, A., Kinloch, A., Digby, R., & Shaw, S. (1999). Dans *Durability of Organosilane Pretreated Adhesive Joints* (pp. 205-210). Cambridge
- [20]. astm-d1002
- [21]. Goland, M., & Reissner, E. (1944). The stresses in cemented joints. *J. appl. mech.*, A17-A26.
- [22]. Thèse Raul H. Andruet, Éléments finis géométriquement non linéaires de 2-D et 3-D pour l'analyse des joints adhésif collés(1998).
- [23]. Lucas F.M. da Silva, Paulo J.C. das Neves, R.D. Adams, J.K. Spelt, Modèles analytiques des joints adhésif collés Part I: Recherche bibliographique, Journal international d'adhérence et d'adhésifs 29 (2009) 319–330.
- [24]. Quantian Luo, Liyong Tong, L'analyse non linéaire Plein-couplée de joint d'adhésif à

simple recouvrement. *Journal international des solides et des structures* 44 (2007) 2349-2370.

[25]. Hyonny Kim et Keith T. Kedward. Analyse des contraintes des joints adhésifs collés sous le chargement de cisaillement plane (2001).

[11]. J.P.M. Gonçalves, M.F.S.F. de Moura, P.M.S.T. de Castro, Un modèle d'élément fini tridimensionnel pour l'analyse des contraintes des joints adhésifs, *Journal international d'adhérence et d'adhésifs* 22 (2002) 357–365.

[26]. Jun Cui. Modélisation d'élément fini de l'échec d'adhésif avec le rendement d'adhérent (2001).

[27]. P.C. Pandey, H. Shankaragouda, Arbind Kr. Singh, L'analyse non linéaire de joint à simple recouvrement considérer le visco-plasticity en adhésifs, *Ordinateurs et Structures* 70 (1999) 387-413.

[28]. E. Oterkus, A. Barut, E. Madenci, S.S. Smeltzer, D.R. Ambur, le joint adhésif à simple recouvrement des stratifiés composite avec les bords coniques, *Journal international des solides et des structures* 43 (2006) 1459-1489.

[29]. L.D.R. Grant, R.D.Adams, Lucas F.M. da Silva, L'analyse expérimentale et numérique de joint adhésif à simple recouvrement pour l'industrie automotrice, *Journal international d'adhérence et d'adhésifs* 29 (2009) 405–413.

[30]. Jae-Hyun Park, Jin-Ho Choi, Jin-Hwe Kweon, Évaluant les forces du joint l'aluminium- à-aluminium épais, avec différentes longueurs et épaisseurs adhésives, *Les structures composites* 92 (2010) 2226-2235.

[31]. D. Fersini, A. Pirondi, L'analyse et la modélisation de la défaillance de fatigue de frottement ont soudé d'un joint adhésif à simple recouvrement d'alliage d'aluminium, *Mécanique de rupture de technologie* 75(2008) 790-803.

[32]. Z. Chen a, R.D. Adams, Lucas F.M. da Silva, La prévision du déclenchement et de la propagation crack de joint à simple recouvrement avec un critère d'échec d'énergie, *Mécanique de rupture de technologie* 78 (2011) 990–1007.

[33]. B. Kilic, E. Madenci, D.R. Ambur, L'influence de l'adhésif se répandent dans le joint à simple recouvrement, *Energie Mécanique de rupture de technologie* 73 (2006) 1472–1490.

Chapitre II

Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

II.1 Introduction

Dans le domaine de technologie de pointe, les matériaux composites ont de nombreuses applications en raison d'un rapport excellent résistance/poids, ces matériaux sont classiquement mis en oeuvre dans l'industrie aéronautique afin de réaliser des pièces structurales. Les structures en composite sont de plus en plus utilisées comme moyen d'assemblage et qui sont justifiées par de nombreux avantages : répondent aux exigences de chargement par leur rigidité qui est spécifiquement élevée. Cependant, le transfert de charge aux niveaux de l'interface pose un problème, en effet, la concentration des contraintes à l'interface entre différentes couches orientées dans le composite stratifié peut être une source d'initiation de fissure et par la suite une propagation qui résulte par le cisaillement et les efforts normaux et transversaux.

il est à noter que la quantité du transfert de n'importe quel type de charge dans les assemblages collés est assurée en premier lieu par la rigidité de ces plaques ainsi que les conditions géométriques, notamment la qualité des interfaces. Pour cette raison, les stratifiés prennent des mesures importantes dans les conditions de service.

La séparation mécanique de tels systèmes collés se produit généralement en raison de la séparation du joint à l'interface, c'est pour cela, la modélisation d'une interface collée en comportement en rupture est un axe de recherche important.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser par la méthode des éléments finis tridimensionnels la distribution des contraintes de Von Mises, de pelage et de cisaillement dans le joint d'adhésif utilisé pour le collage de deux plaques en composite en fonction de plusieurs paramètres à savoir la rigidité des matériaux et l'effet de la séquence d'empilement afin de voir quel type de stratifié qui transmet moins de charge à la couche d'adhésif. On a considéré six différentes séquences d'empilements avec en commun les premières couches qui sont en contact avec l'adhésif sont orientées à 0°. On a ensuite essayé de voir l'effet de l'utilisation du composite hybride sur la réduction des contraintes dans la couche d'adhésif.

II.2. Modèle géométrique et propriétés mécaniques :

Dans ce chapitre, une analyse par la méthode des éléments finis tridimensionnels est présentée pour déterminer la distribution des contraintes dans le joint adhésif pour un assemblage type composite / composite. On a choisi quatre types de matériaux composites :

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

le carbone-époxyde, l'Aramide-époxyde, bore-époxyde et verre-époxyde [1][2]. Ces composites sont collés à l'aide de l'adhésif ADEKIT A140 dont sa courbe de traction est donnée dans la figure II-1.

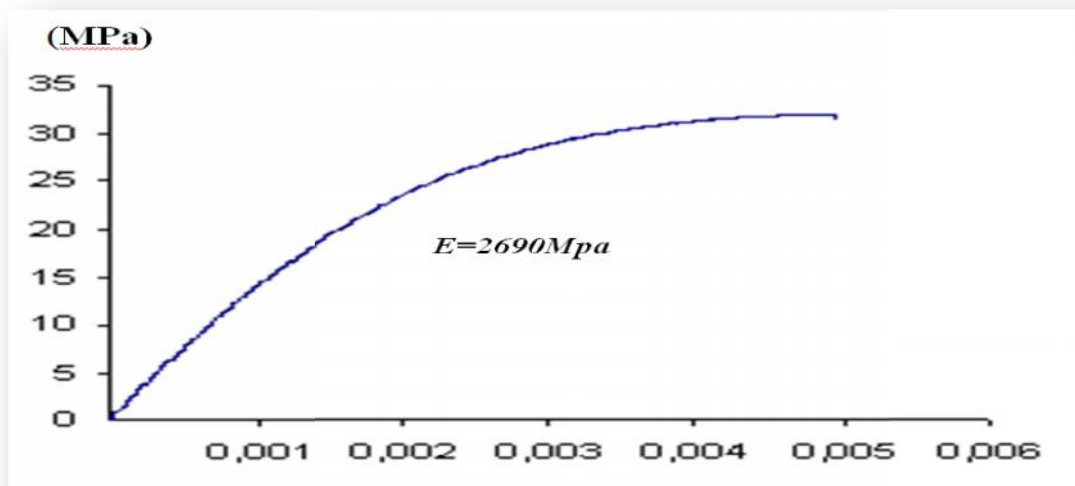


Figure II-1 : Courbe de traction pour l'adhésif ADEKIT A140 (contraintes déformations [3]).

Le modèle géométrique de l'assemblage (simple recouvrement) est présenté dans la figure II- 2 ou les dimensions des différents substrats sont montrés.

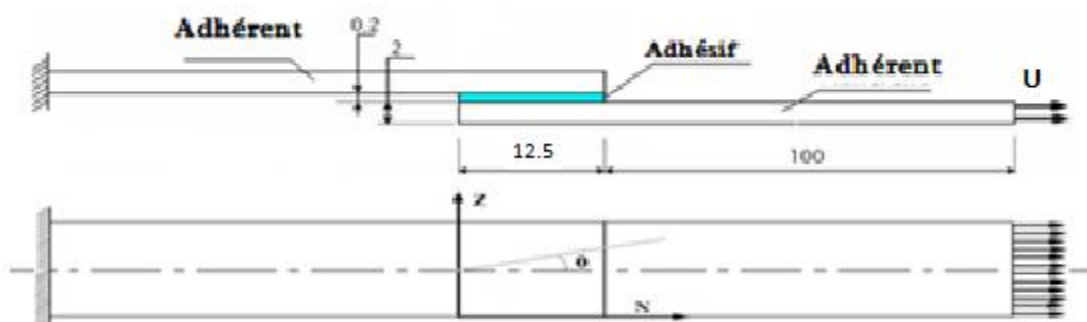


Figure II- 2 : Modèle géométrique.

L'analyse de la distribution des contraintes dans le joint d'adhésif est analysée par le code de calcul ABAQUS [4]. Le déplacement imposée est d'une valeur de 0.2mm, les propriétés mécaniques des différents composites utilisés dans notre étude sont illustrées dans le tableau II-1.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

Deux méthodes de configuration ont été pris en considération pour modéliser la plaque en composite (figure II.3). Le composite a été considéré comme étant un seul bloc avec des propriétés mécaniques globales, puis ce composite est considéré comme étant multicouche (figure II.4), ou on a introduit les propriétés mécaniques pour chaque couche qui diffère selon l'orientation des fibres.

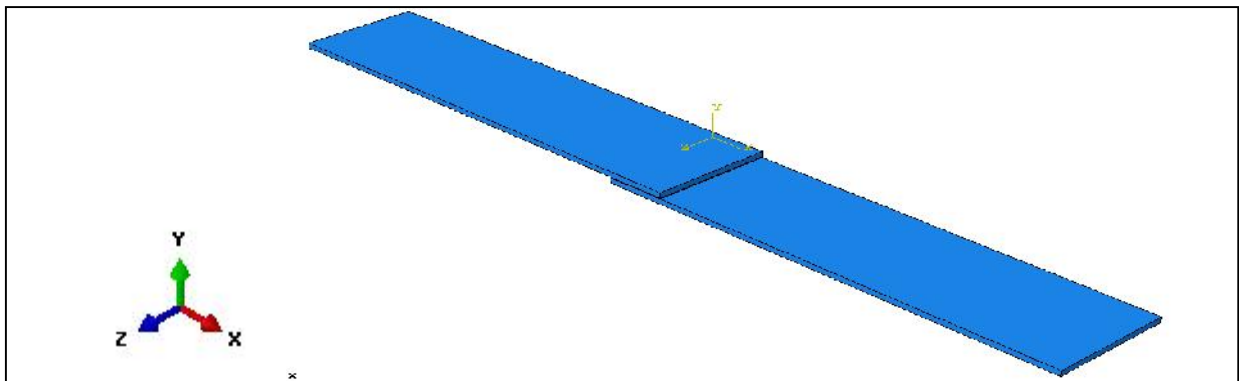


Figure II.3 : Présentation du modèle simple joint.

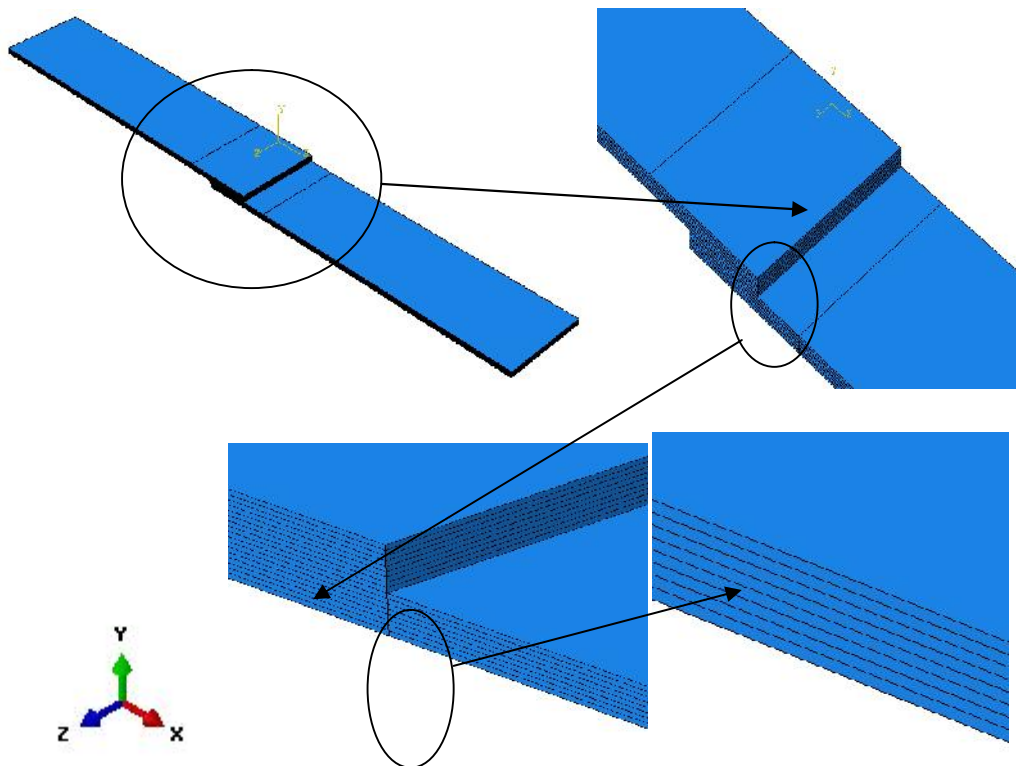


Figure II.4 : Présentation géométrique du composite sous forme un seul bloc et multicouches.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

Nature de fibre	E module de Young [MPa]	€ coefficient de poisson
Fibre de verre	72000	0.25
Fibre de carbone	230000	0.3
Fibre d'aramide	130000	0.4
Fibre de bore	400000	0.3
Matrice époxyde	4500	0.4

Tableau II.1 Propriétés mécaniques des fibres et matrice.

- Six différentes séquences d'empilement ont été mis en évidence, on a fixé l'orientation des quatre couches qui sont à l'extérieur du composite et celles qui sont en contact avec l'adhésif comme 0° , et on fait varier l'orientation des autres angles [tableau II.2].

Stratifié	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Séquence d'empilement	$[0_2]_8$	$[0_2/15_2/-15_2/90_2]_s$	$[0_2/30_2/-30_2/90_2]_s$	$[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$	$[0_2/60_2/-60_2/90_2]_s$	$[0_2/75_2/-75_2/90_2]_s$

Tableau II.2 Différentes séquences d'empilement.

II.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites et de frontière jouent un rôle décisif résolvant la simulation. L'entrée de ces conditions est habituellement faite facilement par les préprocesseurs commerciaux et elle est souvent connectée avec des graphiques. Les utilisateurs peuvent spécifier ces conditions aux identités géométriques (points, lignes ou courbes, surfaces, et solides) ou aux éléments ou aux grilles. Encore, pour simuler exactement, ces conditions pour les systèmes de technologie réels exigent l'expérience, la connaissance et les jugements appropriés. Les conditions aux limites et de frontières sont différentes d'un problème à un autre.

notre modèle géométrique avec les conditions aux limites est inspiré de la thèse de Benchiha Aicha, puisque pour ces conditions aux limites, elle a trouvée les faibles valeurs des différentes contraintes (figure II.5).

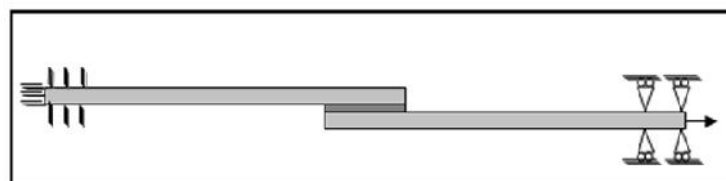


Figure II.5: Configuration du joint à simple recouvrement avec les conditions aux limites choisies

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

L'adhésif et les zones extrêmes de la longueur de recouvrement doivent comporter un maillage très fin par rapport aux autres zones qui doivent comporter un maillage grossier pour éviter d'avoir un nombre volumineux de degrés de liberté inutilement. La figure II.6 montre le maillage des différentes composantes de joint à simple recouvrement avec un raffinement de maillage de la zone de recouvrement.

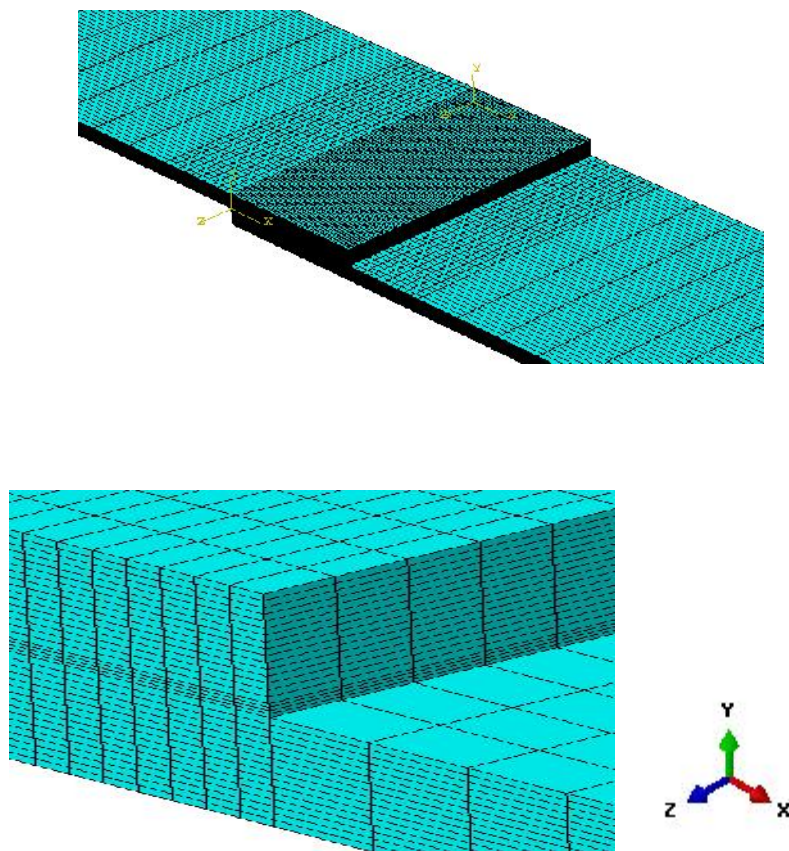


Figure II.6 : Maillage du joint adhésif collé à simple recouvrement utilisé dans le modèle 1.

Pour la détermination des contraintes dans le joint adhésif, on a choisis deux emplacements, le premier cas suivant la longueur de recouvrement afin de voir la distribution des contraintes suivants le sens de chargement et le deuxième endroit, est suivant l'épaisseur pour voir le transfert de charge d'un substrat vers l'autre [figure II.7].

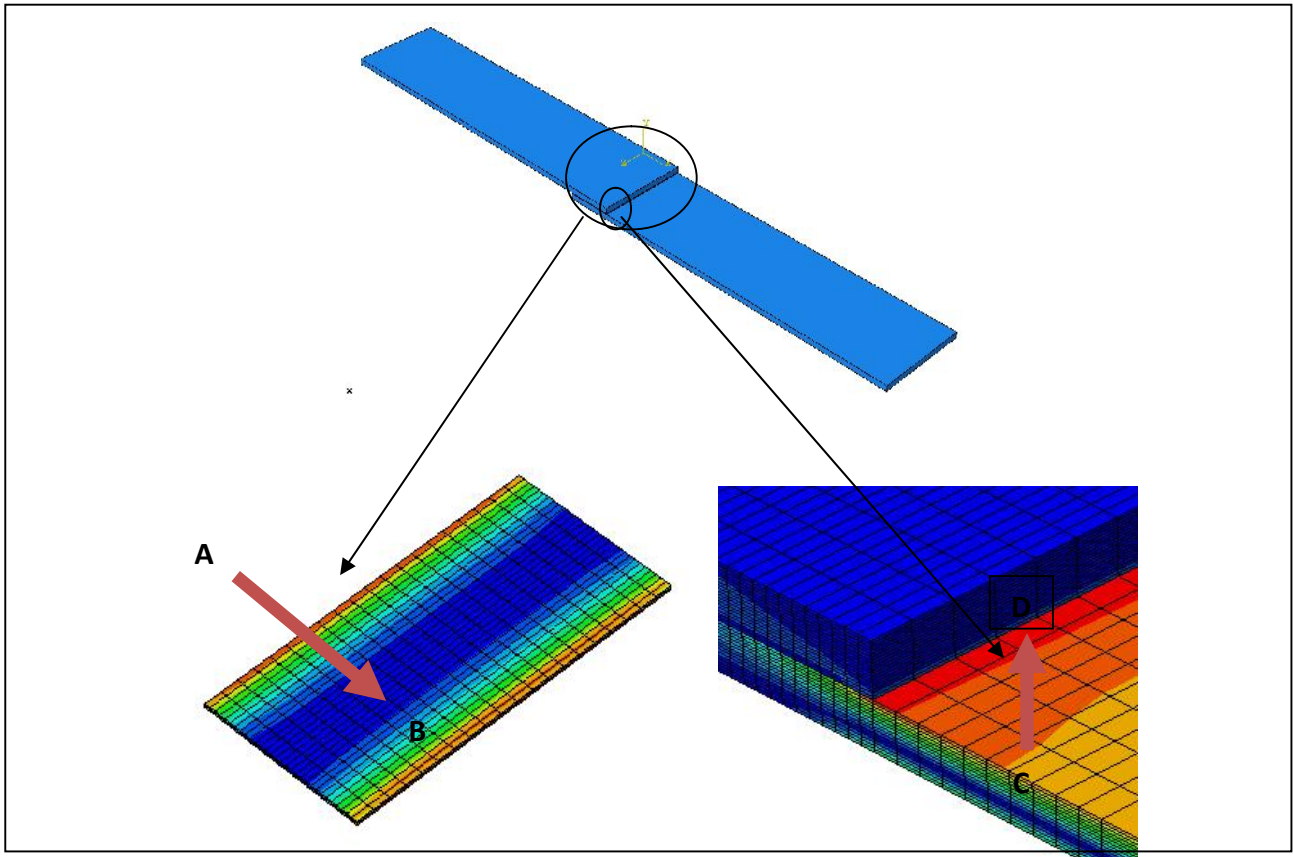


Figure II.7 Présentation des modèles avec les path utilisés. [(A-B: suivant la longueur de l'adhésif ; C-D: suivant l'épaisseur de la structure)].

II.4. Analyse et résultats

II.4.1. Modélisation du joint adhésif collé à simple recouvrement

II.4.1.1. Modélisation du composite sous forme d'un seul bloc

Dans cette partie d'étude, le composite a été considéré comme étant un seul bloc avec des propriétés mécaniques globales (Figure II.8) déterminés par le code de calcul Cadec conçu spécialement pour déterminer les propriétés mécaniques des stratifiés basé sur la loi d'homogénéisation.

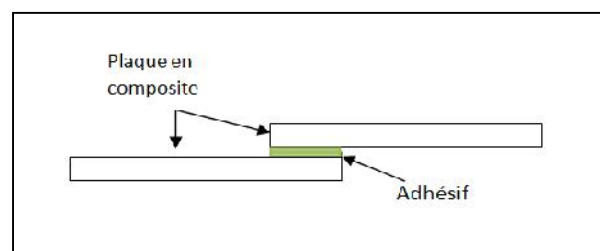


Figure II.8: Représentation du modèle d'assemblage composite/composite (composite sous forme bloc).

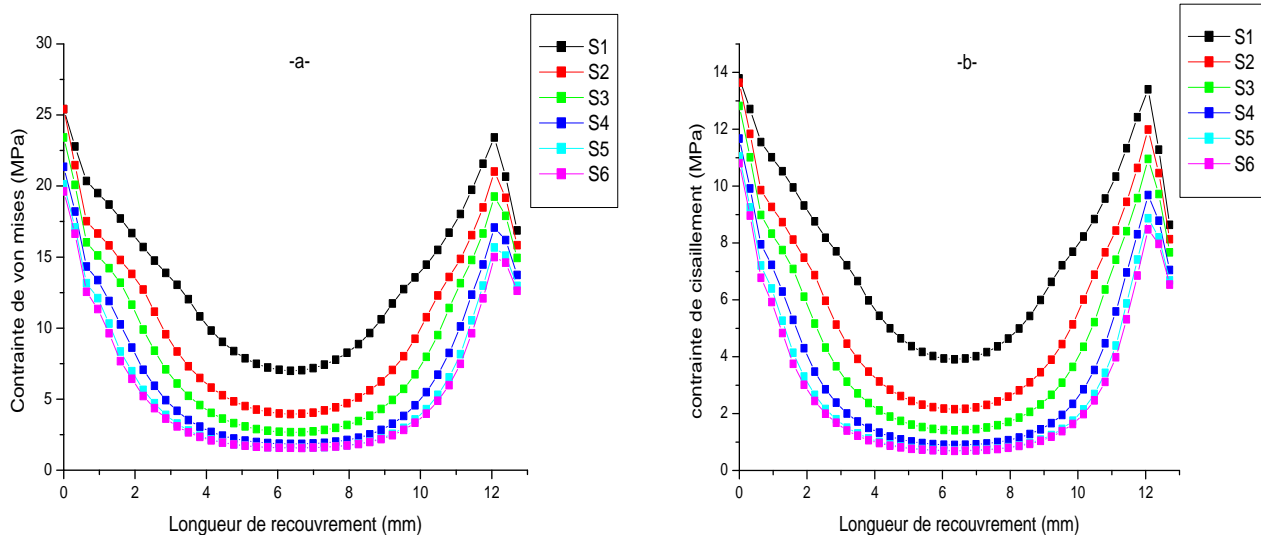
Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

On a introduit juste les constantes d'ingénieurs pour ce composite en le considérant comme matériaux orthotrope déterminées par le code de calcul Cadec. Pour chaque séquence d'empilement, on a déterminé les constantes d'ingénieurs pour le composite qui seront introduites dans le code de calcul Abaqus.

La figure II.9 représente la distribution des contraintes dans la couche d'adhésif suivant la longueur de recouvrement pour différentes séquences d'empilement d'un composite en fibre d'aramide. On remarque que cette distribution est pratiquement la même quelque soit l'orientation de la fibre, on a toujours un maximum de contrainte au niveau du bord de l'adhésif et un cœur pratiquement inactif.

La séquence d'empilement $[0]_8$ est celle qui présente des propriétés mécaniques les plus élevées par rapport aux autres séquences d'empilement puisque l'orientation 0° des fibres est parallèle à l'axe de chargement, donc une résistance meilleure du composite et par conséquent un transfert de contrainte important vers la couche d'adhésif et donc des valeurs importantes des contraintes.

Si l'orientation des fibres tendent vers 90° cas des séquences d'empilement $[0_2/75_2/-75_2/90_2]_s$; $[0_2/60_2/-60_2/90_2]_s$; $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$; $[0_2/30_2/-30_2/90_2]_s$, les propriétés mécaniques du composite deviennent faibles donc une partie de contraintes sera transmise vers le composite et une partie vers l'adhésif et donc des valeurs faibles de contraintes dans la couche d'adhésif.



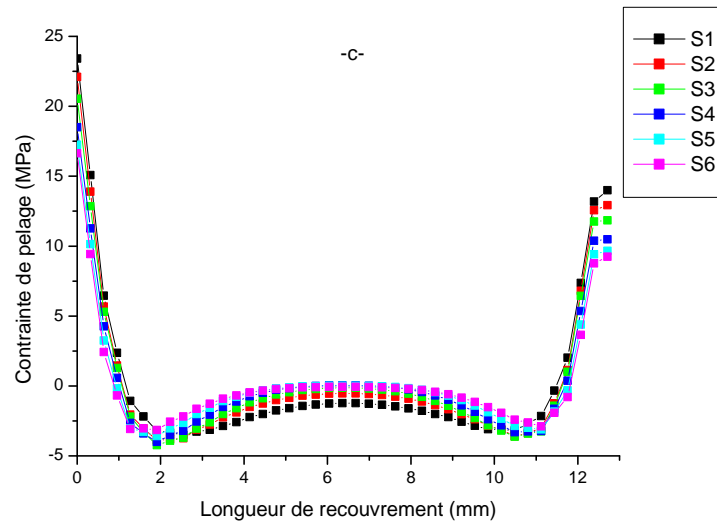
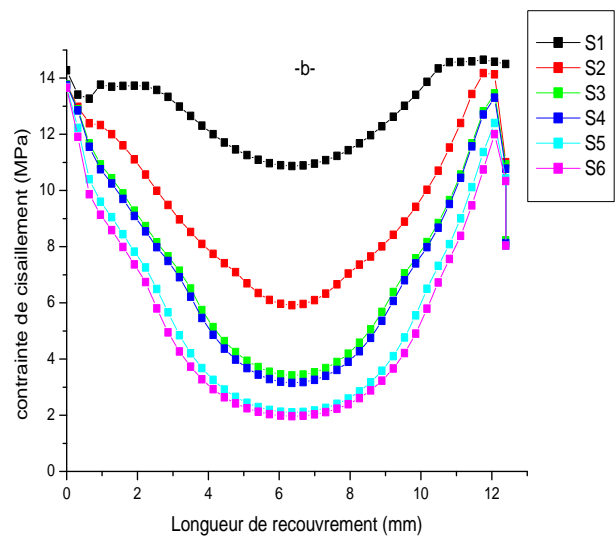
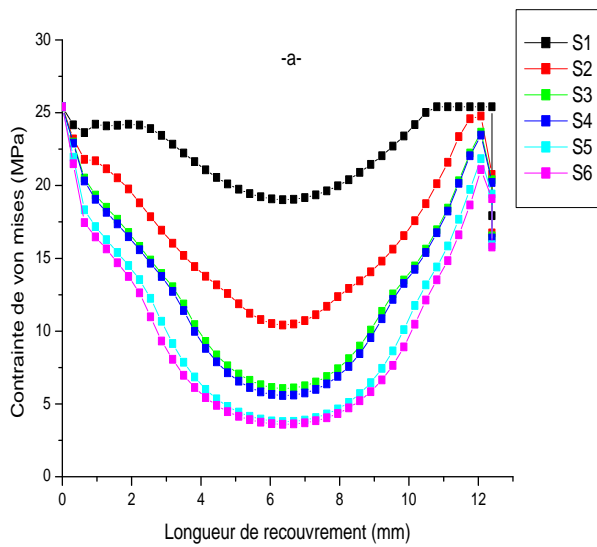


Figure II.9: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour un composite aramide (kevlar)/époxyde.



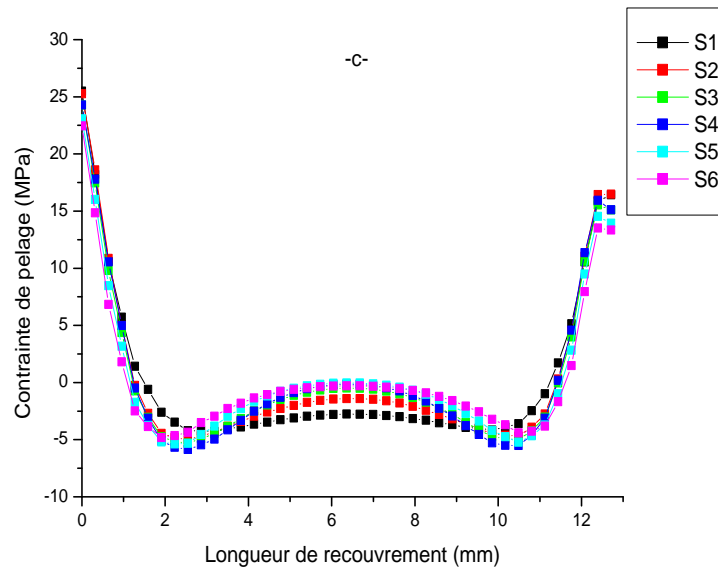


Figure II.10 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour un assemblage carbone/époxyde.

Remarque : S1, S2, S3, S4, S5, S6 ; représentent les séquences d'empilement [voir tableau II.2].

La même remarque est à noter pour les autres types du composite et ce quelque soit la nature de la fibre figure II.10, sauf que les valeurs de ces contraintes changent. On remarque que, si les propriétés mécaniques du composite augmentent [cas de carbone], l'adhésif absorbe plus de contraintes et donc presque toute la surface de collage sera sollicitée et par conséquent le cœur de l'adhésif devient actif.

De même, si le composite présente des propriétés mécaniques élevées avec une séquence d'empilement $[0_8]_s$, ce composite devient trop résistant à la charge appliquée et une grande partie des contraintes sera transmise vers l'adhésif, la déformation du composite devient quasiment faible et donc probabilité de séparation des plaques et par conséquent, des contraintes de pelage élevées au niveau du bord de l'adhésif.

II.4.1.2. Modélisation du composite en multi couches

Dans la deuxième partie de notre étude, on a modélisé les plaques composites comme étant des couches successives (figure II.11) avec des orientations différentes. Cette modélisation nous permettra d'introduire les propriétés mécaniques réelles pour chaque couche avec des orientations

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

des fibres différentes, ce qui est plus réel que le cas où le composite est considéré comme un seul bloc.

Dans cette partie, le calcul des constantes d'ingénieur ne pose pas de problème, on a juste utilisé les équations d'homogénéisation pour déterminer les caractéristiques mécaniques. Par contre, pour les autres séquences d'empilement, on était obligé de passer par le code Cadec conçu spécialement pour les composites pour déterminer les caractéristiques de chaque couche suivant l'orientation de ces fibres.

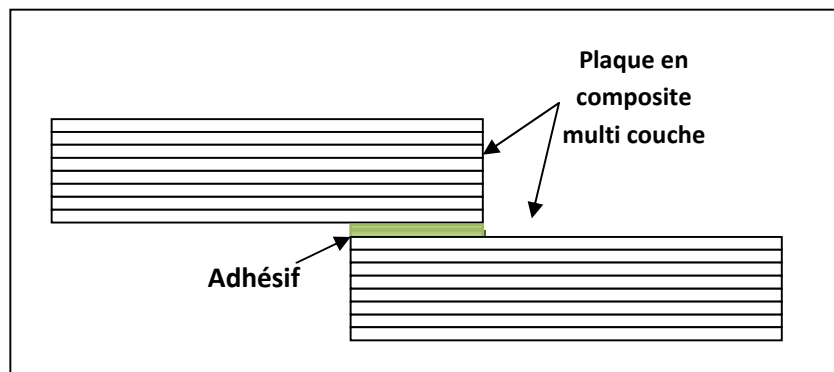


Figure II.11 : Présentation géométrique des composites (sous forme multi couches).

De même, on a essayé de déterminer la distribution des contraintes dans la couche d'adhésif pour les différentes séquences d'empilement et la nature de la fibre dans le composite.

Les figures II.12 représente la distribution des contraintes dans la couche d'adhésif où le composite a été modélisé en plusieurs couches [cas de fibre d'aramide/matrice époxyde], on remarque clairement que la distribution des contraintes est identique à celle où le composite est modélisé en un seul bloc.

Les valeurs des contraintes sont un peu faibles dans le cas où le composite est sous forme multicouches.

De même, la séquence d'empilement joue un rôle dans la valeur des contraintes, les plus faibles valeurs sont pour le cas où le composite présente des couches avec orientation $[0_2/75_2/-75_2/90_2]_s$; $[0_2/60_2/-60_2/90_2]_s$; $[0_2/45_2/-45_2/90_2]_s$; $[0_2/30_2/-30_2/90_2]_s$ et les plus grandes valeurs sont pour le cas $[0_8]_s$.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

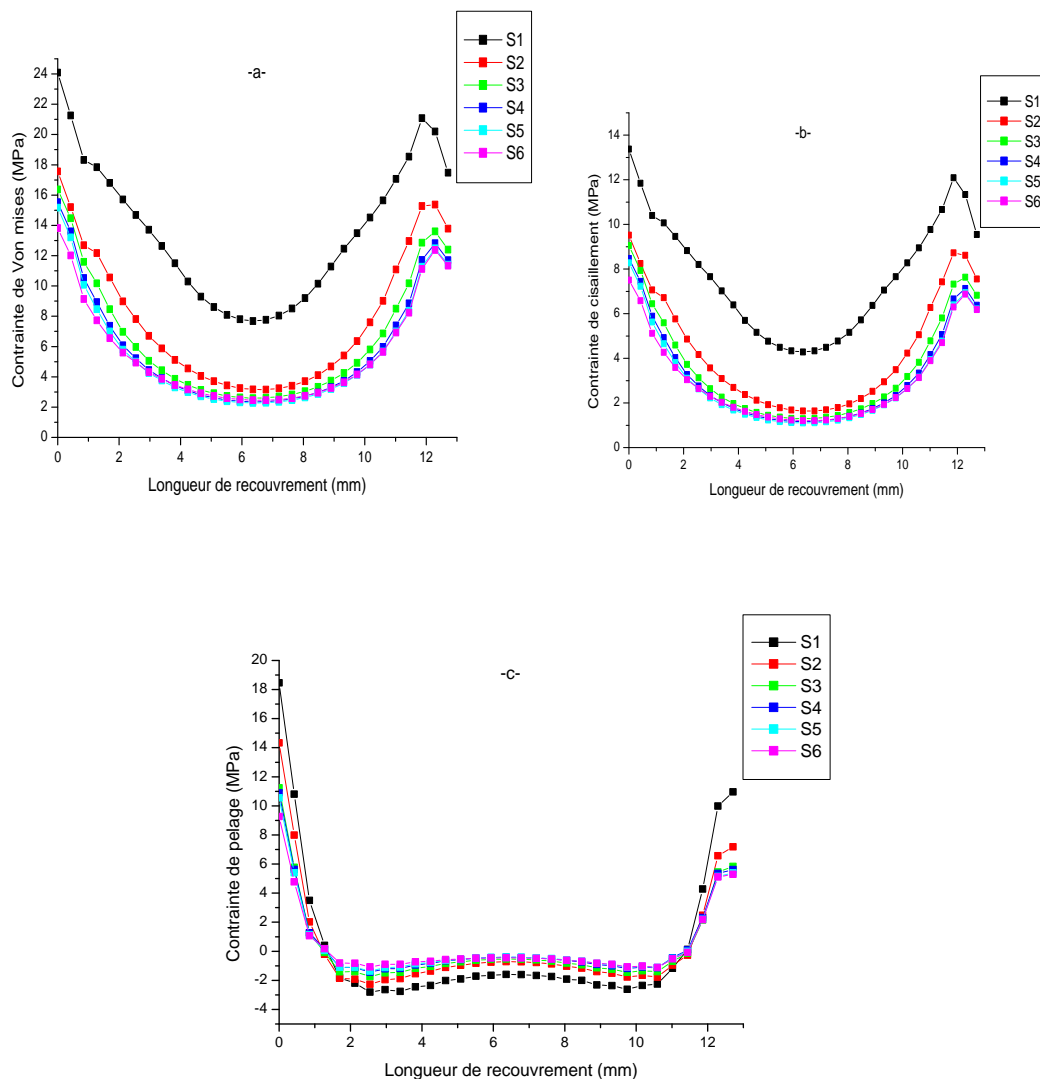


Figure II.12: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour aramide (kevlar)/époxyde.

On remarque clairement que plus la rigidité du composite augmente, plus l'adhésif sera sollicité et donc des valeurs élevées de contraintes. Pour ce cas de modélisation du composite, le transfert de charge vers l'adhésif est totale puisque la rigidité de chaque couche du composite intervient dans ce transfert.

De même, l'effet de la séquence d'empilement ne sera pas affecté par le type de modélisation du composite et donc plus les fibres sont orientés vers 0° plus la rigidité du composite augmente et donc des contraintes élevées dans l'adhésif.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

Pour bien comparer les différentes modélisations du composite en bloc et en multicouches, on a présenté, dans la figure II.14, le cas du composite en fibre de carbone avec la séquence d'empilement $[0_8]$:

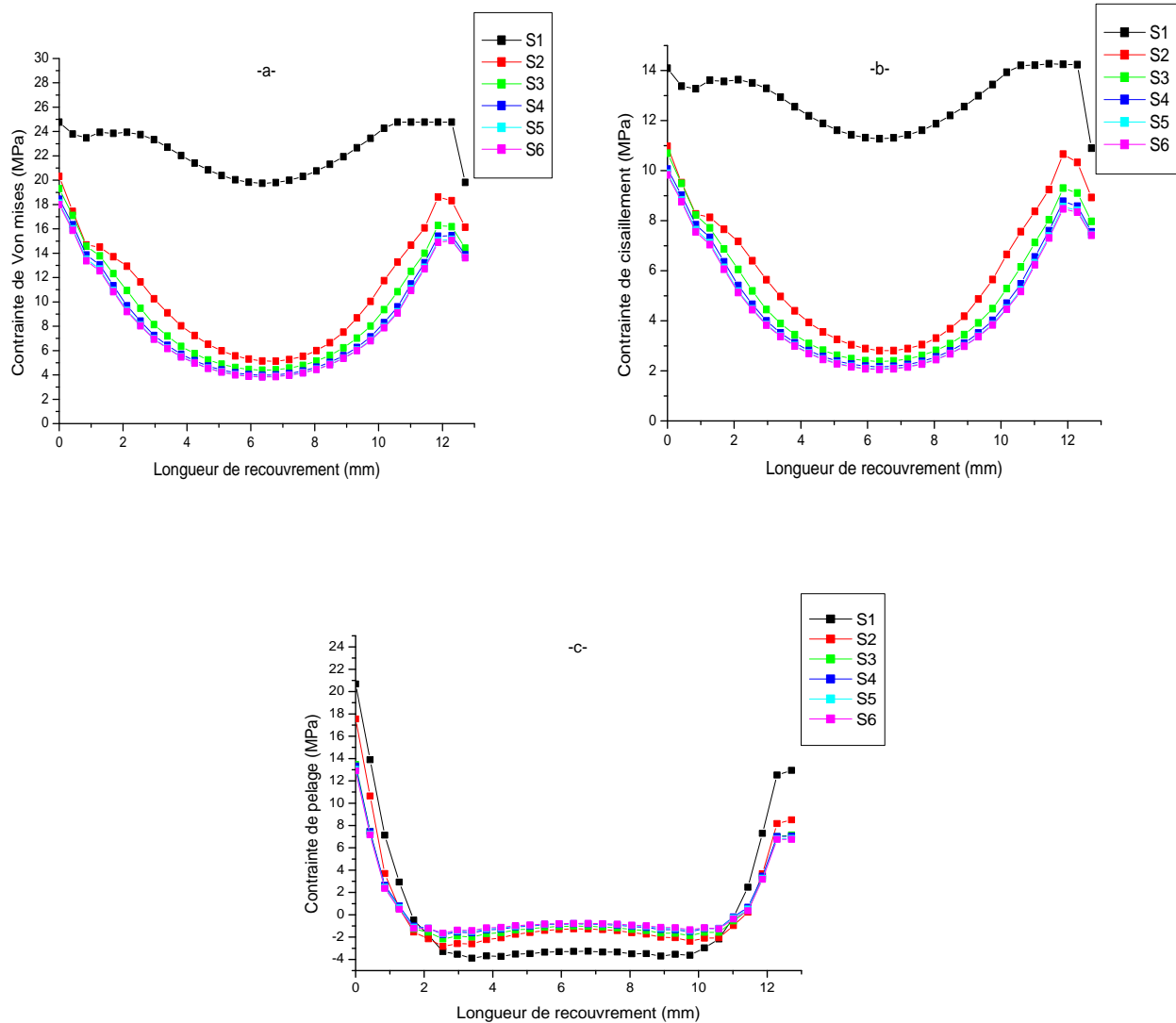


Figure II.13: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour carbone/époxyde.

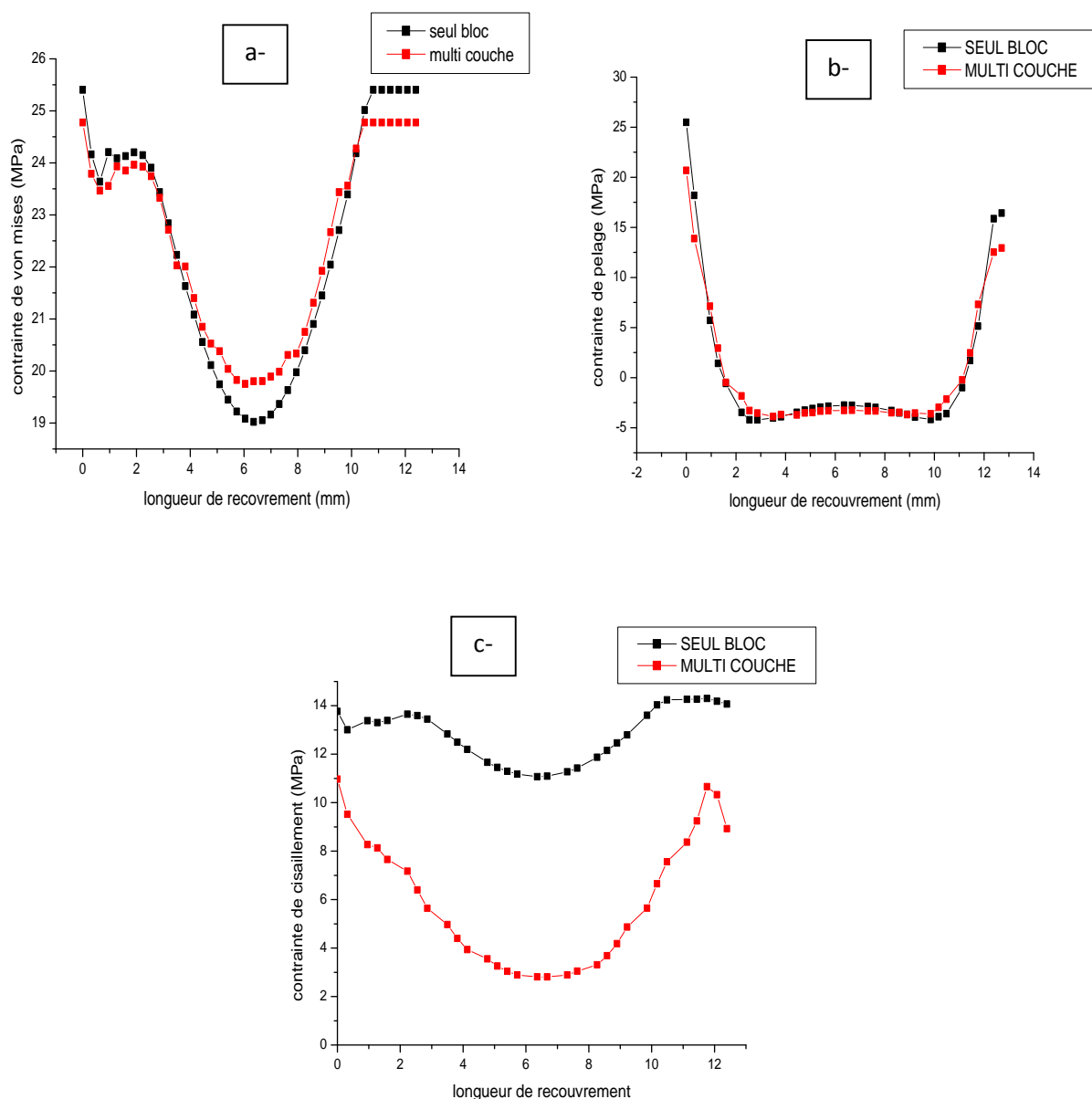


Figure II.14: Distribution des contraintes a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans la couche d'adhésif pour les différents modes de simulation du matériau composite pour la séquence d'empilement $[0_8C]_s$.

La figure II.14 représente la distribution des contraintes suivant la longueur de recouvrement, on remarque que les valeurs des différentes contraintes varient selon le type de modélisation du composite. Pour la contrainte de Von Mises, les plus grandes valeurs sont notées pour le cas où le composite est considéré comme étant un seul bloc, au niveau du bord, les valeurs des contraintes dans l'adhésif considéré comme un seul bloc sont nettement supérieures à celle où le composite

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

étant multicouches. Par contre, le cœur de l'adhésif sera très sollicité dans le cas où l'adhésif se trouve entre deux composites multicouches. Pour les deux cas de modélisations du composite, les bords de l'adhésif présentent des valeurs élevées de contraintes que son cœur.

La même remarque est à noter pour les contraintes de pelage, sauf qu'il n'y a pas de différence pour les contraintes au niveau du cœur de l'adhésif. Par contre, pour les contraintes de cisaillement, dans le cas où le composite est considéré en un seul bloc, presque toute la surface de l'adhésif est sollicitée, contrairement au cas où le composite est multicouche, les contraintes sont juste concentrées au niveau du bord alors que le cœur est presque inactif.

II.4.2. Effet d'utilisation d'un assemblage composite/composite [hybride]

Pour cette partie d'étude, on a essayé de modéliser un assemblage à simple joint type composite en tenant compte de la variation de la nature de la fibre dans les différentes couches, c'est-à-dire utilisé un composite hybride [voir figure II.15].

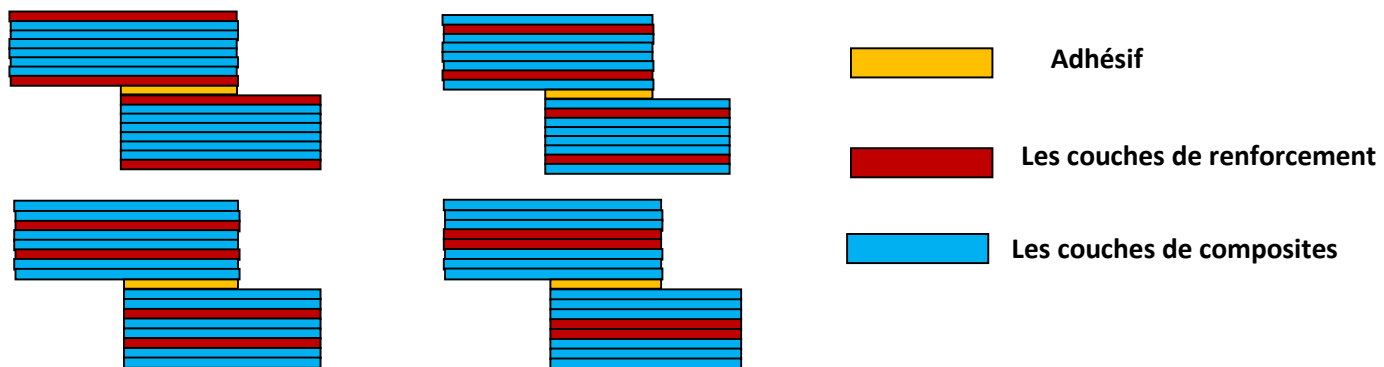


Figure II.15 : Différentes formes de simulation des matériaux hybrides.

II.4.2.1. Renforcement des couches d'aramide par des couches de carbone

Pour cette partie, on a pris un composite à 8 couches, 6 couches en aramide et 2 en carbone. La position des deux couches de renforcement en carbone change dans le composite hybride $[0_{2C}/X_{2C}/-X_{2C}/90_{2C}]_s$.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

A. Modélisation par bloc :

-Cashybride avec 4 couches en carbone et 12 couches en aramide $C_2A_2A_2A_2$

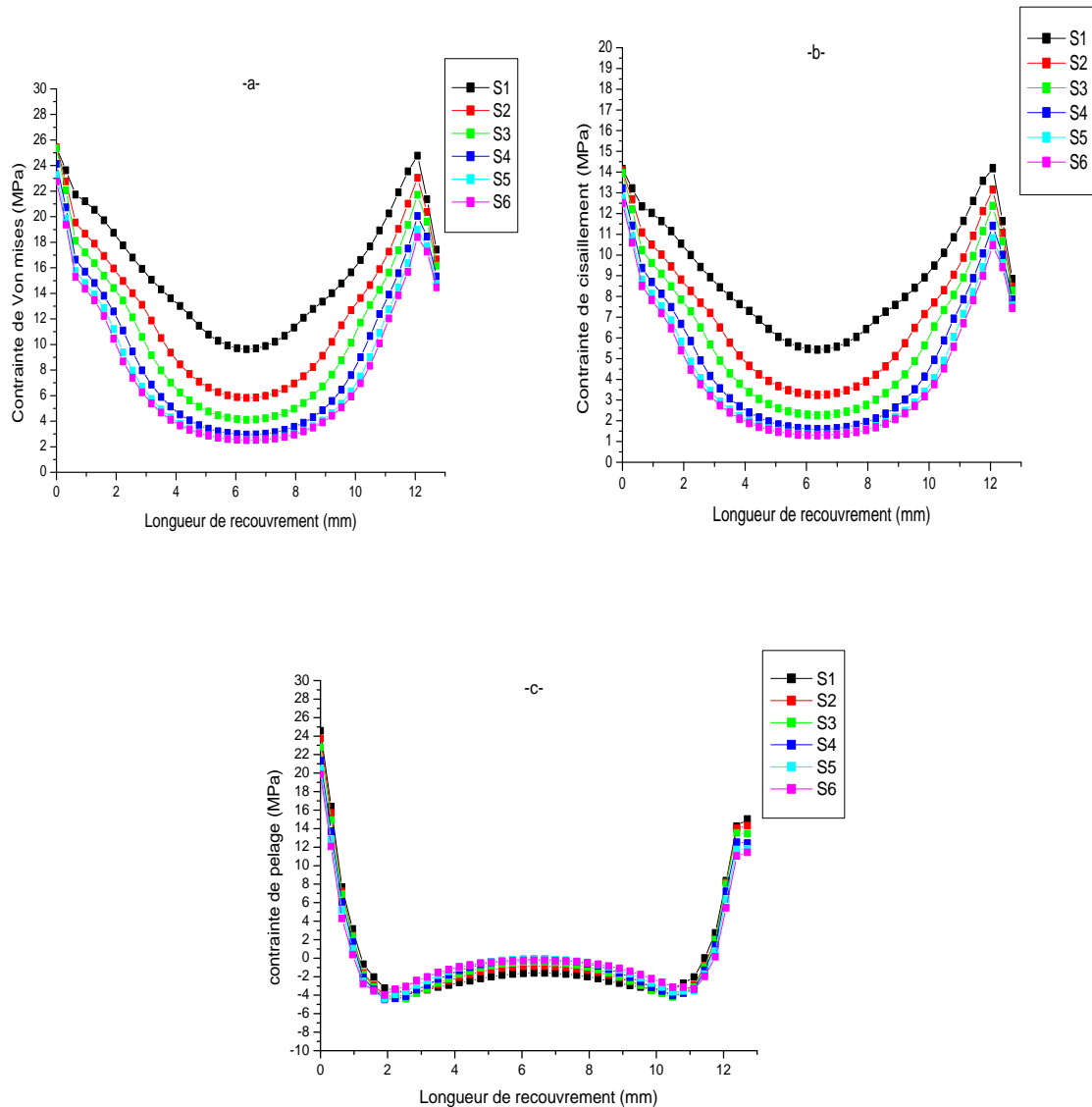


Figure II.16: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour cas assemblage hybride $[0_{2C}/X_{2A}/-X_{2A}/90_{2A}]_S$.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

- Cas hybride avec 4 couches en carbone et 12 couches en aramide $A_2C_2A_2A_2$

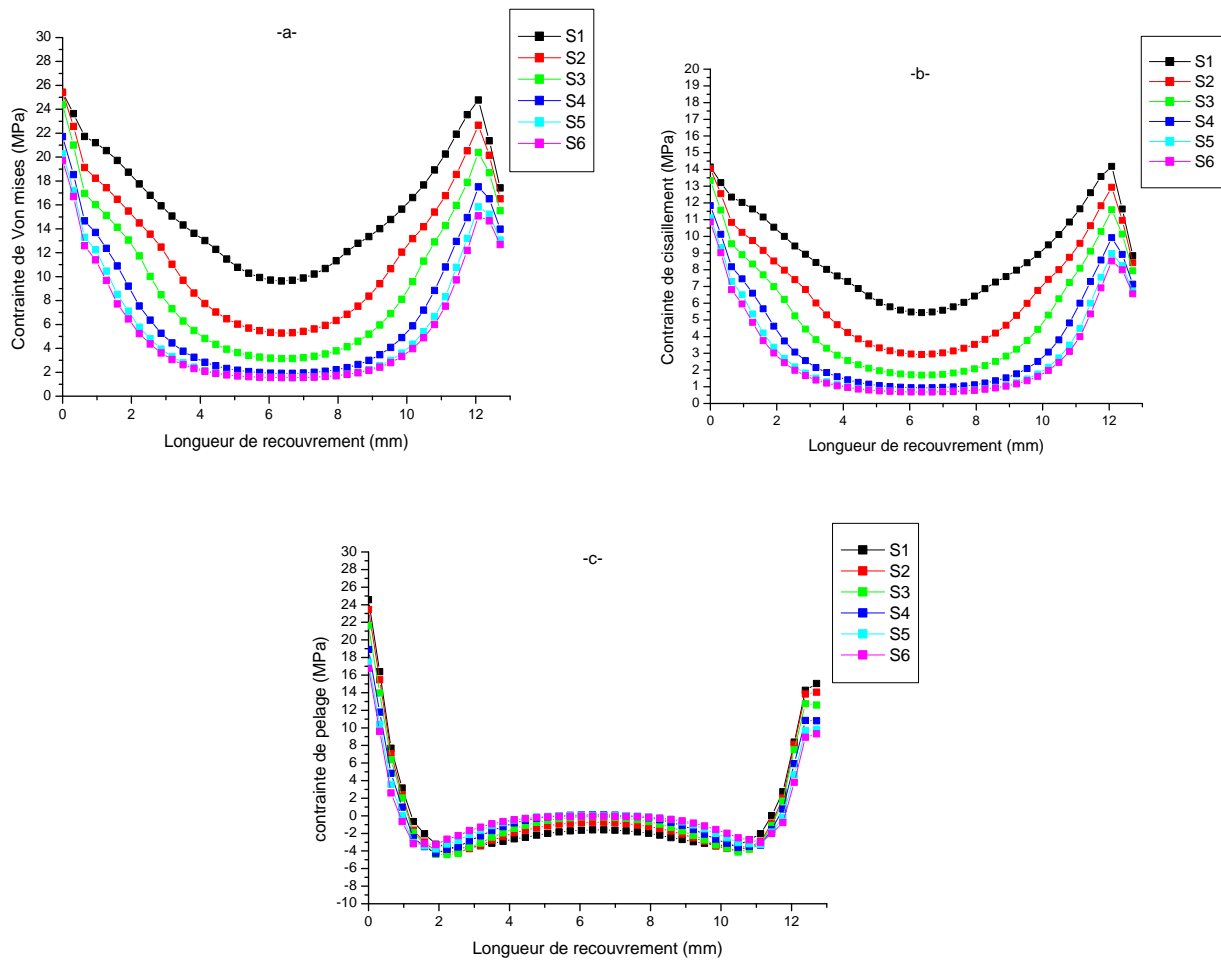


Figure II.17: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas assemblage hybride $[0_{2A}/X_{2C}/-X_{2A}/90_{2A}]_s$.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

-Cas hybride avec 4 couches encarbonate et 12 couches en aramide $A_2A_2C_2A_2$

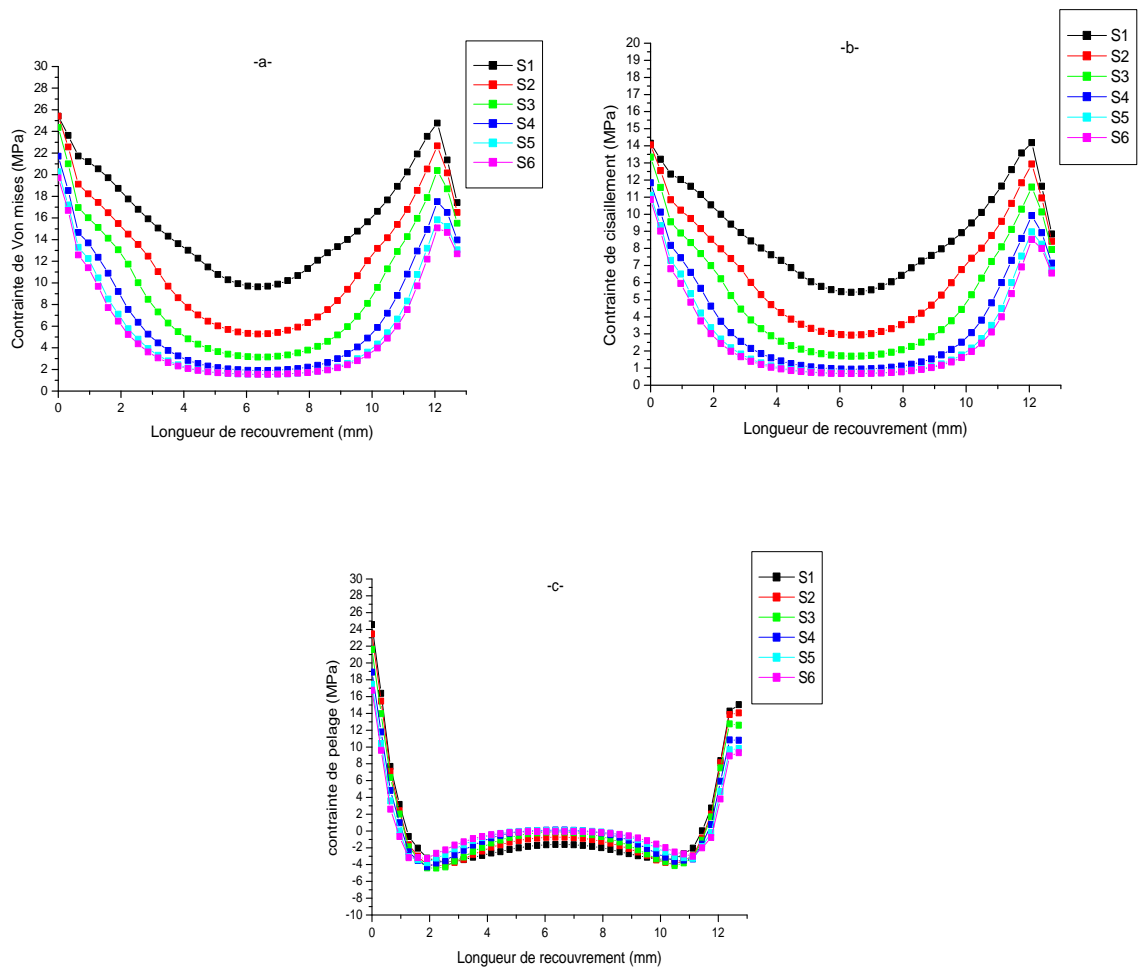


Figure II.18: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas assemblagehybride $[0_{2A}/X_{2A}/-X_{2C}/90_{2A}]_s$.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

-Cas hybride avec 4 couches encarbonate et 12 couches en aramide $A_2A_2A_2C_2$

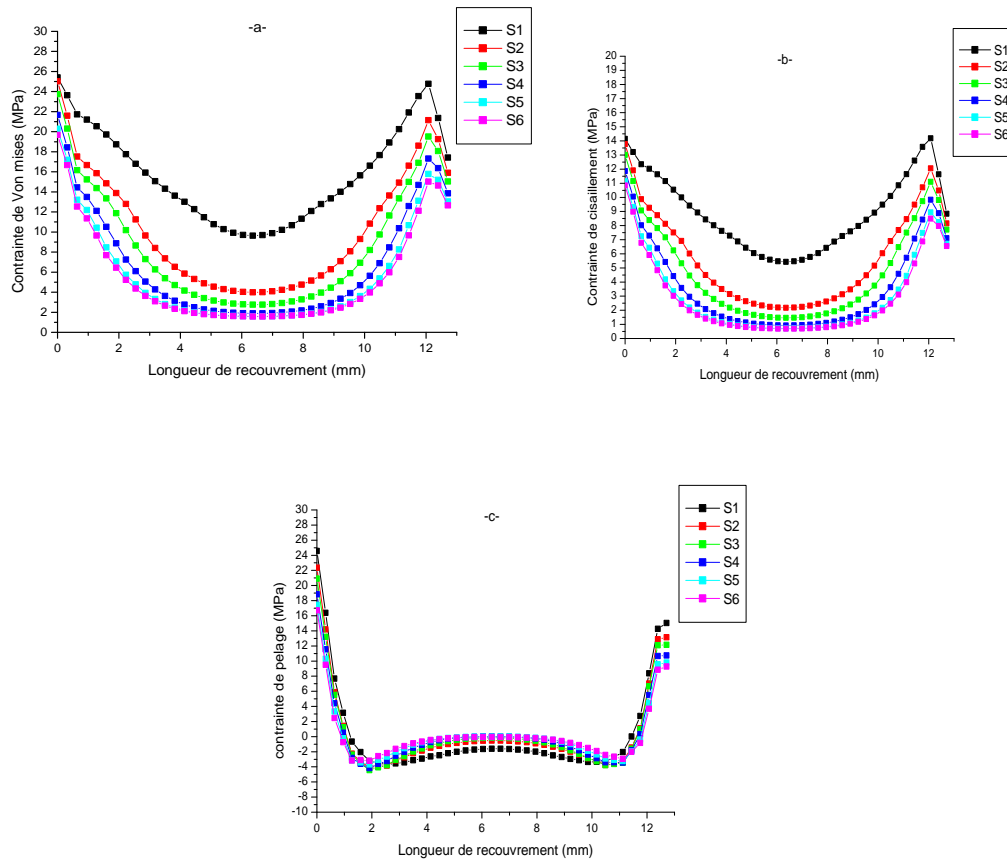


Figure II.19: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas assemblage assemblage hybride $[0_{2A}/X_{2A}/-X_{2A}/90_{2C}]_s$.

Les figures II.16, II.17, II.18 et II.19 représentent la variation des contraintes de Von Mises, pelage et cisaillement suivant la longueur de recouvrement pour un assemblage de deux plaques en composite hybride, on a varié la position des deux couches de carbone par rapport aux couches d'aramide.

Le composite hybride a été modélisé comme étant un seul bloc et donc l'introduction des couches de carbone dans le composite aramide n'apparaît pas puisque on introduit juste des propriétés élevées du composite.

On remarque que suivant le type de composite hybride, la séquence d'empilement $[0^\circ]_8$ présente les plus grandes valeurs des différentes contraintes dans cette séquence d'empilement, les deux

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

couches de carbone sont toujours associées à l'orientation $[0^\circ]$ et donc des propriétés mécaniques élevées pour le composite hybride et par conséquent, une grande partie des contraintes sera transmise à l'adhésif.

Les contraintes de pelage sont extrêmement élevées vu que les propriétés du composite sont élevées.

Les valeurs les plus élevées sont pour le cas où les deux couches de carbone se trouvent à l'extérieur du composite.

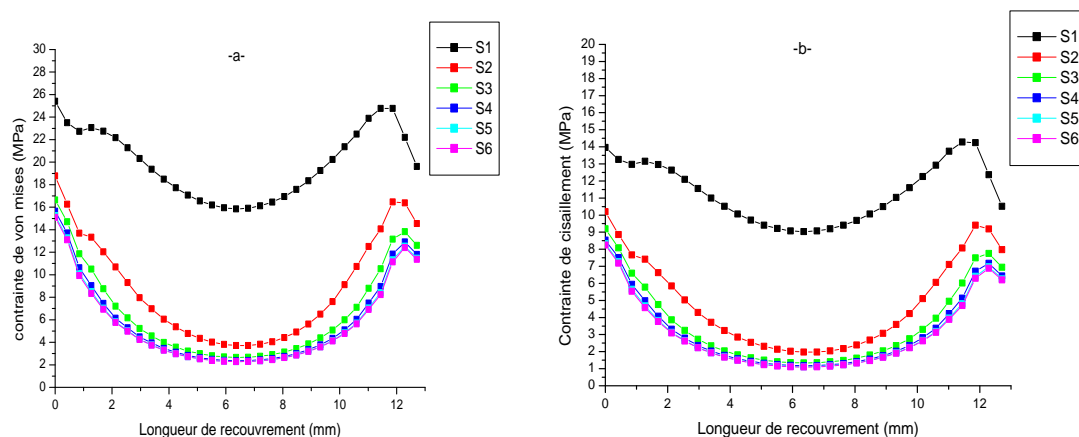
La position des deux couches de carbone dans le composite n'affecte pas trop les valeurs de ces contraintes. Toujours, les valeurs les plus élevées sont notées pour le cas où l'orientation de différentes couches sont à $[0^\circ]_8$ et les plus faibles valeurs sont pour les autres séquences d'empilement.

On remarque clairement que quelque soit la position des deux couches de carbone et la séquence d'empilement, les contraintes de pelage sont maximales au niveau du bord et trop faibles au niveau du cœur de l'adhésif.

Cependant, pour les contraintes de Von Mises et de cisaillement en changeant la position et la séquences d'empilement, on aura une baisse de 6Mpa des contraintes au niveau des bords et 3Mpa au niveau de cœur.

B. Modélisation du composite en multi couches :

-Cas hybride avec 4 couches en carbone et 12 couches en aramide $C_2A_2A_2A_2$



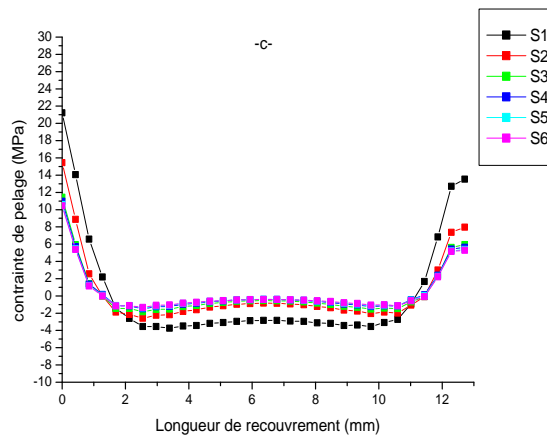
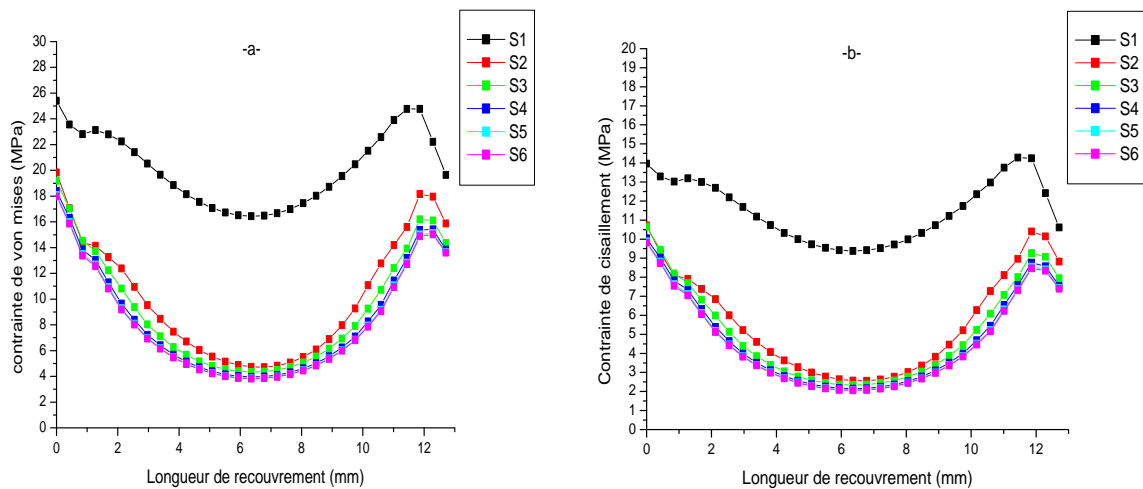


Figure II.20: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour le casdu compositehybride $[0_{2C}/X_{2A}/-X_{2A}/90_{2A}]_s$.

-Cas hybride avec 4 couches encarbonate et 12 couches en aramide $A_2C_2A_2A_2$



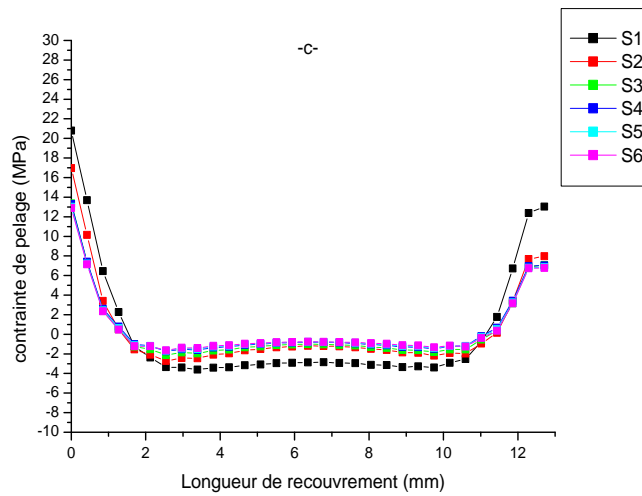
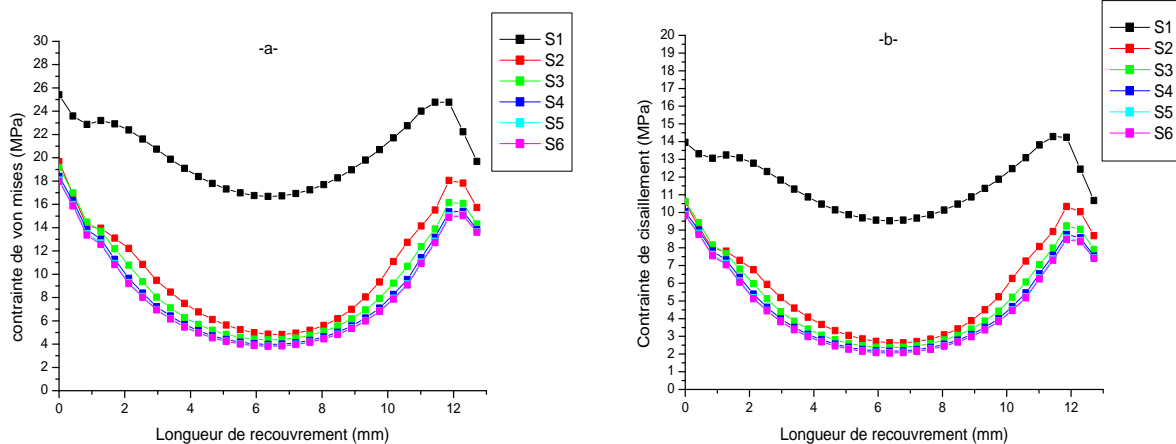


Figure II.21 ; Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas du composite hybride $[0_{2A}/X_{2C}/-X_{2A}/90_{2A}]_s$.

[S1, S2, S3, S4, S5 et S6 : différentes séquences d'empilement (voir tableau II.2)].

-Cas hybride avec 2 couches encarbonate et 6 couches en aramideAACA



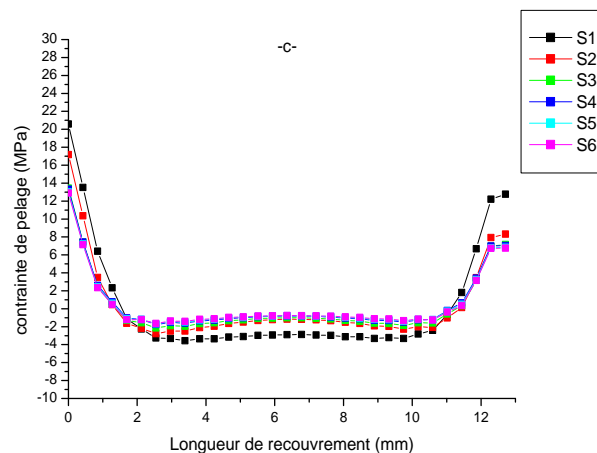


Figure II.22: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement du composite pour assemblage hybride cas $[0_{2A}/X_{2A}/-X_{2C}/90_{2A}]_s$.

-Cas hybride avec 4 couches encarbones et 12 couches en aramide $A_2A_2A_2C_2$

La distribution des contraintes dans le joint d'adhésif est la même que dans les précédentes parties, un maximum dans les bords de l'adhésif avec un cœur moins sollicité.

Si l'orientation des couches est à $[0^\circ]$ et quelque soit la position des deux couches de carbone, le composite a des caractéristiques mécaniques élevées et transfère la plupart des charges vers l'adhésif et donc des valeurs élevées des différentes contraintes dans la couche d'adhésif, aussi toute la zone de recouvrement sera sollicitée, contrairement aux autres séquences d'empilement. En changeant l'angle d'orientation de la fibre, le composite perd une partie de ses caractéristiques mécaniques, donc il transmet moins de contraintes vers l'adhésif et juste les bords qui seront sollicités alors que le cœur de l'adhésif reste pratiquement inactif.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

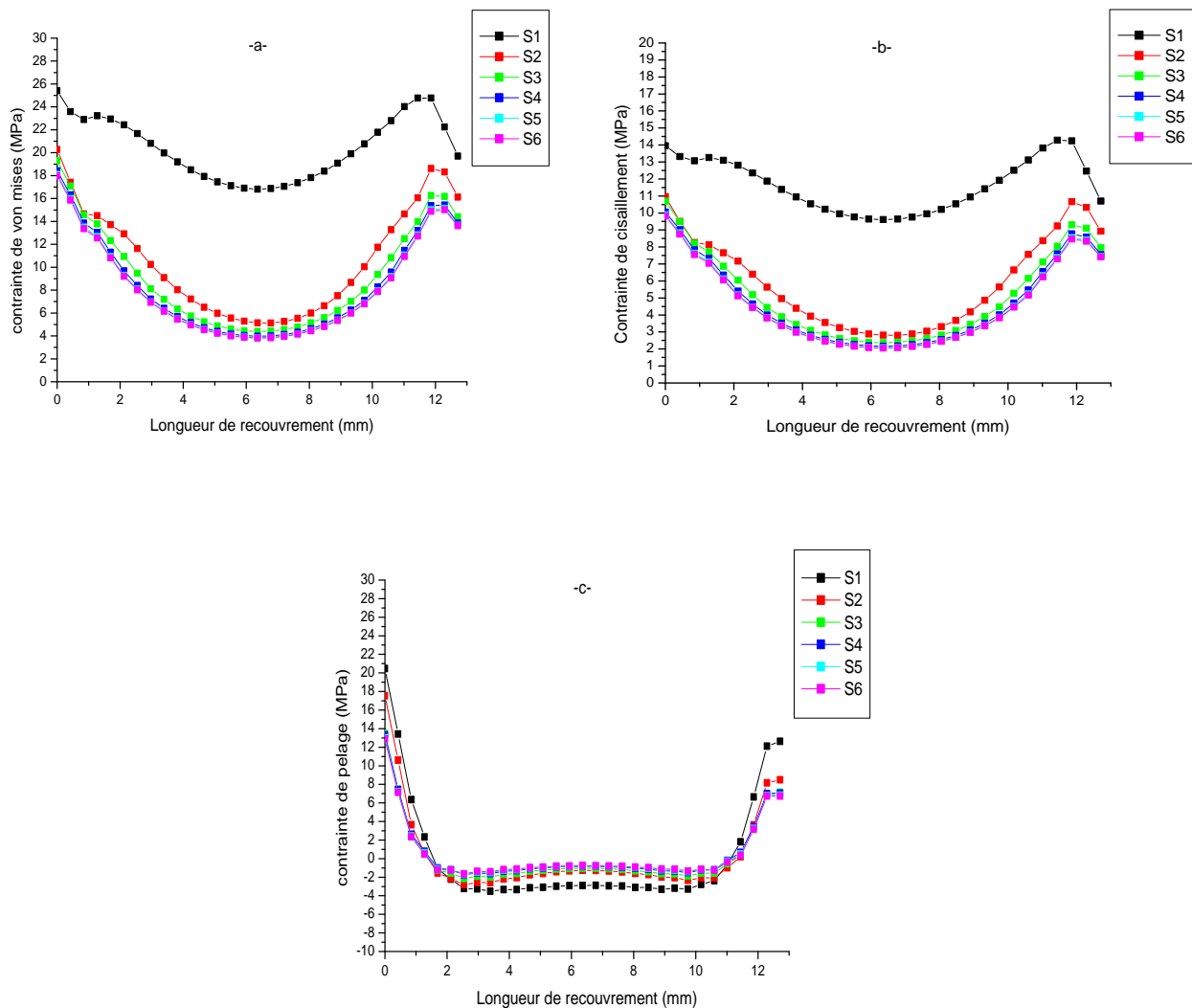


Figure II.23: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas assemblage hybride $[0_{2A}/X_{2A}/-X_{2A}/90_{2C}]_s$.

Pour les contraintes de pelage, et quel que soit la position de la fibre de carbone et la séquence d'empilement, les valeurs les plus élevées sont toujours au niveau des bords. Par contre, pour les contraintes de Von Mises et de cisaillement, la zone de recouvrement est sollicitée suivant toute sa longueur pour la séquence d'empilement $[0^\circ]_8$. Cependant, pour les autres séquences d'empilement, seules les bords qui sont sollicités.

En orientant les fibres de $[0^\circ]$ vers une autre orientation, une baisse de contraintes de 20% sur les bords et 75% par rapport au cœur.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

La figure II.24 représente l'augmentation en % des contraintes de Von Mises au niveau du bord et du cœur de l'adhésif pour le cas des deux modes de simulation du composite en un seul bloc et en multicouches pour le cas de la séquence d' $[0^\circ]_8$.

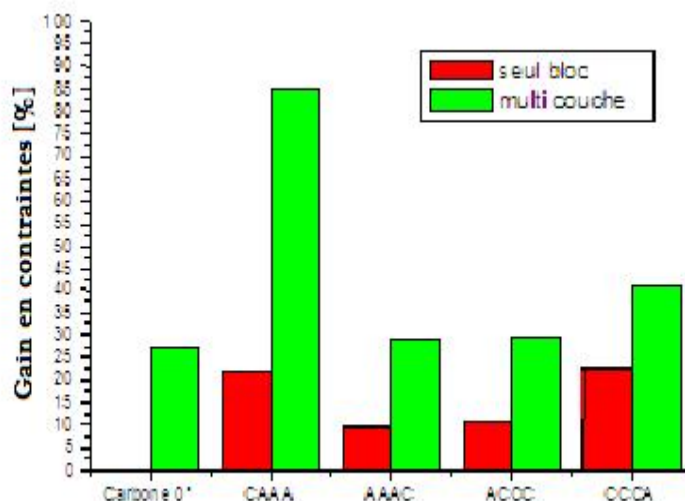


Figure II.24 : Augmentation des contraintes en pourcentage entre séquence d'empilement en % au niveau des bords pour les deux modes de simulation du composite.

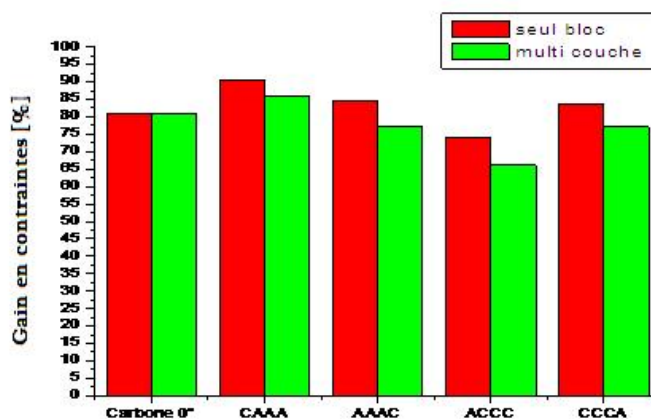


Figure II.25 : Augmentation des contraintes en pourcentage entre séquence d'empilement en % au niveau de centre pour les deux cas de modélisation.

Pour la modélisation du composite en un seul bloc, la distribution des contraintes est toujours identique quelque soit la séquence d'empilement. Les valeurs les plus élevées sont pour la séquence $[0_8]$ et en allant vers l'orientation $[75^\circ]$, les contraintes dans le joint adhésif diminuent.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

Au niveau du bord, en prenant un composite hybride ou les couches d'aramide sont plus que les couches de carbone. Si l'orientation des fibres dans toutes les couches est $[0^\circ]$, et quelque soit la position des deux couches de carbone, les valeurs des contraintes dans le joint adhésif sont les plus élevées. Par contre, si on change la séquence d'empilement, la position des deux couches de carbone a une influence sur la valeur des contraintes de cisaillement et de Von Mises surtout au niveau du cœur de l'adhésif.

Plus l'orientation des fibres tend vers 75° , le cœur de l'adhésif devient inactif, vu que les propriétés mécaniques du composite diminuent et seuls les bords de l'adhésif qui seront sollicités.

Si le composite hybride présente plus de couche d'aramide que le carbone les propriétés mécaniques du composite diminuent.

Au niveau des bords, les contraintes sont élevées et un peu faibles au niveau du cœur. De même, en modifiant la séquences d'empilement, les valeurs les plus élevées sont toujours pour la séquence $[0^\circ]_8$ et ce quelque soit la position des deux couches de carbone dans la plaque composite, et les plus faibles sont toujours pour la séquences d'empilement $[0/75/-75/90]_s$; $[0/60/-60/90]_s$; $[0/45/-45/90]_s$; $[0/30/-30/90]_s$.

Les figures II.24 et II.25 présentent la comparaison entre le mode de simulation du composite par rapport aux valeurs de la contrainte de Von Mises au niveau du bord (figure II.24) et du cœur de l'adhésif (figure II.25).

On remarque clairement qu'il existe une différence des valeurs de contrainte entre ces deux modes de simulation. Le pourcentage d'augmentation de la valeur de la contrainte de Von Mises pour un composite hybride en changeant la position des deux couches d'aramide dans la plaque du composite varie en fonction de la position des deux couches du composite et du mode de simulation du composite.

II.4.2.2. Renforcement des couches de carbone par des couches d'aramide

Dans la 2^{ème} partie de l'utilisation d'un composite hybride, on a renforcé les couches en carbone par des couches en aramide de telle sorte que le composite contient 6 couches de carbone et 2 couches en aramide.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

De même, la position de ces deux couches d'aramide change pour chaque séquence d'empilement. La distribution des différentes contraintes a la même allure et ce quelque soit la séquence d'empilement et le type du composite hybride.

Modélisation du composite en multi couches

-Cas hybride avec 4 couches aramide et 12 couches carbone $A_2C_2C_2C_2$

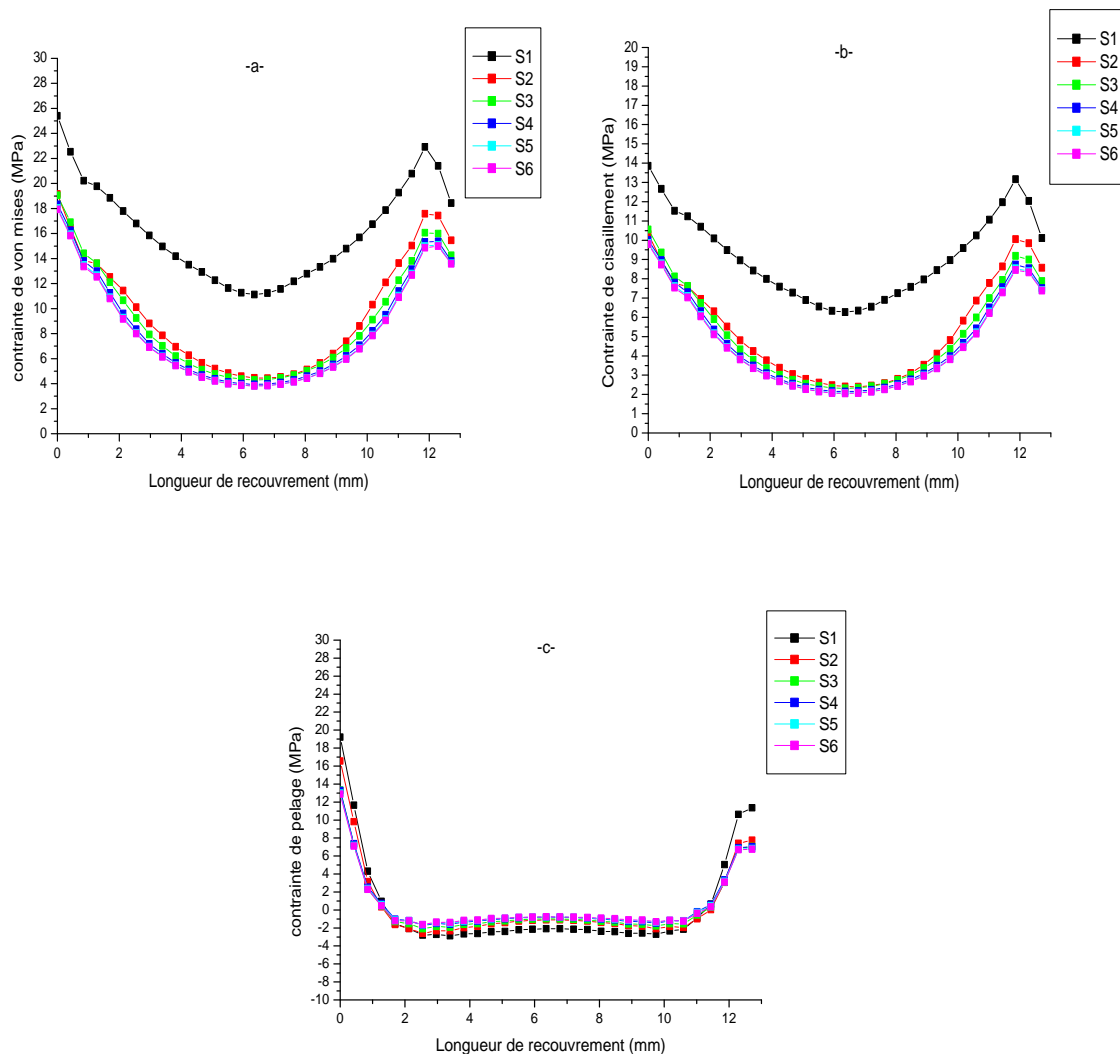


Figure II.26 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour le cas d'assemblage hybride $[0_{2A}/X_{2C}/-X_{2C}/90_{2C}]_s$.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

-Cas hybride avec 4 couches aramide et 12 couches carbone $C_2A_2C_2C_2$

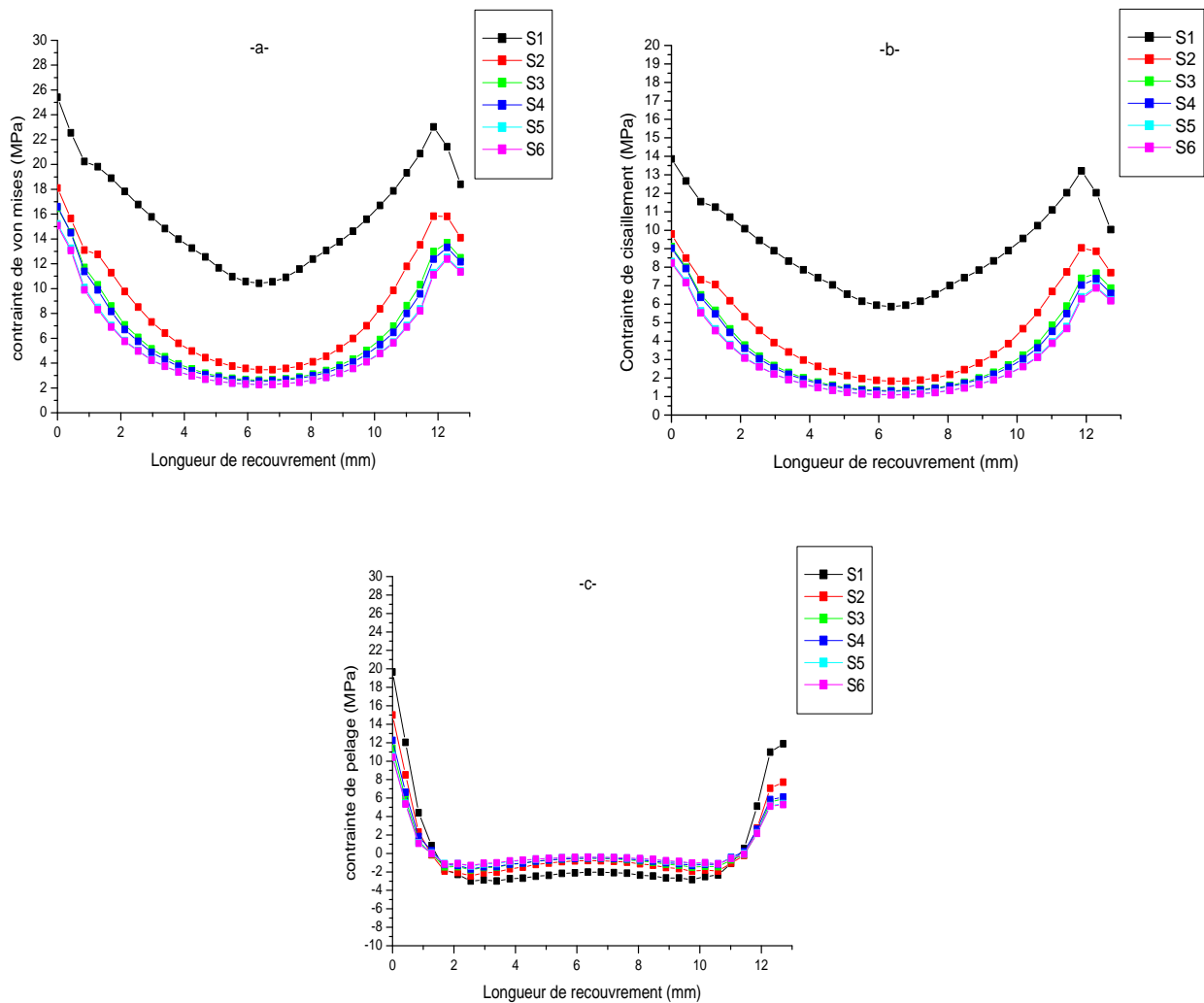


Figure II.27: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour le cas d'assemblage hybride $[0_{2C}/X_{2A}/-X_{2C}/90_{2C}]_s$.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

-Cas hybride avec 4 couches aramide et 12 couches carbone $C_2C_2A_2C_2$

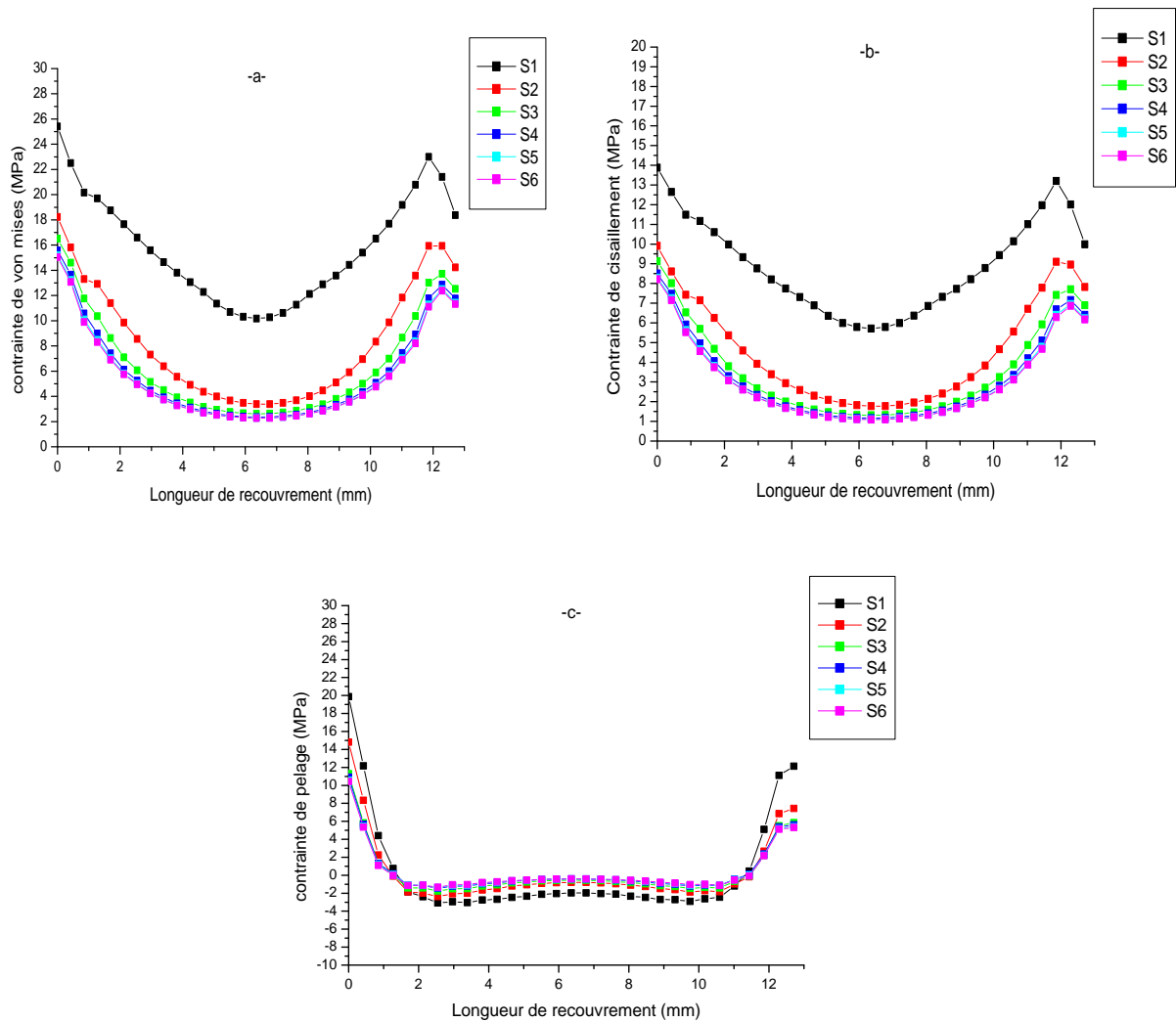


Figure II.28 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour le cas d'assemblage hybride $[0_{2C}/X_{2C}/-X_{2A}/90_{2C}]_s$.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

-Cas hybride avec 4 couches aramide et 12 couches carbone C₂C₂C₂A₂

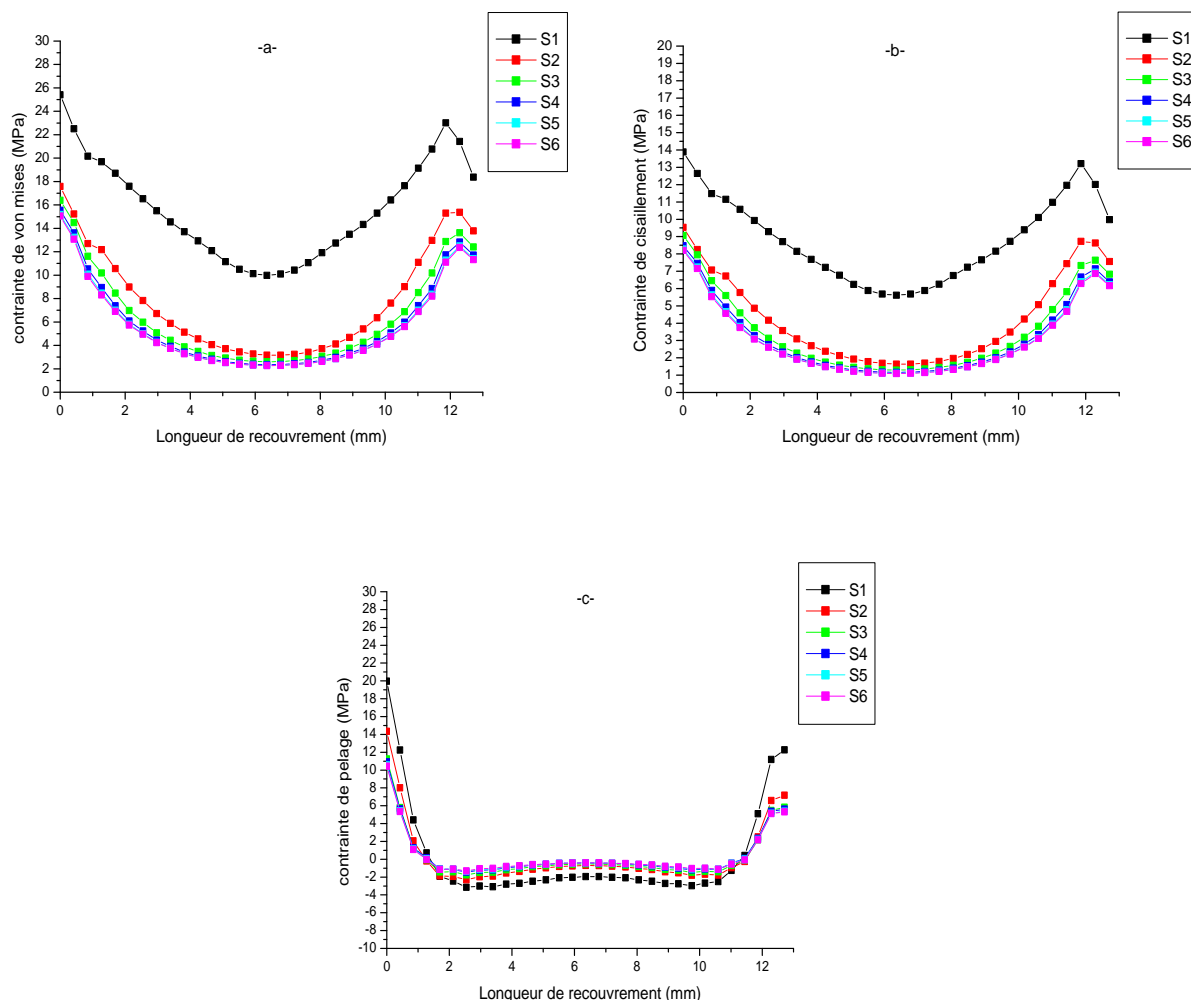


Figure II.29: Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour le cas d'assemblage hybride $[0_{2C}/X_{2C}/-X_{2C}/90_{2A}]_S$.

Les figures II.26, II.27, II.28, II.29 représentent la variation de la contrainte de Von Mises, cisaillement et pelage suivant la longueur de recouvrement pour les différentes séquences d'empilement en utilisant deux plaques en composite hybride ou les deux couches d'aramide ont différentes positions dans la plaque composite par rapport aux couches en carbone/époxyde.

On remarque que l'allure des contraintes est identique et ce quelque soit la position des deux couches d'aramide par rapport aux couches de carbone. Les valeurs les plus élevées de ces contraintes sont toujours pour le cas de la séquence d'empilement $[0^\circ]_8$. En changeant la séquence

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

d'empilement, les contraintes deviennent faibles. Pour ce composite hybride, la position des deux couches d'aramide n'a que peu d'effet sur la valeur des différentes contraintes surtout au niveau du cœur.

Par contre, au niveau du bord, une légère variation de la valeur des différentes contraintes est notée en fonction de la position des deux couches d'aramide.

Pour la séquence d'empilement $[0^\circ]_8$, les valeurs des contraintes dans le joint adhésif sont les plus importantes au niveau du bord et même au niveau du cœur.

Les figures II.30 et II.31 représentent la distribution des contraintes de Von Mises suivant la longueur de recouvrement pour différentes positions des couches de carbone dans le composite aramide et différentes positions dans le composite en carbone.

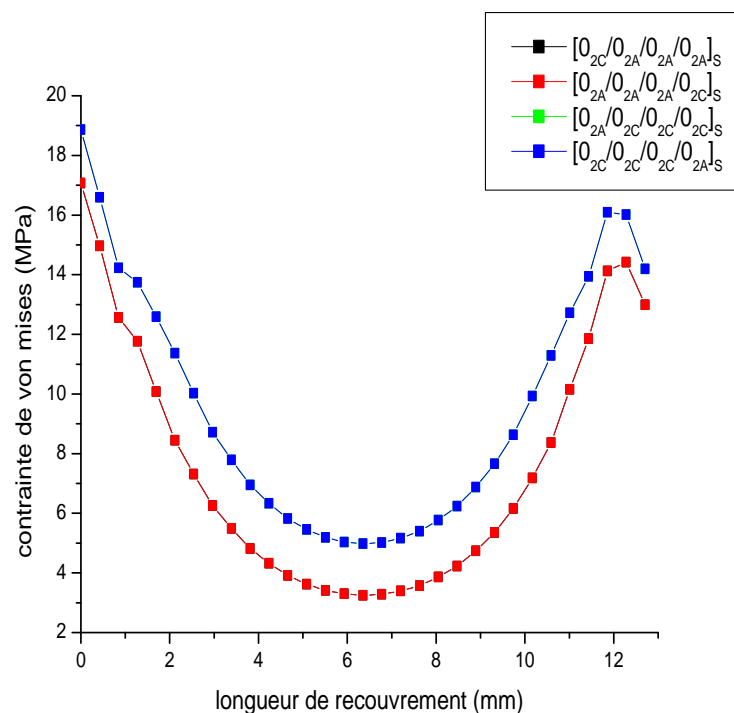


Figure II.30 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour le carbone/époxyde [modélisation par bloc].

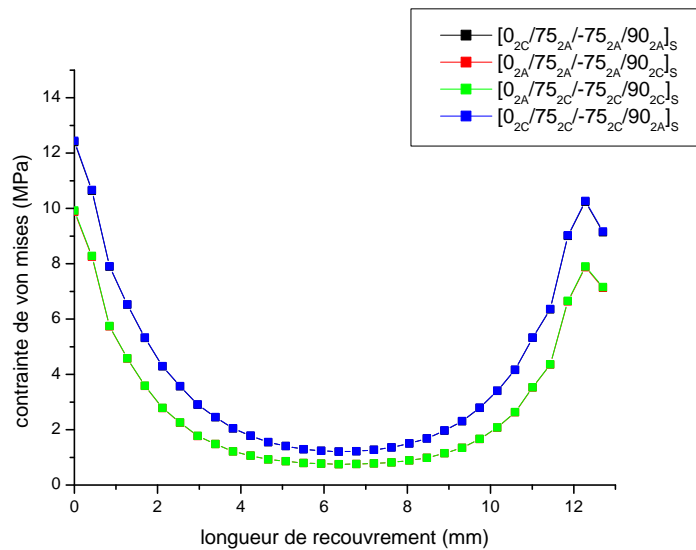


Figure II.31: Distribution des contraintes de a)-Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour le cas d'assemblage hybride[modélisation par bloc].

Pour le composite hybride, si le nombre de couches de carbone sont les plus dominants, la valeur de la contrainte de Von Mises est très élevée que la contrainte dans le cas où les couches d'aramide sont les plus dominants, la position de la couche d'aramide dans le composite hybride n'a qu'une faible influence sur la valeur de la contrainte de Von Mises. De même, si le composite hybride a plus de couches d'aramide, le cœur de l'adhésif reste inactif.

Si on change la séquence d'empilement, le composite devient faible en propriétés mécaniques et donc moins de valeur de la contraintes de Von Mises dans la couche adhésif.

La valeur de la contrainte de Von Mises est peu influencée par le type du composite hybride.

Les valeurs les plus élevées sont toujours pour la séquence d'empilement $[0^\circ]_8$ et ce quelque soit le type de composite hybride utilisé.

La couche de l'adhésif sera un peu sollicitée si le composite hybride a plus de couches de carbone qu'aramide. Si l'orientation des fibres tend vers 75° , le composite présente de faibles propriétés mécaniques et donc moins de transfert de charge vers l'adhésif. Pour cette séquence d'empilement, la nature du composite hybride utilisée n'a que peu d'influence sur la valeur de la contrainte de Von Mises.

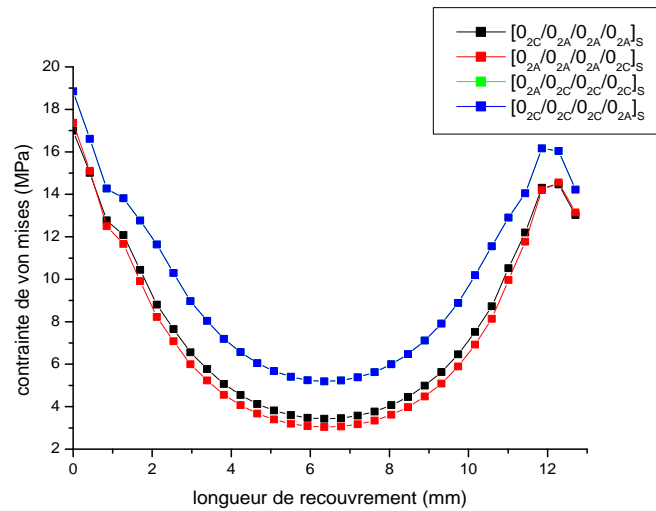


Figure II.32 : Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement [modélisation par multicouches].

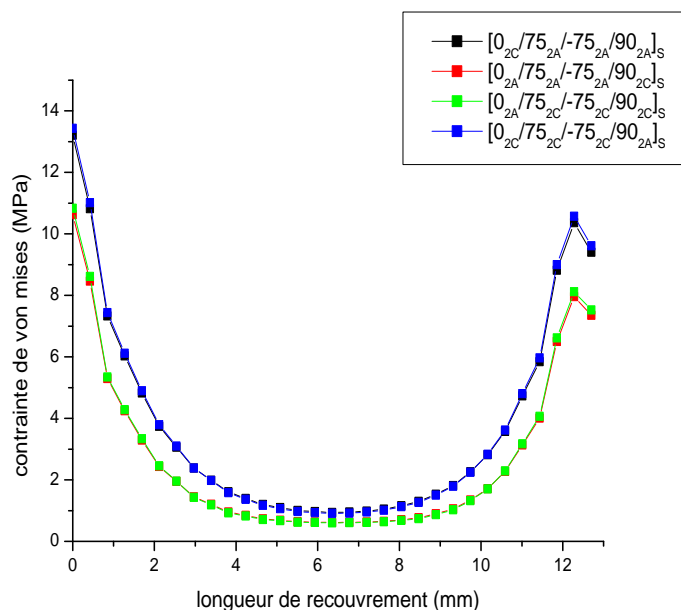


Figure II.33 Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement modélisation par multicouches.

Pour la simulation du composite en multicouches, la position des couches d'aramide dans le composite hybride $[C_2C_2C_2A_2, A_2C_2C_2C_2]$ et la position de la couche de carbone dans le composite hybride $[C_2A_2A_2A_2, A_2A_2A_2C_2]$ a une influence sur la valeur de la contrainte de Von

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

Mises au niveau du bord qu'au niveau du milieu de la longueur de recouvrement. Pour cette simulation en multicouches, le composite présente une hétérogénéité par rapport aux différentes couches et ce qui présente le cas réel, contrairement au mode de simulation du composite en un seul bloc, ou on introduit juste des propriétés mécaniques pour le bloc, ce qui n'est pas réel puisque pour le composite hybride, on doit avoir un transfert de charge hétérogène d'une couche vers l'autre. Aussi, la position des couches de propriétés différentes que les couches de base de composite n'apparaît pas bien clair dans la simulation du composite en seul bloc.

De même, si on change la séquence d'empilement de sorte que les propriétés mécaniques du composite deviennent faibles, la modélisation de composite en multicouches n'a que peu d'influence sur la contraintes de Von Mises. Cette différence de la valeur est bien remarquée au niveau du bord de l'adhésif.

- Comparaison :

a)- Effet de la nature des fibres

Les figures (II.34, II.35, II.36) montrent clairement la différence en valeur maximale des différentes contraintes en fonction du type de modélisation du composite, la séquence d'empilement et la nature des fibres dans les plaques à assemblées.

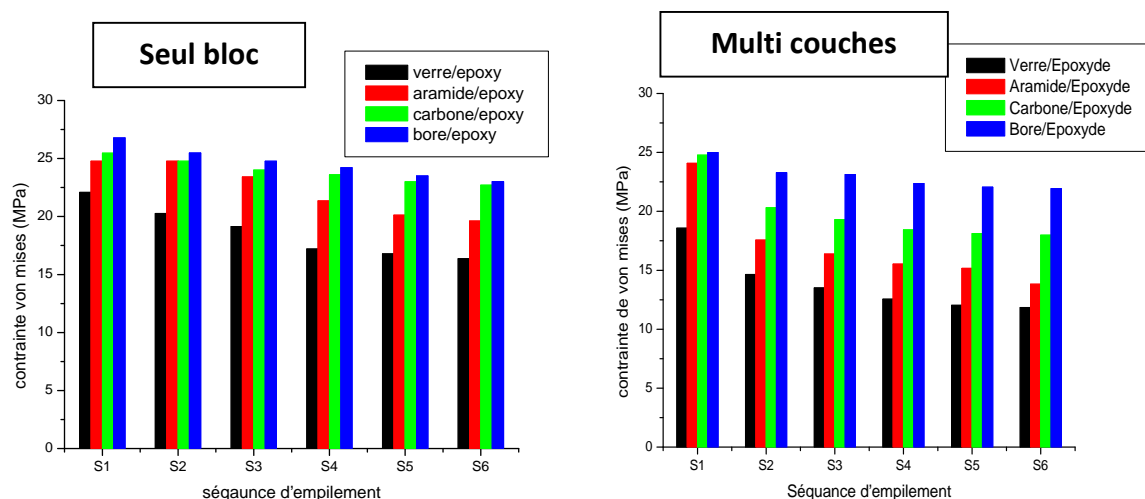


Figure II.34 : Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de Von Mises en fonction du type de modélisation du composite et la séquence d'empilement.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

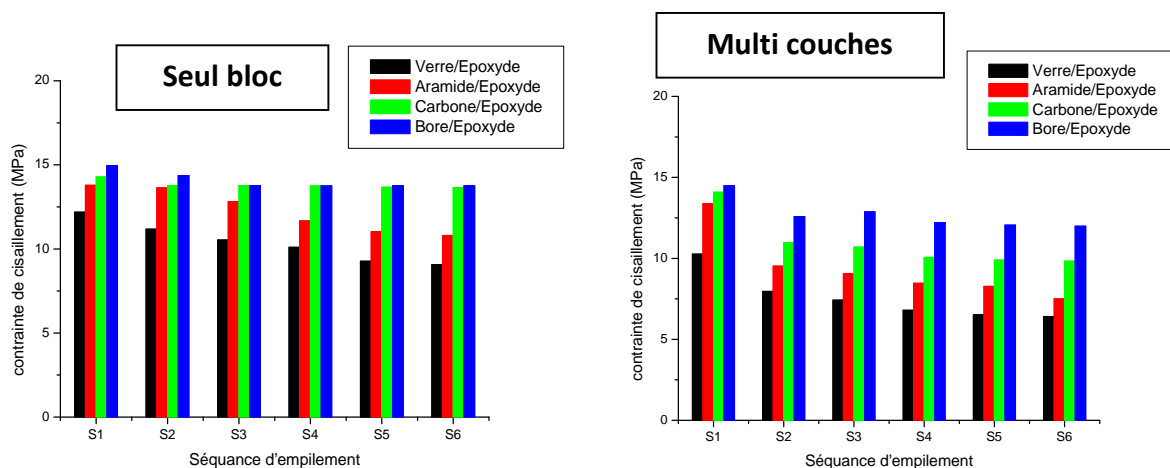


Figure II.35: Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de cisaillement en fonction du type de modélisation du composite et la séquence d'empilement.

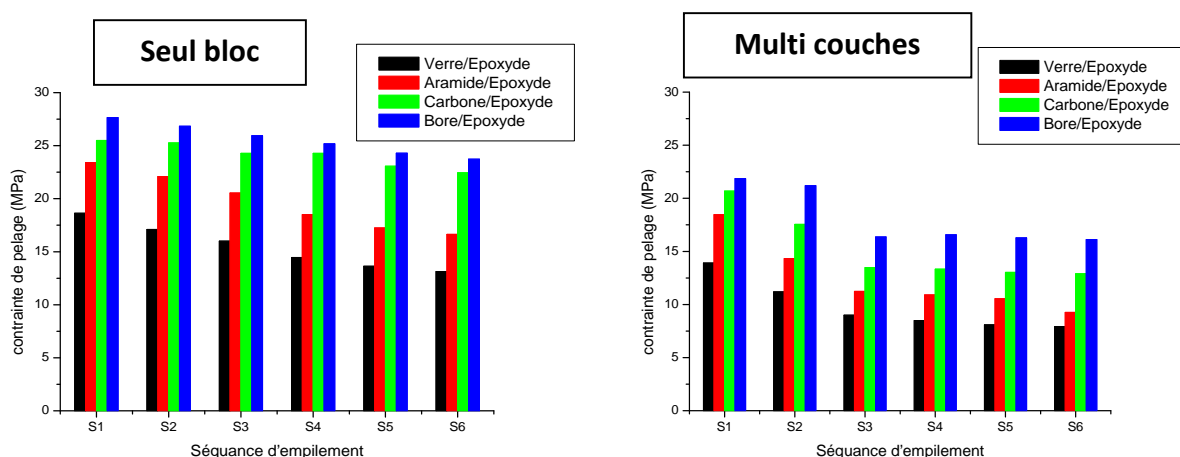


Figure II.36: Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de pelage en fonction du type de modélisation du composite et la séquence d'empilement.

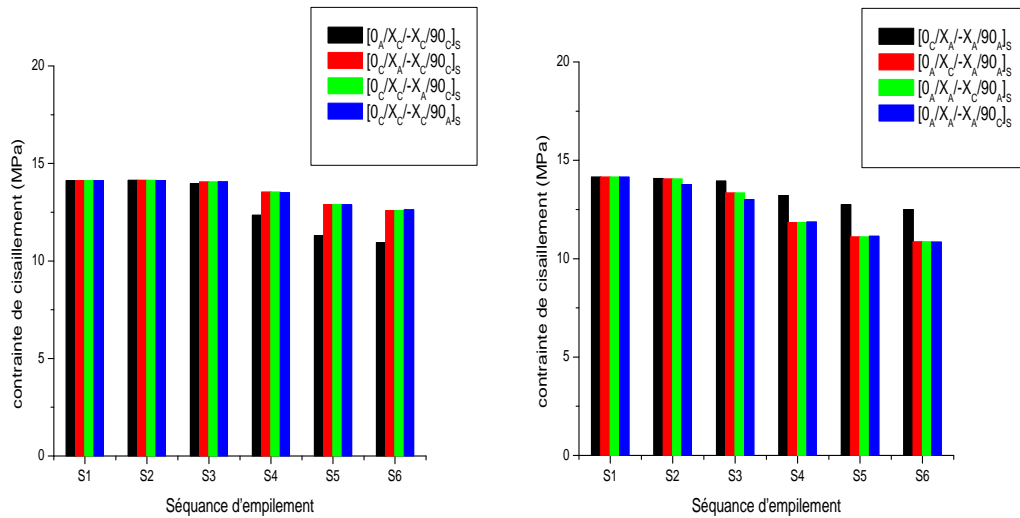
Quelque soit le type de modélisation, les valeurs les plus élevées sont pour la séquence d'empilement $[0_8]$ et pour le composite qui présente des propriétés mécaniques les plus élevées, les valeurs les plus faibles sont pour le cas d'une plaque composite avec de faibles propriétés mécaniques et une séquence d'empilement $[0/75/-75/90]$.

D'autre part, en modélisant le composite en plusieurs couches, cela nous permettra d'introduire les propriétés mécaniques réelles par chaque couche, ce qui va entrainer un transfert de charge différent que pour le cas de la modélisation du composite en une seule couche avec des propriétés mécaniques globales.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

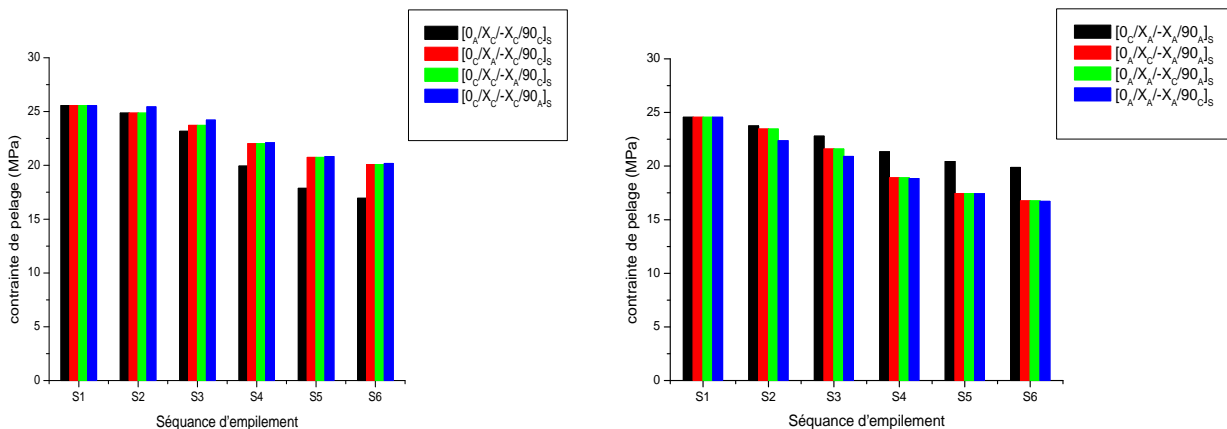
Les valeurs des contraintes sont un peu faibles dans le cas où le composite est modélisé en plusieurs couches.

b)- Effet du composite hybride



a) b)

Figure II.37 : Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de cisaillement en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modélisé par bloc.



a) b)

Figure II.38: Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de pelage en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modéliser par bloc.

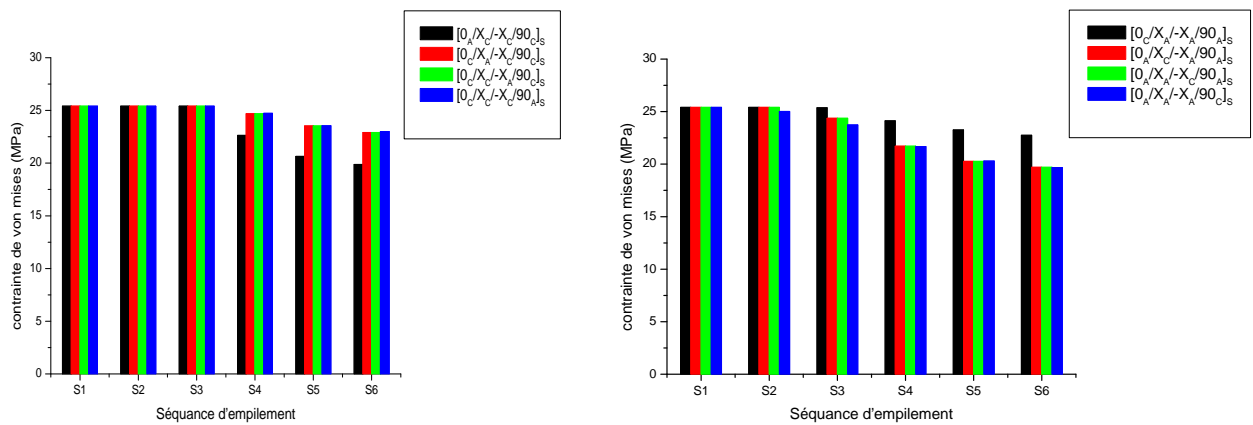


Figure II.39 Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de Von Mises en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modélisé par bloc.

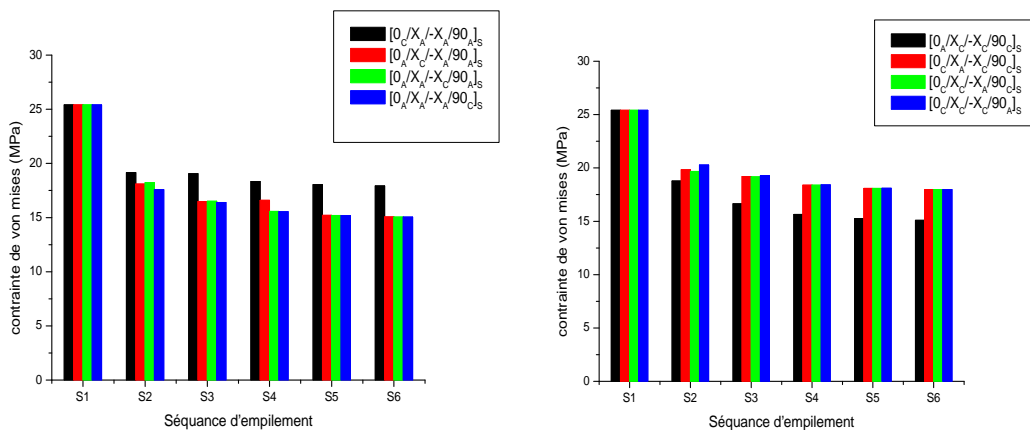


Figure II.40 : Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de Von Mises en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modélisé par multicouches.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

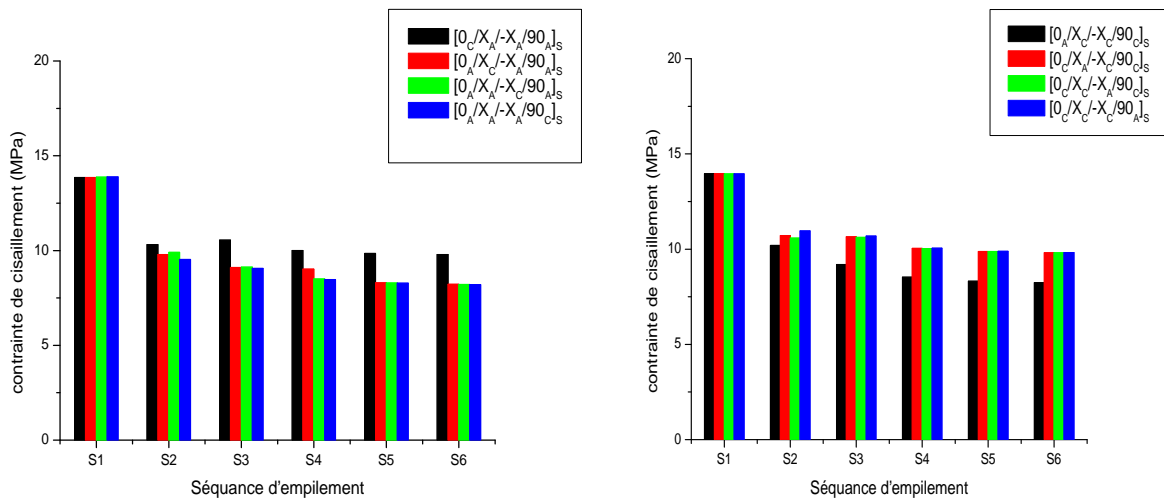


Figure II.41 : Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de cisaillement en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modélisé par multicouches.

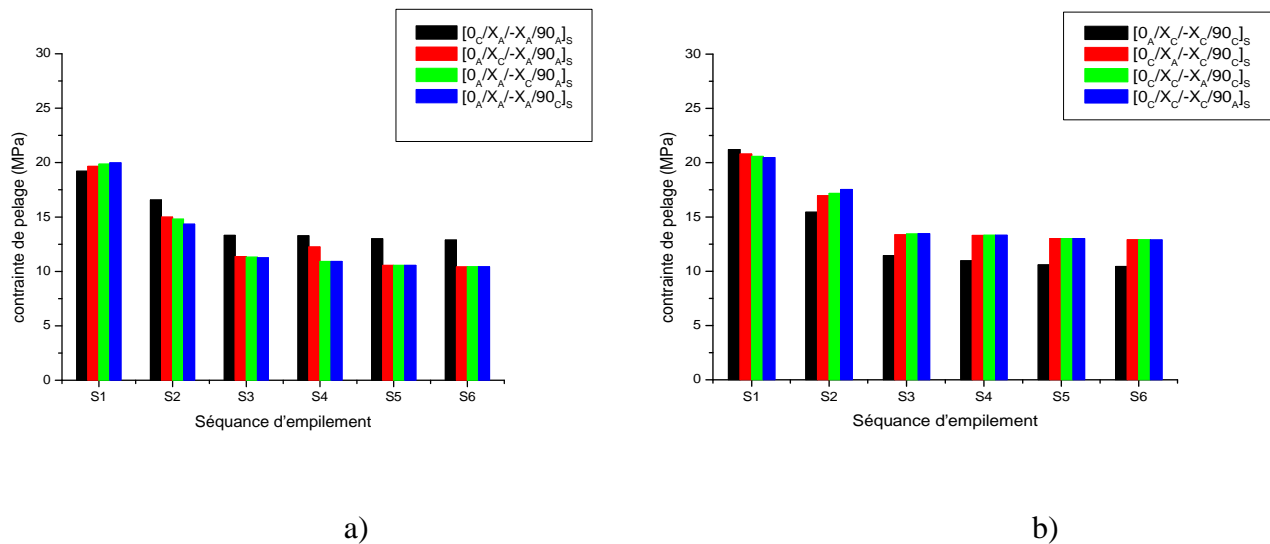


Figure II.42 ; Comparaison des différentes valeurs maximales des contraintes de pelage en fonction de la séquence d'empilement pour le cas d'un matériau hybride modélisé par multicouches.

a) cas d'un composite où les couches d'aramide sont les plus dominantes.

b) cas d'un composite où les couches en carbone sont les plus dominantes.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

Les figures (II.37, II.38, II.39, II.40, II.41 et II.42) représentent une comparaison des valeurs maximales des contraintes de Von Mises, de cisaillement et de pelage en fonction de la séquence d'empilement et le mode de simulation du composite pour le cas d'un assemblage en composite hybride.

On remarque clairement que quelque soit le mode de simulation de la plaque composite, les valeurs maximales les plus élevées sont pour le cas du composite modélisé comme un seul bloc. Pour cette partie, toutes les contraintes seront concentrées au niveau du bord et le composite étant résistant, la plupart de la charge sera transmise vers l'adhésif, et donc, des contraintes de pelage élevées. Contrairement au cas où la plaque composite a été modélisée en multicouches, et vu que la non linéarité des deux forces appliquées, les contraintes de pelage sont maximales dans l'adhésif, ces valeurs minimisées vu qu'une partie de contraintes de pelage sera transférée vers les bords des différentes couches du composite et donc il y a possibilité d'un délaminage entre les différentes couches et donc moins de contraintes de pelage dans l'adhésif.

Les valeurs maximales des différentes contraintes seront affectées par le type de composite hybride utilisé et pour la position des couches qui sont différentes de la nature des couches de base de la plaque composite.

Les plus faibles valeurs sont pour le cas où la plaque composite présent plus de couches d'aramide que de carbone. Les plus faibles valeurs sont pour la séquence d'empilement [0/75/-75/90].

II.4.3. Etude de transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif

Afin de voir clairement le transfert de charge d'une plaque vers l'autre à travers l'adhésif, on a déterminé la distribution des contraintes de Von Mises suivant l'épaisseur de la structure.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

A-cas de composite en fibres de carbone et matrice époxyde

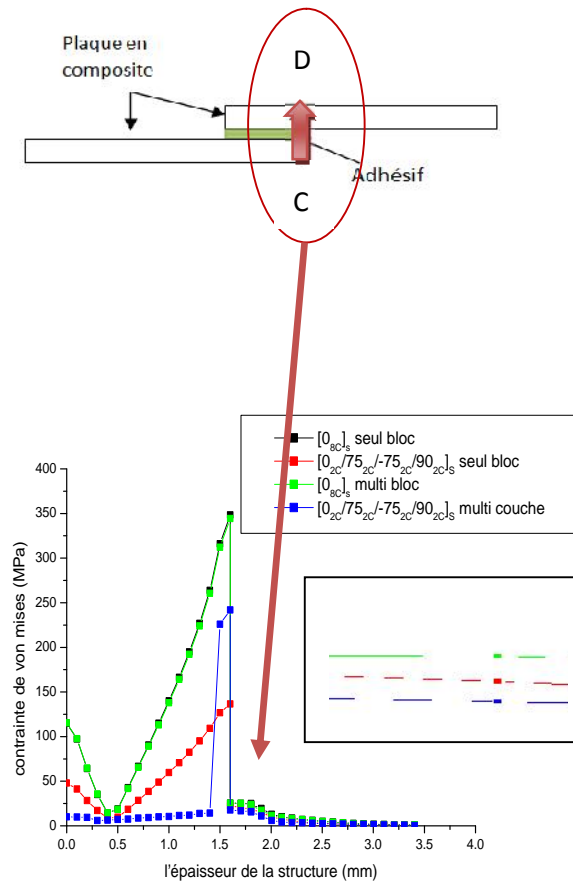


Figure II.43 : Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif pour les différentes séquences d'empilement et le mode de simulation du composite.

Pour le cas où les différents couches du composite ont la même nature de la fibre (carbone), les contraintes sont élevées dans la plaque et la colle.

La distribution des contraintes n'est pas homogène des deux côtés des plaques, vu qu'une partie des contraintes appartiennent au bord de la plaque et l'autre partie appartiennent à la plaque elle-même.

Pour le cas où le composite est totalement en carbone, les valeurs des contraintes dans l'adhésif sont très élevées, vu que la plaque est trop rigide et elle transfère une grande partie des contraintes vers l'adhésif.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

La partie de l'adhésif qui appartient au bord libre de la plaque présente des valeurs élevées des contraintes par rapport à l'autre côté.

B-Cas hybride avec 4 couches de carbone et 12 couches d'aramide $C_2A_2A_2A_2$

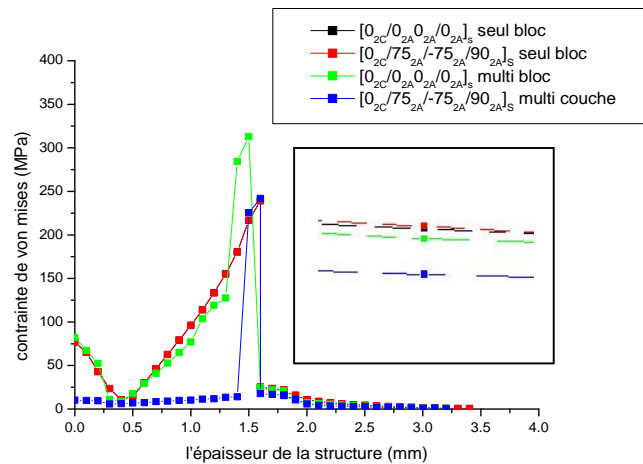


Figure II.44 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif pour différentes séquences d'empilement.

C-Cas hybride avec 12 couches de carbone et 4 couches d'aramide $A_2C_2C_2C_2$

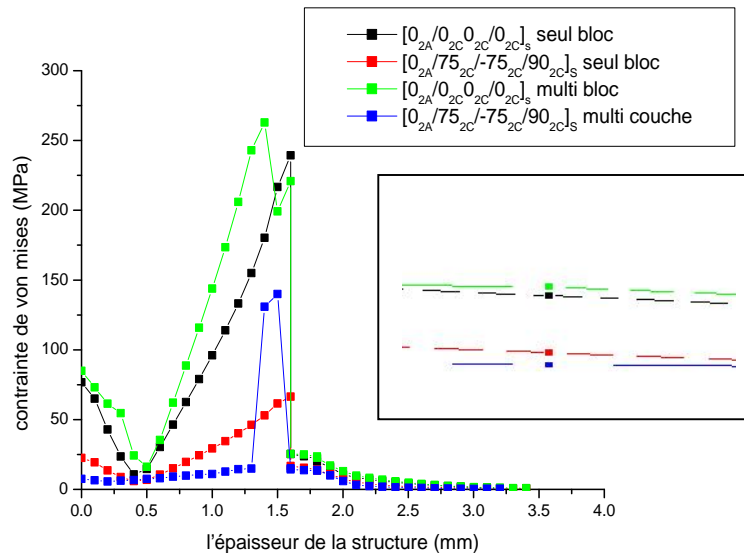


Figure II.45 : Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif pour différentes séquences d'empilement.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

Si le composite présente des couches en carbone et en aramide [composite hybride], la rigidité de la plaque diminue et donc elle absorbe une partie des contraintes et transfère moins de contraintes vers l'adhésif.

Dans le cas où le composite est totalement en carbone, les valeurs des contraintes sont très élevées. Par contre, si on introduit une couche en aramide dans la plaque, la valeur de la contrainte diminue, cette diminution dépend de la position de la couche d'aramide dans la plaque composite.

De même, si on introduit une couche en carbone dans un composite en aramide, la valeur de la contrainte diminue avec la position de la couche dont les fibres sont en carbone.

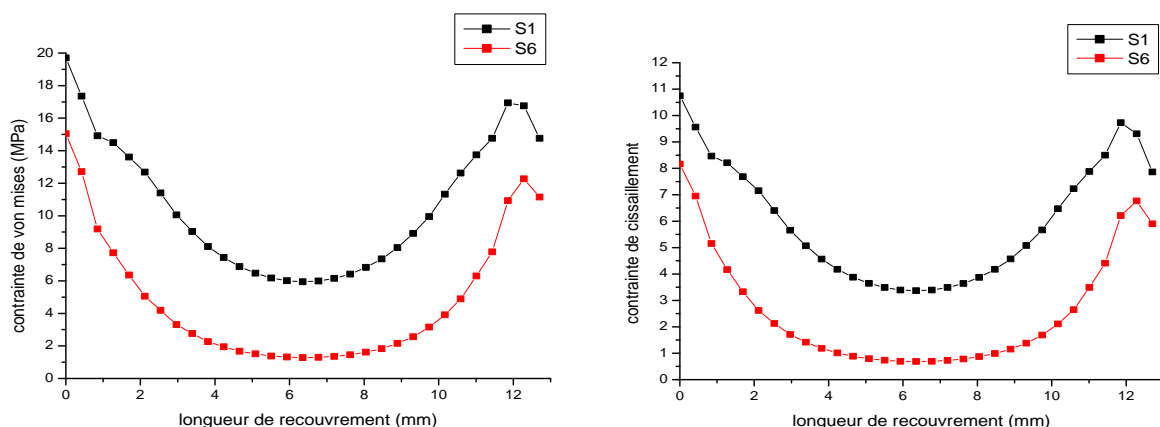
De même, si on considère le composite en un seul bloc et en multicouche, les valeurs de la contrainte diminuent légèrement dans la plaque et l'adhésif [cas multicouches].

Si la séquence d'empilement varie, le transfert de charge varie aussi dans la plaque vers l'adhésif.

II.4.4 Cas d'un déplacement imposé 0.1mm

Pour cette partie, on a minimisé le déplacement imposé afin de bien montrer les différentes valeurs de contraintes dans la couche d'adhésif pour les différentes séquences d'empilement (S1 et S6) et la nature des fibres :

A-Modélisation par bloc



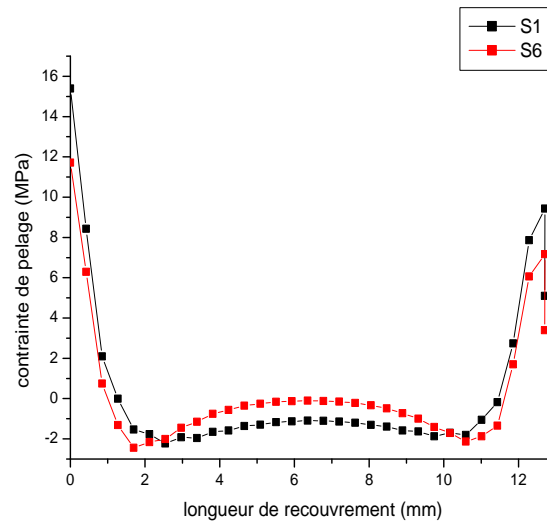


Figure II.46 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour le carbone/époxyde avec séquence d'empilement

$$(S1=[0_{8C}]_s, S6=[0_{2C}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2C}]_s).$$

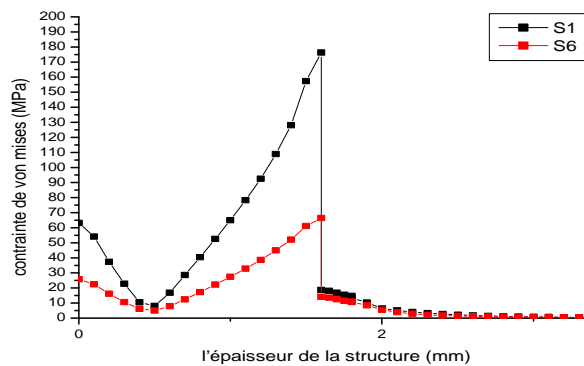


Figure II.47 : Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif [cas fibre de verre] séquence d'empilement (S1=[0_{8C}]_s, S6=[0_{2C}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2C}]_s).

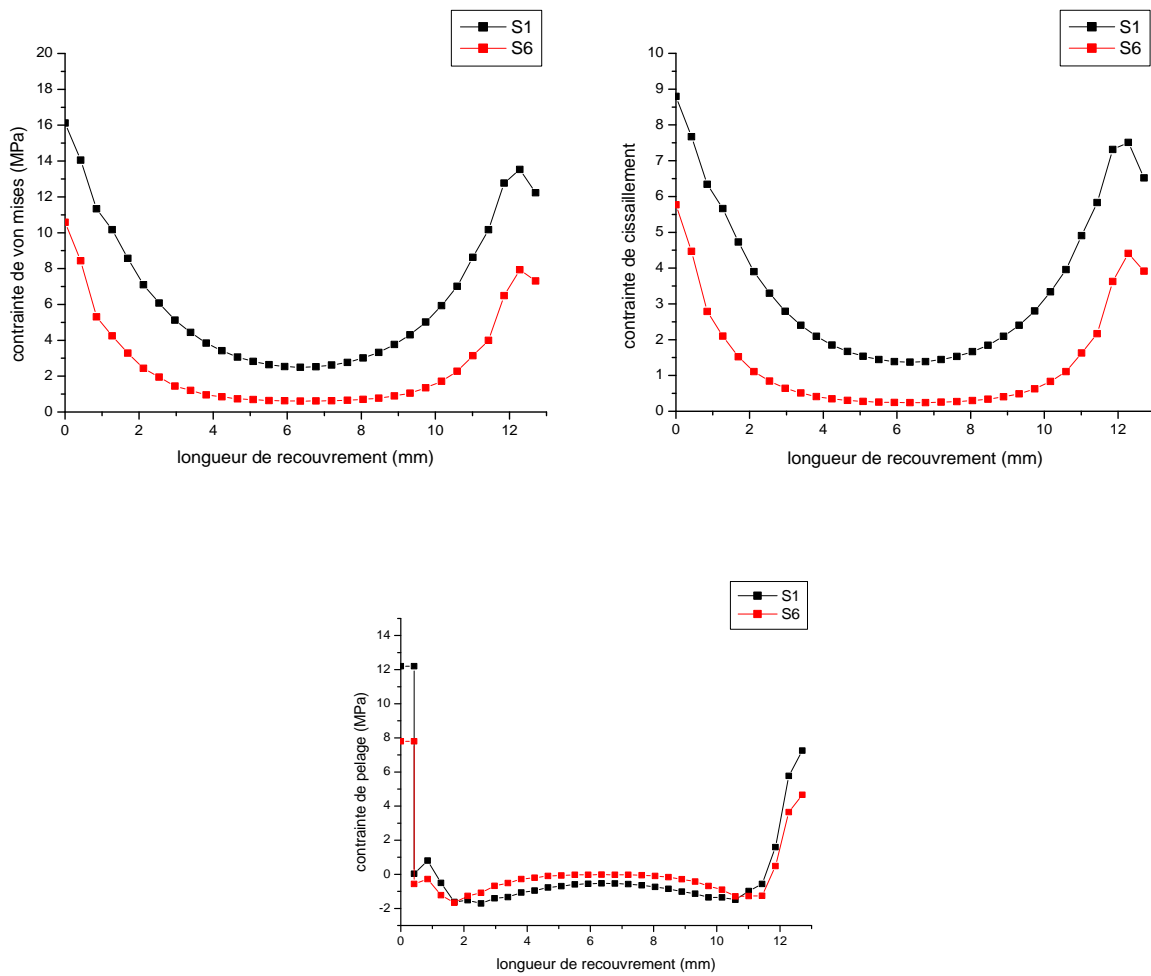


Figure II.48 : Distribution des contraintes. a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour aramide/époxyde avec séquence d'empilement($S1=[0_{8A}]_s$, $S6=[0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s$).

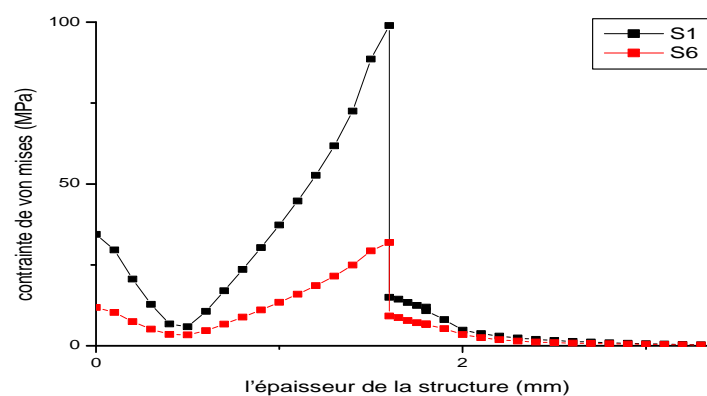


Figure II.49 : Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif [cas fibre de verre séquence d'empilement ($S1=[0_{8A}]_s$, $S6=[0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s$)].

-Cas hybride de 4 couches de carbone et 12 couches d'aramide C₂A₂A₂A₂

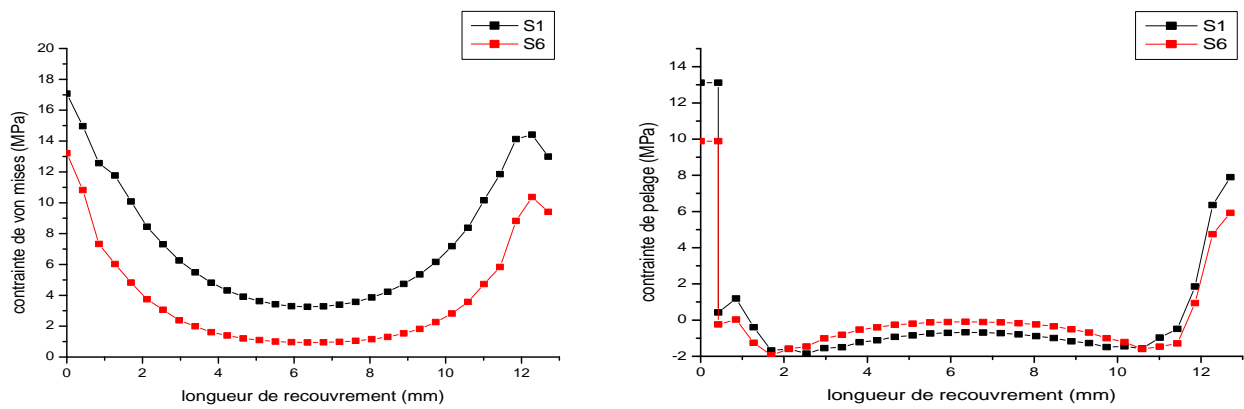


Figure II.50 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-pelage dans l'adhésif [pour cas hybride séquence d'empilement (S1=[0_{2c}/0_{2A}/0_{2A}/0_{2A}]_s, S6=[0_{2c}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s)].

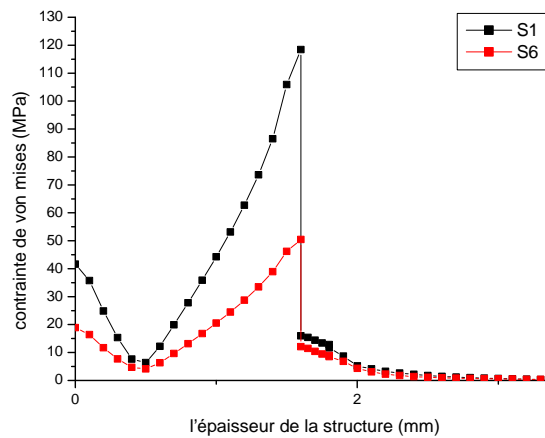


Figure II.51 : Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif [cas hybride pour séquence d'empilement (S1=[0_{2c}/0_{2A}/0_{2A}/0_{2A}]_s, S6=[0_{2c}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s)].

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

-Cas hybride de 4 couches de carbone et 12 couches d'aramide $A_2A_2A_2C_2$

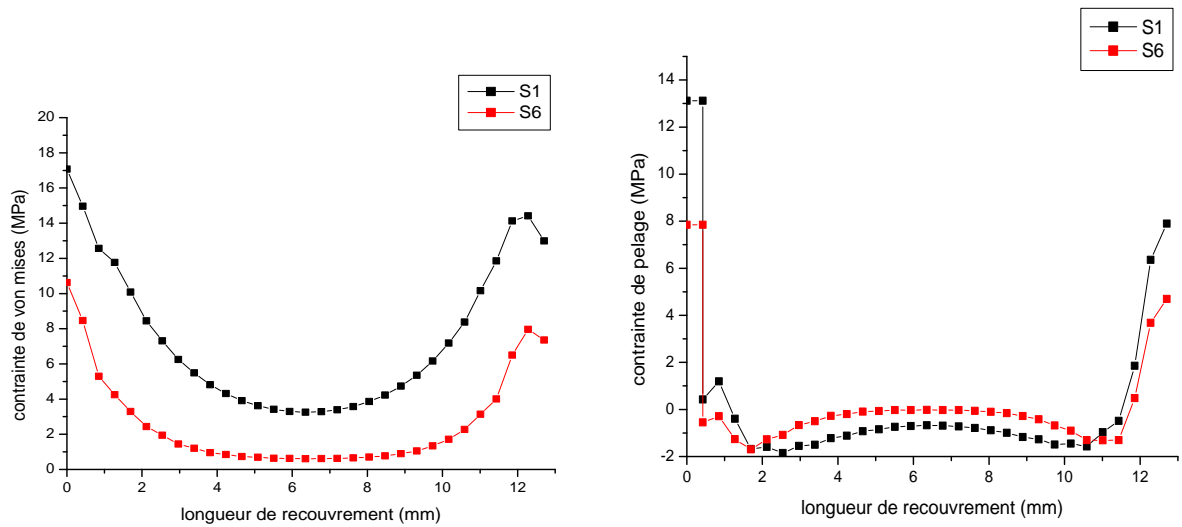


Figure II.52 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-pelage dans l'adhésif [cas hybride séquence d'empilement (S1=[$0_{2A}/0_{2A}/0_{2A}/0_{2C}$]_s, S2=[$0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2C}$]_s)].

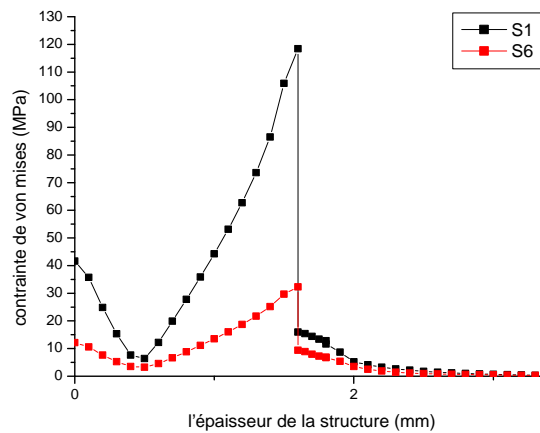


Figure II.53 : Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif [cas hybride séquence d'empilement S1=[$0_{2A}/0_{2A}/0_{2A}/0_{2C}$]_s, S2=[$0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2C}$]_s].

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

-Cas hybride avec 4 couches d'aramide et 12 couches de carbone $A_2C_2C_2C_2$

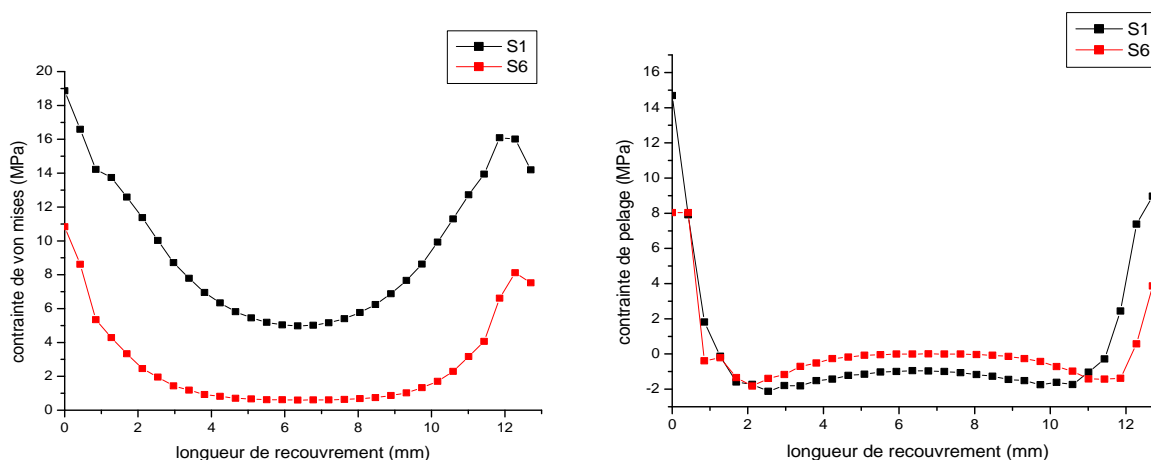


Figure II.54 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif [cas hybride pour séquence d'empilement (S1= $[0_{2A}/0_{2C}/0_{2C}/0_{2C}]_s$, S6= $[0_{2A}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2C}]_s$.)]

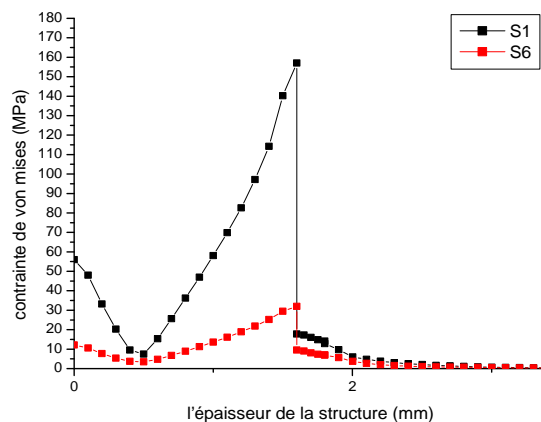


Figure II.55 : Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif cas hybride séquence d'empilement (S1= $[0_{2A}/0_{2C}/0_{2C}/0_{2C}]_s$, S6= $[0_{2A}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2C}]_s$.)

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

-Cas hybride de 4 couches d'aramide et 12 couches de carbone $C_2C_2C_2A_2$

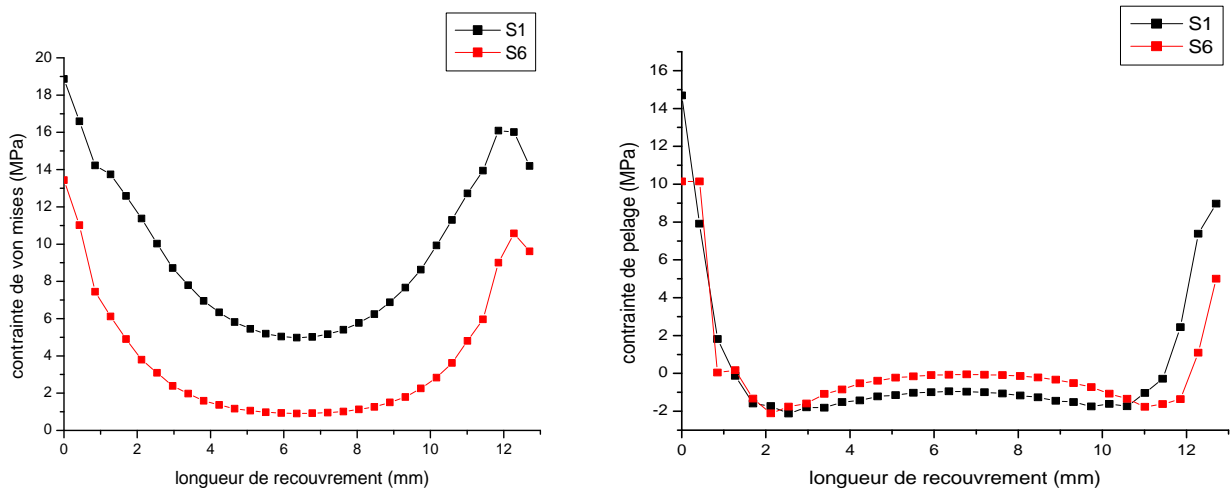


Figure II.56 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b) -pelage dans l'adhésif pour cas hybride de séquence d'empilements ($S1 = [0_{2C}/0_{2C}/0_{2C}/0_{2A}]_s$, $S2=[0_{2C}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2A}]_s$).

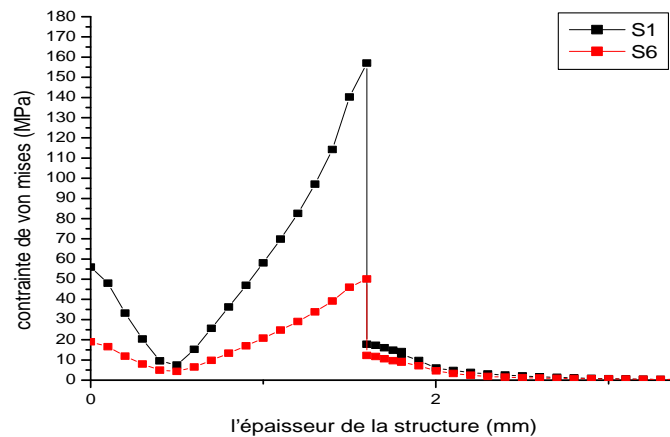


Figure II.57 Transfert de charge d'une plaque à une autre travers l'adhésif cas hybride séquence d'empilement ($S1 = [0_{2C}/0_{2C}/0_{2C}/0_{2A}]_s$, $S2=[0_{2C}/75_{2C}/-75_{2C}/90_{2A}]_s$).

B-modélisation par multicouches

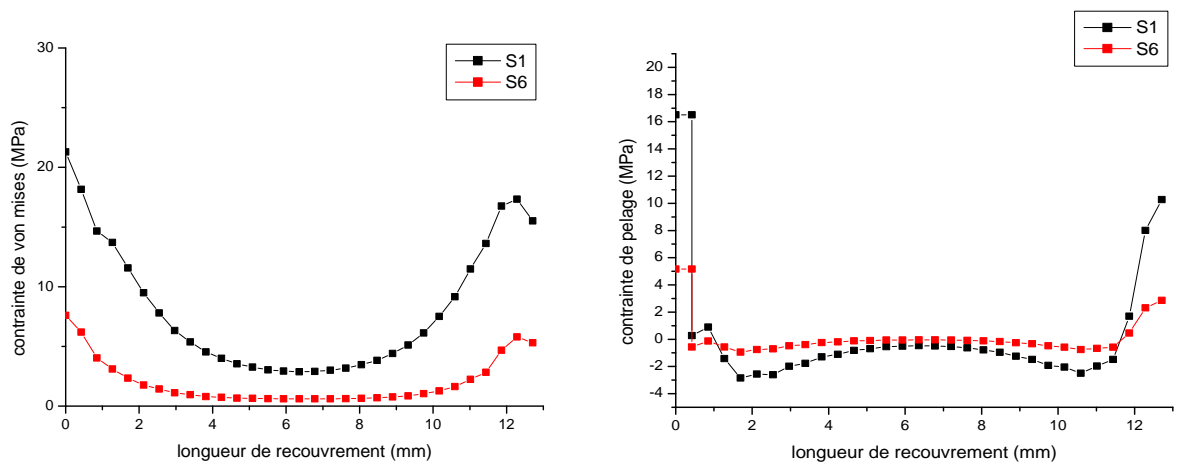


Figure II.58 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour verre/époxyde (S1=[0_{8V}]_s, S2=[0_{2V}/75_{2V}/-75_{2V}/90_{2V}]_s).

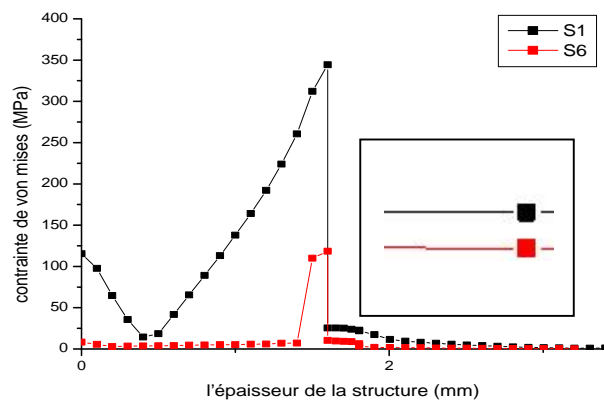


Figure II.59 : Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif cas fibre de verre séquence d'empilement (S1=[0_{8V}]_s, S2=[0_{2V}/75_{2V}/-75_{2V}/90_{2V}]_s).

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

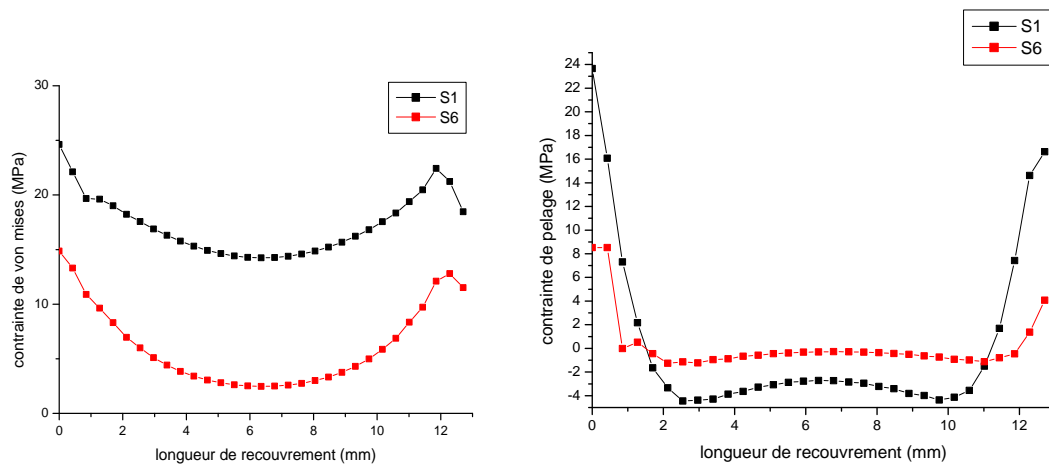


Figure II.60 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)- pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour carbone/époxyde (S1=[0_{8C}]_s , S2=[0_{2C}/75_{2C}/−75_{2C}/90_{2C}]_s).

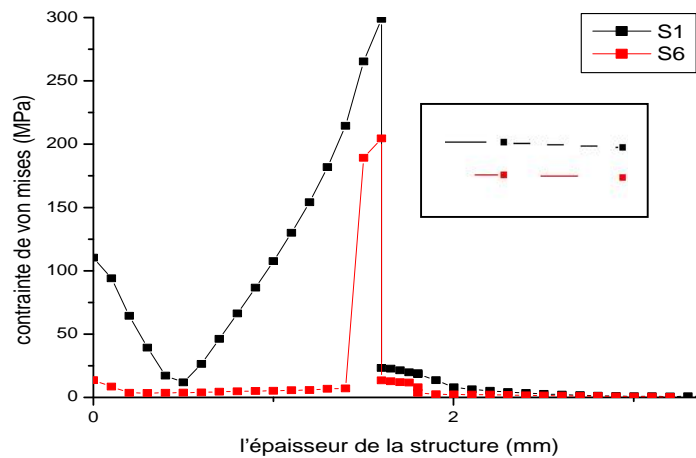


Figure II.61 : Transfert de charge d'une plaque à une autre travers l'adhésif cas fibre de carbone séquence d'empilement (S1=[0_{8C}]_s , S2=[0_{2C}/75_{2C}/−75_{2C}/90_{2C}]_s).

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

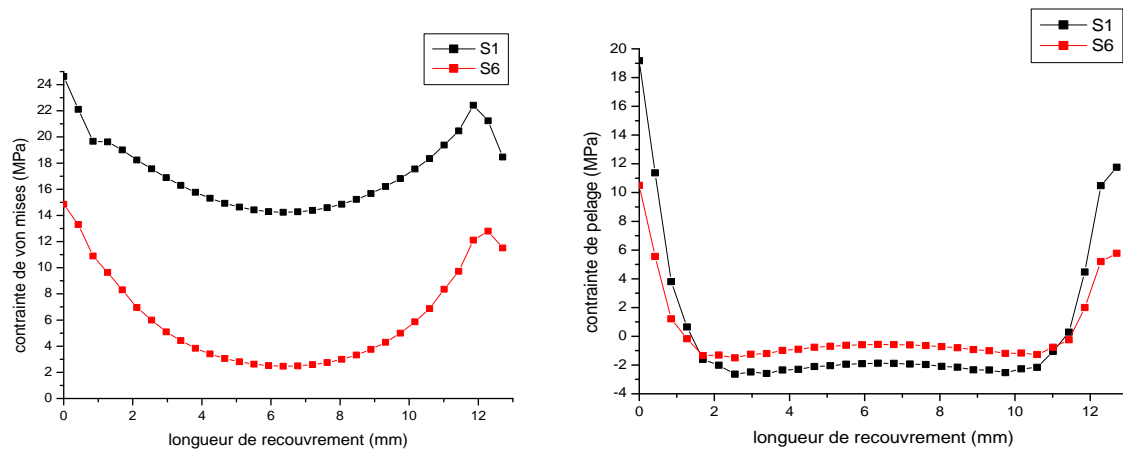


Figure II.62 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-pelage dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement pour bore/époxyde.

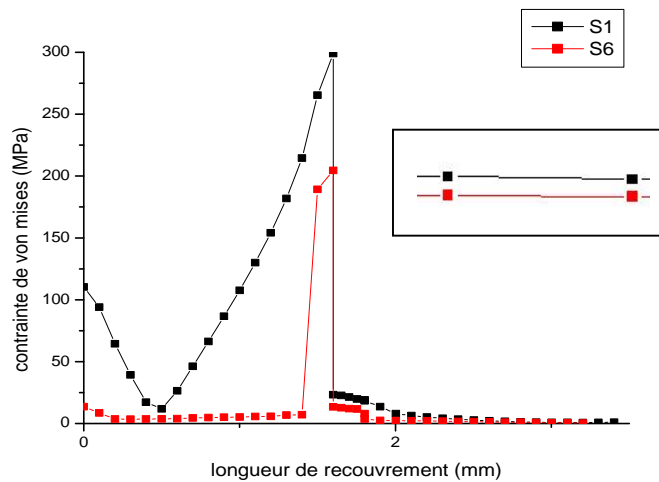


Figure II.63 : Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif cas hybride séquence d'empilement ($S1=[0_{8B}]_s$, $S2=[0_{2B}/75_{2B}/-75_{2B}/90_{2B}]_s$).

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

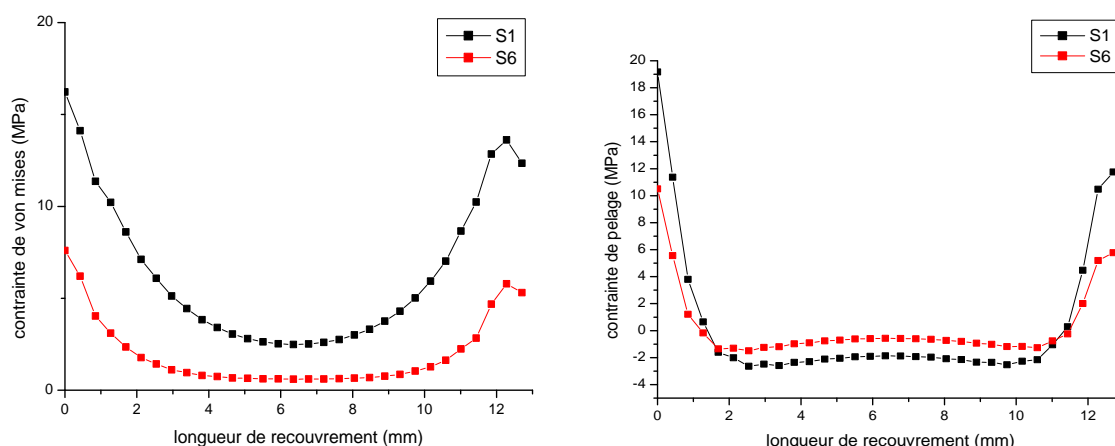


Figure II.64 : Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-pelage dans l'adhésif cas de fibre d'aramide avec séquence d'empilement ($S1=[0_{8A}]_s$, $S2=[0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s$).

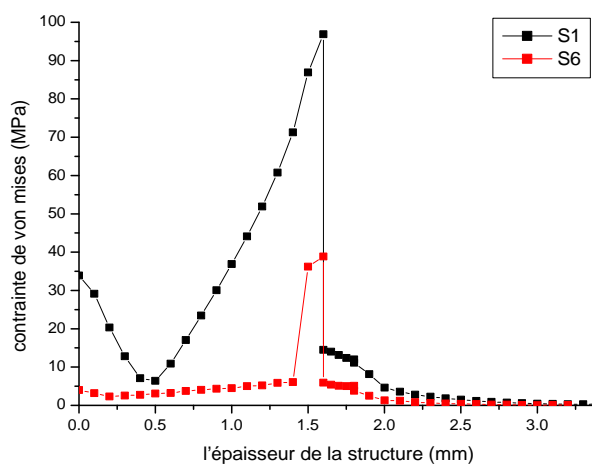


Figure II.65 Transfert de charge d'une plaque à une autre à travers l'adhésif cas de fibre d'aramide séquence d'empilement ($S1=[0_{8A}]_s$, $S2=[0_{2A}/75_{2A}/-75_{2A}/90_{2A}]_s$).

On remarque clairement que pour cette valeur de déplacement, la différence de comportement de l'adhésif est claire. La valeur de la contrainte de Von Mises dans la couche d'adhésif diffère selon la nature de la fibre et la séquence d'empilement.

Si les propriétés de la fibre sont faibles [cas d'aramide, verre], les contraintes dans l'adhésif sont faibles. Cette valeur diminue encore si on change la séquence d'empilement et l'adhésif absorbe

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

moins de contraintes. Par contre, si le composite présente de fortes propriétés mécaniques, l'adhésif absorbe plus de contraintes et donc des valeurs élevées.

En changeant la séquence d'empilement, une baisse de contraintes de Von Mises est à noter.

La modification de la nature et de la séquence d'empilement réduit les contraintes au niveau du cœur de l'adhésif.

Pour le composite de faibles propriétés mécaniques, le cœur d'adhésif reste pratiquement inactif. Par contre, pour le composite avec des propriétés mécaniques élevées, toute la zone de collage sera sollicitée.

La même remarque est à noter pour les contraintes de pelage figure II.64, si on change la nature de la fibre et la séquence d'empilement, la valeur de ses contraintes change. La valeur de la contrainte de pelage diminue quand le composite présente des propriétés mécaniques faibles, donc le risque de délaminage est absent.

Le risque de délaminage a un effet juste au niveau du bord, le cœur de l'adhésif reste inactif quelque soit la nature et la séquence d'empilement.

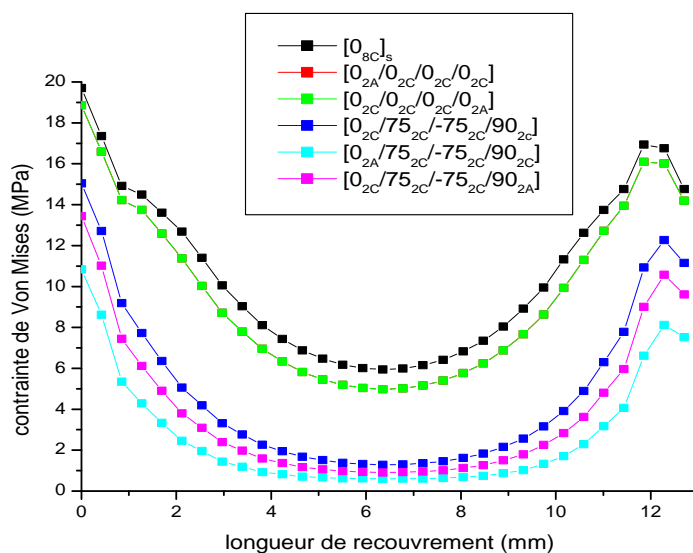


Figure II.66 : Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas hybride.

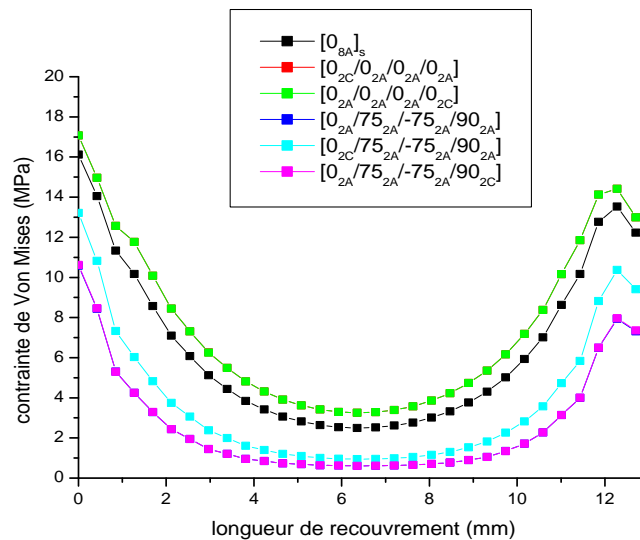


Figure II.67 : Distribution des contraintes de Von Mises dans l'adhésif pour différentes séquences d'empilement cas hybride.

La valeur de la contrainte de Von Mises de la couche d'adhésif dépend fortement de la nature des fibres. Les fibres qui ont des propriétés mécaniques faibles transmettent moins de charge à la couche d'adhésif et donc des valeurs faibles de la contrainte de Von Mises.

Pour ces composites, les bords de l'adhésif seront sollicités et donc le milieu de l'adhésif sera inactif

En modifiant les propriétés de la fibre du composite, les propriétés mécaniques augmentent et donc le composite devient résistant au déplacement imposé, par conséquent, la majorité de la charge imposée sera transmise à l'adhésif et donc des valeurs élevées de la contrainte de Von Mises

Pour le cas des composites avec des propriétés mécaniques élevées, toute la surface de collage sera sollicitée et donc le risque de délaminage sera probable.

En modifiant l'orientation des fibres, les propriétés mécaniques des composites deviennent faibles et donc quel que soit la nature du composite, l'adhésif sera sollicité juste sur les bords et le cœur de l'adhésif sera faiblement sollicité.

De même, la fibre dont les propriétés mécaniques sont élevées présente toujours des contraintes de Von Mises les plus élevées.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

Pour les composites hybrides : si on introduit des couches d'aramide dans les composites en carbone, les propriétés mécaniques des composites diminuent et donc la valeur de la contrainte de Von Mises diminue légèrement au niveau du bord et même au niveau de son cœur.

La différence de valeur dépend fortement de la position des couches d'aramide dans le composite hybride. La même remarque est à noter si on introduit deux couches en carbone dans le composite aramide.

La diminution en valeur de la contrainte de Von Mises dépend fortement de la position des couches d'aramide dans le composite en carbone et des couches de carbone dans le composite en aramide et de la séquence d'empilement.

Si on modifie la séquence d'empilement, les propriétés mécaniques du composite deviennent faibles et donc la diminution de la valeur de la contrainte de Von Mises sera très claire et dépend fortement de la position des deux couches introduites dans le composite hybride.

II.4.5 Analyse du transfert de charge suivant l'épaisseur

La distribution des contraintes suivant l'épaisseur de la structure montre une hétérogénéité de la distribution des contraintes de la P/A/P (plaque /adhésif/plaque) pour un déplacement de 0.1 mm, il faut appliquer plus de contrainte dans le composite qui a de fortes propriétés mécaniques. Par contre, pour le composite [verre, aramide], il faut moins de contrainte, c'est pour cela que les contraintes dans les plaques [carbone, bore] sont les plus élevées et donc on aura plus de contraintes dans l'adhésif et par conséquent, le risque de rupture est plus grand. En changeant la séquence d'empilement, les contraintes diminuent dans la plaque et par conséquent dans l'adhésif.

Pour le composite hybride, on a pris deux cas :

-cas ou les couches de carbone sont les plus dominants [6 couches carbonées et 2 aramides]

- cas ou les couches d'aramide sont les plus dominants [6 couches d'aramides et 2 carbonées]

Si le nombre de couche de carbone est dominant, les propriétés mécaniques du composite hybride sont élevées [mais moins que pour le cas où le composite est totalement en carbone], et donc des valeurs élevées de contraintes dans la couche d'adhésif.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

Si les couches d'aramide sont les plus dominantes dans le composite hybride, les propriétés mécaniques du composite sont un peu faibles et donc des valeurs faibles de contraintes dans la couche d'adhésif.

Si on change la séquence d'empilement [0/75/-75/90], les contraintes dans les plaques et l'adhésif diminuent, puisque pour cette séquence d'empilement, les propriétés mécaniques du composite hybride sont les plus faibles.

La disposition des couches de carbone par rapport aux couches d'aramide dans le composite hybride [CAAA, AAAC] ou bien les couche d'aramide par rapport aux couches de carbone [ACCC, CCCA] a une influence sur la valeur de la contrainte au niveau de l'interface plaque, adhésif (point A sur les courbes).

Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'analyser par la méthode des éléments finis la distribution des contraintes de Von Mises, pelage et de cisaillement dans un joint adhésif utilisé pour assembler deux plaques en composite.

Les résultats de l'analyse numérique par éléments finis en utilisant le code de calcul Abaqus ont montré l'efficacité de cette méthode dans la détermination des contraintes dans le joint adhésif.

- La valeur des différentes contraintes dans le joint adhésif dépend fortement, en premier lieu, de la valeur du déplacement imposé et de la nature des substrats.
- Le comportement de l'adhésif dépend des propriétés mécaniques du composite (la nature de la fibre).
- Quelque soit la nature de la fibre, on a toujours de fortes contraintes au niveau des bords de l'adhésif et des valeurs faibles au niveau du milieu de l'adhésif.
- Le cœur de l'adhésif devient de plus en plus actif si les propriétés mécaniques du composite sont très élevées.
- Pour la plupart des cas, le composite présente des caractéristiques mécaniques élevées par rapport à celles de l'adhésif, donc un faible déplacement imposé entraîne l'adhésif dans son domaine plastique.
- La séquence d'empilement a aussi un rôle déterminant sur la valeur des contraintes, si la séquence d'empilement présente des orientations des fibres suivant la direction de

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

chargement, le composite devient résistant et donc la majorité de la charge appliquée sera transmise à l'adhésif, donc des valeurs élevées des contraintes.

- Par contre, si l'orientation des fibres tend vers 90° , le composite aura des propriétés mécaniques plus faibles selon la direction de chargement et donc une petite quantité de la charge sera transmise vers l'adhésif, donc de faibles valeurs des contraintes.
- La méthode de simulation du composite comme étant un seul bloc et multicouches a une importance sur la valeur des contraintes dans le joint adhésif.
- L'utilisation d'un composite hybride a aussi une importance dans la réduction des contraintes dans le joint adhésif.
- Le plus important dans les composites hybrides est que les couches en milieu du composite doivent être en carbone ou en aramide.
- Le composite qui a de faibles propriétés mécaniques transmet moins de contraintes vers adhésif. Par contre, celui qui a des propriétés mécaniques élevées transmet presque toute la charge appliquée vers l'adhésif.

Chapitre II Effet de la géométrie et la séquence d'empilement du composite sur le comportement du joint de l'adhésif

REFERENCES

- [1] Campilho RDSG, De Moura MFSF, Domingues JJMS. Modelling single and double-lap repairs on composite materials. *Compos Sci Technol* 2005;65:1948–58.
- [2] Demoura, M.; Goncalves, J.; Chousal, J. & Campilho, R. (2008). *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 28 : 419-426.
- [3] M. MADANI KOUIDER, Etude numérique expérimentale de la technique de réparation des défauts cas aluminium avec composite carbone-époxyde [thèse soutenue en 2007, UDL de Sidi Bel abbes].
- [4] ABAQUS finite element programs. ABAQUS iStandard 5.6. Hibbitt. Pawtucket, RI 028: Karlsson and Sorensen, Inc.
- [5] Marzi, S.; Villalonga, L.; Poklitar, M. & Kleiner, F. (2008). *Usage of Cohesive Elements in Crash Analysis of Large, Bonded Vehicle Structures*. LS-DYNA Anwenderforum Bamberg.

Chapitre III

Effet de vieillissement de l'adhésif sur la résistance d'un assemblage collé

III-1. Introduction

L'étude de la durabilité d'un matériau ne revient pas systématiquement à estimer la durée de vie d'un système. Il s'agit en réalité de vérifier que l'assemblage assurera une fonction pérenne au cours de sa vie, et cela passe par une conservation de ses propriétés voire un abatement acceptable sous l'effet du vieillissement. Dans l'environnement aéronautique, les contraintes auxquelles le joint est soumis sont sévères [1]. La durabilité des assemblages structuraux est un problème récurrent, d'une importance capitale pour les industriels du secteur aéronautique, en conditions de service, les assemblages collés structuraux sont généralement soumis à deux types de sollicitations qu'elles soient statiques ou périodiques: les contraintes mécaniques, les sollicitations environnementales, principalement l'humidité et la température. L'effet individuel ou combiné de ces sollicitations modifie non seulement le comportement de l'adhésif de l'assemblage mais agit également sur les interactions interfaciales et les forces d'adhésion. Ces sollicitations sont donc les facteurs de la diminution de la résistance mécanique des assemblages, de la perte de la fonction adhérence et éventuellement d'une diminution de la durée de vie des assemblages collés [2].

L'expérience de ces dernières années souligne l'importance des effets de l'environnement (humidité et température) sur les propriétés mécaniques des matériaux et la stabilité de leurs performances à long terme (vieillessement). L'eau agit à l'interface milieu extérieur/polymère, mais aussi au cœur du polymère, ce qui est possible grâce au déplacement des molécules d'eau dans la matière, appelé phénomène de diffusion. Au cours d'un vieillissement hygrothermique, la présence d'eau au sein des matériaux provoque une détérioration des propriétés mécaniques et entraîne ainsi une dégradation irréversible des propriétés des matériaux [3].

Au cours de sa durée de vie, un joint collé sera soumis à une charge environnementale telle qu'une humidité et / ou une température élevée.

L'adhésif époxyde est sensible aux attaques d'humidité car il a des groupes hydrophiles qui attirent les molécules d'eau [4-5]. L'hydrophilie d'un époxyde peut être provoquée par les groupes hydroxyle (OH-), qui peuvent également former des liaisons hydrogène avec des molécules d'eau. L'humidité absorbée peut agir comme un plastifiant, un solvant ou un agent d'hydrolyse pour certains polymères et adhésifs [6]. Certains effets, tels que la plastification et le gonflement, sont réversibles. La diminution des propriétés mécaniques

de l'adhésif lors de l'absorption de l'humidité s'accompagne également d'une perte de résistance articulaire [7]. La force articulaire n'est pas complètement perdue mais devient constante à un certain niveau [8].

Des investigations montrent une diminution de la résistance du joint lors de l'immersion dans l'eau déminéralisée. En général, cette perte de propriétés est attribuée à la dégradation de l'adhésif ou de l'interface [9,10].

Plusieurs études ont porté sur le vieillissement humide des joints adhésifs. Les environnements humides peuvent être très sévères, entraînant des modifications réversibles ou permanentes de l'adhésif (plastification, gonflement, hydrolyse) [11-12] et de l'interface substrat / adhésif (corrosion, fissuration, décollement, etc.) comme a été décrit par Bowditch et d'autres [13,14]. En conséquence, de nombreux travaux ont été consacrés à la caractérisation de la durabilité des joints collés [15].

Popineau et Shanahan [16] ont étudié un assemblage composite/aluminium afin de trouver une relation entre l'énergie de fracture de l'assemblage à l'absorption d'eau adhésive. Fernando et Harjoprayitno [17] ont utilisé des éprouvettes (DCB) pour déterminer l'énergie en utilisant des tests de fatigue et le vieillissement dans l'eau distillée.

De nombreux chercheurs ont beaucoup travaillé sur la modélisation de la durabilité [18-19] et soulignent que pour pouvoir prédire comment le vieillissement affectera le comportement à long terme des structures collées, il faut d'abord disposer de deux ensembles de données :

- Données de diffusion pour l'adhésif et
- Propriétés mécaniques de l'adhésif dépendantes de l'humidité.

Pour expliquer l'absorption de l'eau par un adhésif époxyde, on a émis l'hypothèse que la concentration d'équilibre de l'eau pourrait être gouvernée par le volume libre et les défauts de l'adhésif. Les molécules d'eau diffusent d'un vide vers un autre constituant une voie préférentielle d'ingression [20]. Mais cette théorie est discutable car les polymères riches en volume libre peuvent avoir une très faible hydrophilicité [21]. Pour de nombreux auteurs, l'absorption est plus susceptible d'être une attraction des molécules polaires d'eau dans le réseau par des groupes hydrophiles de l'adhésif tels que OH- ou NH- pour former

de simples liaisons hydrogène [22] ou des associations plus complexes [23]. Le nombre de ces groupes détermine la concentration d'équilibre de l'eau (ou solubilité) de l'adhésif.

La concentration d'eau dans l'adhésif n'est pas homogène et dépend du temps d'immersion. Une loi classique de Fick donne généralement une bonne prédiction de l'absorption de masse d'un modèle époxyde immergé dans l'eau [24,25]. Mais pour un réseau ou pour des conditions environnementales spécifiques, des lois plus complexes [26], comme un modèle de sorption de la nature à deux phases (modèle de Fick à deux étages) [27], un modèle de sorption d'humidité à deux phases (modèle de Langmuir) ou le modèle de diffusivité dépendant du temps ou de la concentration [28,29,30] donnent une meilleure prédiction.

L'effet de l'humidité a été étudié par de nombreux chercheurs, car l'eau est une substance qui remplace potentiellement le lien entre l'adhésif et le substrat, en affaiblissant la liaison. Mubashar et autres ont étudié les effets d'absorption et de désorption de l'humidité dans les joints adhésifs entre les substrats en aluminium 2024-T3 [31]. Il a été constaté que la résistance des joints se dégradait avec l'absorption de l'humidité, mais pouvait se rétablir si l'humidité était désorbée. Cependant, il a été noté que les joints secs ont échoué de façon cohésive. Sugiman et Crocombe [32] ont étudié l'effet de l'humidité sur la réponse statique des assemblages collés à simple recouvrement. Les résultats des tests ont montré que les propriétés mécaniques se dégradaient linéairement avec la teneur en humidité [32].

Adams [33] a conclu qu'il n'existait pas de méthode simple pour déterminer la durabilité à long terme des essais accélérés et qu'une température et une humidité excessives déclencheraient des mécanismes de dégradation non représentatifs. L'étendue et les caractéristiques de la dégradation de l'environnement dans les joints collés ne peuvent être généralisées et dépendent du système spécifique d'intérêt lié. En général, les tests accélérés ont tendance à surestimer la réduction de la force articulaire. Adams a soutenu qu'aucune procédure accélérée pour les matériaux dégradants ne correspond parfaitement aux conditions de service réelles.

La plupart des études citées ci-dessus ont été consacrées à l'étude de l'effet du vieillissement sur la dégradation des propriétés mécaniques du joint adhésif et adhère sous la charge de traction. Notre objectif est d'analyser par la méthode des éléments finis l'effet de l'absorption d'eau par l'adhésif sur la résistance de l'assemblage collé. La résistance du

joint a été quantifiée en déterminant la distribution des contraintes, du pelage, du cisaillement et de Von Mises par rapport au joint adhésif.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la variation des propriétés de l'adhésif époxyde bi-composant type Adekit A140 sous l'effet de l'absorption d'eau. Les propriétés mécaniques de l'adhésif (le module d'Young E), ont été déterminées après chaque durée d'immersion ensuite utilisées dans la modélisation numérique.

Les résultats expérimentaux utilisés dans notre travail sont obtenus au niveau de laboratoire (LASIE) en France dans le cadre des travaux des Thèses de Mr K.MADANI et Mr L.REZGANI du vieillissement de l'adhésif et les tests de traction accompagnés pour chaque durée de vieillissement et température.

III-2. Généralités sur les types de vieillissement

On distingue dans la littérature plusieurs types de vieillissement, le vieillissement étant considéré comme une évolution lente des propriétés du matériau, à partir d'un état de référence, résultant de son instabilité propre ou de l'environnement. Cette évolution peut concerner la structure chimique des macromolécules, la composition du matériau (pénétration ou départ de petites molécules) ou son état physique (fraction de volume libre, contraintes internes). Il est reconnu qu'en dessous de sa température de transition vitreuse (T_g), un polymère n'est généralement pas dans un état d'équilibre thermodynamique. En effet, au cours d'un refroidissement, le matériau se fige avec un excès de volume libre et d'enthalpie au passage de la zone de transition vitreuse. Le vieillissement physique résulte alors d'une restructuration progressive des molécules dans le polymère vers une configuration plus stable. De nombreuses études dans ce domaine menées sur les polymères et sur les composites à matrice organique ont montré que les propriétés dépendant de la mobilité moléculaire sont significativement affectées.

Contrairement au le vieillissement physique, le vieillissement chimique se réfère à un changement irréversible dans le réseau moléculaire dû à des réactions chimiques. Aux températures considérées, les processus chimiques les plus importants concernent les réactions de coupure de chaînes, de post-réticulation ou d'oxydation. Les phénomènes de post-réticulation ou de thermolyse impliquent respectivement une augmentation ou une diminution de la densité de réticulation. Cette variation s'accompagne généralement de la T_g et des propriétés mécaniques. Ce type de vieillissement modifie peu la forme des

courbes de traction des polymères, mais joue un rôle important sur les propriétés à rupture et notamment sur l'allongement à rupture qui diminue avec le temps de vieillissement [34].

III-3. Les facteurs influençant la durée de vie des joints collés

Même pour un joint collé présentant des propriétés optimales à l'élaboration, il est impossible de garantir le maintien de ces dernières en fonctionnement. En effet, en service, les joints sont soumis à des sollicitations qui peuvent l'endommager, ce sont :

- La température,
- L'application d'une contrainte mécanique,
- L'environnement, l'humidité dans la plupart des cas.

Ce sont les trois facteurs d'endommagement de l'adhésif lui-même en tant que polymère, mais aussi du joint. Dans le cas du joint, les mécanismes d'endommagement sont plus complexes que dans le cas de l'adhésif massique. Une fois au sein de l'assemblage, l'eau affaiblit la tenue du joint par une combinaison de mécanismes impliquant à la fois l'interface et l'adhésif lui-même. Comme l'eau, chacun des facteurs température et contrainte a, à lui seul, une action délétère sur la résistance mécanique des assemblages et peut conduire à une perte totale de l'adhérence [35].

III-4. L'eau et ses mécanismes de diffusion

L'eau est un des facteurs principaux agissant sur le vieillissement des adhésifs, d'une part parce que l'eau présente une grande permittivité (fortes paires d'ions contribuent aux forces interfaciales) mais aussi parce qu'elle a une grande tension de surface (ceci agit sur la formation de liaisons faibles entre l'adhésif et le substrat métallique). Le principal effet macroscopique de la pénétration de l'eau dans un assemblage collé est la chute importante des propriétés mécaniques, c'est-à-dire des contraintes à la rupture et des modules d'élasticité en cisaillement et en traction.

III-4.1. Diffusion de l'eau dans un adhésif

L'évaluation de l'affaiblissement de l'assemblage nécessite, tout d'abord, l'étude du comportement au vieillissement de l'adhésif massique, à travers la détermination des

cinétiques d'absorption d'eau et la caractérisation des effets physiques et chimiques de l'eau sur le polymère. Le modèle le plus simple pour la diffusion d'un solvant (espèce diffusante) dans un solide est donné par la loi de Fick (1855). Le gradient de concentration du solvant induit un flux qui lui est proportionnel, c'est donc le moteur de la diffusion. La vitesse de diffusion est caractérisée par le coefficient de diffusion D . La première loi de Fick donnée par l'équation (III-1) suivante :

$$\vec{\phi} = -D \overrightarrow{\text{grad}C} \quad \text{III.1}$$

Ou

D : coefficient de diffusion du milieu en mm^2/s ,

C : concentration du solvant au sein du milieu.

Le signe négatif indique que le flux est dirigé des zones à concentration élevée vers celles à concentration plus faible. La quantité de matière diffusant dans la direction x par unité de surface et par unité de temps est appelée le flux et est relié au gradient de concentration ($\partial c / \partial x$) par la première loi de Fick.

La seconde loi de Fick fait intervenir le temps, on considère que l'eau pénètre librement et sans interaction avec les composants. C'est alors la seconde loi de Fick qui s'applique et s'écrit :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad \text{III-2}$$

Si la diffusion est unidirectionnelle dans la direction x , comme par exemple lors du phénomène de sorption dans un film fin, la seconde loi de Fick s'écrit plus simplement :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{III.3}$$

Ces équations ont des solutions appropriées à des conditions aux limites données. La cinétique de diffusion est donnée par la résolution de l'équation (III-3). Aux temps courts, cette solution s'écrit :

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{l} \left(\frac{Dt}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{III.4}$$

Où M_t est la masse d'eau absorbée au temps t , M_∞ la masse d'eau absorbée à saturation et l l'épaisseur de l'échantillon.

Le coefficient de diffusion peut être déterminé expérimentalement, si la prise en diffusant ne dépasse pas 60% (partie linéaire de la courbe), par la tangente de la courbe

$$\frac{M_t}{M_\infty} = f \left(\frac{\sqrt{t}}{l} \right) \quad , \text{ On en déduit le coefficient de diffusion } D \text{ par la relation :}$$

$$D = \frac{\pi a^2}{16M_\infty^2} \quad \text{III.5}$$

La courbe est une fonction linéaire en début d'absorption et qui s'incurve au moment de la saturation, quand le matériau se met en équilibre avec l'environnement [Figure III-1].

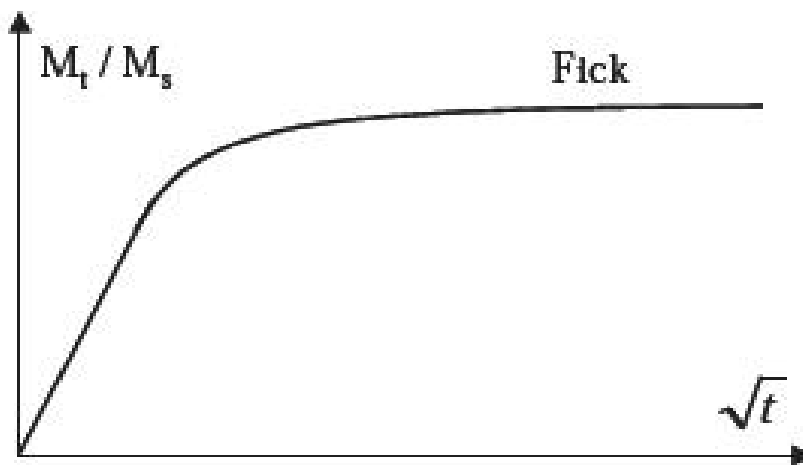


Figure III-1: Courbe de diffusion de type Fick [6].

Où a : est la pente de la tangente à la courbe.

III-4.2. Conséquences de l'absorption d'eau

La pénétration des molécules d'eau dans le réseau peut induire simultanément

plusieurs phénomènes qui constituent globalement le vieillissement humide :

- Une plastification du réseau (diminution de la température de transition vitreuse) : En effet, l'eau va se fixer sur les sites hydrophiles du polymère et rompre des liaisons physiques inter ou intra-macromoléculaires. Il en résulte une augmentation de la mobilité des chaînes, qui se traduit naturellement par un décalage de la température de transition vitreuse vers les basses températures. Le phénomène de plastification s'accompagne généralement d'une diminution importante des propriétés mécaniques de l'adhésif (contrainte à la rupture, module d'élasticité), mais aussi d'une augmentation notable de la ductilité.
- Un gonflement du réseau : la rupture des liaisons physiques conduit également à un relâchement général des mailles du réseau qui favorise encore l'insertion de nouvelles molécules d'eau et le gonflement global du polymère. Dans les joints adhésifs, ce gonflement n'est pas homogène et génère des contraintes mécaniques supplémentaires [36].

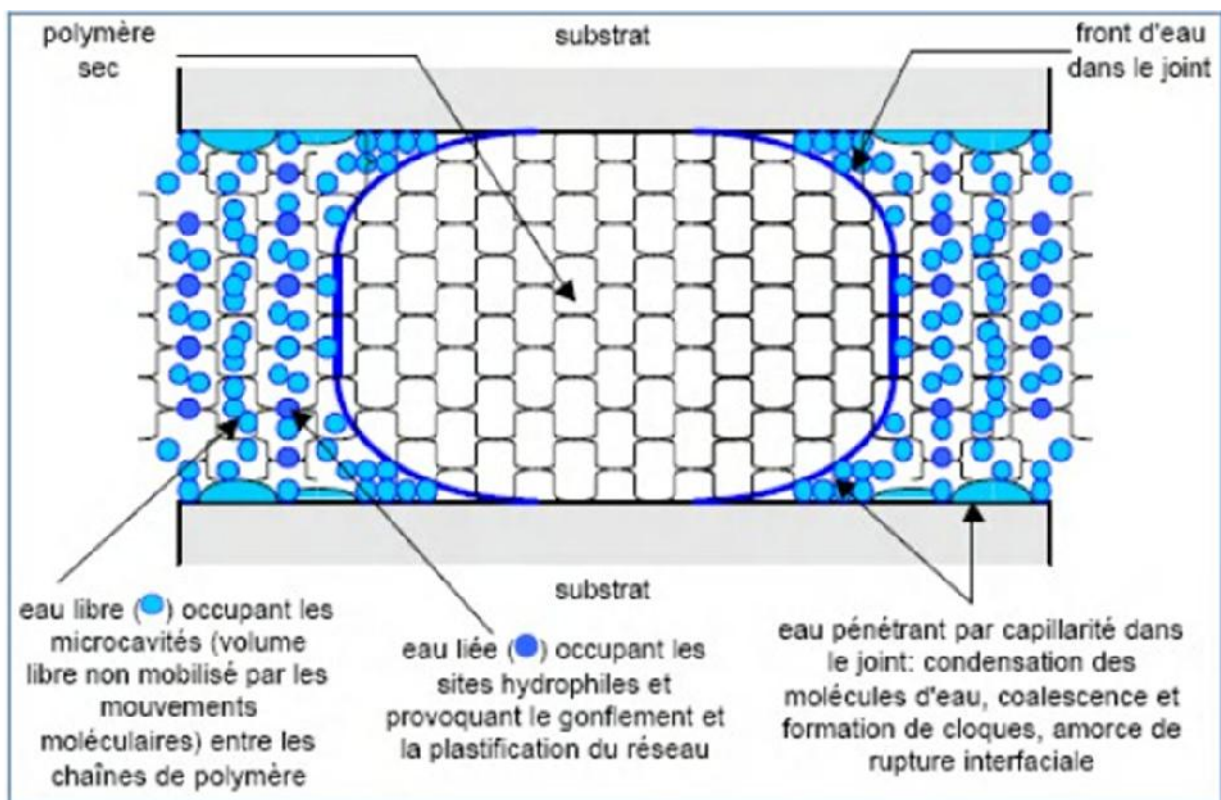


Figure III-2: Schéma récapitulatif des différents modes de pénétration de l'eau dans un assemblage collé [37].

Ces différents phénomènes devront être pris en compte dans l'étude du vieillissement des assemblages collés. Le tableau III-1 résume l'ensemble des actions que l'eau peut avoir sur un polymère, une fois qu'elle a pénétré le réseau.

	Effet	Causes	Conséquences	Schématisation
Réversible	Plastification	<ul style="list-style-type: none"> • Pénétration de l'eau dans le réseau tridimensionnel • Rupture de liaisons secondaires responsables de la cohésion du matériau 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution du module d'Young • Diminution de la limite d'élasticité • Augmentation de la déformation à rupture 	<p>Zones hachurées : groupements polaires.</p> <p>Rupture par l'eau des liaisons secondaires dans le polymère, d'après [Verdu, 1990]</p>
	Evolution de la température de transition vitreuse T_v	<ul style="list-style-type: none"> • L'effet plastifiant entraîne une augmentation de la mobilité moléculaire • Changements de conformation pour des températures inférieures 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la T_v • Loi des mélanges applicable pour calculer nouvelle T_v $\frac{1}{T_V} = \frac{w_1}{T_{V1}} + \frac{w_2}{T_{V2}}$ <p>avec T_{V1} la T_V des composants et w_i le pourcentage massique des composants.</p>	<p>Etat initial</p> <p>Penetration du solvant</p> <p>○ ○ ○ molécule de solvant ~~~~~ chaîne macromoléculaire (dans la réalité, les chaînes ne sont pas parallèles)</p> <p>Plastification par un solvant, d'après [Colombini, 2002]</p>
	Réticulation secondaire	Mouvements des petites molécules facilité	Les molécules n'ayant pas réagi se combinent	
Irréversible	Gonflement	<ul style="list-style-type: none"> • Dans un premier temps, les molécules d'eau se placent dans le volume libre • Puis une fraction d'eau se lie au polymère par liaisons hydrogène 	<p>Désenchevêtrement des chaînes</p> <p>Possibilité d'endommagement physique irréversible</p>	
	Hydrolyse	L'eau réagit avec certains groupements du réseau Soit latéraux (rare) Soit au sein même de la chaîne	Coupure du squelette perte, à terme, des propriétés mécaniques	$\sim X-Y \sim + H_2O \longrightarrow \sim X-OH + H-Y \sim$ <p>Equation générale de l'hydrolyse, d'après [Verdu, 1990]</p>
	Lessivage	départ des molécules d'adjuvants présentes à la surface puis diffusion des molécules du cœur vers la surface.		<p>Exemples de mécanismes de lessivage ou d'exsudation, d'après [Verdu, 1990]</p>

Tableau III-1 : Différentes actions de l'eau sur un polymère [38].

III.5. Analyse et résultats

III.5.1 Préparation de l'adhésif

L'adhésif se présente sous forme de liquide visqueux et afin d'avoir des échantillons massifs de cette adhésif, on a injecté le liquide visqueux dans un moule en téflon conçu spécialement pour réaliser des éprouvettes en traction, une fois l'opération terminée, le moule sera laissé un minimum de trois jours afin que l'adhésif sera réticulé (figure III.3).

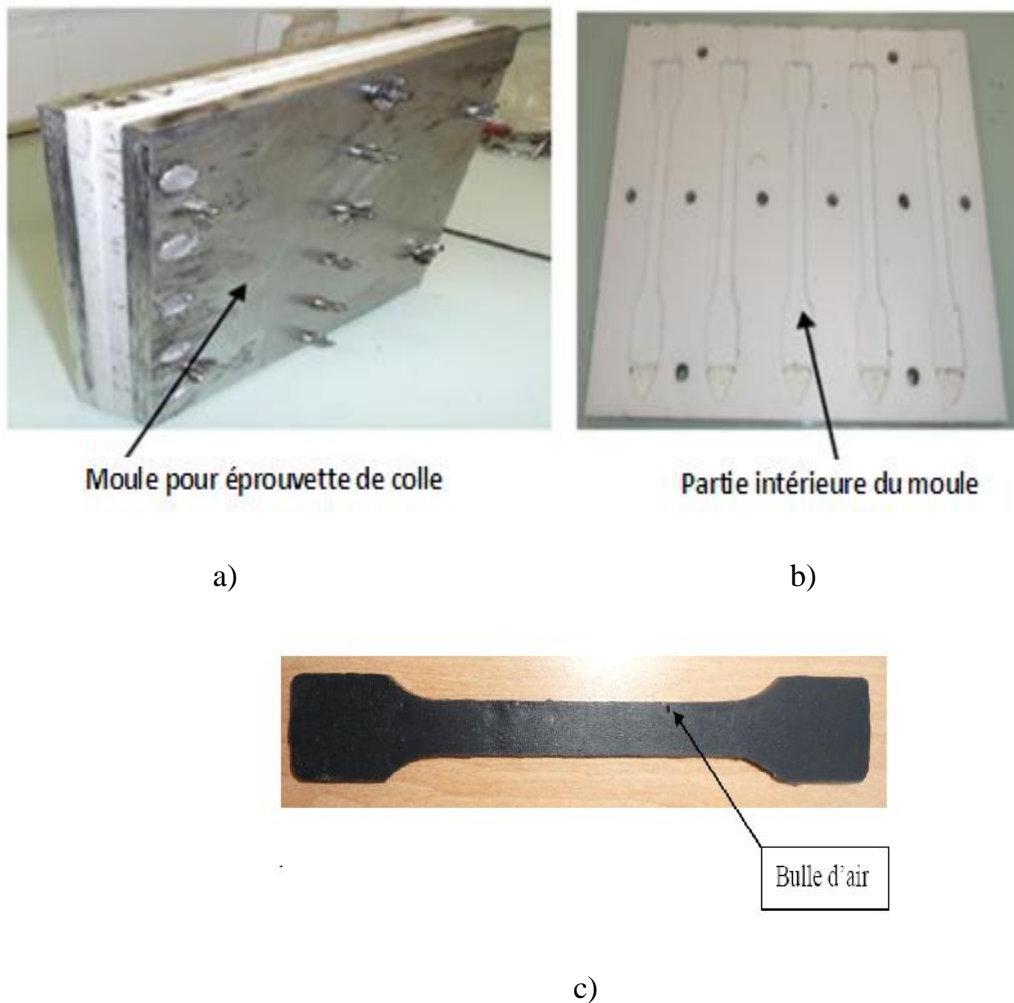


Figure III.3 : Réalisation des éprouvettes en traction :

a) Moule, b) Partie du moule, c) Eprouvette,

Ces échantillons ont été mis dans un bac d'eau distillée puis introduit dans une enceinte climatique pour effectuer un vieillissement hygrothermique (figure III.4).

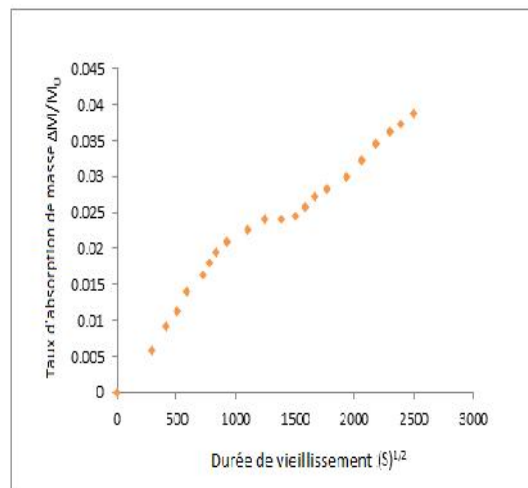


Figure III.4 : Bac pour immerger les éprouvettes et enceinte climatique.

Des mesures de masse pour les échantillons de l'adhésif, avant et après chaque durée d'immersion dans l'eau, ont été effectuées sur une balance de grande précision (figure III.5).



(a)



(b)

Figure III.5 : a) Balance pour les mesures de masse des échantillons de l'adhésif.

b) Taux d'absorption de masse d'eau durant le vieillissement.

III.5.2. Méthodes d'étude du vieillissement de l'adhésif en immersion dans l'eau

Pour déterminer les propriétés mécaniques après le vieillissement d'une structure collée par l'adhésif, il est primordial de connaître l'évolution des propriétés mécaniques des substrats et de l'adhésif au cours de la durée de vieillissement afin de prévoir le comportement de l'assemblage en vieillissement.

On a choisi un adhésif époxyde bi-composant type ADEKIT A140 fait par la compagnie d'AXSON. L'adhésif est choisi sur la base de son utilisation dans la construction et la réparation des structures aérospatiales pour suivre le processus de diffusion de l'eau dans ce matériau et l'évolution de ces caractéristiques mécaniques au cours du temps.

On a supposé pour la partie numérique que seul l'adhésif .

Des éprouvettes de l'adhésif ont été pesées avant et après l'immersion pour déterminer la masse d'eau absorbée par l'adhésif après chaque temps d'immersion. Les mesures de masse effectuées sur l'adhésif ont été réalisées sur une balance numérique et les résultats sont représentés dans la figure III.7. Le taux d'absorption d'eau est donné par l'expression suivante :

$$\Delta M(\%) = \frac{M_f - M_0}{M_0} \quad \text{III- 6}$$

M_f : la masse de l'échantillon après l'immersion

M_0 : la masse de l'échantillon avant l'immersion.

Les essais de traction sur l'adhésif massique après chaque durée d'immersion ont été effectués par Mr K. MADANI et Mr L.REZGANI au laboratoire LASIE à la Rochelle en France. Ces essais ont été réalisés sur une machine Instron de capacité de 50KN à une vitesse faible de 0,3 mm/min, après chaque durée d'immersion, les mesures des déformations ont été faites par un extensomètre collé directement sur l'échantillon (Figures III.6).

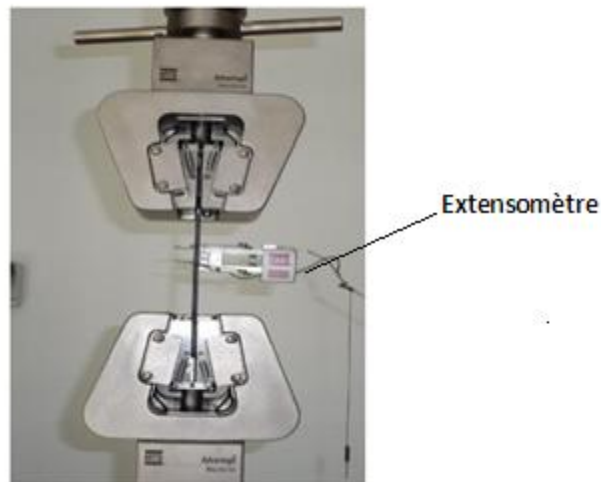


Figure III.6 : Fixation de l'éprouvette adhésive sur la machine de traction.

III.5.3. Caractérisation de l'adhésif non vieilli

Pour obtenir les caractéristiques de l'adhésif (test des éprouvettes), des essais de traction sont effectués sur des éprouvettes standards.

La courbe moyenne des essais de traction effectués sur trois échantillons est représentée sur la figure III.7. Les échantillons non vieillis présentent un comportement fragile et donc l'absence d'un domaine plastique. La courbe est linéaire jusqu'à une déformation autour de 0,001, liée à l'élasticité de l'adhésif.

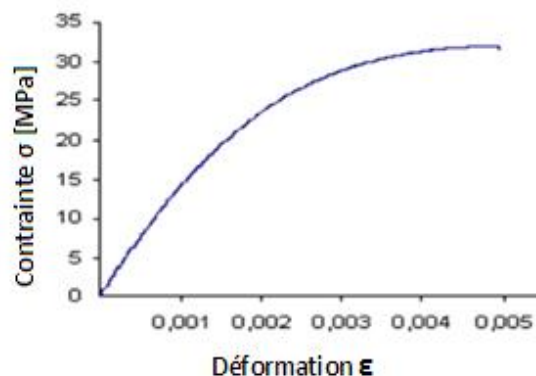


Figure III.7 : (a) Courbe de traction contrainte / déformation de l'adhésif non vieilli [38].

La pente de la partie linéaire permet d'obtenir le module d'Young qui est d'environ 2500 Mpa, cette valeur étant une moyenne de plusieurs tentatives en raison de la présence de bulles d'air

et d'autres défauts présents dans les échantillons élaborés. Ces bulles d'air étaient des zones de concentration de contraintes et qui seront alors des sites privilégiés pour l'absorption de l'eau. La rupture est toujours initiée à partir d'un défaut matériel dans la partie efficace, invisible avant l'essai de traction.

III.5.4. Caractérisation de l'adhésif vieilli

Les éprouvettes de l'adhésif à l'état massif réalisées par le moule ont été pesées et introduites dans un bac d'eau qui est introduit à son tour dans l'enceinte climatique, la température de vieillissement étant variable 20°C, 40°C et 60°C. Pour chaque température et après chaque durée d'immersion.

Les éprouvettes ont été essuyées avec un papier filtre et avant d'être testées sur la machine d'essai de traction après. Les résultats obtenus sont présentés dans les parties suivantes.

III.5.4.1. Vieillissement dans de l'eau distillée à 20 ° C

La figure III.8 montre la courbe contrainte / déformation pour divers temps d'immersion dans de l'eau distillée à 20 ° C. Lorsque les éprouvettes adhésives sont caractérisées par une traction uniaxiale avant immersion dans l'eau distillée, leur comportement est généralement fragile et aucun seuil de plasticité n'est observé. Mais ce comportement change après vieillissement avec le temps. En effet, l'absorption d'eau par le polymère change son comportement d'un état rigide à un état ductile, ce qui est bénéfique pour l'adhésif lorsqu'il travaille en cisaillement [40,41]. Lorsque les molécules d'eau pénètrent dans le réseau d'adhésif, elles rompent les interactions polymère-polymère et créent des interactions eau-polymère. Ainsi, l'effet du vieillissement sur l'adhésif est négatif pour la résistance du matériau mais procure un gain de ductilité.

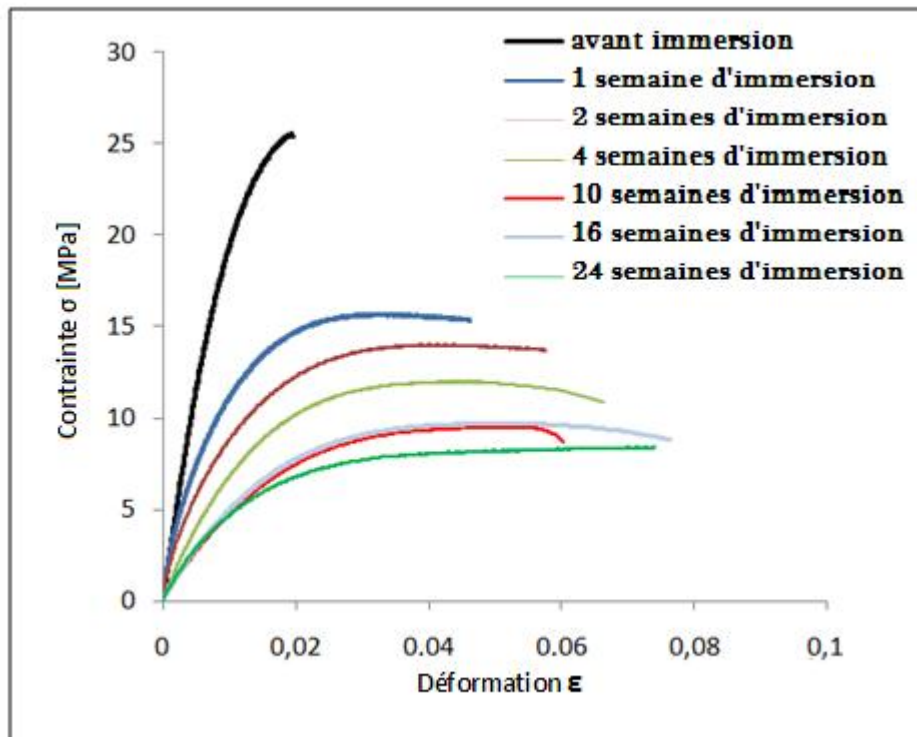


Figure III.8. Courbes de contrainte / déformation de l'adhésif pour différents temps d'immersion dans de l'eau distillée à 20 ° C.

III.5.4.2 Vieillissement dans de l'eau distillée à 40 ° C

La figure III.9 présente la variation des propriétés mécaniques en fonction des temps d'immersion dans l'eau à 40 ° C. L'absorption d'eau à 40 ° C entraîne une modification du comportement mécanique des éprouvettes testées. La température accélère le vieillissement de l'adhésif et provoque une plastification importante du polymère. Ainsi, pour de courtes durées d'immersion (une semaine), on observe une baisse importante de la courbe de traction, ce qui implique une partie élastique inférieure et un effet plastifiant plus important du polymère. Les deux comportements varient inversement avec l'augmentation du temps d'immersion.

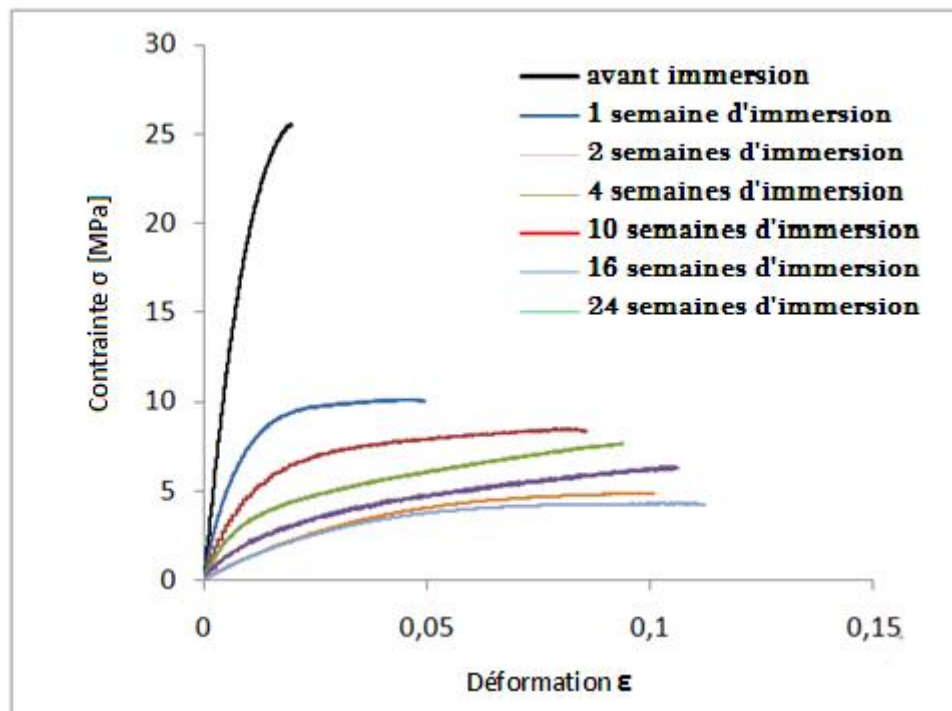


Figure III.9. Courbes de contrainte / déformation de l'adhésif pour divers temps d'immersion dans de l'eau distillée à 40 ° C.

III.5.4.1.3 Vieillissement dans de l'eau distillée à 60 ° C

La figure III.10 montre clairement un changement significatif du comportement mécanique des éprouvettes vieillis à divers temps d'immersion à 60 ° C par rapport aux échantillons non vieillis. Dans la première semaine de vieillissement, le domaine du comportement plastique augmente considérablement. De l'autre côté, l'élasticité diminue en raison des changements physiques et chimiques de l'adhésif vieilli. Ces changements sont très importants à haute température (60 ° C).

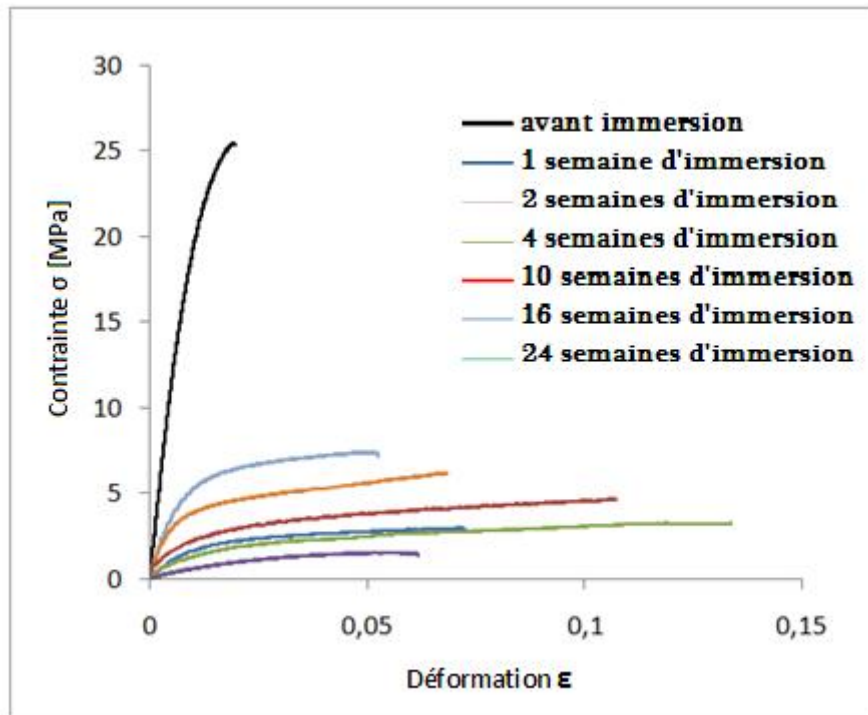


Figure .III.10. Courbes de contrainte / déformation de l'adhésif pour divers temps d'immersion dans de l'eau distillée à 60 ° C [39].

Au cours du vieillissement, la couleur de la solution d'eau distillée a été modifiée, ce qui peut s'expliquer par la perte de composants organiques de l'adhésif dans l'eau. Cette couleur s'intensifie avec le temps de vieillissement des spécimens et la température.

III.5.5. Variation du module d'Young en fonction de la durée d'immersion

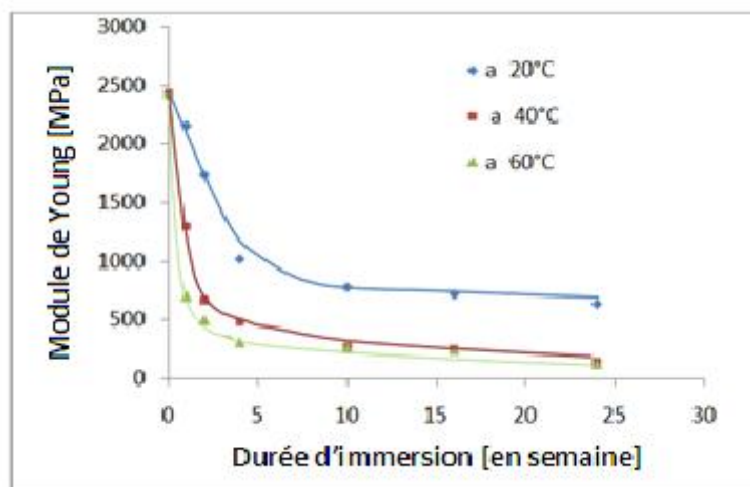


Figure III.11 Module d'Young pour diverses conditions de vieillissement.

On remarque une chute considérable du module d'Young avec l'augmentation de taux d'absorption d'eau, c'est-à-dire que la résistance mécanique de l'adhésif diminue de manière significative avec l'absorption d'eau. Le temps d'immersion a un effet considérable sur le comportement mécanique de l'adhésif. On note aussi après une certaine durée que la résistance de l'adhésif demeure pratiquement constante en raison de la saturation en absorption d'eau.

L'analyse des résultats expérimentaux du vieillissement de l'adhésif permet de faire les remarques suivantes : L'absorption d'eau conduit à une chute importante de la rigidité et de la contrainte à la rupture. En revanche, l'allongement à la rupture augmente avec la teneur en eau, ce qui traduit l'augmentation de ductilité du matériau. Ces différents effets résultent du phénomène de plastification induit par les molécules d'eau. Une reprise en eau entraîne nettement une réduction de la résistance. Plus la durée de vieillissement est importante, plus l'adhésif perd ses propriétés mécaniques et les caractéristiques de résistance essentielles.

III.5.6. Assemblage composite/composite

III.5.6.1- Modèle géométrique et propriétés mécaniques

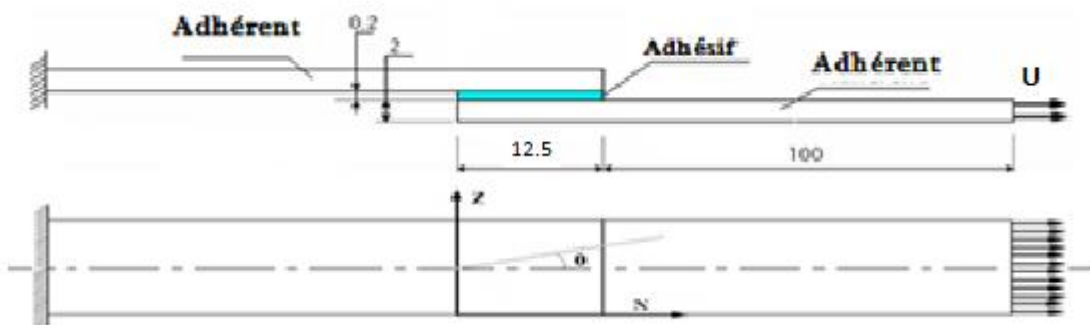


Figure III.12. Représentation du modèle géométrique (composite/composite)

Le modèle géométrique pour notre étude est le même considéré que dans le chapitre II, les dimensions des différents substrats sont montrés sur la figure III.12.

Les propriétés mécaniques du composite et de la matrice sont représentées dans le tableau III.2.

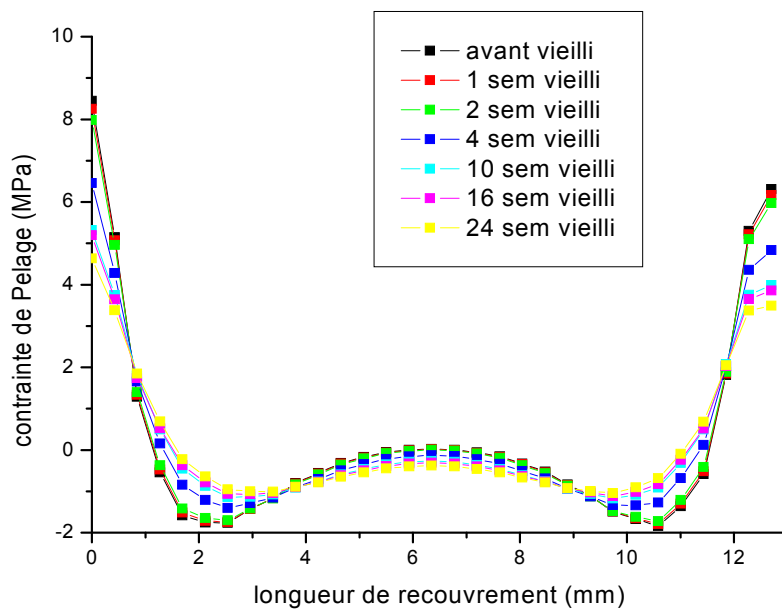
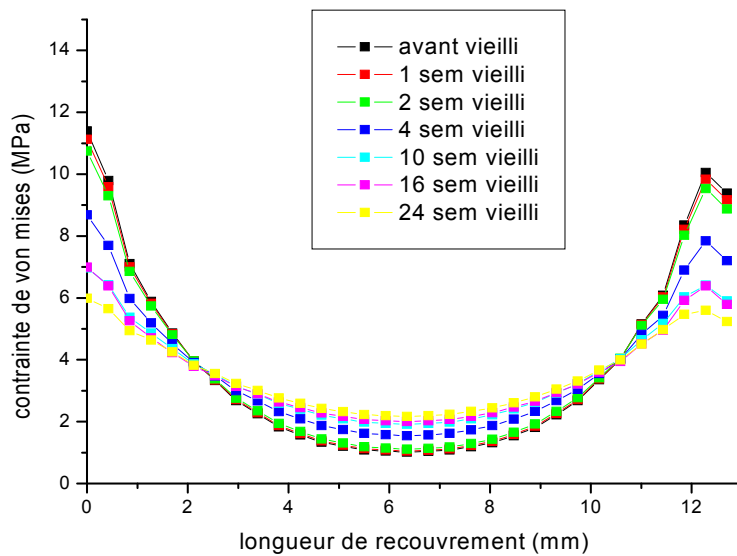
Nature de fibre	E (module de Young) [MPa]	€ coefficient de poisson
Fibre de carbone	230000	0.3
Matrice époxyde	4500	0.4

Tableau III.2 Propriétés mécaniques des fibres et matrice de la plaque composite [44].

III.5.6.2 Caractérisation de l'adhésif vieilli : (cas d'un assemblage composite/composite)

Pour cette partie, on a considéré uniquement la séquence d'empilement $[0^\circ]_8$ pour le composite et comme nature des fibres, on a mis en évidence le carbone.

L'analyse des différentes contraintes dans le joint adhésif suivant la longueur de recouvrement pour différentes températures et durées de vieillissement est montrée sur les figures suivantes :

- a) Vieillissement à 20°C

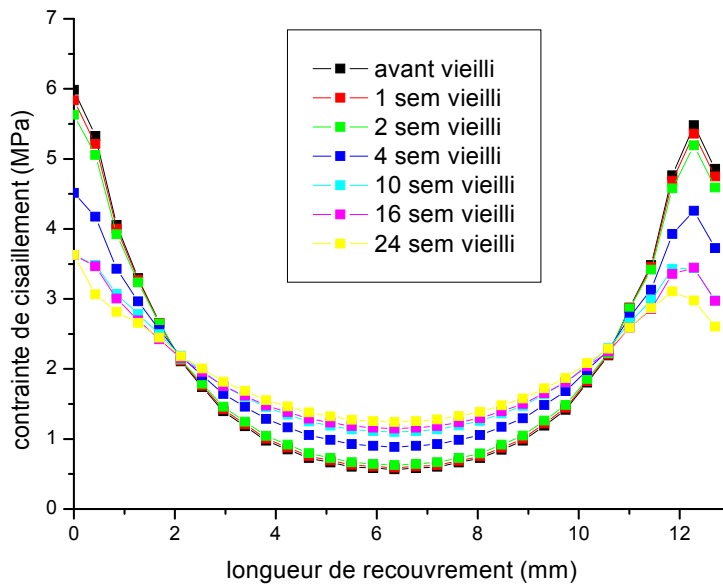
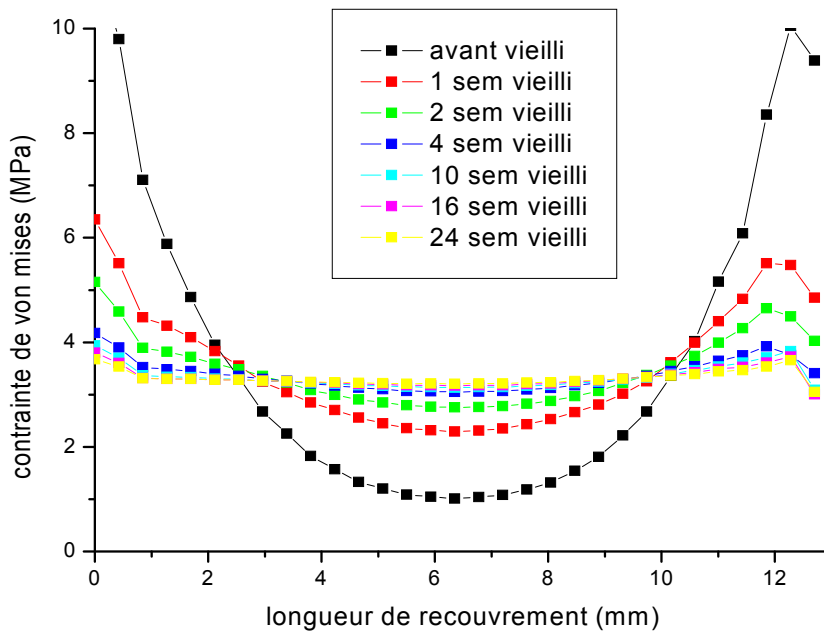


Figure III.13 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes durées de Vieillissement à 20°C.

- b) Vieillissement à 40°C



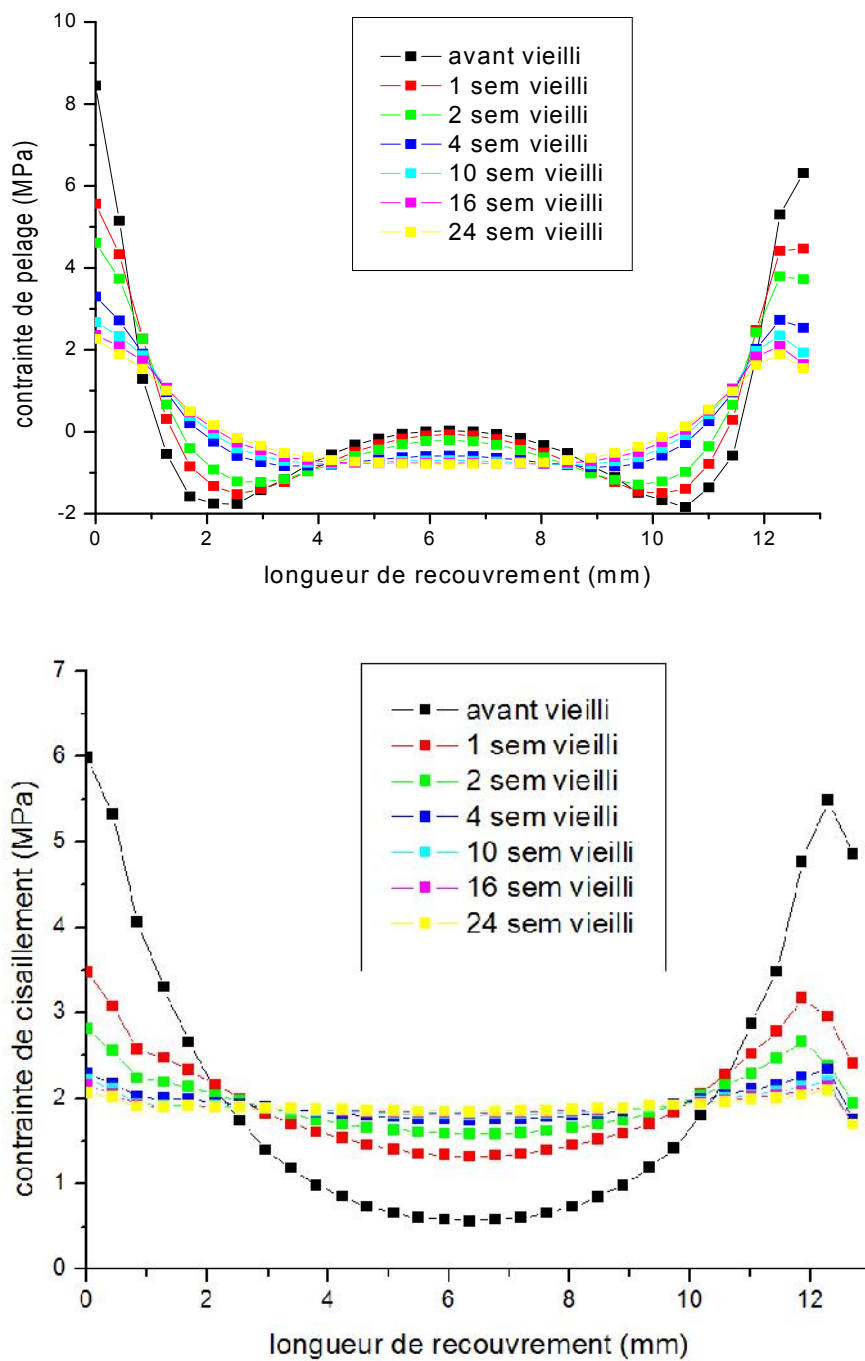


Figure III.14 Distribution des contraintes de a)- Von Mises b)- pelage c)- cisaillement dans l'adhésif pour différentes durées de vieillissement à 40°C.

- a) Vieillissement à 60°C

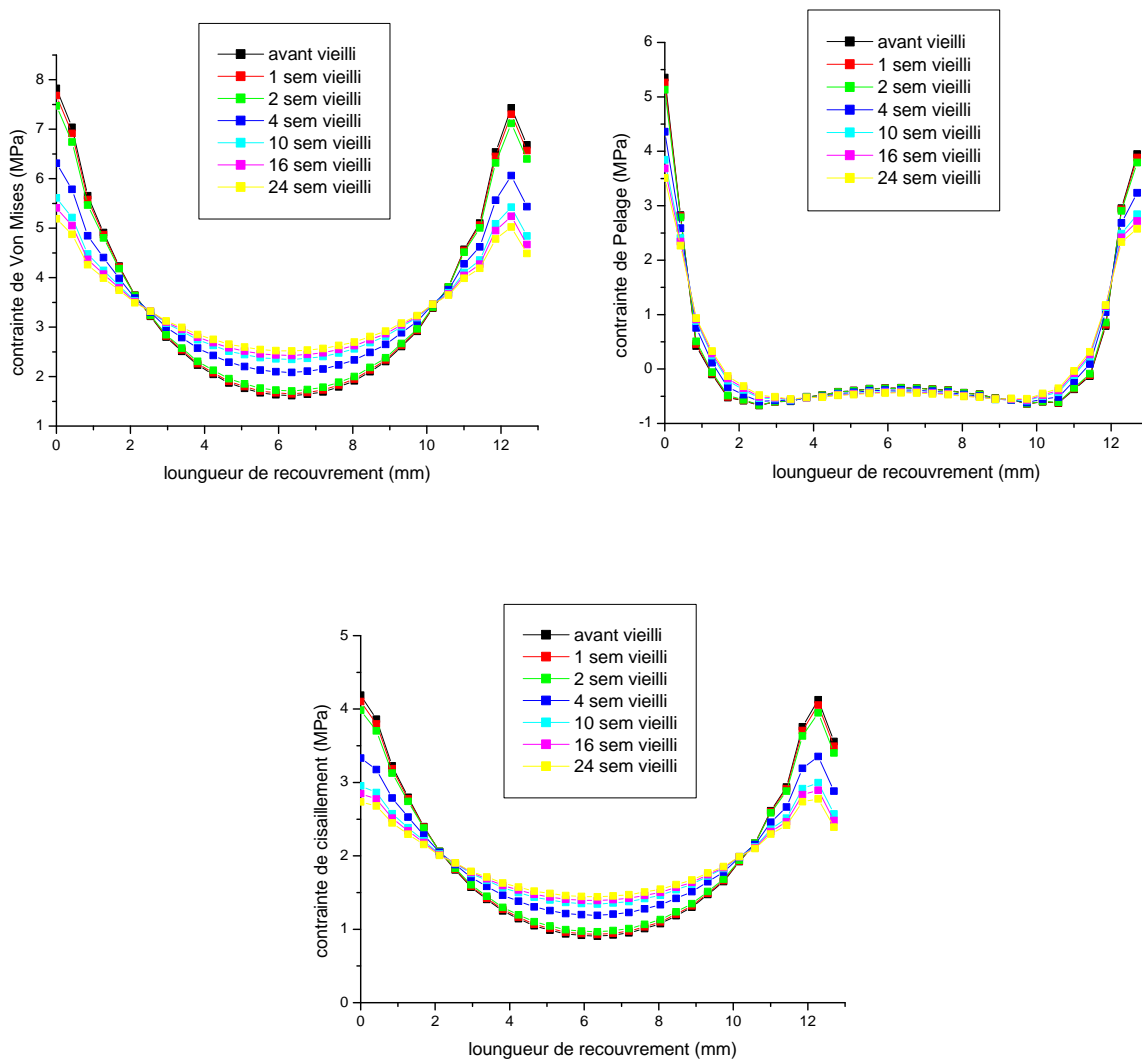


Figure III.15 Distribution des contraintes de a)-Von Mises b)-cisaillement c)-pelage dans l'adhésif pour différentes durées de Vieillissement à 60°C.

L'analyse des contraintes dans la couche d'adhésif montre clairement que la distribution des contraintes n'est pas homogène dans le joint adhésif, on a toujours des contraintes élevées au niveau des bords de l'adhésif et un milieu peu sollicité.

A 20°C, les contraintes de Von-Mises sont plus élevées au niveau de bord, ces contraintes diminuent en fonction de la durée Vieillissement. Cependant, le milieu de l'adhésif devient de plus en plus actif si la durée d'immersion augmente. Ces contraintes deviennent de plus en plus faibles si la température est de 40°C ou 60°C. A ces températures, l'adhésif perd une

grande partie de sa rigidité et devient trop ductile. L'augmentation de la durée de vieillissement minimise de plus en plus la valeur de la contrainte de Von-Mises. La même remarque est notée pour les contraintes de cisaillement et de pelage.

On remarque qu'en début du vieillissement [1 semaine], l'adhésif est peu affecté par l'absorption de l'eau puisque la variation des différentes contraintes chute d'une valeur un peu négligeable, avec l'augmentation de la durée de vieillissement, la diminution en valeur des contraintes varie en fonction de la température après deux semaines de vieillissement, la contrainte de Von Mises chute de 8.5 % à 20°C, 50 % à 40°C et 12.80 % à 60°C.

Cependant, après 24 semaines de vieillissement, ce pourcentage en chute de valeur de la contrainte de Von Mises en fonction de la température de sorte qu'on aura une chute de 48 % à 20°C, 65 % à 40°C et 38 % à 60°C.

La même remarque est à noter pour les autres valeurs des contraintes de cisaillement et de pelage. Pour le cas d'un assemblage, la chute en propriétés mécaniques de l'adhésif est bénéfique pour la résistance du joint.

III.5.7. Cas d'un assemblage Aluminium/Aluminium

III.5.7.1- Modèle géométrique et propriétés mécaniques

Pour cette partie d'étude, on a considéré le cas d'un assemblage Aluminium/Aluminium, les essais de traction effectués sur la plaque d'aluminium 2024-T3 et l'adhésif ADEKIT A140 ont permis d'avoir des courbes caractéristiques indiquées dans la figure III.16. [37].

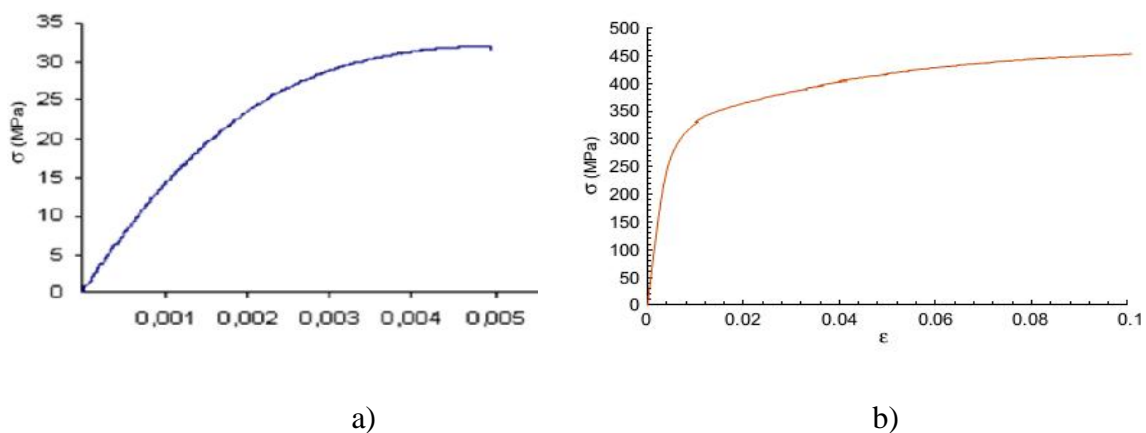


Figure III.16. Courbe Traction contrainte-déformation pour :
a) - plaque d'aluminium, b) - adhésif ADEKIT A140 [37].

A partir de ces deux courbes, on peut déterminer les propriétés mécaniques des deux matériaux indiquées dans le tableau III.1.

Materiaux	E (Gpa)	G (Gpa)	
Adekit A140	2.690	0.99	0.3
Aluminium 2024T3	69	36.92	0.3

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques de l'aluminium 2024-T3 et de l'adhésif A140.

Le but de cette partie du chapitre est de voir le comportement de l'adhésif en fonction de la durée de vieillissement pour le cas d'un assemblage de plaque ductile, on a mis en considération la modification des bords de l'adhésif et de la plaque (figure III.17). Le modèle géométrique est inspiré du travail de Mr EL HENNANI dans le cadre de sa thèse [43].

L'analyse des résultats par éléments finis de la distribution des contraintes de Von Mises dans la couche d'adhésif est représentée dans les figures ci-dessous :

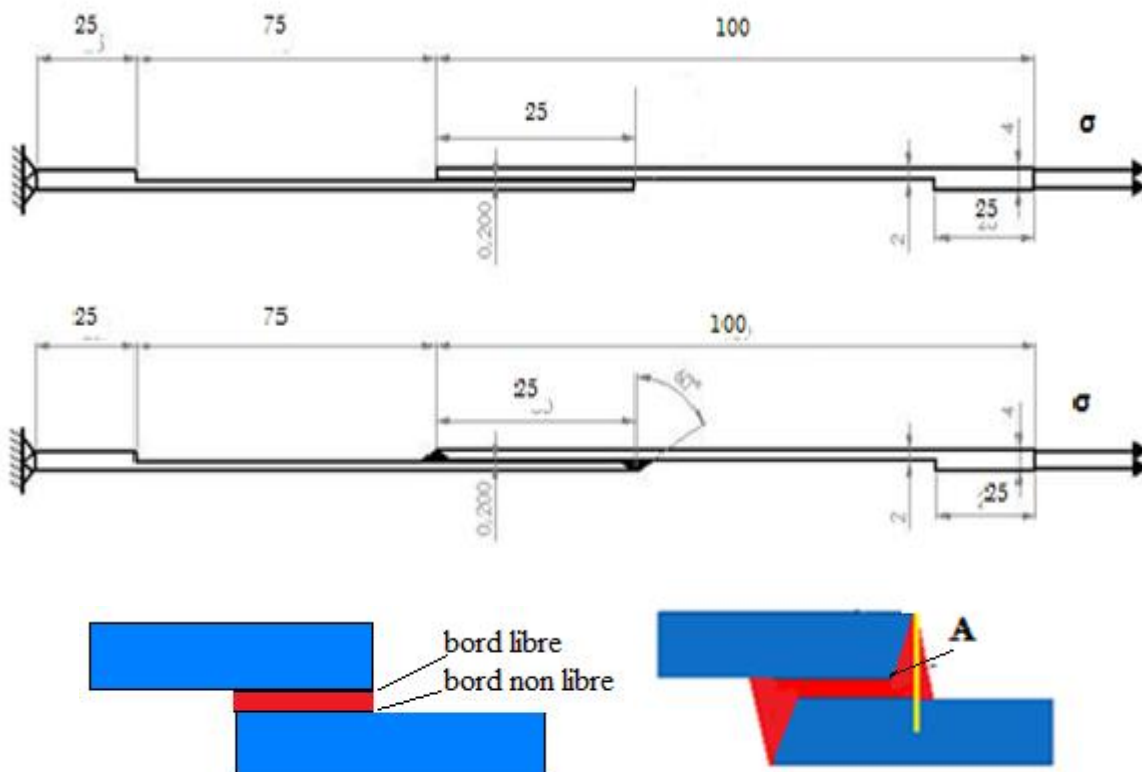


Figure III.17 : Modèle géométrique avec et sans biseautage et bourrelet des bords de la plaque et de l'adhésif.

III.5.7.2 Comparaison entre la forme biseautée et normale pour différentes températures avec et sans vieillissement de l'adhésif :

- a) Vieillissement à 20°C

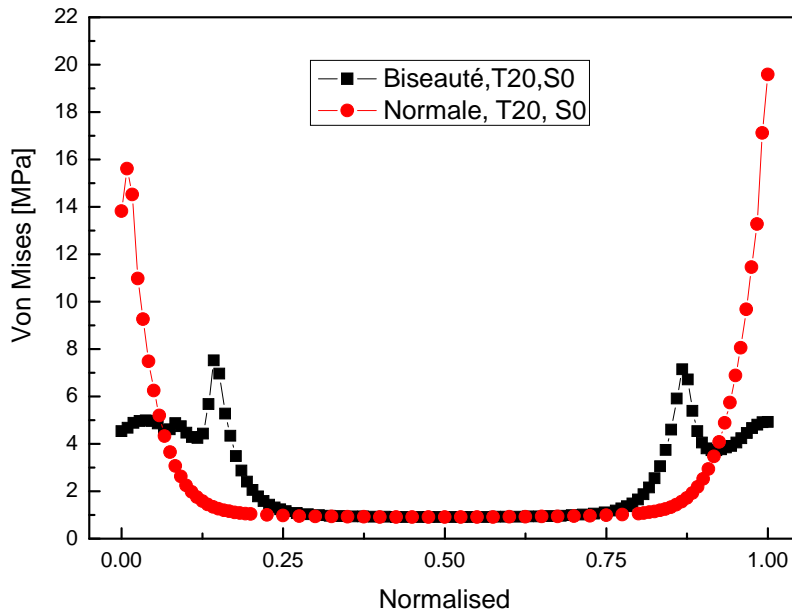


Figure III.18 Comparaison entre la forme biseauté et normale à la température 20° sans vieillissement de l'adhésif.

(T20 : Température 20°C, S0 : sans vieillissement)

La figure III.18 représente la distribution des contraintes suivant la longueur de recouvrement avant vieillissement. On remarque que la forme biseautée de l'adhésif réduit clairement la valeur de la contrainte au niveau de son bord de presque 50.%.

Un pic de contrainte est noté au niveau du point A mais qui reste un peu faible par rapport au cas où le bord de l'adhésif est droit. Le cœur de l'adhésif reste inactif dans les deux cas.

La valeur de la contrainte est réduite dans les deux cas [normale et biseauté]. L'exposition de l'adhésif à l'eau réduit sa résistance par une chute de la valeur de son module d'Young mais augmente sa ductilité.

En absorbant de l'eau, l'adhésif devient plus ductile et sa résistance au cisaillement devient meilleure, ce qui lui procure une meilleure résistance vis à vis de la charge appliquée, donc, la contrainte de Von Mises diminue (figure III.18).

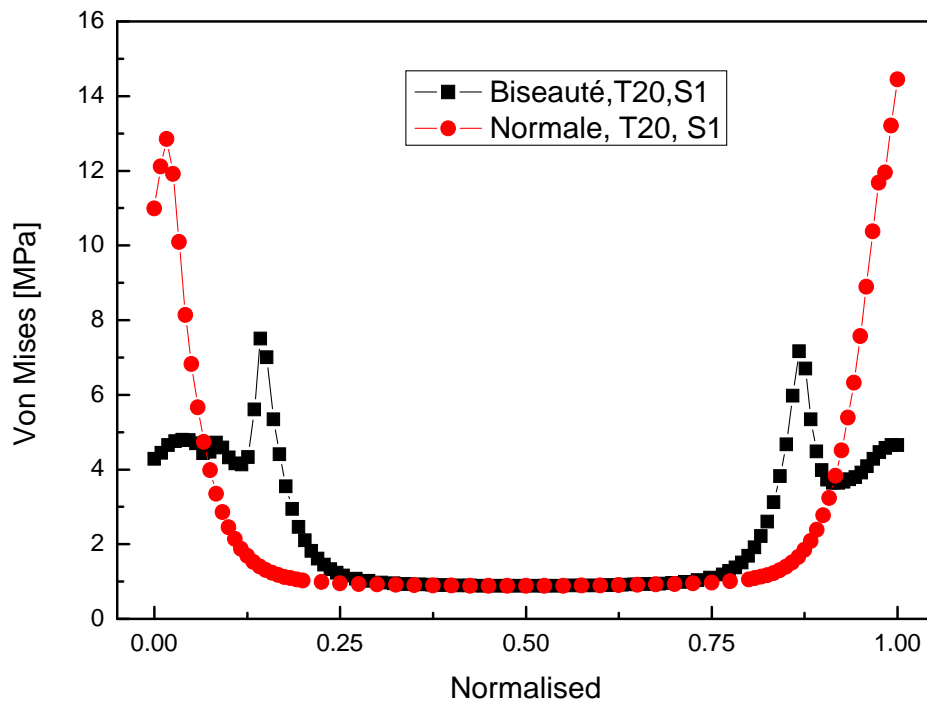


Figure III.19 Comparaison entre la forme biseautée et la forme normale à la température 20°C durant la 1^{ère} semaine de vieillissement (S1).

En augmentant la durée de vieillissement, le cœur de l'adhésif devient de plus en plus actif. Pour le cas d'un assemblage non biseauté, la valeur de la contrainte diminue de presque 50% au niveau du bord libre et bord non libre. Par contre, pour le cas d'un assemblage avec modification des bords de l'adhésif et de la plaque, on remarque une diminution de 60% au niveau des deux bords de l'adhésif. Cependant, au niveau du point A, on remarque une légère diminution de la valeur de la contrainte de Von Mises, à ce niveau et sous l'effet de la flexion de la plaque due à l'excentricité des deux forces appliquées, il y aura une concentration des contraintes.

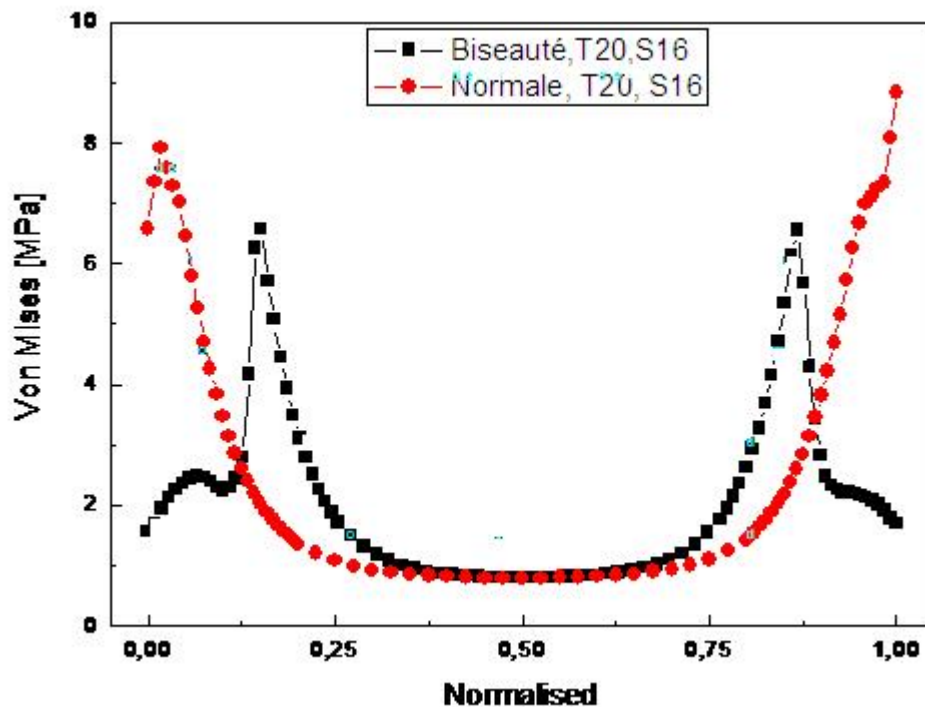


Figure III.20 : Comparaison entre la forme biseautée et la forme normale à la température 20°C durant la 16^{ème} semaine de vieillissement (S16).

La variation de la valeur maximale de la contrainte de Von Mises en fonction de la durée du vieillissement à la température 20°C est représentée dans la figure III.21. On remarque clairement que la résistance de l'adhésif s'améliore en fonction de l'augmentation de la durée de vieillissement, une chute considérable de contrainte est notée dès le début du vieillissement, l'amélioration des deux bords de la plaque et l'adhésif apporte une diminution de la contrainte de Von Mises, ce qui permet une meilleure résistance de l'assemblage et donc une longue durée de vie en service.

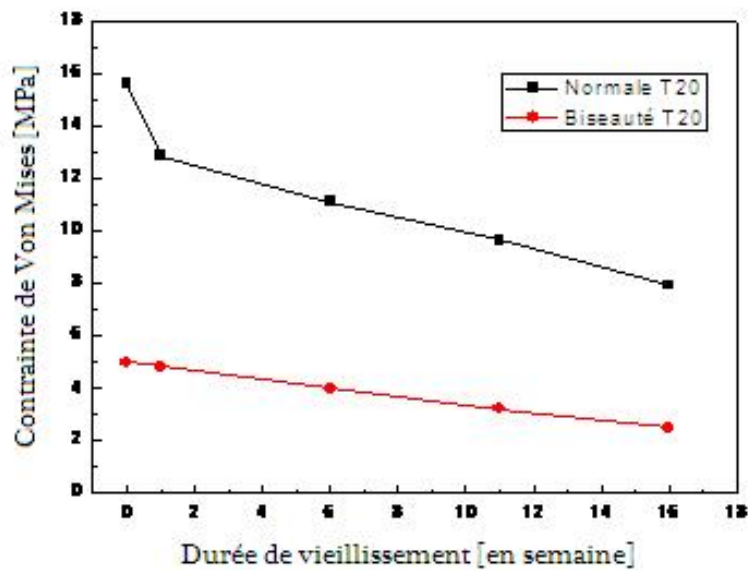


Figure III.21 : Variation de la valeur maximale de la contrainte de Von Mises en fonction de la durée de vieillissement (Comparaison entre la forme biseautée et normale à la température 20°).

L'absorption de l'eau par l'adhésif lui permettra de devenir plus ductile et donc devient plus résistant en cisaillement qu'en traction et donc des valeurs faibles de contrainte de Von Mises.

Au niveau du point A, la valeur de la contrainte n'est pas affectée par la durée d'immersion. Par contre, en augmentant la durée de vieillissement, l'adhésif devient de plus en plus ductile avec un domaine plastique important et donc une meilleure résistance à l'effort appliqué.

La valeur de la contrainte devient plus faible dans les deux cas d'assemblage en fonction de la durée d'immersion.

Au niveau du bord, la valeur de la contrainte dans l'assemblage avec un bourrelet sera trop réduite mais avec une réduction de 2MPa par rapport au cas non vieilli. Cependant, pour le cas d'assemblage sans modification, la réduction de la contrainte est de 8MPa après 16 semaines de vieillissement.

- b) Vieillessement à 40°C

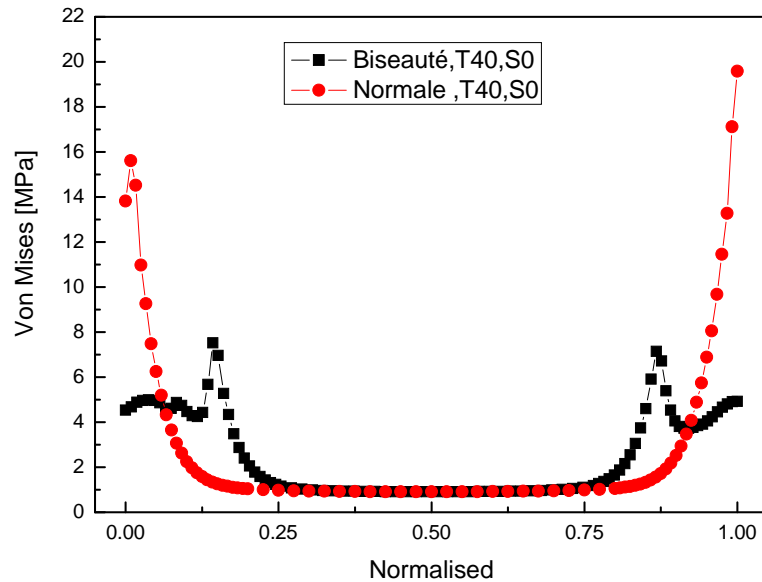


Figure III.22 : Comparaison entre la forme biseautée et la forme normale à la température 40° sans vieillissement de l'adhésif.

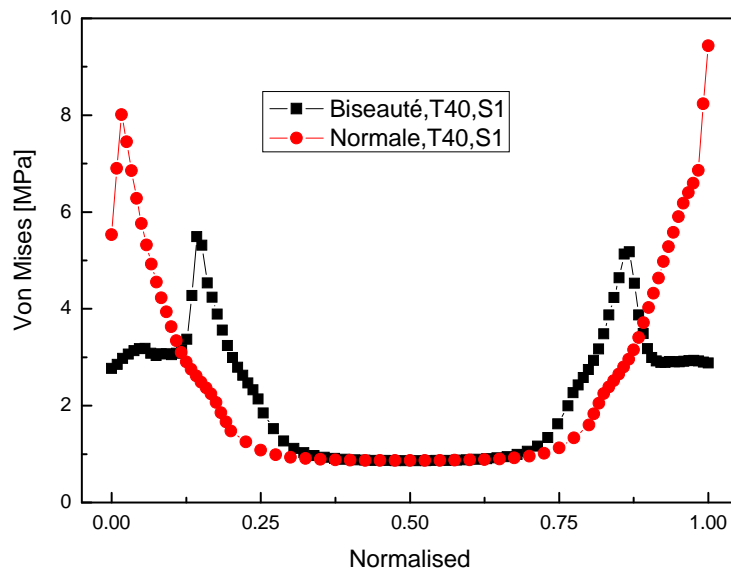


Figure III.23 : Comparaison entre la forme biseautée et la forme normale à la température 40° durant la 1^{ère} semaine de vieillissement.

En augmentant la température à 40°C (Figure III.23), l'adhésif se comporte de la même manière que dans le cas à la température 20°C. La valeur de la contrainte est plus faible dans le cas d'un assemblage avec bourrelet et biseautage, de même les contraintes sont toujours concentrées au niveau du bord avec un cœur inactif. Après une semaine de vieillissement, l'adhésif perd sa résistance et devient ductile, donc plus de résistance à la charge appliquée, cependant, des contraintes de Von Mises faibles.

Le cœur de l'adhésif devient de plus en plus actif et une grande partie de la zone de recouvrement sera sollicitée si la durée de vieillissement augmente. L'adhésif devient de plus en plus ductile et sa résistance vis à vis de la charge appliquée devient plus remarquable.

La valeur de la contrainte devient plus faible. Une chute importante de cette valeur est de presque 40% entre la forme biseautée et la forme normale de la plaque et de l'adhésif.

A cette durée de vieillissement, le cœur de l'adhésif devient trop actif et la zone sollicitée dans l'adhésif devient importante.

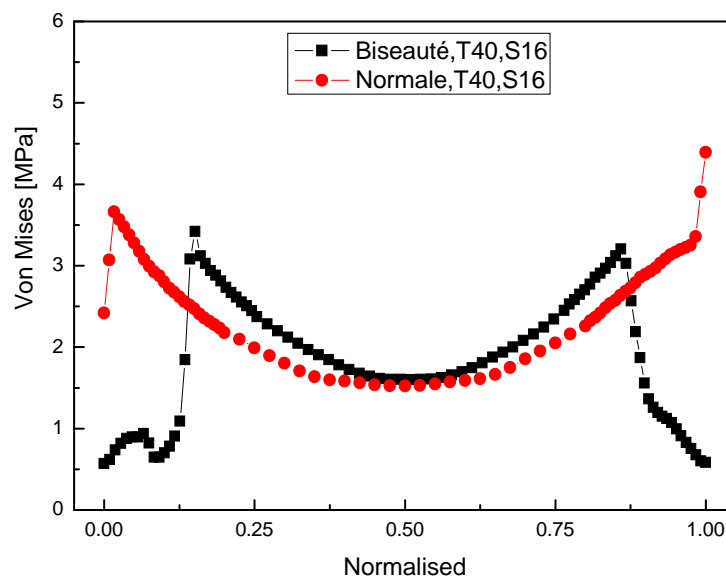


Figure III.24 : Comparaison entre la forme biseautée et la forme normale à la température 40° durant la 16^{ème} semaine de vieillissement.

Plus la durée de vieillissement augmente, la valeur de la contrainte dans l'adhésif diminue de plus en plus. La différence de la valeur des contraintes varie en fonction de la durée de

vieillessement à l'état sec et elle est de 75.%. Après 16 semaines, cette différence devient 60% (Figure III.25).

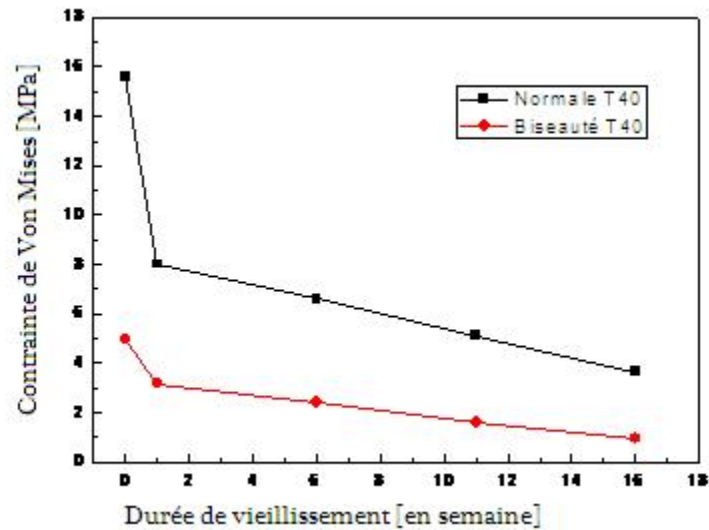


Figure III.25 : Comparaison entre la forme biseautée et la forme normale à la température 40°.

- a) Vieillessement à 60°C

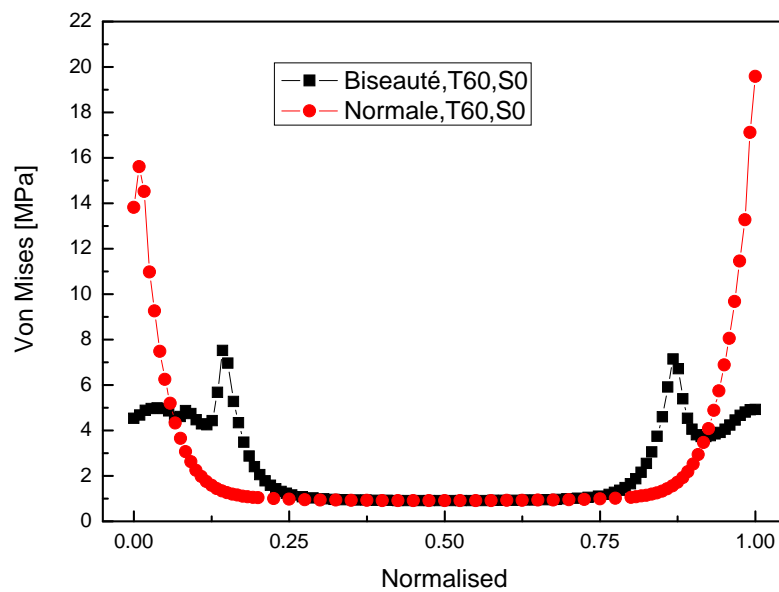


Figure III.26 : Comparaison entre la forme biseautée et la forme normale à la température 60° sans vieillissement.

Si la température augmente pour atteindre 60°C, l'adhésif perd tous ses propriétés de résistance et devient à son état caoutchoutique avec des propriétés mécaniques faibles.

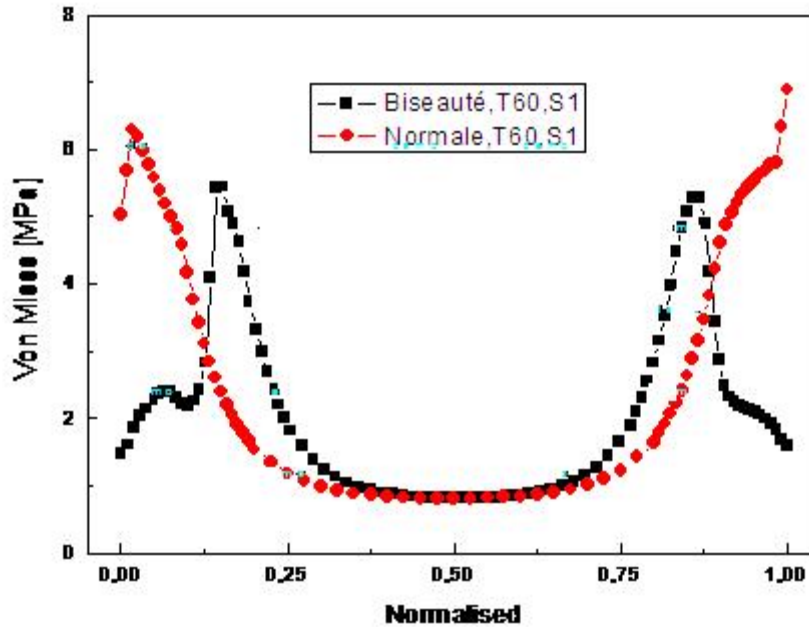


Figure III. 27 : Comparaison entre la forme biseautée et la forme normale à la température 60° durant la 1^{ère} semaine de vieillissement.

Après une semaine de vieillissement à la température $T = 60^{\circ}\text{C}$, on remarque que les deux assemblages ont des valeurs de contrainte presque identiques avec une légère différence. Aussi, la zone sollicitée est presque la même suivant la section de l'adhésif.

L'adhésif absorbe bien une grande partie de contraintes dans les deux cas d'assemblage, les valeurs sont très faibles à cette température, au niveau des bords, les contraintes dans le cas de l'assemblage droit sont plus élevées que pour le cas de l'assemblage avec modification des deux bords de l'adhésif et de la plaque.

Au point A, le pic de surcontrainte atteint une valeur de plus de 100% par rapport au bord libre. A cet endroit, la résistance de l'adhésif au pelage est faible. La souplesse de l'adhésif lui procure une bonne résistance à la sollicitation imposée.

La figure III.28 représente la distribution des contraintes suivant la longueur de recouvrement pour deux assemblages ; un normal et l'autre biseauté. On remarque clairement que le

bouffant d'adhésif réduit clairement la valeur des contraintes au niveau du bord. Par contre, il sera plus exposé à l'environnement. Après une durée de 16 semaines en immersion dans l'eau, l'adhésif devient caoutchoutique avec une grande ductilité et une bonne résistance au cisaillement et la contrainte imposée. On remarque aussi que le cœur de l'adhésif sera sollicité et son comportement sera le même dans les deux cas d'assemblage.

La forme biseautée présente toujours des valeurs minimales des contraintes par rapport à la forme normale du joint.

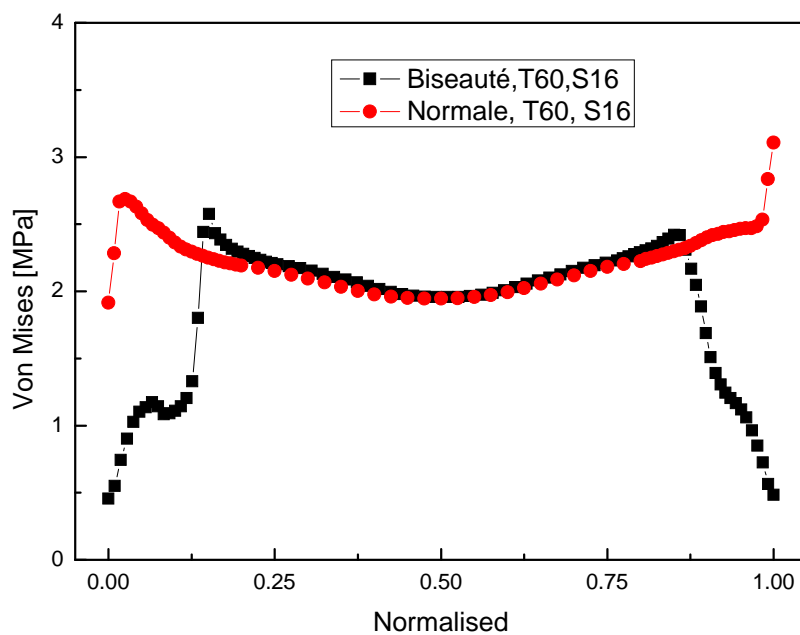


Figure III.28 : Comparaison entre la forme biseautée et la forme normale à la température 60° durant la 16^{ème} semaine de vieillissement.

La figure III.29 présente la valeur de la contrainte maximale de Von Mises entre la forme biseautée et la forme normale en fonction de la durée d'immersion à la température de 60°C. On remarque clairement que la forme modifiée des deux bords de la plaque et de l'adhésif présente toujours les valeurs les plus faibles de la contrainte de Von Mises et ce quelque soit la durée de vieillissement.

La différence de valeur de Von Mises entre la forme normale et la forme biseautée diminue au fur et à mesure que la durée de vieillissement augmente.

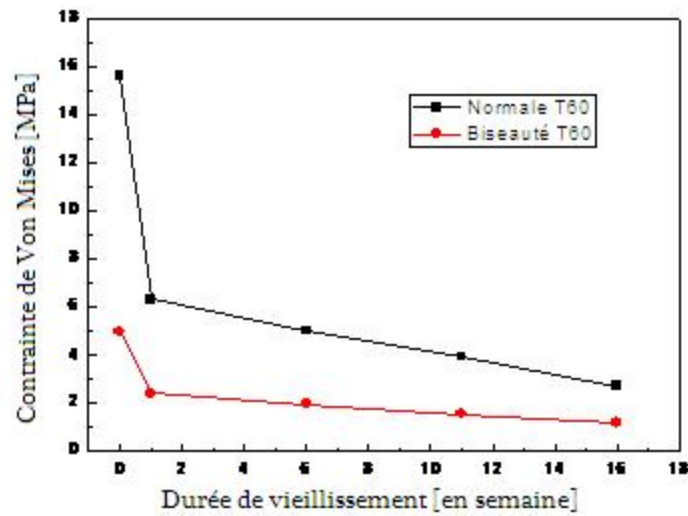


Figure III.29 : Comparaison entre la forme biseautée et la forme normale à la température 60°.

III.5.8.3 Distribution de la contrainte de cisaillement

La figure II.30 représente la distribution de la contrainte de cisaillement suivant la longueur de recouvrement à la température de 20°C pour différentes durées de vieillissement.

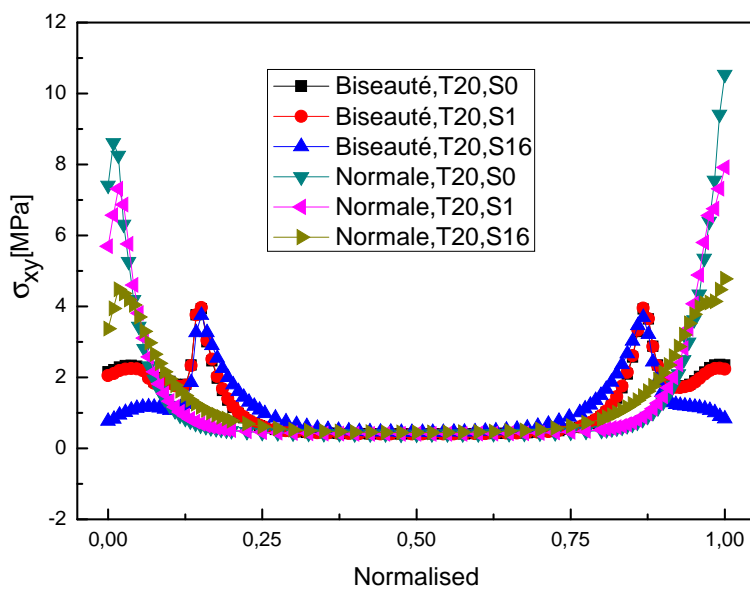


Figure III.30 : Comparaison de la contrainte de cisaillement entre la forme biseautée et la forme normale à la température 20° avant et après vieillissement.

On remarque clairement que l'adhésif dans l'assemblage avec biseautage et bourrelet présente une meilleure résistance par rapport au cas de l'assemblage normale (sous modification). Dans ce cas, l'adhésif présente plus de surface collée et donc minimise plus le transfert des contraintes dans l'adhésif, la modification des deux bords de l'adhésif et la plaque réduit considérablement le moment de flexion et donc réduit les contraintes de cisaillement et de pelage, la contrainte de cisaillement diminue dans les deux cas d'assemblage en présence d'absorption de l'eau et donc du vieillissement.

Cette chute en valeur des contraintes apparaît dans la première semaine de vieillissement de l'adhésif, de même, pour l'assemblage avec modification des bords de la plaque et l'adhésif, un pic de surcontrainte apparaît au niveau du point A qui présente des valeurs de contrainte de cisaillement plus élevées qu'au niveau du bord.

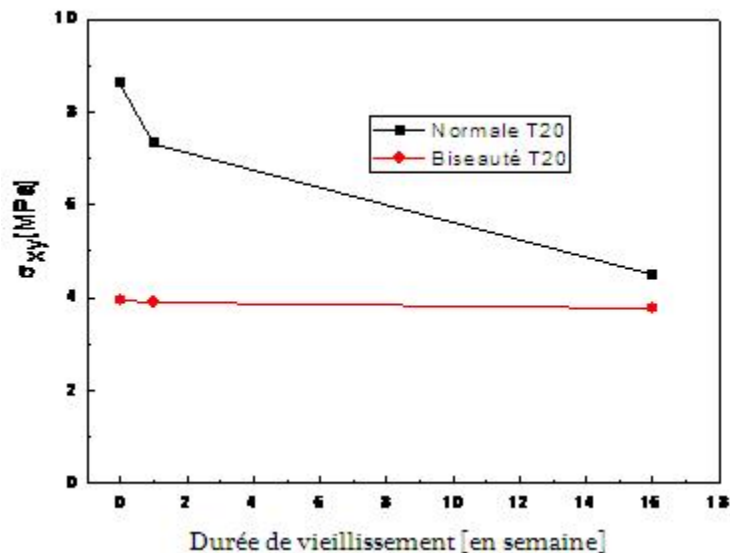


Figure III.31 : Comparaison du cisaillement entre la forme biseautée et la forme normale à la température 20° avant et après vieillissement.

La comparaison entre la forme normale et la forme biseautée montre clairement l'effet de la modification des bords de la plaque et l'adhésif ainsi que la durée de vieillissement sur la valeur de la contrainte de cisaillement (figure III.31).

Pour la forme biseautée, l'effet de vieillissement n'a que peu d'influence sur la valeur de la contrainte de cisaillement, cette influence est très clair pour le cas de l'assemblage normale.

La différence de valeur de contrainte de cisaillement entre la forme normale et la forme biseautée diminue si la durée de vieillissement augmente.

De même, si la température de vieillissement augmente (figures III.32 et III.34) pour les valeurs 40°C et 60°C, les valeurs de la contrainte de cisaillement diminuent considérablement dans les deux cas d'assemblage. Pour l'assemblage modifié, si la température augmente, la valeur de la contrainte de cisaillement devient presque constante suivant la longueur de recouvrement. Une légère différence est à noter au niveau du point A.

De même, pour l'assemblage normal, si on augmente la durée de vieillissement, la valeur de la contrainte de cisaillement diminue considérablement pour atteindre des valeurs faibles dans l'adhésif.

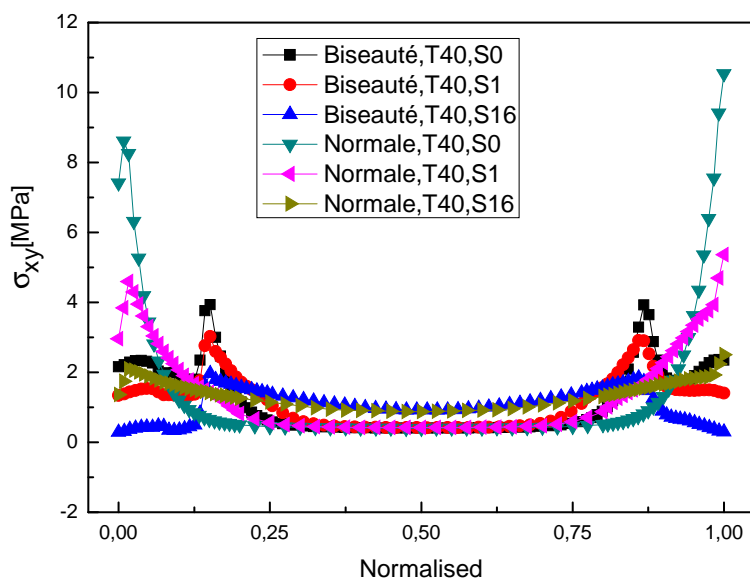


Figure III.32 : Comparaison du cisaillement entre la forme biseautée et la forme normale à la température 40° avant et après vieillissement.

La figure III.33 et III.35 présentent une comparaison entre les valeurs maximales de la contrainte de cisaillement pour les deux cas d'assemblage en fonction de la durée de vieillissement et la température.

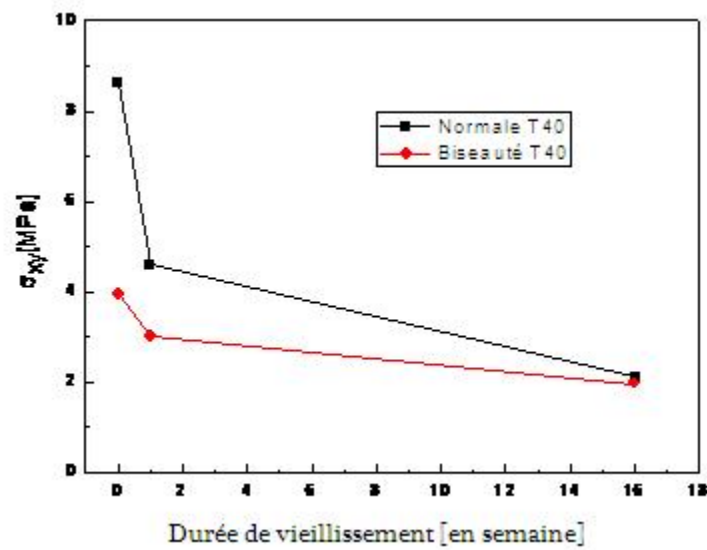


Figure III.33 : Comparaison du cisaillement entre la forme biseautée et la forme normale à la température 40° avant et après vieillissement.

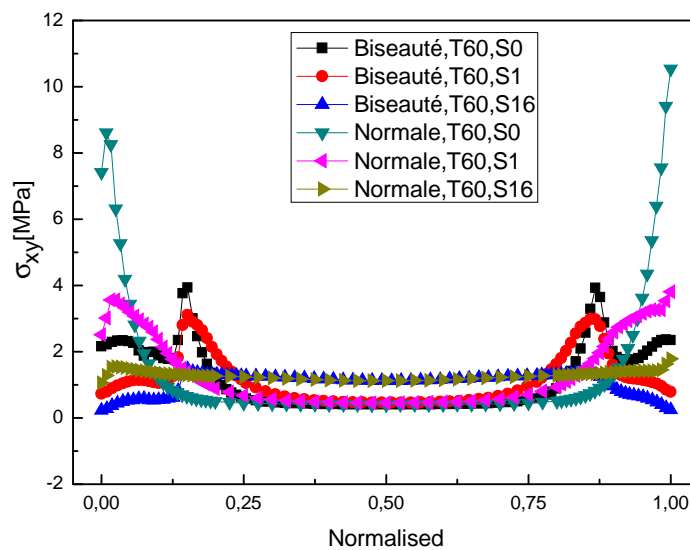


Figure III.34 : Comparaison du cisaillement entre la forme biseautée et la forme normale à la température 60° avant et après vieillissement.

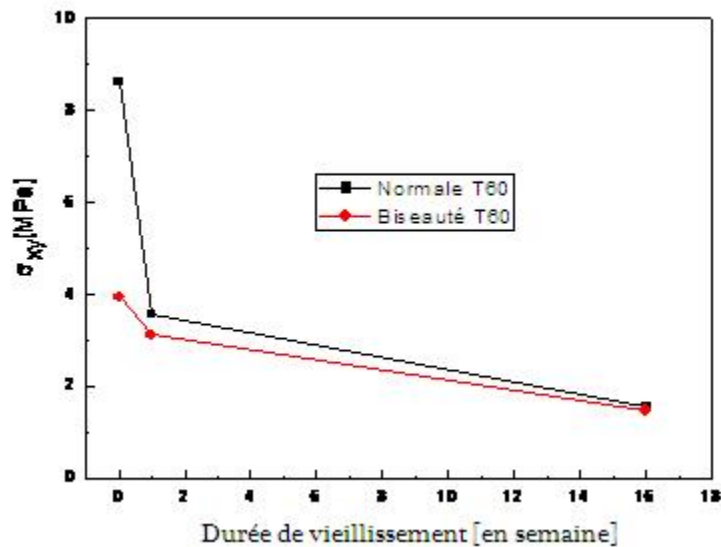


Figure III.35 : Comparaison du cisaillement entre la forme biseautée et la forme normale à la température 60° avant et après vieillissement.

On remarque que la contrainte de cisaillement diminue considérablement en fonction de la durée de vieillissement, l'assemblage normal présente les valeurs les plus élevées de cette contrainte.

A l'état non vieilli, la différence entre la valeur de la contrainte de cisaillement des deux assemblages est bien notée, cette différence diminue au fur et à mesure que la durée de vieillissement augmente pour disparaître complètement à la 16^{ème} semaine de vieillissement.

Conclusion

Cette partie d'étude concerne l'effet du vieillissement de l'adhésif à des températures variées sur la résistance dans un assemblage à simple joint, les résultats de l'analyse numérique nous ont permis d'en déduire les conclusions suivantes :

- La modification des deux bords de l'adhésif et la plaque est une meilleure façon pour réduire les différentes contraintes dans le joint adhésif.
- Le bourrelet d'adhésif présente plus de surface de collage et donc une meilleure résistance à l'assemblage.

- Pour le cas d'un assemblage composite/composite, une grande partie des contraintes est transférée dans l'adhésif et donc des valeurs élevées des contraintes puisque les contraintes sont diminuées considérablement après chaque durées de vieillissement.
- Le vieillissement de l'adhésif en immersion dans l'eau lui procure une chute de ses propriétés mécaniques de résistance et un gain énorme en propriétés de ductilité, ces propriétés mécaniques de l'adhésif, après vieillissement, lui procure une meilleure résistance au cisaillement et au pelage dans l'assemblage à simple joint.

Références

- [1] Higgins A. Adhesive bonding of aircraft structures. *Int J Adhes Adhes* 2000;20:367–76.
- [2] Adams RD, Comyn J, Wake WC. *Structural adhesives joints in engineering*. 2nd ed London: Chapman & Hall; 1997.
- [3] Baker AA, Bitton D, Wang J. Development of a proof test for through-life monitoring of bond integrity in adhesively bonded repairs to aircraft structure. *Int J Adhes Adhe* 2012;36:65–76.
- [4] Loha WK, Crocombe AD, Abdel MM, Abdel Wahab MM, Ashcroft IA. Modelling anomalous moisture uptake, swelling and thermal characteristics of a rubber toughened epoxy adhesive. *Int J Adhes Adhes* 2005;25:1–12.
- [5] Kinloch AJ, editor. *Adhesion and adhesives*. London: Chapman & Hall; 1995 [ISBN041227440X].
- [6] Rowland SP. *Water in polymers*. ACS symposium series 127; 1979. [ISBN 0841205590].
- [7] Ahmad Z, Ansell MP, Smedley D. Effect of nano and microparticle additions on moisture absorption in thixotropic room temperature cure epoxy-based adhesives for bonded-in timber connections. *Int J Adhes Adhes* 2010;30:448–55.
- [8] Mubashar A, Ashcroft IA, Critchlow GW, Crocombe AD. Moisture absorption–desorption effects in adhesive joints. *Int J Adhes Adhes* 2009;29:751–60
- [9] Comyn J. Kinetics and mechanism of environmental attack. In: Kinloch AJ, editor. *Durability of structural adhesives*. Elsevier Applied Science Publishers; 1983. p. 85–131.
- [10] Bowditch MR. The durability of adhesive joints in the presence of water. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 1996;16:73–9.
- [11] Ellis TS, Karasz FE. Interaction of epoxy resins with water: the depression of glass transition temperature. *Polymer* 1983;25:64.
- [12] Xiao GZ, Shanahan MER. Water absorption and desorption in an epoxy resin with degradation. *J Polym Sci B* 1997;35:2659.
- [13] Bowditch MR. The durability of adhesive joints in the presence of water. *Int J Adhes Adhes* 1996;16:73–9.
- [14] Kinloch AJ. *Durability of structural adhesives*. Barking: Applied Science Publishers; 1983.
- [15] Hart-Smith LJ. Adhesive bonding of composite structures—progress to date and some remaining challenges. *J Comp Technol Res* 2002;24(3):133–53.
- [16] Popineau S, Shanahan MER. Simple model to estimate adhesion of structural bonding during humid ageing. *Int J Adhes Adhes* 2006;26:363.
- [17] Fernando M, Harjoprayitno WW. A fracture study of the influence of moisture on the fatigue behaviour of adhesively bonded aluminium-alloy joints. *Int J Adhes Adhes* 1996;16:113–9.

- [18] Loh WK, Crocombe AD, Abdel Wahab MM, Ashcroft IA. Environmental degradation of the interfacial fracture energy in an adhesively bonded joint. *Eng Fracture Mech* 2002;69:2113–28.
- [19] Hua Y, Crocombe AB. Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive. *Int J Adhes Adhes* 2008;28:302–13.
- [20] Gupta VB, Drzal LT, Rich MJ. The physical basis of moisture transport in a cured epoxy resin system. *Journal of Applied Polymer Science* 1985;30: 4467–93.
- [21] Tcharkhtchi A, Bronnec PY, Verdu J. Water absorption characteristics of diglycidylether of butane diol-3,5-diethyl-2,4-diaminotoluene networks. *Polymer* 2000;41:5777–85.
- [22] Bellenger V, Verdu J, Morel E. Structure-properties relationships for densely cross-linked epoxide amine systems based on epoxide or amine mixtures .2. Water absorption and diffusion. *Journal of Materials Science* 1989;24:63–8.
- [23] Zhou JM, Lucas JP. Hygrothermal effects of epoxy resin. Part I: the nature of water in epoxy. *Polymer* 1999;40:5505–12.
- [24] Tcharkhtchi A, Bronnec PY, Verdu J. Water absorption characteristics of diglycidylether of butane diol-3,5-diethyl-2,4-diaminotoluene networks. *Polymer* 2000;41:5777–85
- [25] Diamant Y, Marom G, Broutman LJ. The effect of network structure on moisture absorption of epoxy resins. *Journal of Applied Polymer Science* 1981;26:3015–25.
- [26] Glaskova TI, Guedes RM, Morais JJ, Aniskevich AN. A comparative analysis of moisture transport models as applied to an epoxy binder. *Mechanics of Composite Materials* 2007;43:377–88.
- [27] Loh WK, Crocombe AD, Wahab MMA, Ashcroft IA. Modelling anomalous moisture uptake, swelling and thermal characteristics of a rubber toughened epoxy adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2005;25:
- [28] Popineau S, Rondeau-Mouro C, Sulpice-Gaillet C, Shanahan MER. Free/bound water absorption in an epoxy adhesive. *Polymer* 2005;46:10733–40.
- [29] Weitsman Y. Diffusion with time-varying diffusivity, with application to moisture-sorption in composites. *Journal of Composite Materials* 1976;10:193–204
- [30] Fujita H. Diffusion in polymer-diluent systems. *Advanced Polymer Science* 1961;3:1–41.
- [31] Mubashar A, Ashcroft IA, Critchlow GW, Crocombe AD. Moisture absorption- desorption effects in adhesive joints. *Int J Adhes Adhes* 2009;29:751–60
- [32] Sugiman S, Crocombe AD, Ashcroft IA. Experimental and numerical investigation of the static response of environmentally aged adhesively bonded joints. *Int J Adhes Adhes* 2013;40:224–37.
- [33] Adams RD. *Adhesive bonding: Science, technology and applications*. England: Woodhead publishing Ltd; 2000.
- [34] Qing XP, Beard SJ, Kumar A, Hannum R. A real-time active smart patch system for monitoring the integrity of bonded repair on an aircraft structure. *Smart Mater Struct* 2006;5:66–73.

- [35] Kilic B, Madenci E, Ambur DR. Influence of adhesive spew in bonded single-lap joints. Eng Fract Mech 2006;73:1472–90.
- [36] Madani K, Touzain S, Feugas X, Cohendouz S, Ratwani M. Experimental and numerical study of repair techniques for panels with geometrical discontinuities. Comput Mater Sci 2010;48:83–93.
- [34]. Schierffer Anne, Maire Jean-François et Lévêque David, Analyse multiechelle du vieillissement et du comportement thermomécanique de composites a matrice organique, (2005).
- [35]. A. NACERI, et A. VAUTRIN, Caractérisation du comportement mécanique d'un composite (tissu de verre/résine époxyde) à différentes périodes de vieillissement hygrothermiques, (2006).
- [36]. Thèse, Romain LEGER. Contribution à l'étude de la durabilité des structures collées soumises à des efforts mécaniques après vieillissement humide , (2010).
- [37]. Thèse, Marie Pierre FOULC, durabilité des assemblages par colles : état de l'art. (2008).
- [38]. Thèse, Céline GROS, Durabilité de joints adhésifs silicone sous conditions environnementales sévères : application au packaging en électronique de puissance, (2006).
- [39]. Thèse, Julien Mercier, Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites, (2006).
- [40]. Thèse, Marie-Anne Bruneaux, Durabilité des assemblages colles: modélisation mécanique et physico-chimique, (2004).
- [41]. Thèse, Kouider MADANI, Etude numérique et expérimentale de la technique de réparation des fissures Dans les structures aéronautiques par patch en composite, (2007).
- [42]. Thèse, Laid REZGANI, Etude des effets de l'environnement sur le comportement des panneaux composites : application a la réparation des structures aéronautiques, (2014).
- [43]. Thèse, Mohamed EL HANNANI, Etude statistique des différentes paramètres de collage sur la réduction des contraintes, (2017).

Chapitre IV

Technique de réparation d'une structure endommagée

IV.1. Introduction

Les matériaux composites utilisés dans les structures d'ingénierie avancées ont gagné une popularité au cours des dernières décennies en raison de leur rapport résistance / poids élevé et de leur capacité d'amortissement élevée [1].

Comparés aux joints à fixation mécanique, les joints collés présentent de nombreux avantages tels que la répartition de la charge sur une plus grande surface en raison de l'absence de trous, aucun dommage au matériau composite dû à l'usinage des trous, aucune augmentation de poids due au poids des fixations en présence de trous [2][3][4]. Cependant, les concentrations de contrainte se produisent toujours au bord de la couche adhésive dans les joints collés [5][6][7]. Par conséquent, les joints collés sont plus préférables aux joints mécaniques dans l'assemblage de matériaux composites [1].

La liaison adhésive remonte à l'aube de l'aviation et bien au-delà de l'Antiquité [6]. Alors que les premiers avions étaient en bois, la majorité des avions du XX^{ème} siècle utilisaient principalement des structures métalliques avec une fixation mécanique comme mécanisme de jonction. Cependant, l'accent a été mis sur l'utilisation de matériaux composites avec liaison comme principaux moyens d'assemblage des composants. Une étude détaillée des structures métalliques collées par adhérence est rapportée dans le programme PABST (Primary Adhesively Bonded Structure Technology) [1]. Au cours des deux dernières décennies, le collage de matériaux composites polymères renforcés de fibres est devenu l'objet de recherche.

Les réparations liées par collage utilisant des patches de bore / époxyde et de graphite / époxyde présentent également certains inconvénients. L'un des principaux inconvénients de ces matériaux de patch résulte de leur coefficient de dilatation thermique relativement faible par rapport au substrat métallique [5].

Le collage des patches composites sur les zones endommagées est une méthode de réparation locale fréquemment utilisée dans l'industrie [8][9]. Pour reconstituer la performance mécanique d'une structure réparée aussi proche que possible de celle d'origine, le patch doit être soigneusement conçu. Le succès de la réparation dépend de la cohérence entre le matériau de la structure de base et le patch, l'adhésif utilisé, le traitement de surface, ainsi que les compétences des opérateurs de réparation [10][11]. Botelho a étudié le comportement en fatigue des composites réparés avec des fibres d'aramide / époxyde. Son travail présente

l'influence de la réparation structurale sur les propriétés de résistance à la traction et à la fatigue d'un composite aramide/ époxyde typique utilisé dans l'industrie aérospatiale. Selon ce travail, les composites aramide / époxyde avec et sans réparation présentent des valeurs de résistance à la traction élevées. Par conséquent, les résultats de fatigue montrent que le composite aramide / époxyde réparé présentait une faible résistance à la fatigue par rapport au composite non réparé. La réparation des fissures dans les structures en aluminium par patch composite a été étudiée dans une large mesure [21].

Tanchev a mené une étude expérimentale et numérique sur les performances statiques et en fatigue d'une réparation par collage sur des structures intactes en composite 5HS / RTM6 incorporant des joints affleurants à joints collés (FM300-2). Les résultats montrent que le joint adhésif, largement utilisé dans les réparations, réduit considérablement la résistance statique ainsi que la résistance à la fatigue du composite. Dans les deux cas, la rupture statique et la fatigue des structures «réparées» se produisent au niveau du joint adhésif et impliquent l'initiation et la propagation de la fissure. Il y a également eu de nombreuses études impliquant l'effet que les raidisseurs ont sur l'amorçage et la croissance des fissures [22]. Moreira a présenté dans son étude la caractérisation des réparations de colliers simples collés sous charge de fatigue. Le comportement de fatigue à cycle élevé des réparations à simple bande de stratifiés carbone-époxyde a été analysé expérimentalement et numériquement. Les essais statiques et de fatigue ont été effectués sous une charge de flexion à trois points. L'approche numérique est basée sur le modèle de la zone cohésive en modes mixtes I et II qui tient compte de la dégradation quasi-statique et de la fatigue par un paramètre de dommage unique. Il a été vérifié que la prédiction de la durée de vie en fatigue est dans la plage de la durée de vie en fatigue observée expérimentalement [23].

La réparation par patch double ou réparation symétrique est la configuration la plus forte lors de l'application d'un patch composite. Cela a été montré comme un moyen efficace d'abaisser le facteur d'intensité de contrainte (FIC) et à son tour d'augmenter la durée de vie en fatigue [24] [7]. Le patch symétrique est le moyen le plus efficace qui présente une répartition plus uniforme de la contrainte dans l'épaisseur de la plaque. Pour la même configuration, une étude a montré qu'une réparation par double patch présente deux fois la durée de vie en fatigue d'un patch unilatéral [14].

Différentes techniques (modélisation analytique et solution numérique) ont été utilisées dans le passé pour prédire la résistance et la distribution des contraintes des joints d'un

assemblage collé. Après de nombreuses années d'étude, diverses techniques de réparation ont été appliquées avec succès. Parmi ceux-ci, la réparation structurelle par collage qui est très utilisée par rapport aux autres techniques de réparation.

Ainsi, au cours des dernières années, plusieurs études expérimentales [15] [16] et numériques [17] [18] ont été menées pour étudier l'influence de différents les paramètres relatifs à la répartition des contraintes, à la force ultime et au facteur d'intensité des contraintes des structures réparées par collage. Liu et Wang ont conduit des tests expérimentaux et un modèle 3D de dommages progressifs a été développé. Ils ont trouvé un bon accord entre les résultats expérimentaux et numériques. En utilisant leur modèle, les effets de plusieurs paramètres de réparation sur la résistance à l'initiation de la rupture, la résistance ultime et le mécanisme de rupture des structures réparées ont été étudiés [32]. Sabrlkin et Mall ont étudié, par une approche expérimentale-analytique combinée, plusieurs paramètres liés aux comportements mécaniques et à la fatigue d'un panneau en aluminium 7075-T6 fissuré réparé avec un patch composite unilatéral collé [33].

Hosseini-Toudeshky ont étudié, par la propagation de fissures de fatigue (numériques et expérimentales), le comportement de panneaux d'aluminium fissurés centralement en condition de chargement en mode I, réparés avec des plaques composites à un côté. Ils ont montré que la fissure croît de manière non uniforme depuis son emplacement initial jusqu'à l'épaisseur d'un panneau réparé sur un seul côté. Il y a un bon accord entre les formes de front de fissure propagées obtenues par analyse par éléments finis et celles obtenues à partir des expériences pour divers panneaux réparés avec différentes épaisseurs de plaques [17] [19].

La méthode des éléments finis peut être utilisée avec une grande précision pour évaluer les facteurs d'intensité de contrainte et d'autres paramètres de fracture au fond de la fissure. L'analyse par éléments finis du renforcement composite menée par Mitchell [24] [26] semble être la première tentative complète de compréhension analytique de cette catégorie de problèmes. Plus tard, la méthode des éléments finis a été utilisée par plusieurs autres auteurs, parmi lesquels Jones et Callinan [25], [27], [28], [29], [30], [31].

Des études numériques ont été réalisées par Hosseini-Toudeshky [34] et Mohammadi [30] pour évaluer les effets de contrainte résiduelle thermique sur la croissance des fissures de fatigue des panneaux réparés sur un seul côté liés à divers matériaux composites en mode chargement. Il a été montré que ces réparations fournissent une méthode efficace pour restaurer la capacité de charge ultime de la structure [30].

L'analyse des effets des propriétés géométriques du composite sur la performance de réparation a suscité un grand intérêt dans la littérature. Une bonne façon de concevoir une réparation par patch est de maximiser le rapport sécurité-coût en trouvant la forme optimale du patch [31][34]. Brighenti et Breitzman ont utilisé l'algorithme génétique pour optimiser la forme du patch. En adoptant le patch de forme optimale, le facteur d'intensité de contrainte peut être réduit à environ 50% par rapport à celui associé à un patch de forme simple (carrée ou rectangulaire) [38] [35].

De nombreux paramètres géométriques, matériels et de charge affectent l'efficacité de la réparation de patch composite. Certaines des études précédentes ont examiné ces effets. Par exemple, les dimensions du patch, y compris l'épaisseur du patch, ont été étudiées [34]. L'orientation de la couche de composite fibreux a été étudiée par Ayatollahi [31] [36].

Cependant, plusieurs de ces études n'ont pas pris en compte l'effet de l'orientation des fibres et de l'utilisation d'un patch composite hybride pour réparer les structures endommagées. Dans la présente étude, la méthode des éléments finis est utilisée pour analyser les effets de l'angle d'orientation des fibres, de la séquence d'empilement et de l'utilisation des composites hybrides sur la distribution des contraintes et l'intégrale J au fond de la fissure d'une plaque endommagée et réparée par patch composite soumise à une charge de traction.

Cette étude a été conduite en vue d'analyser le comportement d'une structure fissurée et réparée par patch en composite. L'approche énergétique, de la mécanique non linéaire de la rupture fondée sur l'intégrale J de Rice, est utilisée pour décrire le comportement en rupture de la plaque réparée par patch. L'influence des propriétés mécaniques de l'adhésif, ainsi que l'orientation des fibres, l'utilisation d'un patch hybride, l'épaisseur des différentes couches du patch et la taille de la fissure ont été mis en évidence sur les variations de l'intégrale J en pointe de fissure pour une réparation par patch.

Tout d'abord, nous étudions l'effet de l'orientation des fibres spécialement la position des couches qui ont un angle différent de 0^0 après la première couche d'orientation $[0^\circ]$ sur l'intégrale J et d'autre part, nous essayons de voir l'effet des propriétés mécaniques du patch et l'utilisation d'un patch hybride sur la réduction de la distribution des contraintes et l'intégrale J.

IV.2. Modèle géométrique et présentation des propriétés des matériaux :

Dans cette modélisation, on considère une plaque rectangulaire mince en aluminium 2024-T3 ayant les dimensions suivantes:

Hauteur $H = 250$ mm, largeur $w = 125$ mm, épaisseur $e = 2$ mm. Une fissure latérale initiale de 8 mm de longueur est supposée exister dans la plaque perpendiculaire à la direction de chargement.

La plaque a été réparée par un patch rectangulaire externe et soumise à un déplacement imposé d'une valeur $U = 0,5$ mm. Le patch composite est collé à la plaque fissurée pour le renforcement de la fissure latérale (Figure IV.1). Les dimensions du patch sont: Longueur $H_r = 50$ mm, largeur $w_r = 25$ mm et épaisseur $e_r = 1$ mm.

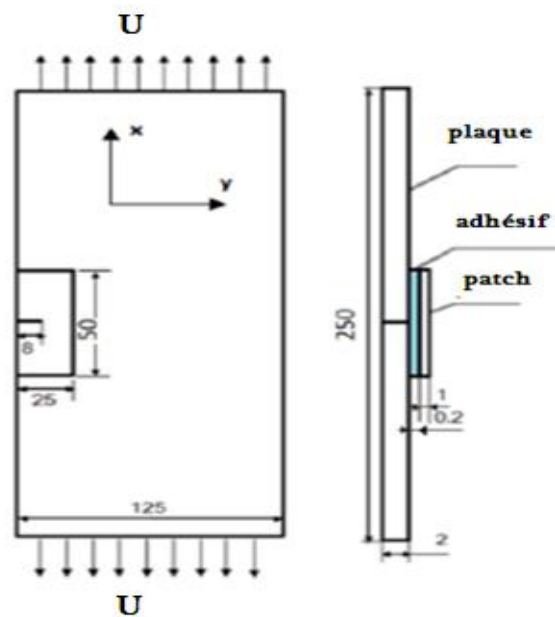


Figure IV.1 : Modèle géométrique de la plaque réparée

Les essais de traction effectués sur la plaque d'aluminium 2024-T3 et l'adhésif ADEKIT A140 ont permis d'avoir des courbes caractéristiques indiquées dans la figure IV.2. [37].

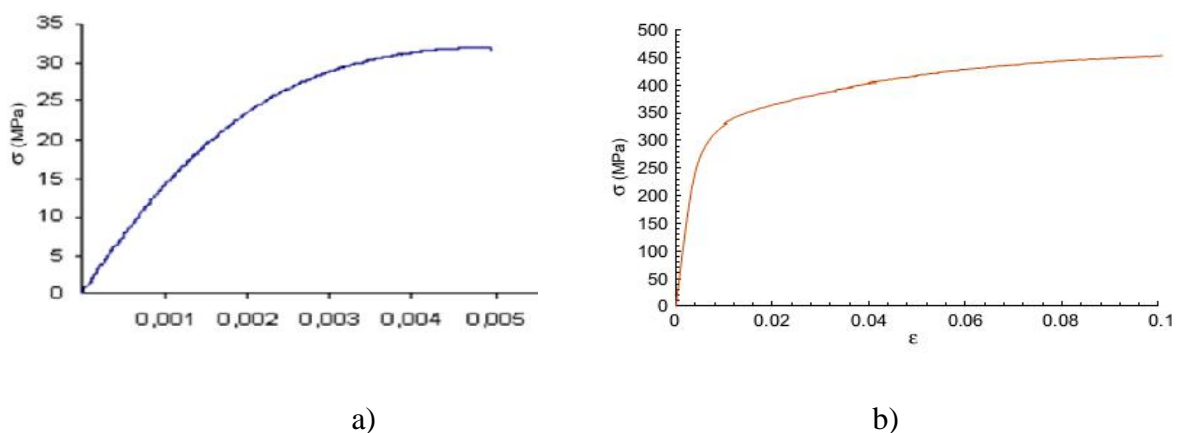


Figure IV.2. : Courbe Traction contrainte-déformation pour :
a) - plaque d'aluminium, b) - adhésif ADEKIT A140 [11, 37]

A partir de ces deux courbes, on peut déterminer les propriétés mécaniques des deux matériaux indiquées dans le tableau IV.1.

Materiaux	E (Gpa)	G (Gpa)	
Adekit A140	2.690	0.99	0.3
Aluminium 2024T3	69	36.92	0.3

Tableau IV.1: Propriétés mécaniques de l'aluminium 2024-T3 et de l'adhésif A140.

Dans cette analyse, nous avons supposé deux natures de composites stratifiés à savoir : carbone/époxyde [39] et aramide/époxyde [40]. Les propriétés des matériaux utilisés dans cette étude sont énumérées dans le tableau IV.2.

Materiaaux	E1 (Gpa)	E2 (Gpa)	E3 (Gpa)	G12 (Gpa)	G13 (Gpa)	G23 (Gpa)	12	13	23
Carbon-epoxy	109.000	8.819	8.819	4.315	4.31	3.200	0.342	0.342	0.38
Aramid-epoxy	76	5.5	5.5	2.3	2.3	2.3	0.34	0.34	0.34

Tableau IV. 2 : Propriétés mécaniques du composite.

Ces deux types de composites ont été choisis pour réparer la plaque fissurée et voir l'effet de la modification de l'épaisseur des couches de composite ainsi l'utilisation d'un composite hybride sur la réduction de la valeur de l'intégrale J et la distribution des contraintes dans la couche adhésive.

Quatre séquences d'empilement (tableau IV.3) et trois modifications géométriques du patch composite (Figure IV. 3) sont prises en compte dans cette étude afin d'examiner leurs effets sur la réduction de l'intégrale J. L'angle des couches d'orientation sont mesurées dans la direction longitudinale de la structure (axe des x) [voir Figure IV.1].

1 - (0/-45/45/90) _s	2 - (0/45/-45/90) _s
3 - (0/-45/90/45) _s	4 - (0/45/90/-45) _s

Tableau IV. 3 : Différentes séquences d'empilement du composite utilisées dans notre étude.

Les différentes géométries du patch utilisées pour la réparation de la plaque sont représentées dans la figure IV. 3. Tout d'abord, on a essayé d'utiliser un patch avec des couches identiques de même épaisseur et avec différentes orientations. En deuxième lieu, on a essayé de modifier la valeur de l'épaisseur de chaque couche comme l'indique les figures IV.3. (b) et IV.3. (c).

Nous avons utilisé un patch avec la même épaisseur de toutes les couches mais avec des orientations différentes (figure IV.3.a)

L'épaisseur des couches change avec le changement du modèle de configuration du patch:
 Pour le stratifié de configuration N°1, les épaisseurs sont identiques et ont une valeur de 0,125 mm.
 Pour le modèle de configuration N°2, les épaisseurs des stratifiés ont tendance à diminuer vers l'extérieur : 0,200 mm-0,145 mm, 0,130 mm, 0,125 mm, inversement pour le modèle configuration N°3 ou des couches d'épaisseur ont tendance à diminuer vers l'intérieur, (voir Figure IV. 3).

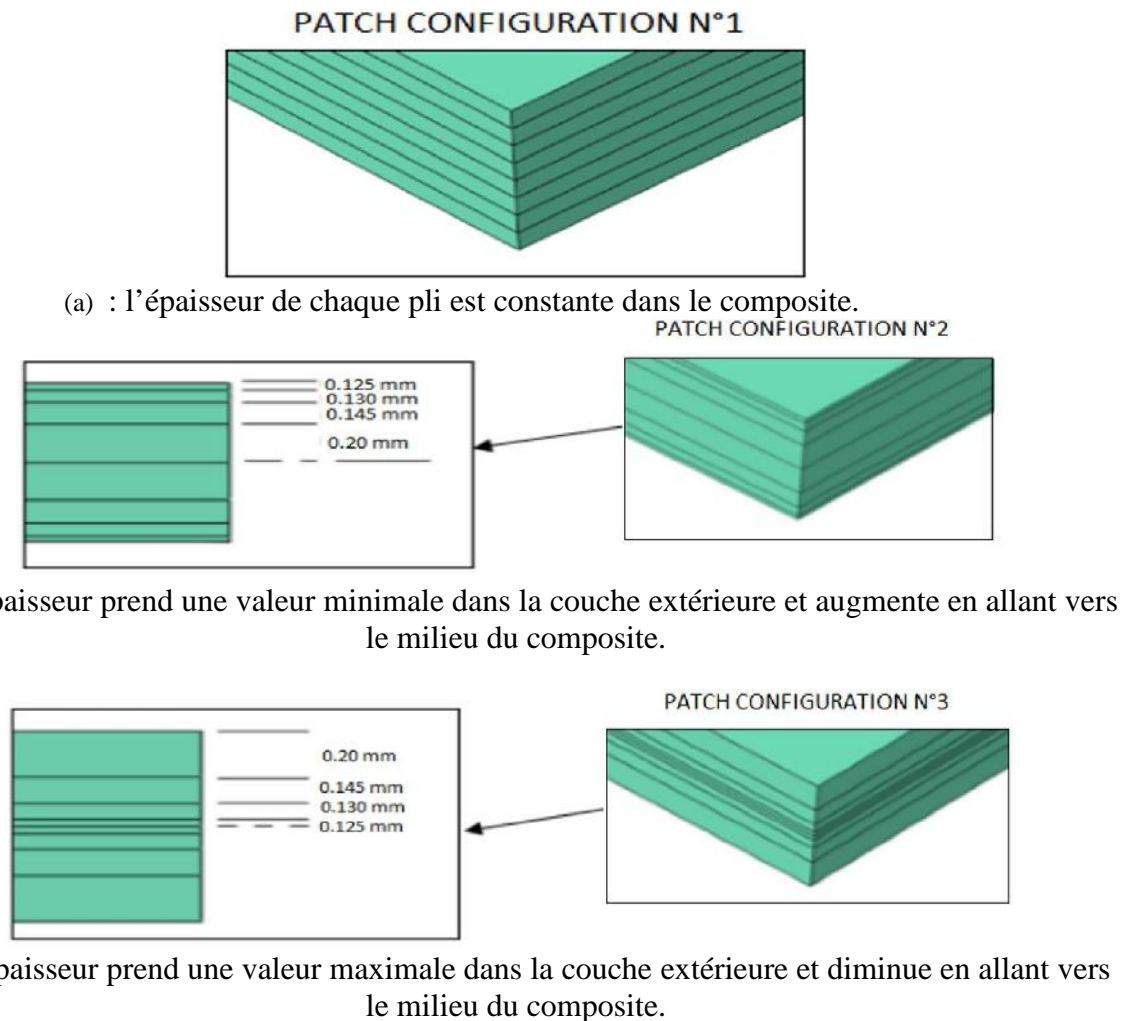


Figure IV.3 : Représentation des différentes géométries du patch.

Pour le composite hybride, on a essayé de modifier les propriétés mécaniques des différentes couches (comme le montre les séquences d'empilement suivantes :

1 - (0 _A /-45 _A /45 _A /90 _C) _S	3 - (0 _A /-45 _C /90 _A /45 _A) _S
2 - (0 _A /45 _A /-45 _C /90 _A) _S	4 - (0 _C /45 _A /90 _A /-45 _A) _S

Tableau IV. 3 : Configuration du composite hybride.

Ou C : fibre de Carbone et A : fibre d'Aramide

Nous changeons seulement la nature des fibres de deux couches pour ces trois configurations du patch. Par conséquent, nous obtenons 8 plies du composite avec 6 couches aramide/époxyde et 2 couches de carbone /époxyde.

Pour ce choix du composite hybride, on a essayé de modifier juste les couches qui ont la même orientation de la fibre et ceci pour chaque séquence d'empilement.

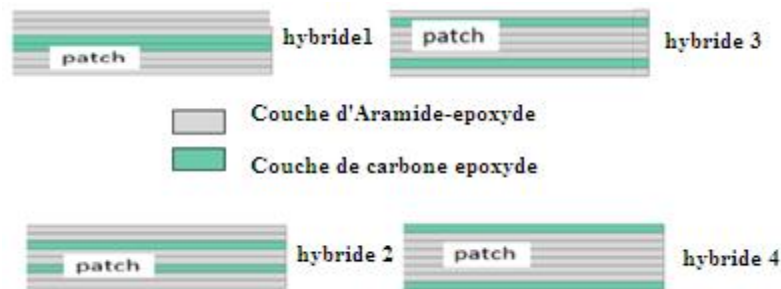


Figure IV. 4: Différentes configurations du composite (2 couches en carbone et 6 couches en aramide).

IV.3. Modélisation par éléments finis

L'analyse par éléments finis de la configuration de la plaque réparée (représentée sur la Figure IV.5) se fait à l'aide du code de calcul ABAQUS [42]. La structure des couches du stratifié (patch) est en fait une structure tridimensionnelle. Un modèle d'éléments finis en trois dimensions d'une telle structure comporte plusieurs degrés de complexité. Afin de saisir les caractéristiques essentielles de la réponse que nous faisons même des hypothèses simplificatrices, les dernières citées et désignées ci-après, ont comme résultat:

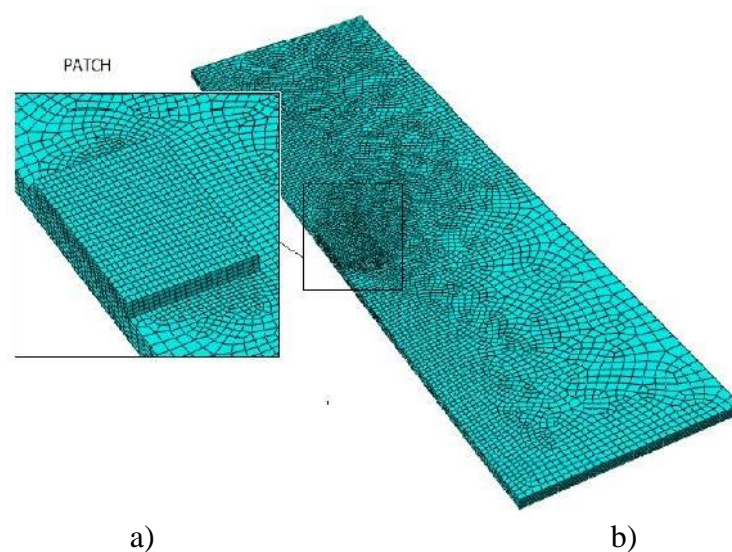


Figure IV.5. Détails du maillage de la plaque réparée a) zone de patch et b) de fissure

- Chaque couche est considérée comme structure tridimensionnelle, elle est peut être relié par des liaisons adhésives.

- La couche adhésive est homogène, élasto-plastique et isotrope et se déforme sous les contraintes de traction, cisaillement et de pelage.

L'adhésif est modélisé sous la forme d'une troisième couche. Dans le modèle d'éléments finis, les nœuds sont communs entre chaque structure tridimensionnelle de sorte qu'il y ait une continuité de la déformation et de la contrainte.

Cette technique de la modélisation des trois couches a été employée par Naboulsi et Mall [18]. Elle utilise l'analyse par éléments finis à deux dimensions, composée de trois couches, pour modéliser Le joint adhésif. La technique des trois couches est différente parce que l'adhésif est modélisé comme un milieu continu en remplaçant les éléments de ressort de cisaillement (organes non continus) couramment utilisés dans les méthodes d'éléments finis existants [41]. L'avantage de la modélisation de l'adhésif comme un corps continu est d'être en mesure de capter les caractéristiques de l'adhésif qui sont nécessaires pour tenir compte des effets de chaleur, un comportement non linéaire de la matière, la détérioration progressive, etc. Les éléments utilisés dans la modélisation de l'ensemble sont quadrilatérales standards de 8 nœuds iso paramétriques.

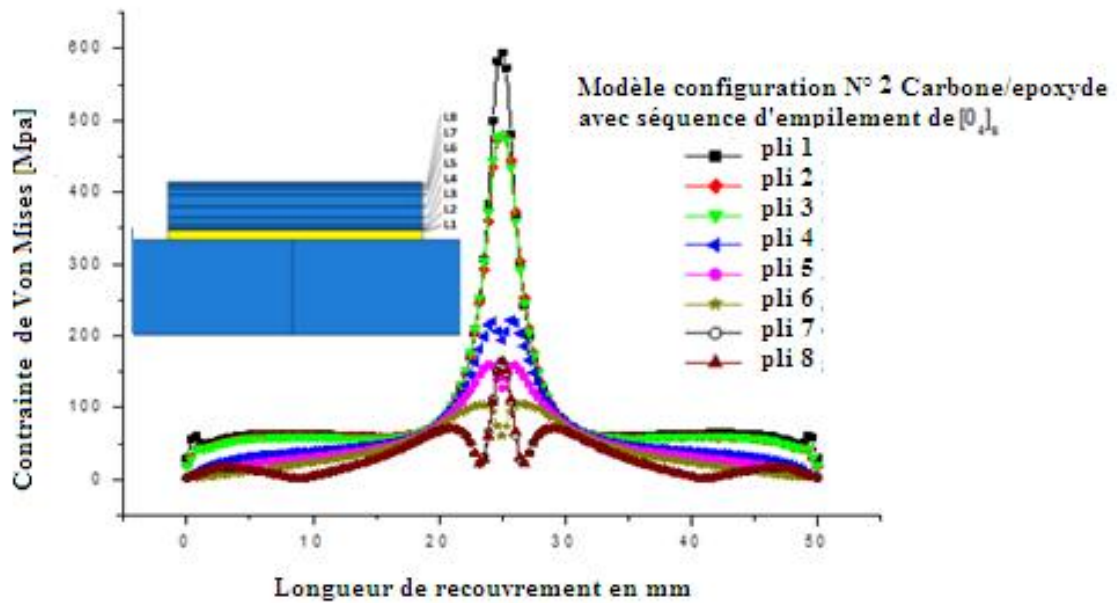
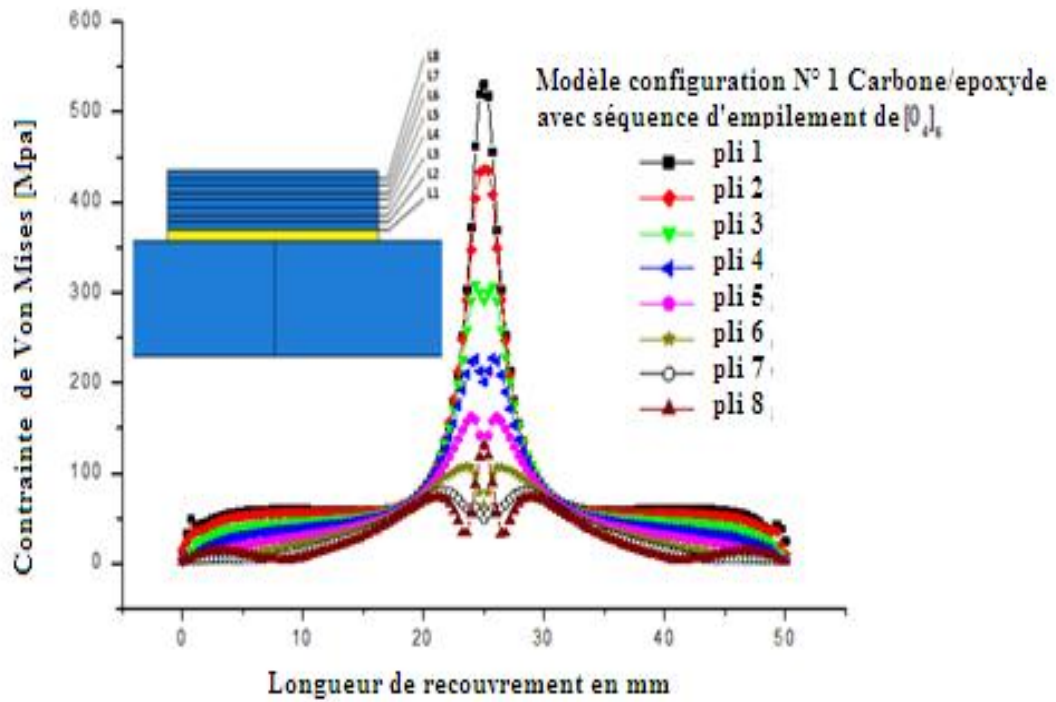
IV.4. Analyse et résultats

IV.4.1. Effet du modèle géométrique du patch sur la distribution des contraintes

IV.4.1.1. Distribution des contraintes de Von Mises dans chaque couche du composite :

Afin d'étudier l'effet des changements géométriques et mécaniques du patch sur le transfert de charge de la plaque vers le patch à travers l'adhésif, on a présenté dans la figure IV.6, la distribution des contraintes équivalentes de Von Mises dans les différentes couches du patch.

Dans cette partie de l'étude, la séquence d'empilement choisie est $[0^\circ]$ et comme nature de matériaux, on a pris le carbone/époxyde.



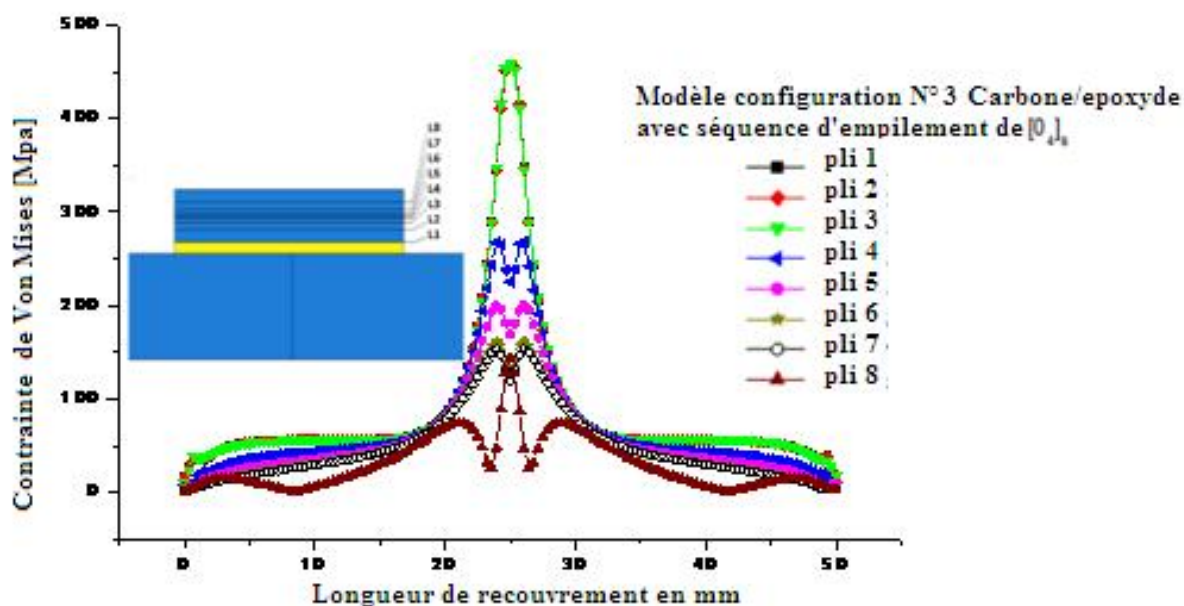


Figure IV.6 : Comparaison des distributions de contraintes dans les différentes couches pour les trois modèles de patch (séquence d'empilement choisi $[0_8]$).

La première remarque est que la distribution des contraintes dans les différents plis est quasi-identique quelque soit la modification apportée au patch.

Les contraintes sont maximales dans les premières couches qui sont en contact avec l'adhésif. En allant vers l'extérieur du patch, la valeur de la contrainte diminue. Les contraintes sont concentrées au niveau de la pointe de fissure et diminuent en allant vers le bord libre du patch.

Par conséquent, les différentes modifications apportées à la géométrie du patch n'influent pas sur la distribution des contraintes dans le patch ainsi que sur le transfert de charge plaque /adhésif/patch.

On remarque que la distribution des contraintes est identique quelque soit la configuration du patch, la valeur est maximale au niveau de la fissure et aux niveaux du bord.

Les patches avec la configuration N°2 absorbent plus de contraintes de la plaque endommagée que les patches de configuration N°1 et N°3.

L'effet de la flexion due à l'excentricité de l'axe neutre provoquée par la réparation par simple patch (configuration N°1) induit des contraintes maximales aux niveaux du bord. Le

modèle configuration N°1 [l'épaisseur des couches est identique] provoque moins de flexion par rapport aux autres modèles et donc des contraintes moins élevées aux bords.

Le modèle 2 [épaisseur dégradé vers l'intérieur] présente des contraintes plus élevées et moins de flexion par rapport aux autres modèles.

La mesure de la déformation de la structure réparée montre clairement que la valeur est significativement plus élevée dans le cas de la réparation du patch avec la configuration N°3 [figure IV.8].

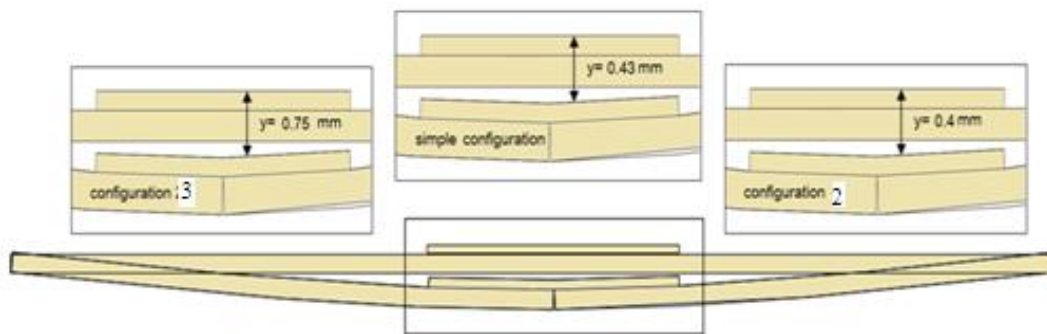


Figure IV.7 : Flexion de la plaque réparée en fonction des différentes configurations du patch [0₈].

La distribution des contraintes dans la couche d'adhésif présente des valeurs maximales au niveau de la fissure et aux niveaux des bords [Figure IV.8].

Le transfert de charge à travers l'adhésif est très important pour les différentes configurations de patch. Le patch qui est configuré avec des épaisseurs des couches dégradées vers l'intérieur cause des contraintes élevées dans la couche d'adhésif.

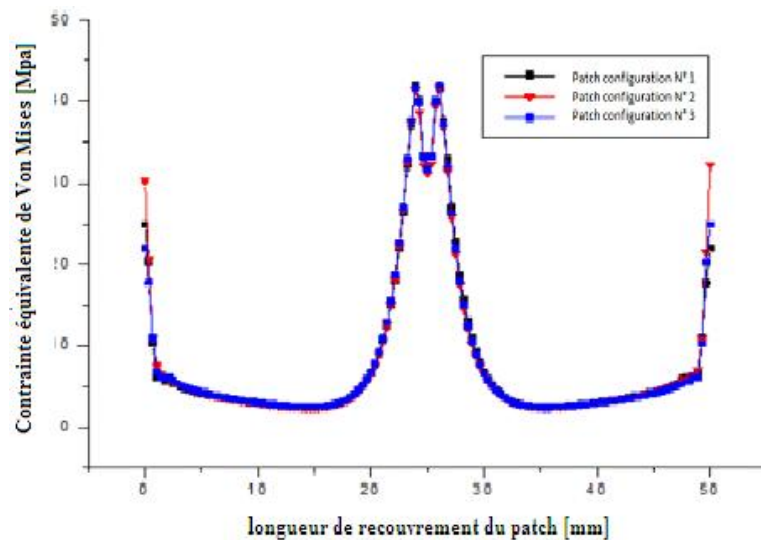


Figure IV.8 : Comparaison de la distribution des contraintes pour les modifications des trois géométries du patch à l'interface plaque / adhésif (composite carbone / époxyde avec une séquence d'empilement de $[0^\circ]_8$).

De même, le niveau de contrainte dans la plaque montre clairement que le patch avec la configuration N°2 [épaisseur dégradée du milieu vers l'extérieur] absorbe plus de contrainte de la plaque par rapport aux deux autres configurations et donc moins de contraintes dans la plaque [Figure IV.9].

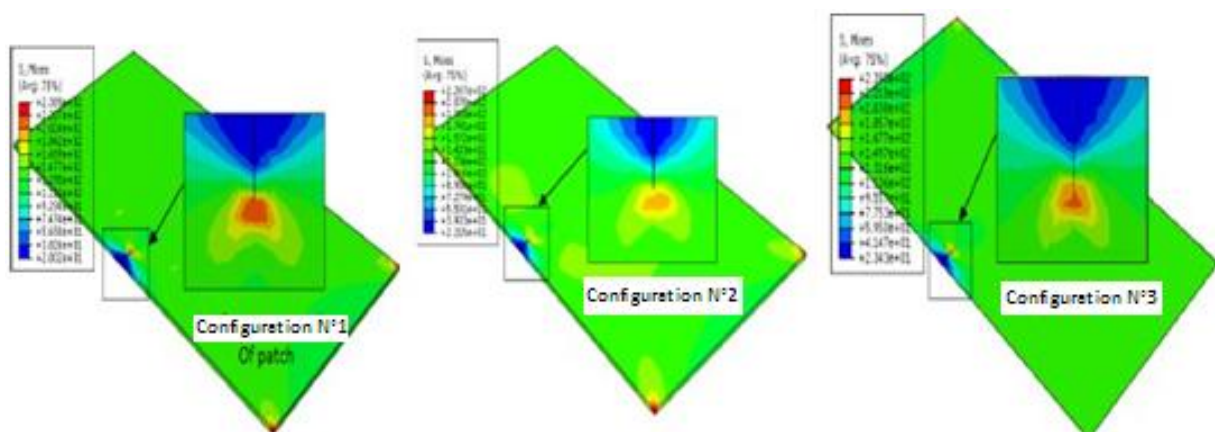


Figure IV.9 : Niveau des contraintes dans la plaque réparée pour chaque configuration du patch (séquence d'empilement choisi $[0^\circ]_8$).

IV.4.2 Variation de l'intégrale J

IV.4.2.1 Effet des modifications géométriques du patch sur la valeur de l'intégrale J :

Afin d'analyser l'effet des différentes modifications du patch sur la valeur de l'intégrale J en fonction des 4 types de séquence d'empilement cités dans le tableau IV.3 ; on a pris comme matériau pour le patch du carbone époxyde.

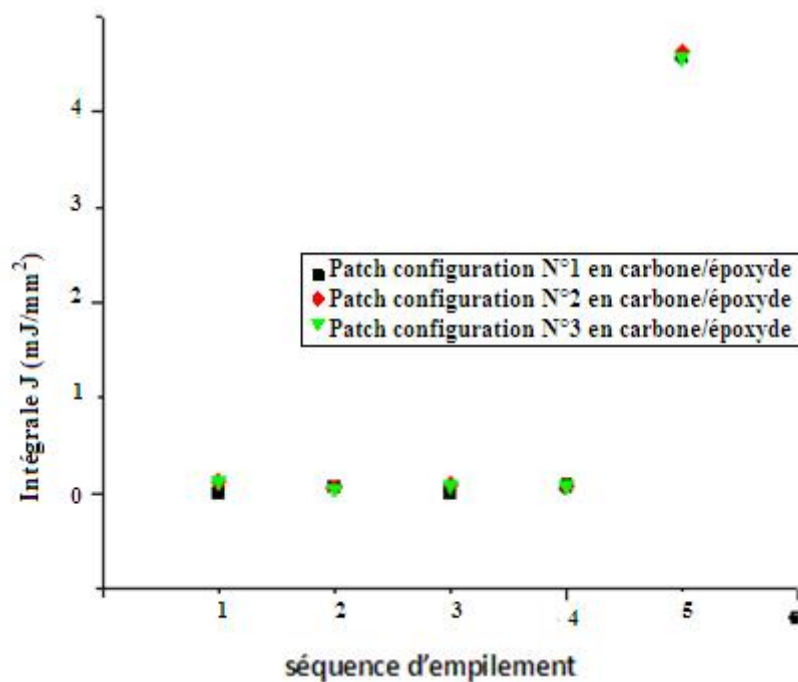
Dans notre analyse numérique, on a pris juste la valeur maximale de l'intégrale J pour les différents contours et une seule longueur de fissure [8 mm]. D'après la Figure IV.10. (a), on remarque clairement que la valeur de l'intégrale J varie selon l'emplacement des couches dont l'orientation des fibres est différente de 0° par rapport à la première couche qui est fixée à 0° dans tout le reste de notre étude [orientation des fibres est 0°].

La valeur maximale de l'intégrale J est pour le cas où toutes les couches sont orientées à 0° [composite unidirectionnel]. Dans ce cas, le patch est trop rigide [module d'Young élevé] et donc les contraintes sont plus concentrées dans la plaque ainsi une valeur élevée de l'intégrale J. La valeur de l'intégrale J de la plaque réparée par le patch unidirectionnel est trop élevée par rapport aux autres valeurs, c'est pourquoi on a présenté dans la figure IV.10.(b) juste les 4 séquences d'empilement.

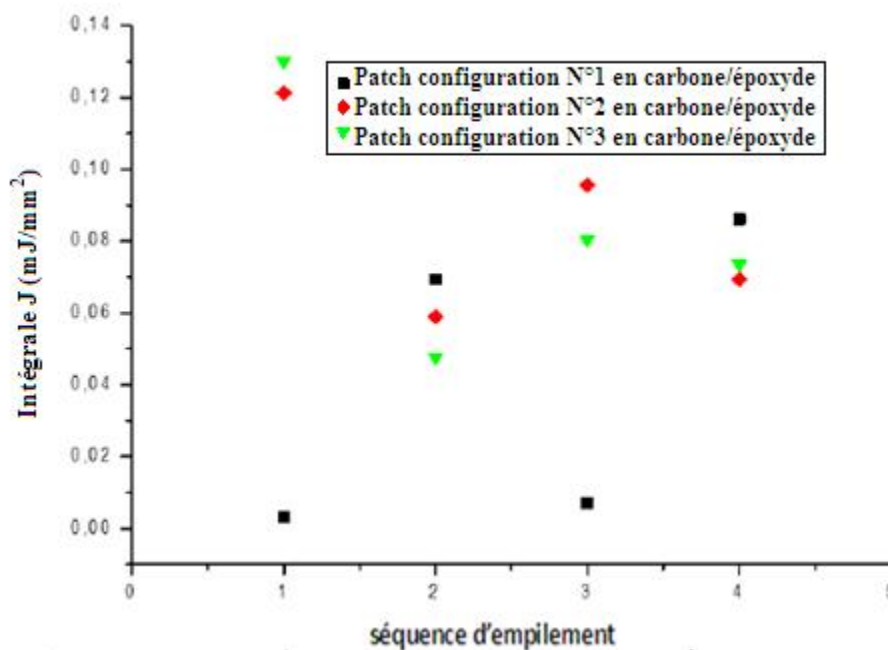
Dans la figure IV.10 (b), la valeur de l'intégrale J est minimale dans le cas où le patch a une configuration simple [épaisseur des couches est identique] avec les séquences d'empilement $(0/-45/45/90)_S$ et $(0/-45/90/45)_S$, par contre, dans le cas de la séquence d'empilement $(0/45/-45/90)_S$, la valeur de l'intégrale J est minimale pour une plaque réparée par un patch configuré selon le modèle 3.

Pour le cas de la séquence d'empilement $[(0/45/90/-45)_S]$, la valeur de l'intégrale J est minimale dans le cas où la plaque est réparée par un patch dont sa configuration est de type [modèle 2].

Quelques soit le type de la modification géométrique du patch ainsi que la séquence d'empilement, la valeur de l'intégrale J reste toujours minimale par rapport au cas où la séquence d'empilement est $[0^\circ]_8$.



a)



b)

Figure IV.10 : Variation de l'intégrale J en fonction des différentes séquences d'empilement pour les différentes configurations du patch de réparation (carbone/époxyde).

Ce comportement est presque identique même si on change la nature du composite en prenant par exemple comme nature du matériau de réparation de l'aramide/époxyde (Figure IV. 11).

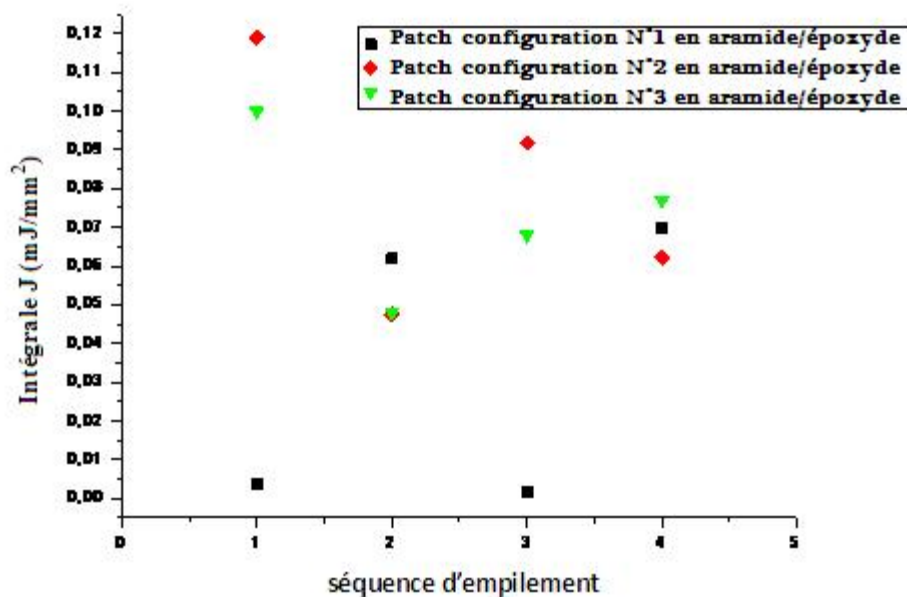


Figure IV.11 : Variation de l'intégrale J en fonction des différentes séquences d'empilement pour les différentes configurations du patch de réparation (aramide/époxyde).

Le transfert de charge de la plaque endommagée vers le patch passe par l'adhésif qui est le maillon faible dans la structure. L'analyse des contraintes dans l'adhésif est essentielle pour éviter la rupture de ce dernier.

La figure (IV.12) représente la variation de la contrainte équivalente de Von Mises dans la couche d'adhésif en fonction des différents séquences d'empilement pour les différentes configurations géométriques du patch.

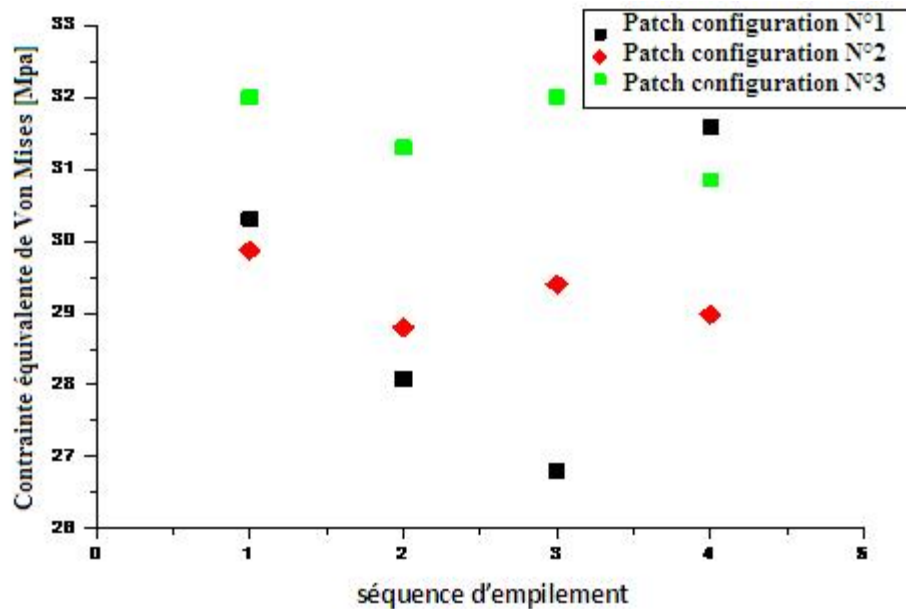
On remarque clairement que la valeur de la contrainte de Von Mises est influencée par le type de la modification du patch ainsi que la séquence d'empilement.

La valeur minimale de la contrainte de Von Mises est pour le cas d'une plaque réparée par patch dont sa séquence d'empilement est du type $[0/-45/90/45]_s$.

Pour le cas de la réparation avec un patch configuré selon le modèle 3, quelques soit la séquence d'empilement, on a toujours des valeurs maximales de Von Mises dans la couche de l'adhésif.

Pour le cas de réparation avec le patch configuré selon le modèle 2, la valeur de la contrainte de Von Mises est maximale dans le cas de la séquence d'empilement est $[0/-45/45/90]_s$.

Dans la réparation d'une plaque endommagée par un patch en composite dont ces différentes couches ont différentes orientations des fibres, il est indispensable de faire un choix optimal pour l'emplacement de ces couches pour éviter des contraintes maximales dans la couche d'adhésif.



d)

Figure IV.12 : Variation de la contrainte équivalente de Von Mises dans la couche d'adhésif en fonction des différents séquences d'empilement pour les différentes configurations géométriques du patch.

IV.4.2.2. Effet de l'utilisation d'un composite hybride

La réparation avec un matériau composite hybride n'est pas très utilisée car cette technique est nouvelle dans le secteur aéronautique. L'objectif de cette section est d'analyser, au moyen de la méthode des éléments finis, l'effet de l'utilisation d'un patch composite hybride sur la valeur de l'intégrale J.

Dans cette étude, nous allons essayer de réparer la plaque endommagée par un composite hybride, dans ce cas, le composite stratifié a plus d'aramide que de couches de carbone.

Nous savons très bien que le patch en carbone / époxyde absorbe plus de contraintes que le patch aramide / époxyde en raison de ses hautes propriétés mécaniques. La nature des matériaux composites joue un rôle important dans le retard de la propagation de la fissure et

apporte une longue durée de vie de la structure. C'est pourquoi, la plupart des patches de réparation sont basés sur le carbone, le bore et le graphite.

Dans la figure IV.13, nous présentons la distribution de la contrainte de Von Mises dans le patch composite pour différents types de fibres : a) patch aramide / époxyde et b) carbone / époxyde).

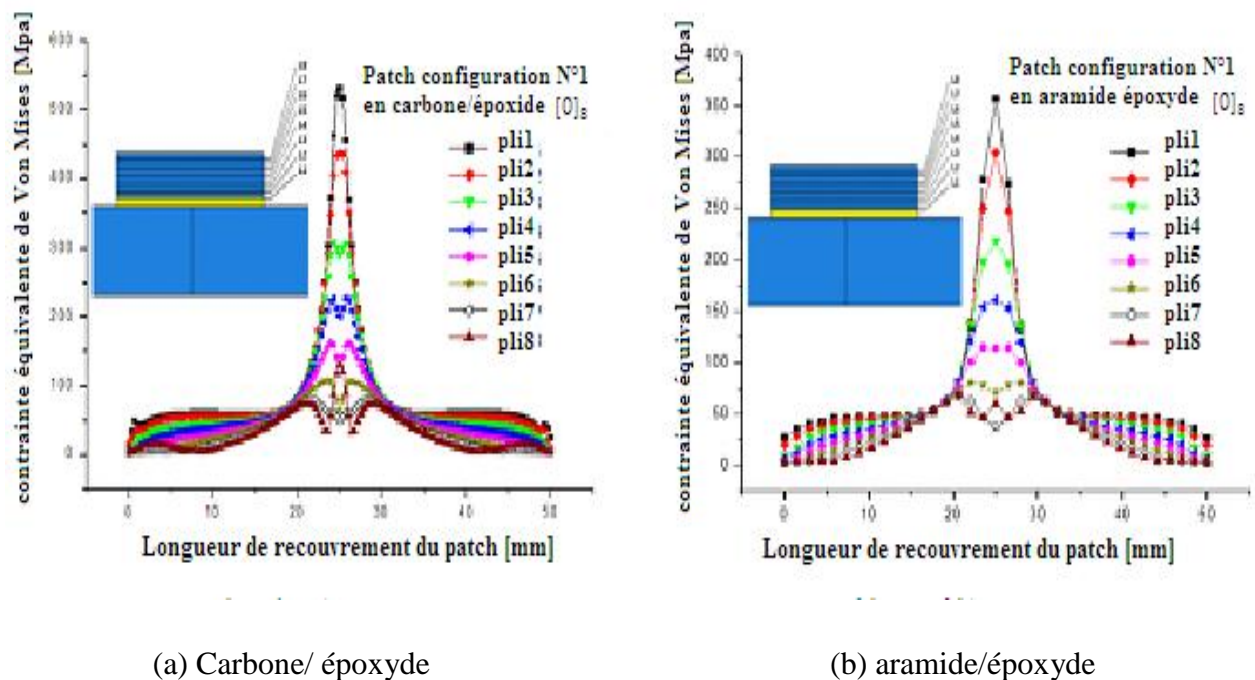


Figure IV. 13 : Distribution des contraintes dans les différentes couches du composite de réparation (Cas du composite de réparation hybride : aramide/époxyde renforcé par carbone/époxyde).

La distribution des contraintes dans les différentes couches du composite réparé est identique quelle que soit la nature de la fibre, sauf que le patch en carbone / époxyde a des valeurs plus élevées par rapport au patch aramide / époxyde. Ces valeurs maximales sont provoquées par un meilleur transfert de charge de la plaque vers le patch. Donc, dans la plupart des cas, le patch de réparation est choisi trop rigide afin d'avoir un meilleur transfert de contrainte (Figure IV.13). Le patch en aramide / époxyde absorbe lui-même des contraintes de la plaque endommagée mais restent inférieures à celles du patch en carbone.

Le taux de transfert de charge d'une couche à l'autre est sensiblement le même quelle que soit la nature de la fibre.

Pour voir l'effet de l'utilisation d'un patch hybride sur la réduction de la valeur de l'intégrale J de la plaque et de la contrainte dans la couche adhésive, nous avons voulu renforcer le composite aramide / époxyde avec des couches en carbone / époxyde [6 couches d'aramide et 2 couches de carbone]. La position des deux couches de carbone dans le composite hybride varie selon les configurations présentées à la figure IV.14.

Pour chaque composite hybride, l'orientation des deux couches de carbone / époxyde varie en fonction des séquences d'empilement sélectionnées dans le tableau IV. 3.

Aussi, nous avons essayé d'étudier pour chaque cas de composite hybride, l'influence des changements géométriques du patch selon les modèles 1, 2, ou 3 (figure IV.3).

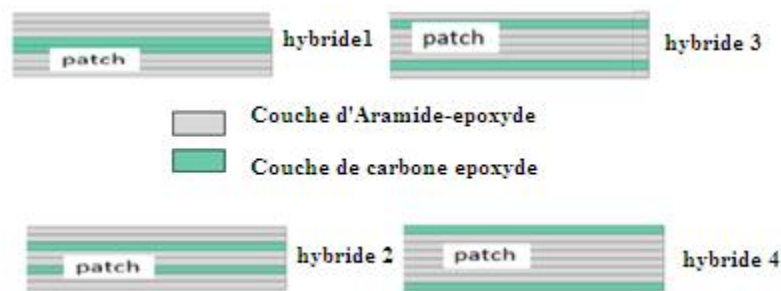


Figure IV. 14: Différentes configurations du composite hybride

L'analyse des résultats liés aux différents paramètres sur la valeur de l'intégrale J pour la plaque réparée par patch composite hybride est montrée sur la figure IV.15.

Le patch composite hybride réduit considérablement les valeurs de l'intégrale J par rapport à un patch d'aramide / époxyde. Dans le patch hybride, la position des deux couches de carbone joue un rôle important dans la réduction de la valeur de l'intégrale J. De plus, il est nécessaire de noter que l'orientation des fibres des autres couches affecte également la valeur de l'intégrale J.

La valeur de l'intégrale J est minimale dans le cas des séquences d'empilement $(0/-45/45/90)_S$ et $(0/-45/ 90/45)_S$ avec les configurations du patch hybride respectivement (hybride1et hybride2) .

La valeur de l'intégrale J est maximale lorsque les deux couches de carbone sont justes après la première couche du patch composite.

Cependant, si le patch a la séquence d'empilement $(0/45 / -45 / 90)_s$, il est préférable d'utiliser un composite avec la deuxième configuration d'hybride et une épaisseur identique pour toutes les couches.

De même, nous essayons d'analyser la valeur de l'intégrale J pour les deux autres configurations de patch (l'épaisseur des couches ne sont pas les mêmes (figures IV.3b et IV.3c)).

Pour ces deux modèles de patch, quel que soit le composite de réparation hybride ou non, les valeurs de l'intégrale J sont légèrement plus élevées que pour une plaque réparée par un simple patch où l'épaisseur des différentes couches est identique.

La valeur minimale de l'intégrale J est remarquée dans le cas où le patch est hybride et la position des deux couches de carbone est au milieu du composite (hybrid1) avec une séquence d'empilement $(0/45/90/-45)_s$. Cependant, la plus grande valeur est notée pour un composite hybride 2 et une séquence d'empilement $(0/ -45/45/90)_s$.

Pour la troisième configuration du patch, on voit clairement que la valeur de l'intégrale J varie à la fois avec la séquence d'empilement et la disposition des couches de carbone par rapport aux couches d'aramide.

Si la séquence d'empilement est de type $(0/-45/45/90)_s$, on notera que la disposition des deux couches de carbone n'affecte pas la valeur de l'intégrale J.

La valeur la plus faible est observée pour la séquence d'empilement $(0/-45/90/45)_s$ avec un composite hybride de type 3.

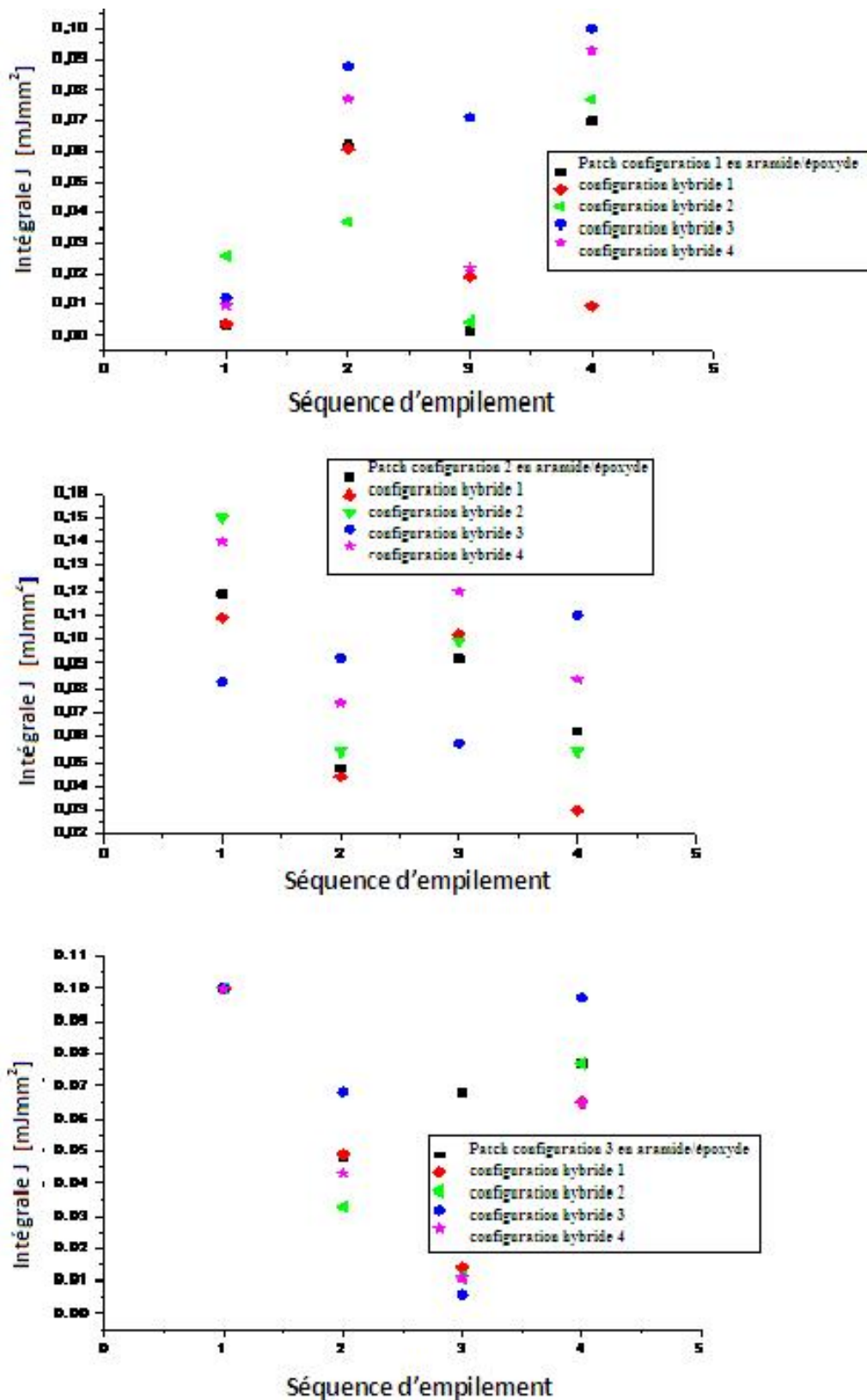


Figure IV.15 : Variation de l'intégrale J en fonction des différentes séquences d'empilement pour les différentes configurations du patch de réparation (aramide/époxyde).

Dans cette deuxième section, on a voulu renforcer le patch en aramide par des couches en carbone selon les configurations citées précédemment.

Ce composite hybride sera constitué de 8 couches [6 couches en aramide/époxyde et 2 couches en carbone/époxyde].

Les résultats de l'analyse numérique montrent clairement que la valeur de l'intégrale J est influencée par la séquence d'empilement et d'autres par l'utilisation d'un composite hybride.

Pour la première configuration du patch où l'épaisseur des couches est identique, la valeur de l'intégrale j n'est pas trop influencée par l'utilisation d'un composite hybride à part pour la séquence d'empilement [2] avec si la disposition des couches de carbone selon le type 1 et 2.

Pour la séquence d'empilement [4], la valeur de l'intégrale J est minimale pour le cas d'un patch hybride avec la configuration 1 où les 2 couches en carbone se trouvent au milieu du patch.

Pour les autres configurations du patch [modification de l'épaisseur], l'effet de l'utilisation d'un patch hybride est très significatif.

On remarque clairement que la valeur de l'intégrale J est très influencée par l'effet de la séquence d'empilement et par la position des couches en carbone par rapport aux couches d'aramide.

Pour la configuration du patch 1 : la valeur la plus faible de l'intégrale J est notée pour une plaque réparée par un patch hybride selon la disposition 1 des couches de carbone et la séquence d'empilement 4 [(0_A/45_C/90_C/-45_C)_S].

La valeur maximale est pour le cas d'un patch hybride avec la disposition 2 des couches par rapport aux couches d'hybride dont la séquence d'empilement est 1[(0_C/-45_C/45_C/90_A)_S].

La valeur de l'intégrale J est diminuée en utilisant un composite hybride mais en prenant en considération le type de la séquence d'empilement.

II.4.2.3 Distribution des contraintes dans la couche adhésive

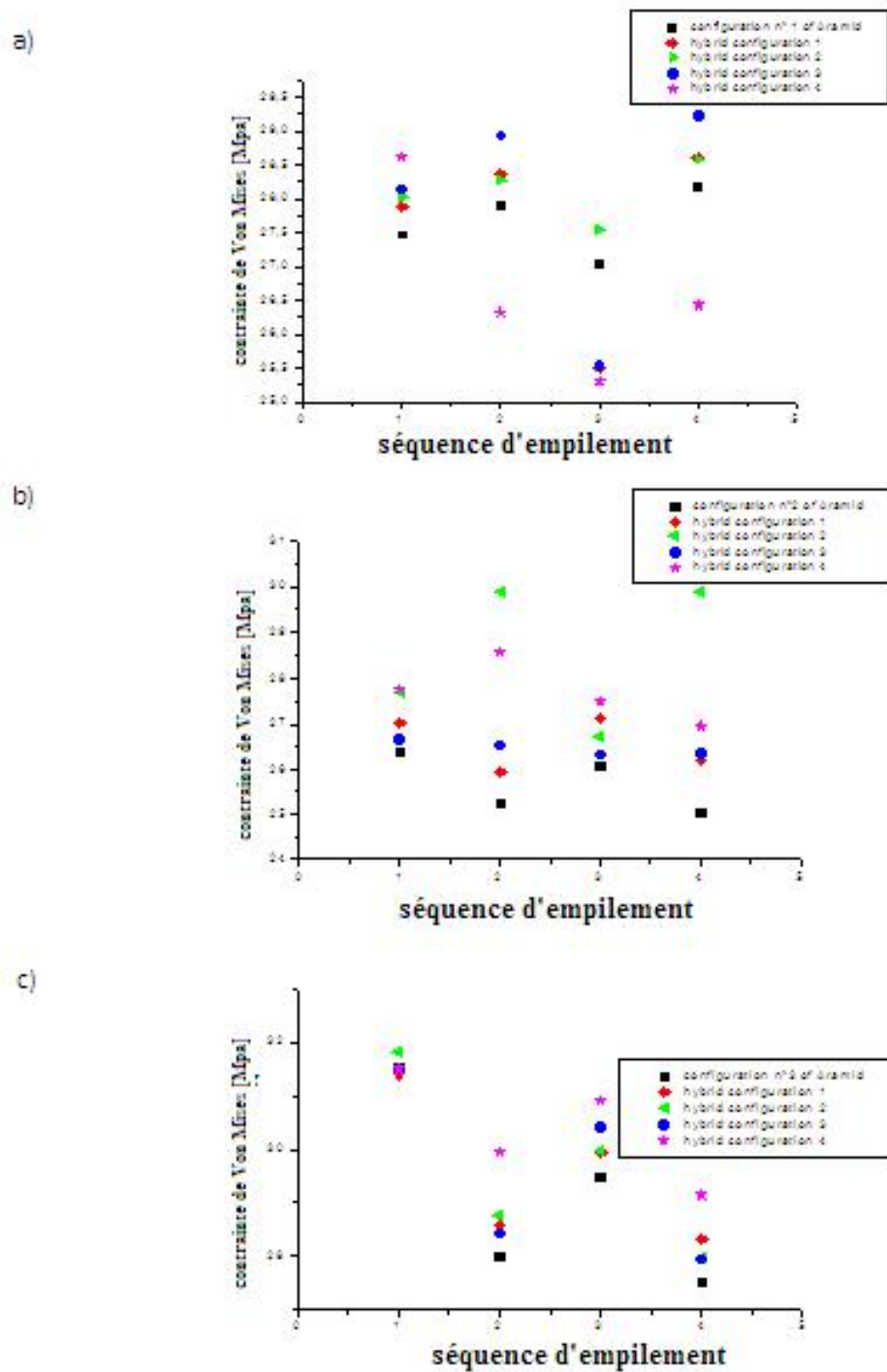


Figure. IV.16 : Variation de la contrainte de Von Mises pour les différents modèles de composite hybride basés sur différentes séquences d'empilement.

(a) configuration du patch N° 1, (b) configuration du patch N° 2, (c) configuration du patch N° 3.

Afin de voir si le changement géométrique du patch, les séquences d'empilement et l'utilisation de composite hybride ont une influence sur la valeur de la contrainte équivalente dans la couche d'adhésif, on a représenté, dans la figure IV.16, la variation de la contrainte de Von Mises dans la couche d'adhésif en fonction de la nature et de la séquence d'empilement du patch.

Si la plaque est réparée par patch composite avec des épaisseurs de couches selon la configuration 2 (figure IV.3), il est préférable d'utiliser un patch simple où les couches sont toutes en aramide /époxyde car le patch hybride donne des valeurs maximales dans les couches d'adhésif (figure IV.16 (b)).

Pour le modèle de patch avec des changements d'épaisseur de couches selon la configuration 3 (figure IV.3), la valeur maximale de la contrainte de Von Mises est observée pour un patch avec une séquence d'empilement (0/- 45/45/90) s. où quel que soit le type composite hybride utilisé, il y a toujours une valeur maximale de la contrainte de Von Mises.

Les valeurs inférieures sont notées pour les séquences d'empilement (0/45 / -45 / 90)s et (0/45/90 / -45)s avec un patch composite simple où toutes les couches sont en aramide / époxyde (figure. IV.16 (c)).

Pour voir clairement le transfert de charge dans les différentes couches du composite hybride, on a analysé la distribution des contraintes de Von Mises dans les différentes couches des différents composites hybrides (figure IV. 17).

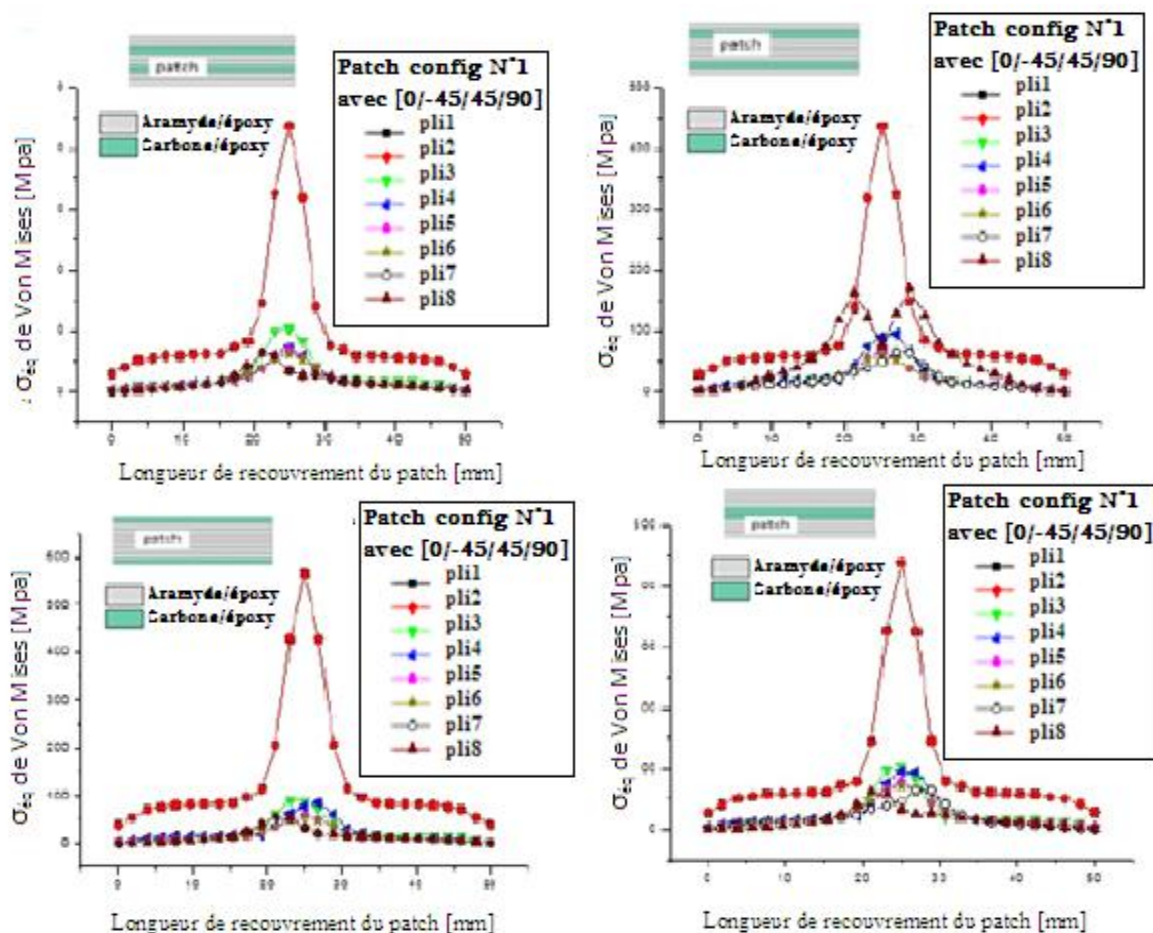


Figure .IV. 17 : Répartition de la contrainte de Von Mises suivant la longueur du patch dans les différentes couches dans les différents types de composite hybride ((0 / -45 / 45/90) S) (toutes les couches du patch ont la même épaisseur).

On voit clairement que la distribution des contraintes est la même quel que soit le type de composite hybride, la valeur maximale dans la couche du patch est toujours dans la couche qui est en contact avec l'adhésif.

La plus grande valeur de la contrainte de Von Mises est atteinte dans le cas du patch composite où la couche de carbone est en contact avec l'adhésif puisque, dans cette position, la couche de carbone peut mieux absorber les contraintes provenant de la plaque endommagée.

Afin de voir l'effet de la séquence d'empilement, nous analysons la distribution de la contrainte de Von Mises dans les différentes couches des quatre types du patch composite hybride pour la séquence d'empilement [0]₈. Les valeurs les plus élevées des contraintes sont observées lorsque la couche de carbone est en contact direct avec l'adhésif, entraînant un bon transfert de charge (figure IV.17).

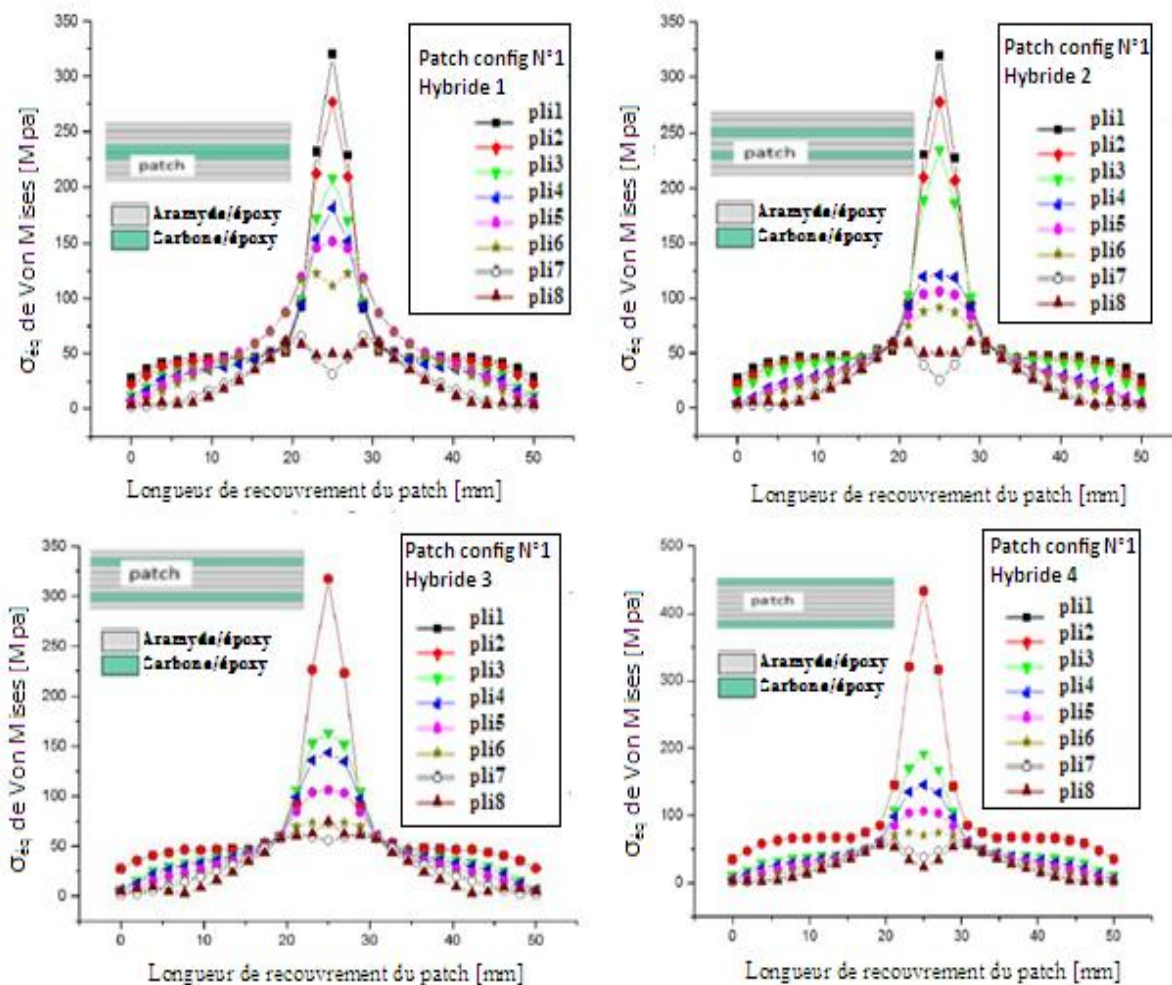


Figure IV. 18 : Répartition de la contrainte de Von Mises sur toute la longueur du patch dans les différentes couches selon les types du composite hybride $[0]_8$ (toutes les couches du patch ont la même épaisseur).

IV.5. Comparaison des résultats.

Le tableau IV.5 représente la comparaison entre les valeurs d'intégrale J pour les différentes configurations du patch.

Configuration de patch n° 1: L'épaisseur de chaque couche est la même dans le composite

Configuration de patch n° 2: Valeur minimale de l'épaisseur pour les couches externes et valeurs croissantes vers le milieu du composite.

Configuration de patch n° 3: Valeur maximale de l'épaisseur pour les couche externes et valeurs décroissantes vers le milieu du composite

- a- Patch normal. b- Patch hybride configuration1.
- c- Patch hybride configuration2. d- Patch hybride configuration3.

	(0/45/-45/90) _S	(0/45/90/-45) _S
Patch configuration 1	0.07 mj/mm²	0.085 mj/mm²
Patch configuration 2	-17%	-17%
Patch configuration 3	-28%	-11%

a) Patch

		(0/45/-45/90) _S	(0/45/90/-45) _S
	Patch configuration1	0.07 mj/mm²	0.085 mj/mm²
Patch configuration1	Patch hybrid configuration1	-5%	+14%
	Patch hybrid configuration2	-48%	-7%
	Patch hybrid configuration3	+25%	+17%
	Patch hybrid configuration4	+12%	+16%

b)

		(0/45/-45/90) _S	(0/45/90/-45) _S
	Patch configuration1	0.07 mj/ mm²	0.085 mj/ mm²
Patch configuration2	Patch hybrid configuration1	-35%	-64%
	Patch hybrid configuration2	-25%	-36%
	Patch hybrid configuration3	+34%	+29%
	Patch hybrid configuration4	+7%	-2%

c)

		[0/45/-45/90] _s	[0/45/90/-45] _s
	Patch configuration1	0.07 mj/ mm²	0.085 mj/mm²
Patch configuration3	Patch hybrid configuration1	-28%	-24%
	Patch hybrid configuration2	-50%	-8%
	Patch hybrid configuration3	-6%	+15%
	Patch hybrid configuration4	-35%	-24%

d)

Tableau IV. 4 : Comparaison entre les valeurs de l'Intégrale J pour les différentes configurations du patch.

Le tableau IV.4 représente une comparaison entre les valeurs de l'Intégrale J pour les différentes configurations du patch.

Pour la séquence d'empilement [0 / -45 / 45/90] s et [0 / -45 / 90/45] s : la configuration du patch N ° 1 reste la meilleure par rapport aux autres configurations de patch, soit la nature du patch (hybride ou normal).

Nous venons de présenter une comparaison pour les deux autres séquences d'empilement [0/45 / -45 / 90] s et [0/45/90 / -45] s. On note, pour ces deux séquences d'empilement, une diminution significative de la valeur l'Intégrale J.

Cette diminution de valeur dépend fortement de la géométrie du patch et de la position des deux couches de carbone par rapport aux couches d'aramide dans le patch hybride.

La meilleure configuration du patch qui apporte une meilleure absorption des contraintes dans la plaque et par conséquent une réduction de la valeur de l'Intégrale J est la configuration patch N°2 avec la séquence stratifiée [0A / 45A / 90A / -45C].

Conclusion:

Le travail que nous avons mené, nous a permis de traiter l'influence des modifications de la géométrie et de la séquence d'empilement du patch en composite sur les valeurs des paramètres de rupture calculés pour une plaque sollicitée à une traction contenant une fissure latérale. A cet effet, on dégage les constatations suivantes :

- La présence d'un patch réduit considérablement la concentration de contraintes qui peut retarder la naissance de la fissure et par la suite l'augmentation de la durée de vie de la structure en service.
- Le choix de l'épaisseur du patch est un des meilleurs moyens pour augmenter la performance de la réparation des structures.
- la distribution des contraintes dans les différents plis est quasi-identique quel que soit le type de la modification effectuée sur le patch.
- la distribution des contraintes est identique quel que soit la configuration du patch, la valeur est maximale au niveau de la fissure et aux niveaux du bord. La flexion due à l'excentricité de l'axe neutre provoquée par la réparation par simple patch induit des contraintes maximales aux niveaux du bord.
- Le transfert de charge à travers l'adhésif est très important pour les différentes couches de patch
- Quel que soit le type de la modification géométrique du patch ainsi que la séquence d'empilement, la valeur de l'intégrale J reste toujours minimale par rapport au cas où la séquence d'empilement est $[0^\circ]$.
- la valeur de la contrainte de Von Mises est influencée par le type de la modification du patch ainsi que la séquence d'empilement.
- Lorsqu'on a un composite rigide [carbone/époxyde] renforcé par deux couches d'aramide, la position des couches d'aramide par rapport aux autres couches constituant le stratifié joue un rôle important sur la réduction de la valeur de l'intégrale J dans la plaque et par conséquent sur le transfert de charge.
- la valeur de l'intégrale j varie selon la séquence d'empilement et en même temps en fonction de la disposition des couches d'aramide par rapport aux autres couches du stratifié [constituant le composite hybride].
- Le patch en aramide absorbe lui-même des contraintes de la plaque endommagée mais restent inférieures à celle du patch en carbone.

- la valeur de l'intégrale J est très influencée par l'effet de la séquence d'empilement et par la position des couches en carbone par rapport aux couches d'aramide.
- La valeur de l'intégrale J est diminuée en utilisant un composite hybride mais en prenant en considération le type de la séquence d'empilement.

References

- [1]Içten, B.M.; Karakuzu,R., (2002), “Compos Sci Technol”;62:1259–71.
- [2]Elhannani,M.; Madani, K.; Mokhtari, M.; Touzain, S.; Feugas, X.; Cohendoz, S. (2016), “A new analytical approach for optimization design of adhesively bonded single-lap joint”. Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal Vol.59 No.2
- [3]Benchiha, A. and Madani, K., (2015), “Influence of the presence of defects on the stresses shear distribution in the adhesive layer for the single-lap bonded joint”. Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal Vol. 53 No. 5
- [4]Benchiha.A.; Madani, K.; Touzain, S.; Feugas, X.; Ratwani, M.,(2016),” Numerical analysis of the Influence of the presence of disbond region in adhesive layer on the stress intensity factors (SIF) and crack opening displacement (COD) in plates repaired with a composite patch”. Steel and Composite Structures, An Int'l Journal Vol. 20 No. 4, 2016
- [5]Erdogan, F., Ratwani, M. (1971), “Stress distribution in bonded joints. ”J Compos Mater;5:378–93.
- [6]Hart-Smith, L.J. 1987,” Design of Adhesively Bonded Joints, Joining Fiber-Reinforced Plastics”, F. L. Matthews editor, 19, pp. 271-311
- [7]Costa Mattos, H.S., Monteiro, A.H., Palazzetti, R. (2012) ,“Failure analysis of adhesively bonded joints in composite materials. ” J Mater Des;33:242–7.
- [8]Thrall Jr Edward, W. (1977), “Primary adhesively bonded structure technology” (PABST). JAircraft;14:588–94.
- [9]Thrall Jr Edward, W. (1979), “PABST program test results. ”Adhes Age;22:22–33.
- [10]Grabovac, I.; Whittaker D., (2009), “Application of bonded composites in the repair of ships structures ”– A 15-year service experience, Composite: Part A 40 1381–1398.
- [11]Campilho, R.D.S.G.; Moura, M.F.S.F.; Domingues, J.J.M.S., (2005) ,“Modeling single and double-lap repairs on composites materials”, Composites Science and Technology 65 1948–1958.
- [12]Gong, X.-J. Cheng, P. Rousseau, J. Aivazzadeh, S. (2007), “ Effect of local stresses on static strength and fatigue life of patched composite panels”, in: Proceedings of 16th International Conference on Composite Materials,. Kyoto, online: www.iccm-central.org.
- [13]Costa, T.R.F. Serrano, A.M. Atman, A.P.F. Loguercio, A.D. Reis, A. (2012), “Durability of composite repair using different surface treatments”, Journal of Dentistry 40 513–521.
- [14]Belhouari, M.; Bouiadjra B.B.; Megueni, A.; Kaddouri, K.; (2004), “Comparison of double and single bonded repairs to symmetric composite structures: a numerical analysis”. Compos Struct;65(1):47–53.
- [15]Tsai, G.C.; Shen, S.B., (2004), “Fatigue analysis of cracked thick aluminum plate bonded with composite patches”. Compos Struct;64(1):79–90.
- [16]Klung, J.C.; Sun, C.T., (1998),“Large deflection effects of cracked aluminum plates repaired with

- bonded composite patches". *Compos Struct*;42:291–6.
- [17]Charalambides MN, Hardouin R, Kinloch AJ, Matthews FL. (1998) , “Adhesively-bonded repairs to fiber-composite materials” I. Experimental. *Composites A*;29(11):1371–81.
- [18]Bartholomeusz, RA.; Baker, AA.; Chester, RJ.; Searl, A., (1999) ,“Bonded joints with through-thickness adhesive ” stresses – reinforcing the F/A-18 Y470.5 bulkhead. *Int J AdhesAdhes*;19(2–3):173–80.
- [19]Naveen, R.; Soni, SR.; Denney, JJ., (1983) ,“Analysis of bonded composite patch repaired metallic structures – an overview of aging aircraft”, **AIAA98-**. p. 1578–88.
- [20]Charalambides, MN.; Kinloch, AJ.; Matthews, FL., (1998),“Adhesively-bonded repairs to fiber-composite materials II”. Finite element modeling. *Composites A*;29(11):1383–96.
- [21]Botelho, E. C., (2009),”Fatigue behavior study on repaired aramid fiber/epoxy composites *Journal of Aerospace*”, *Technology and Management V. 1*, n. 2, Jul. - Dec. 2009
- [22]Tenchev, R.T.; Falzon B.G.,(2008),” An Experimental and Numerical Study of the Static and Fatigue Performance of a Composite Adhesive Repair”, www.scientific.net/KEM.383.25 *Key Engineering Materials Vol. 383*10.4028
- [23]Moreira, R.D.F; de Moura. M.F.S.F.; Figueiredo M.A.V.; Fernandes, R.L.A.; Gonçalves, J.P.M.,(2015), ”Characterisation of composite bonded single-strap repairs under fatigue loading”, *./International Journal of Mechanical Sciences*103 (2015)22–29
- [24]Gong, X.-J.,P.; Cheng, Rousseau, J.; Aivazzadeh S., (2007), “Effect of local stresses on static strength and fatigue life of patched composite panels”, in: *Proceedings of 16th International Conference on Composite Materials*,. Kyoto, online: www.iccm-central.org.
- [25]Hosseini-Toudeshky, H. ; Mohammadi, B.; Daghyani, H.R., (2003),”Fatigue crack growth rate of adhesively repaired thin aluminum panels in general mixed-mode condition”, in: *11th Annual Conference (International) of Mechanical Engineering*, Mashad, Iran, 13–15 May,
- [26]Mitchel, RA; Woolley, RJ.,; Chwirut, DJ., (1975),“Analysis of composite reinforced cut-outs and cracks”. *AIAA J*;13:744–9.
- [27]Jones, R., Callinan, RJ., (1979), “Finite element analysis of patched cracks”. *J StructMech*;7:107–30.
- [28]Ting, T.; Jones, R.; Chiu, WK.; Marshall, IH.,; Greer, JM., (1999),“Composites repairs to rib stiffened panels”. *Compos Struct*;47:737–43.
- [29]Madani, K.; Touzain, S.,; Feugas, X.; Roy, A.; Cohendoz, S., (2009), “Analyze of the notch effect on the distribution of the stresses in the adhesive layer between two bonded aluminum 2024-T3 plates”. *J Mater Technol*;97:315–24.
- [30]Turaga, VRS.; Ripudaman, S., (1999),“Modeling of patch repairs to a thin cracked sheet”. *EngFractMech*;62:267–89.
- [31]M.R. Ayatollahi*, HashemiR, (2007), “Computation of stress intensity factors (KI, KII) and T-stress for cracks reinforced by composite patching”, *Compos Struct*78 602-609.

- [32]Liu, X.; Guoping Wang,(2007), “Progressive failure analysis of bonded composite repairs”*Composite Structures* **81** 331–340
- [33]Sabelkin, V.; Mall, S.; Hansen, M.A.; R.M.Derriso, (2007),” investigation into cracked aluminum plate repaired with bonded composite patch”. *Composite Structure* 79:55-66(2007)
- [34]Hosseini-Toudeshky, H.; Mohammadi, B., (2009) , “Thermal residual stresses effects on fatigue crack growth of repaired panels bounded with various composite materials”. *Compos Struct*;**89**:216–23.
- [35]Breitzman, TD.; Iarve, EV.; Cook, BM.; Schoeppner, GA.; Lipton, RP., (2009), “ Optimization of a composite scarf repair patch under tensile loading”. *Compos Part A: Appl Sci Manuf*;**40**:1921–30.
- [36]Ouinias, D.; Hebbbar, A.; Bachir Bouiadjra, B.; Belhouari, M.; Serier, B., (2009) , “Numerical analysis of the stress intensity factors for repaired cracks from a notch with bonded composite semicircular patch”. *Compos B Eng*;**40**:804–10.
- [37]Madani, K. ,(2010),” Experimental and numerical study of repair techniques for panels with geometrical discontinuities”, *Computational Materials Science* **48**(1):83-93
- [38]Brighenti Roberto, Carpinteri Andrea, Vantadori Sabrina. (2006) , “A genetic algorithm applied to optimization of patch repair for cracked plates”. *Comput Meth Appl Mech Eng*;**196**:466–75.
- [39]Qing, XP.; Beard, SJ.; Kumar, A.; Hannum, R., (2006), “A real-time active smart patch system for monitoring the integrity of bonded repair on an aircraft structure”. *Smart Mater Struct*;**5**:66–73.
- [40]Kilic, B.; Madenci, E.; Ambur, DR., (2006), “Influence of adhesive spew in bonded single-lap joints”. *Eng Fract Mech*;**73**:1472–90.
- [41]Naboulsi, S.; Mall, S., (1996), “Modeling of a cracked metallic structure with bonded composite patch using the three layer technique”. *Compos Struct*;**35**:295–308.
- [42]ABAQUS/CAE Ver 6.14 User’s Manual. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.; 2015.

Chapitre V

Effet de vieillissement sur les structures réparées

V.1 Introduction

Actuellement, la réparation ou le renforcement des structures en présence d'entaille ou fissure émanant d'entaille par des patchs en composite est souvent employée pour prolonger leur durée de vie, et ce, plus particulièrement dans l'industrie aéronautique [1].

Ces patchs permettent de soulager une zone fortement sollicitée en réorientant le flux des efforts (une partie d'entre eux transite vers le patch, ce qui fait diminuer ceux qui demeurent dans la pièce renforcée). Pour le comportement en fatigue, cela se traduit par un retard à l'amorçage d'une fissure. Ainsi, les patchs composites sont utilisés non plus seulement comme un moyen de réparation mais comme un renforcement préalable des structures. L'efficacité du renfort dépend évidemment du nombre de plis du patch composite [2], de sa forme ou de sa taille par exemple... En résumé, coller un patch composite a pour objectif de dévier partiellement le trajet des efforts, ce qui permet de réduire le niveau de contrainte dans la zone critique et donc d'augmenter sa durée de vie [3].

Les réparations par patch reconstituent le niveau de résistance initial affaibli ou enlevé par des dommages ou des fissurations, idéalement sans changer de manière significative la distribution originale de charges.

Les renforts ou les patchs sont employés pour remplacer la force ou la rigidité perdue ou pour corriger les défauts de conception. Dans une réparation par collage, les deux matériaux les plus importants sont le matériau de la pièce de réparation et l'adhésif. En choisissant les matériaux composites du patch, les propriétés les plus importantes sont la force maximale (force de rupture) et la rigidité (module de Young, E).

C'est ces deux propriétés qui permettent à la pièce de réparation d'être fabriqué beaucoup plus mince que les pièces de réparation métalliques, fournissant une réparation plus aérodynamique. De nombreuses recherches utilisant le "bore-époxyde" et le "graphite-époxyde" pour réparer les fissures et remplacer la zone sensible des fuselages ont été menées depuis 1977 [4]. La majorité de ces travaux est basé sur des analyses simples obtenues expérimentalement. Avec le développement rapide de la technologie informatique, il est possible actuellement de programmer des modèles assez précis pour comprendre le comportement des fissures réparées par collage de composites et d'améliorer ainsi l'efficacité de ce type de composites. Une partie de la première recherche effectuée dans ce secteur a été faite par Baker au Laboratoire aéronautique et maritime australien de recherches [4-5]. .

La technologie de réparation par collage devient de plus en plus admise et avancée, mais la recherche additionnelle est toujours nécessaire pour aider à prévoir à quel point les pièces composite de réparation collées peuvent assurer leur objectif. Les recherches de l'Armée de l'Air australienne [6] et des États-Unis [7-8] ont montré les avantages d'utiliser cette technologie sur les structures minces et épaisses.

Shubbe [9] et Conley [10] ont étudié la réparation par des composites entièrement collés sur des structures épaisses ($e = 6,35\text{mm}$).

Alan Baker [11] a utilisé avec succès le bore-époxyde pour la réparation de défauts dans les types d'avions suivants : Hercules, Mirages et Orion, F111, Boeing 727, 767, etc.

Christian et Ammond [12] ont reporté les leçons tirées de leur expérience sur l'application du bore-époxyde sur cinq régions de l'avion C141. Les conceptions des moyens de réparation ont été faites de manière à réduire les niveaux de contraintes sur la zone réparée de 15% au moins.

Umamaheswar et Singh [13] ont exécuté la méthode des éléments finis modélisant et analysant des réparations localisées pour une plaque mince en aluminium en utilisant un code commercial NISA 6.0. Ils ont utilisé des éléments briques 8 nœuds à 24 degrés de liberté, et des éléments coques de 4 nœuds 24 degrés de liberté et un élément de poutre à 2 nœuds et 12 degré de liberté. Les résultats obtenus ont été employés pour calculer le facteur d'intensité de contraintes en utilisant l'intégrale modifiée de fermeture de fissure.

Belason et Miller [14] ont conduit une étude par éléments finis bidimensionnelle et tridimensionnelle ainsi qu'une série d'essais au laboratoire pour évaluer l'efficacité des patches en bore/époxyde collés sur une structure d'avion en aluminium 7075-T6. Leur objectif était d'obtenir des données, qui soutiendront l'approbation pour l'usage sur l'avion commercial. Ils ont étudié les efforts dans l'adhésif, la pièce de réparation (bore/époxyde) et la plaque d'aluminium pour trois charges différentes (les charges thermiques, les charges de traction appliquées et les charges thermiques et de traction combinées). Les essais de traction ont prouvé que le bore/époxyde a reconstitué la force statique de l'aluminium et que la rupture s'est produite presque toujours dans l'aluminium en dehors de la pièce de réparation.

Chue a étudié l'effet de la taille du composite de réparation, de la longueur de la pièce de réparation et de la séquence d'empilement sur l'efficacité de la réparation collée sur une

plaque en aluminium 2024-T3 avec la présence d'une fissure émanant d'un trou en utilisant la méthode d'élément finis tridimensionnelles, l'énergie élastique linéaire de rupture et le taux de restitution d'énergie. Ils ont observé que l'augmentation de la taille du composite de réparation réduit le niveau d'énergie de tension du bout de la fissure et qu'il est préférable d'augmenter la longueur de la pièce de réparation par rapport à la fissure. De plus, l'ordre d'empilement du stratifié de réparation a peu d'effet sur la distribution d'énergie de tension à proximité de la fissure.

Une réparation sur les deux faces augmente considérablement la durée de vie d'une plaque fissurée par rapport à une réparation d'un seul côté, et en raison des difficultés de fabrication, une réparation unilatérale est généralement faisable. Toutefois, elle produit des flexions par rapport à l'axe neutre du panneau sous charge de traction, ce qui provoque des variations de contraintes suivant l'épaisseur de la plaque fissurée et donc produit une propagation non uniforme des fissures le long de la tête de fissure. L'influence de l'effet de la flexion dans les réparations par simple patch a été d'abord discuté par Madani et al [15]. Dans son travail, l'auteur a développé une correction de flexion pour le calcul du facteur d'intensité de contrainte sur la base de la charge transférée sur le patch à partir de la plaque fissurée.

L'effet de la présence d'un défaut géométrique dans une plaque réparée ou non a été étudié par plusieurs auteurs parmi eux, citons les travaux de Madani et al [16] ou ils ont montré que le patch de réparation apporte une augmentation de la rigidité de la plaque endommagée, par contre, elle entraîne une diminution de sa ductilité. Le seul inconvénient de ce type de réparation est l'exposition simultanée du patch en composite et de l'adhésif à l'environnement. Les études actuelles sont consacrées à étudier l'effet de vieillissement sur le transfert de charge dans l'adhésif ou le composite vieillis, et par conséquent, sur la réduction du facteur d'intensité de contraintes et les contraintes dans la plaque endommagée. Des travaux récents [17-18] ont montré que le vieillissement du composite et/ ou de l'adhésif réduit le transfert de charge de la zone endommagée et augmente considérablement le facteur d'intensité de contrainte et les contraintes, le nombre de cycle à la rupture sera réduit considérablement en fonction de la durée de vieillissement et donc, il réduit la durée de vie de la structure.

L'objectif de notre étude est de voir le comportement en rupture d'une plaque en aluminium 2024-T3 réparée par patch en composite sous l'effet du vieillissement de l'adhésif.

Des essais expérimentaux ont été menés en traction pour caractériser l'adhésif vieilli en immersion dans eau et sous différentes températures. Ces essais ont été réalisés par Mr K. MADANI et Mr L.REZGANI au laboratoire LASIE à la Rochelle en France. L'analyse numérique par la méthode des éléments finis a pour but de déterminer l'intégrale J en tenant compte des propriétés mécaniques de l'adhésif dégradé et des propriétés mécaniques du patch composite. L'effet de la séquence d'empilement et l'utilisation d'un composite hybride a été mis en évidence pour améliorer le transfert de charge de la plaque endommagée vers le patch en composite à travers l'adhésif.

V.2 Effet de la température et l'absorption de l'eau sur le vieillissement de l'adhésif

Des essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction de type (modèle : MTS, Q, TestTM), équipé d'une cellule de mesure de charge et d'une capacité maximale de 50 KN.

Les essais ont été réalisés avec une vitesse de déplacement de la traverse de 0,3 mm/min à température ambiante. Un extensomètre de déformation est fixé sur l'éprouvette durant tous les essais réalisés.



Figure V.1 : Montage de l'éprouvette sur la machine de traction.

V. 3 Caractérisation de l'adhésif à l'état sec

Afin d'obtenir les caractéristiques de l'adhésif à l'état massique, des essais de traction ont été effectués, par REZGANI Laid au laboratoire LASIE (laboratoire des sciences de l'ingénieur pour l'environnement) en France, sur des éprouvettes haltères normalisées présentées ci-dessus. La courbe moyenne des essais de traction obtenue est représentée dans les figures V.3, V.4, V.5. [19] avant l'immersion des éprouvettes dans l'eau. L'adhésif,

caractérisé en traction, représente un comportement fragile vu l'absence d'un domaine plastique.

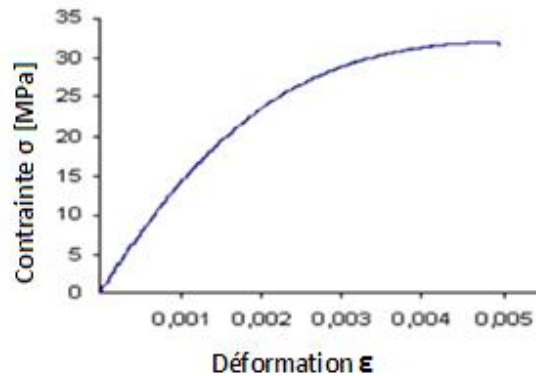


Figure V.2 : Courbe de traction pour l'adhésif à l'état sec

On observe que la courbe est linéaire jusqu'à une déformation de 0,007 environ (figure V.2), ce qui traduit l'élasticité de l'adhésif. La pente de cette partie linéaire permet d'obtenir le module d'Young qui vaut à peu près 2500Mpa. Cette valeur est une moyenne des 3 essais à cause de la présence des bulles d'air dans les éprouvettes et elle est en accord avec les valeurs typiques de la littérature.

V.4 Caractérisation de l'adhésif vieilli

Après chaque durée d'immersion dans l'eau à différentes températures, Les éprouvettes sont testées sur machine de traction, les résultats obtenus sont représentés ci-dessous :

V.4.1 vieillissement à T=20°C

La figure (V.3) présente la courbe contrainte/déformation pour différentes durées d'immersion dans l'eau distillée. Avant vieillissement, l'adhésif sous traction présente un comportement généralement fragile ou le domaine de plasticité n'existe pas, ce comportement change après le vieillissement de l'adhésif en fonction de temps.

L'absorption d'eau modifie le comportement du matériau d'un état rigide vers un état ductile, ce qui est bénéfique pour l'adhésif lorsqu' il travaille plus en cisaillement. L'effet de

vieillessement sur l'adhésif est négatif sur sa résistance mais il apporte un gain en propriétés de ductilité.

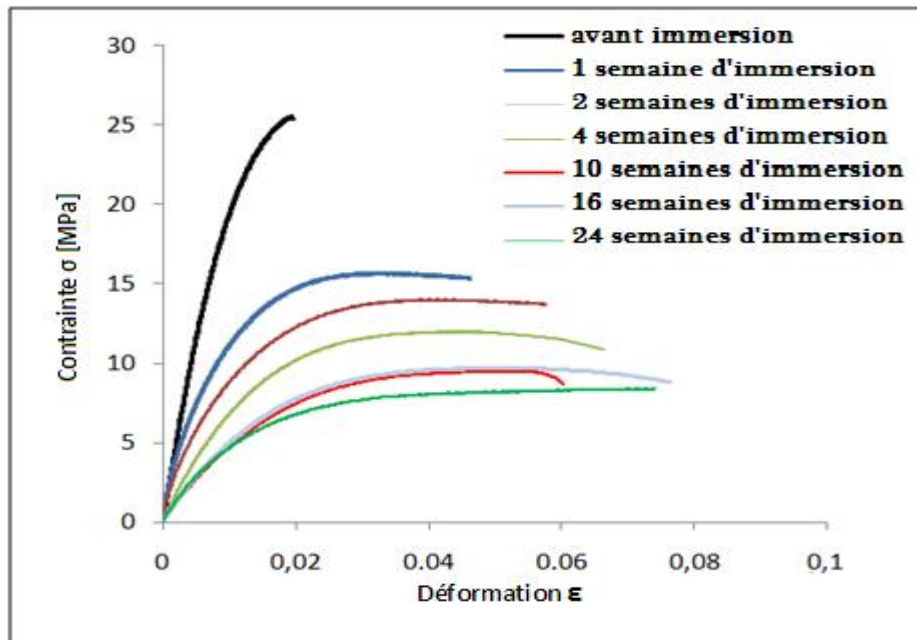


Figure V. 3 : Courbes contrainte /déformation pour différentes durées d'immersion dans l'eau distillée à 20°C

V.4.2 l'adhésif vieilli dans l'eau à 40°C

La figure (V.4) présente les courbes de traction de l'adhésif en fonction des durées d'immersion dans l'eau. On remarque que la prise en eau à 40° C conduit à changer le comportement mécanique des éprouvettes testées. La température accélère l'effet de vieillissement de l'adhésif et donne lieu à une plastification importante du polymère. Dès la première durée d'immersion (une semaine), une chute considérable de la courbe de traction, une partie élastique trop faible devant une plastification importante du polymère. Ces deux comportements varient d'une façon inverse en augmentant la durée d'immersion.

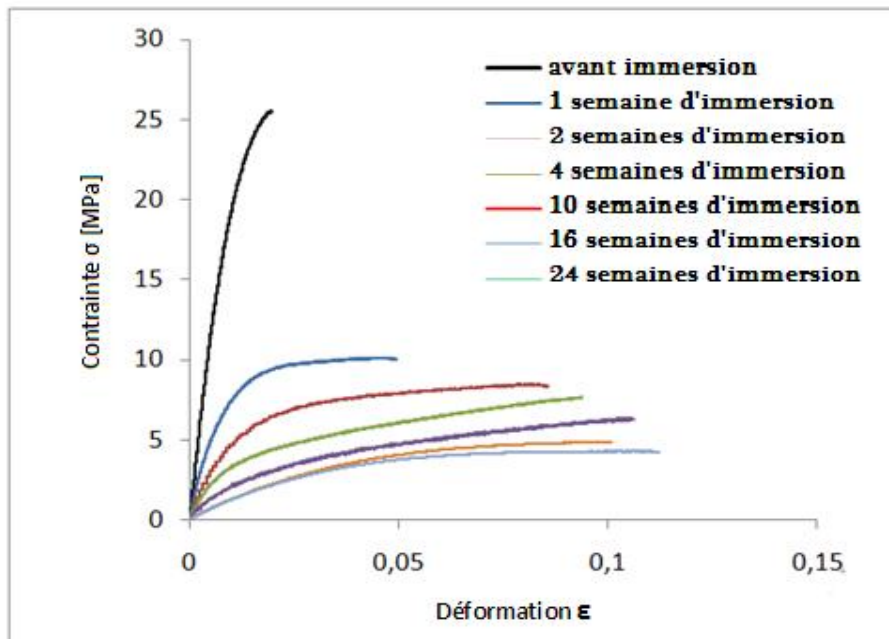


Figure V.4 : Courbes contrainte /déformation pour différentes durées d'immersion dans l'eau distillée à 40°C.

V.4.2 l'adhésif vieilli dans l'eau à 60°C

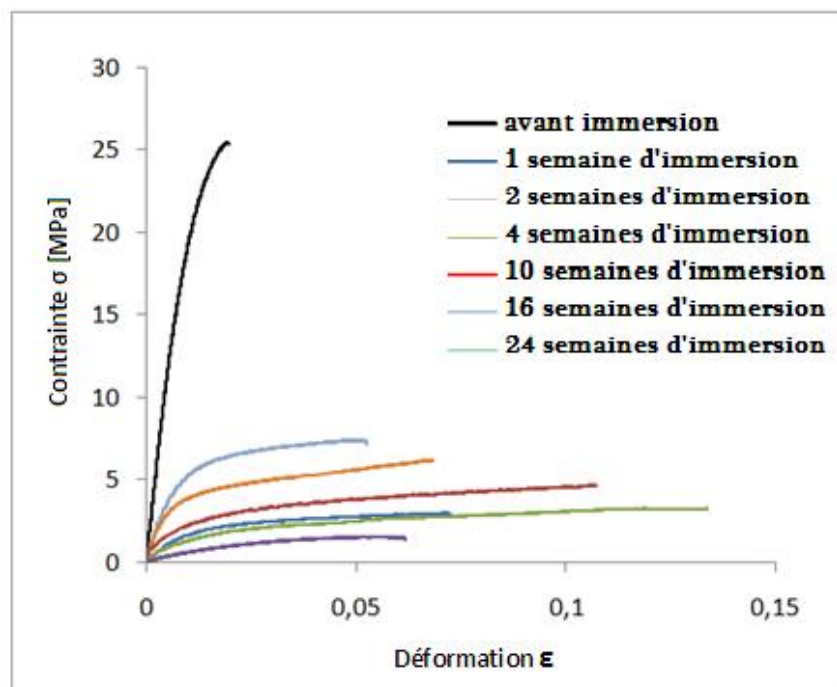


Figure V.5. Courbes contrainte /déformation pour différentes durées d'immersion dans l'eau distillée à 60 ° C [17].

Notre étude sur le vieillissement hygrothermique de l'adhésif a pour but de déterminer les conséquences de la température et de la pénétration de l'eau sur ses propriétés mécaniques.

Le calcul de module d'Young pour chaque durée de vieillissement montre bien l'effet négatif de l'absorption d'eau sur les éprouvettes de l'adhésif, la diminution de module d'Young atteint une chute de 73% après 170 jours de vieillissement dans l'eau à 20°C, mais pour le vieillissement à 40°C la chute de module d'Young est environ 90%.

La perte des propriétés de l'adhésif vieilles montre aussi la chute de la contrainte à la rupture avec le temps de vieillissement et la température de milieu, pour le vieillissement à 20°C, après 170 jours, la chute atteint environ 65% de la valeur initiale (avant immersion). A 40°C et pour juste une semaine d'immersion, la chute de la contrainte à la rupture est environ 58%, après 170 jours elle atteint 80%.

En revanche, la déformation à la rupture augmente avec la teneur en eau des éprouvettes, cette augmentation atteint 200% de l'éprouvette non-vieille pour un vieillissement d'une semaine, Après 24 semaines de vieillissement elle atteint 250%, et atteint 445 % pour le vieillissement à 40°C, cela traduit l'augmentation de la ductilité de l'adhésif vieilli en fonction du temps d'immersion dans l'eau et avec l'augmentation de la température.

On peut dire que pour l'immersion de l'adhésif dans l'eau, la chute des propriétés de l'adhésif est plus importante avec le temps, la température élevée accélère le vieillissement. Le pourcentage de prise en eau augmente avec l'augmentation de la température de vieillissement, ce qui provoque de chute progressive de la résistance de l'adhésif avec le temps mais une augmentation importante de la ductilité de l'adhésif.

La présence d'eau dans l'adhésif engendre un phénomène de plastification du réseau qui s'accompagne généralement d'une diminution importante des propriétés mécaniques de l'adhésif (contrainte à la rupture, module d'élasticité), mais aussi d'une augmentation notable de la ductilité. Ces changements des propriétés mécaniques sont d'autant plus importants que le pourcentage d'eau absorbée augmente. La température fait augmenter plus la quantité d'eau absorbée, par conséquence augmente la cinétique de dégradation avec le temps.

V.5 Partie Modélisation numérique

V.5.1 Modèle géométrique et maillage utilisé

Dans cette partie de l'étude, on a essayé d'étudier l'exposition simultanée de l'adhésif à l'humidité et la température sur le comportement d'une plaque en aluminium 2024-T3 endommagée et réparée par patch composite.

Le modèle géométrique de la plaque réparée est le même utilisé que celui présenté dans le chapitre précédent. De même, les propriétés mécaniques des différents substrats sont représentées dans le tableau IV.1. On a repris les mêmes séquences d'empilement (voir tableau IV.2). La forme du patch a été mise en évidence ou l'épaisseur de chaque couche du composite a été modifiée selon les trois configurations du patch représentées dans la figure IV.3.

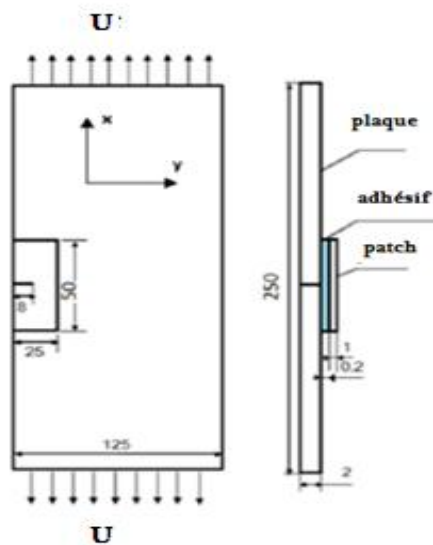
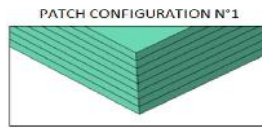


Figure V.6 : Modèle géométrique de la plaque réparée.

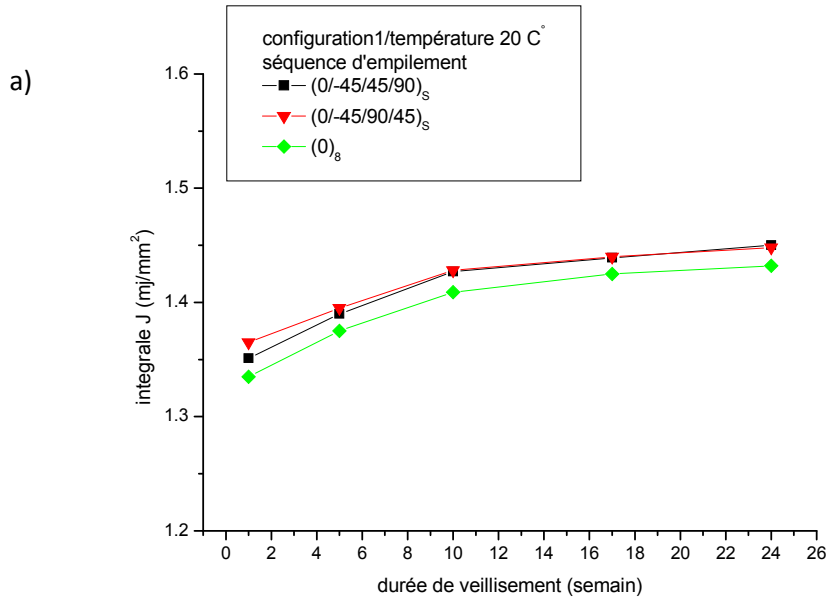
les propriétés mécaniques de la plaque, le composite et l'adhésif ont aussi été présentées dans la première partie de notre étude, pour le composite, on a pris seul le cas des fibres de carbone et juste trois séquences d'empilement $[0_8]_s$, $[(0/-45/45/90)_s]$ et $[(0/-45/90/45)_s]$.

V.5.2 Influence de la température sur le vieillissement de l'adhésif

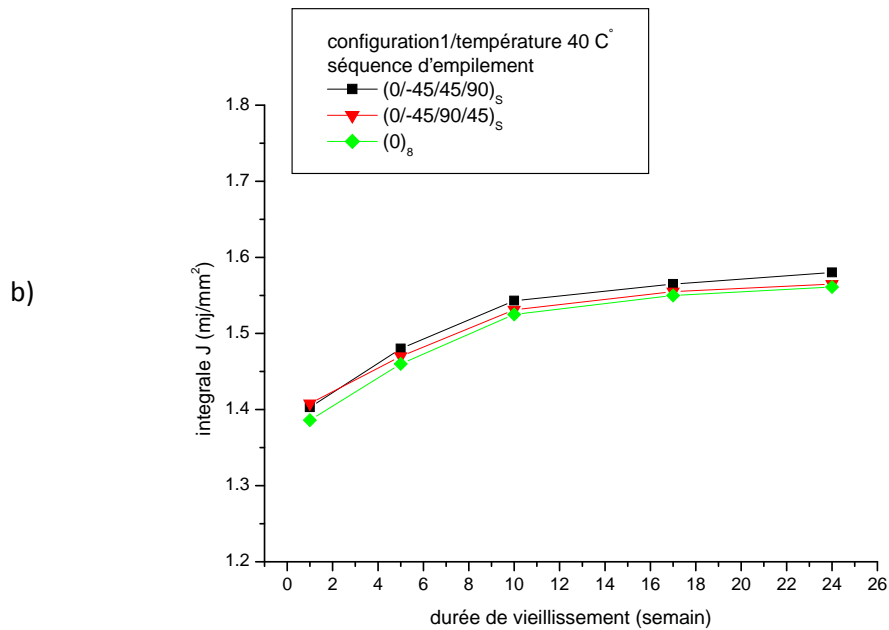
V.5.2.1. cas 1 Patch configuration N°1



- Température 20°C



- Température 40°C



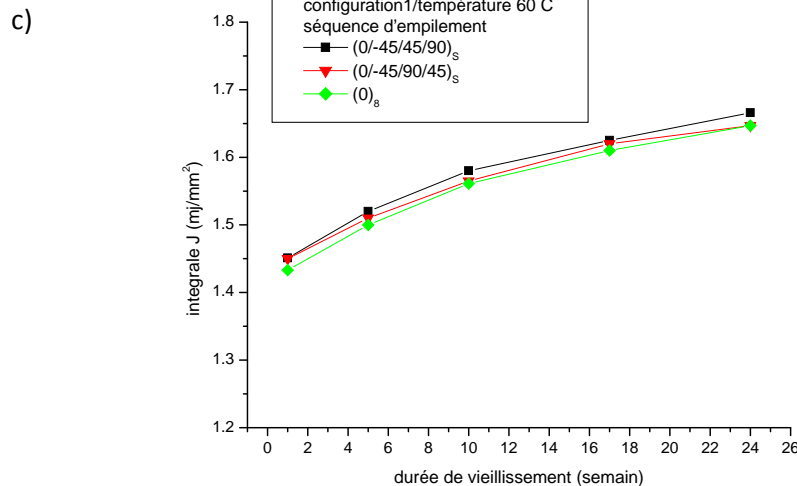
-Température 60°C

Figure IV.7 : Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch avec différentes séquences d'empilement. [cas de patch de configuration N°1]

D'après la figure IV.6, on remarque que la variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion est identique quelque soit la température.

On remarque aussi que l'intégrale J augmente si la durée de vieillissement augmente. La valeur minimale de l'intégrale J est pour le cas de la séquence d'empilement est $[0^\circ]_8$. Pour les deux séquences d'empilement $[0/-45/45/90]_S$ et $[0/-45/90/45]_S$, la valeur de l'intégrale J est quasiment la même quelque soit la durée de vieillissement.

Pour des petites durées de vieillissement, une légère différence est notée entre le cas de réparation par patch avec la séquence d'empilement $[0/-45/45/90]_S$ et $[0/-45/90/45]_S$.

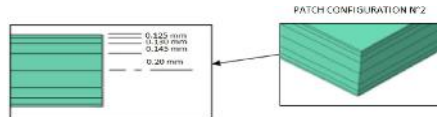
En augmentant la température, la valeur de l'intégrale J augmente.

Pour une réparation avec un patch de configuration N°1, la séquence d'empilement ou l'orientation des fibres n'a que peu d'influence sur la valeur de l'intégrale J et ce quelque soit la durée de vieillissement et la température

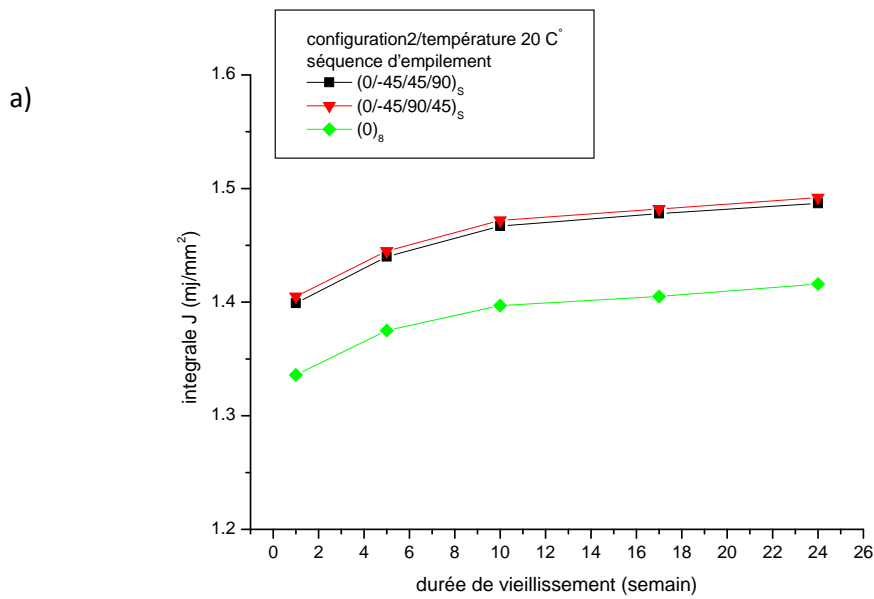
Une fois que l'adhésif perd ses caractéristiques de résistance, le transfert de charge de la plaque endommagée vers le patch n'aura pas d'influence avec la séquence d'empilement, à

part pour la température de 20°C ou l'adhésif se trouve à son état rigide et le transfert de charge est en relation direct avec la séquence d'empilement.

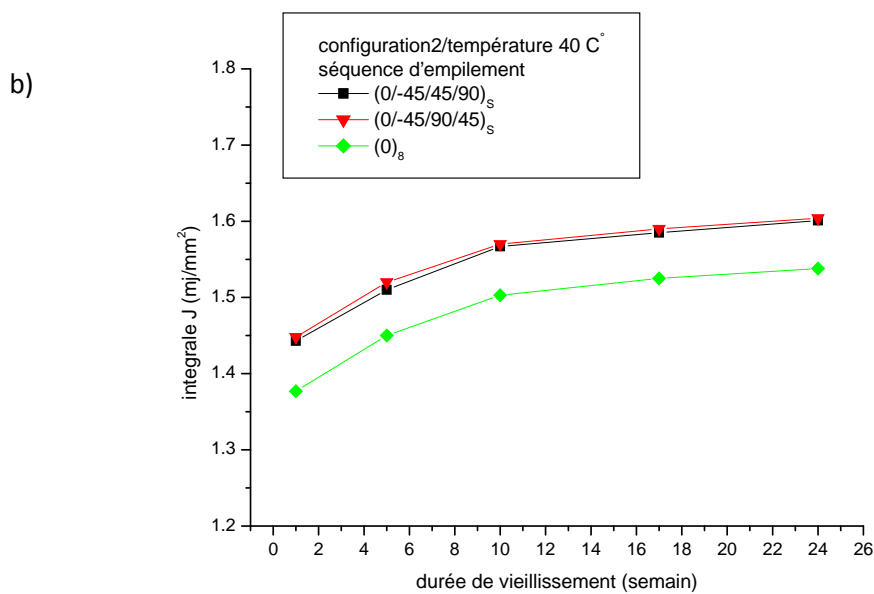
V.5.2.2 cas 2 Patch configuration N°2



- Température 20°C



-Température 40°C



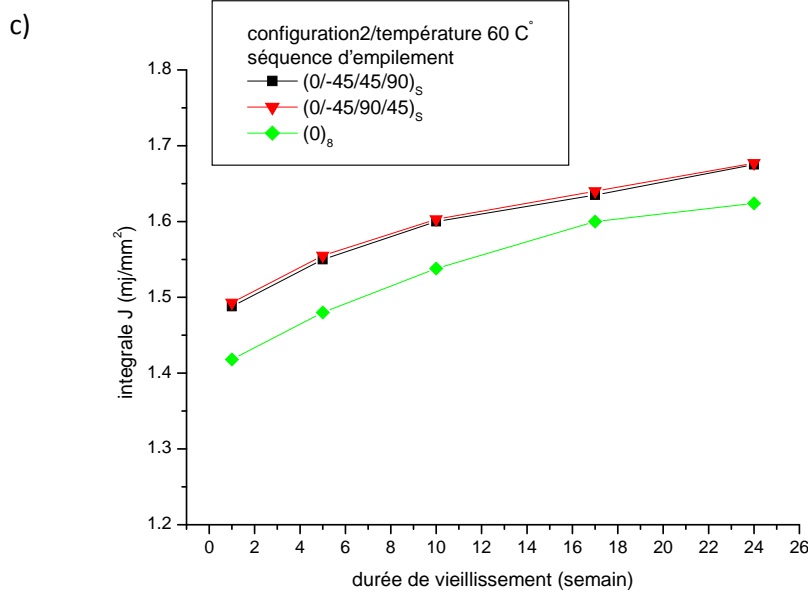
-Température 60°C

Figure IV.8 : Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°2].a) Température 20°C, b) Température 40°C, Température 60°C

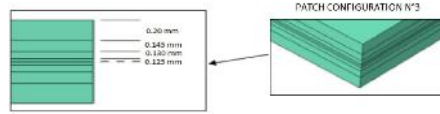
La figure IV.7 représente la variation de la valeur de l'intégrale J en fonction de la durée de vieillissement pour le cas d'un patch en configuration N°2 [les épaisseurs des couches ont tendance à diminuer vers l'extérieur]. On remarque clairement que l'allure des courbes varie de la même manière que dans le cas de la réparation par patch configuration N°1 sauf que les valeurs changent. Le patch de configuration N°1 présente des valeurs moins élevées que pour le cas d'une réparation par patch [configuration 2].

A l'état sec, la séquence d'empilement $[0^\circ]_8$ présente de faibles valeurs de l'intégrale J et l'effet de la séquence d'empilement est bien noté. Cette différence de valeurs de l'intégrale J entre le cas de patch $[0^\circ]_8$ et $[(0/-45/45/90)]_s$ et $[(0/-45/90/45)]_s$ devient moins importante lorsque la température augmente.

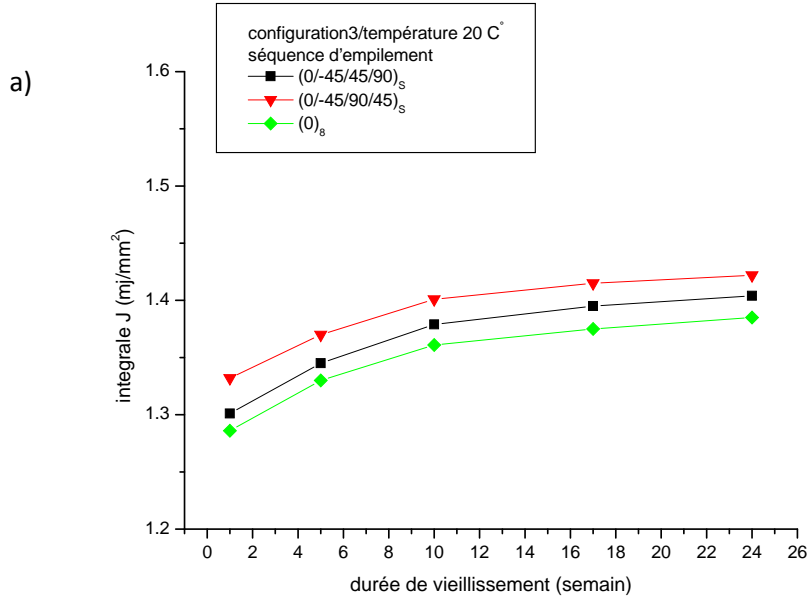
L'effet de l'utilisation de la séquence d'empilement $[(0/-45/45/90)]_s$ et $[(0/-45/90/45)]_s$ n'a que peu d'effet sur la valeur de l'intégrale J.

La valeur de l'intégrale J augmente si la température augmente, l'adhésif perd une partie de résistance et donc, il transfère moins de contraintes de la plaque endommagée vers le patch.

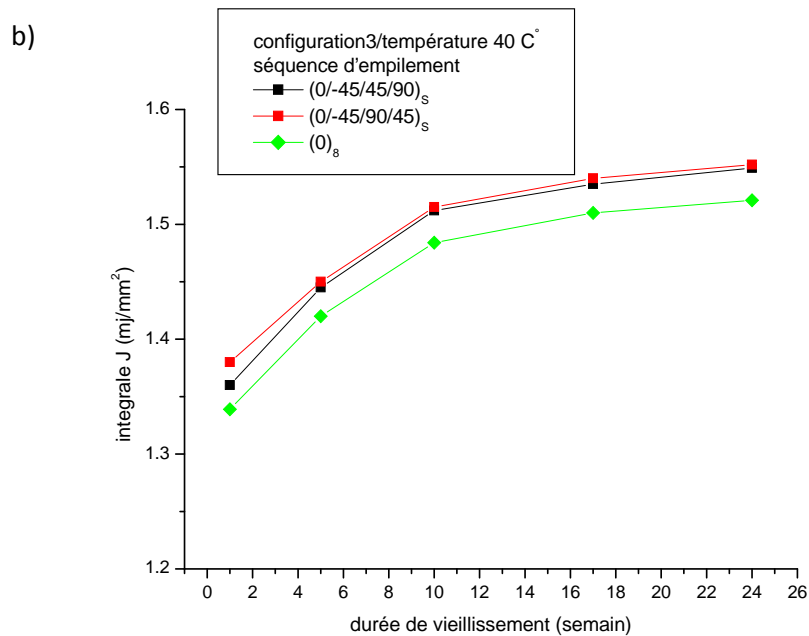
V.5.2.3. cas 1 Patch configuration N°3



- Température 20°C



- Température 40°C



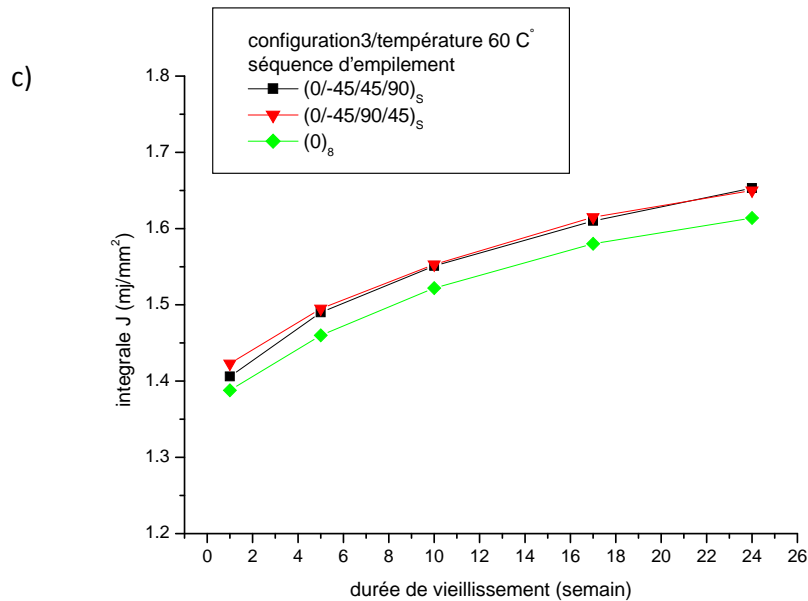
-Température 60°C

Figure IV.9 : Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°3].

a) Température 20°C, b) Température 40°C, Température 60°C

Pour le patch de configuration N°3, les valeurs de l'intégrale J sont nettement inférieures que pour le cas de réparation par patch configuration N°1 et patch configuration N°2.

A l'état sec [T=20°C], on remarque que la séquence d'empilement a un effet sur la valeur de l'intégrale J de même que les autres configurations du patch. L'effet de la séquence d'empilement disparaît avec l'augmentation de la température.

La séquence d'empilement [0°]₈ présente toujours les plus faibles valeurs de l'intégrale J et ce quelque soit la durée de vieillissement et même la température.

La durée de vieillissement de l'adhésif fait perdre de plus en plus ses caractéristiques mécaniques et par conséquent un faible transfert de charge vers le patch et donc une valeur élevée de l'intégrale J.

V.5.3 Utilisation d'un composite hybride

Dans la deuxième partie de ce chapitre, on a essayé d'apporter une méthode pour réduire la valeur de l'intégrale J en modifiant la nature de quelques couches dans le composite de réparation. Pour cela, on a choisi un composite hybride entre des couches en aramide et en carbone de sorte que la séquence d'empilement devient $[0_A/-45_A/90_A/45_C]_S$ et $[0_C/45_A/90_A/45_A]_S$

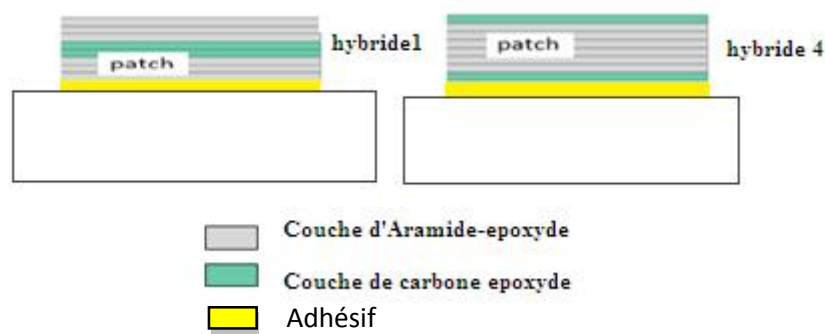
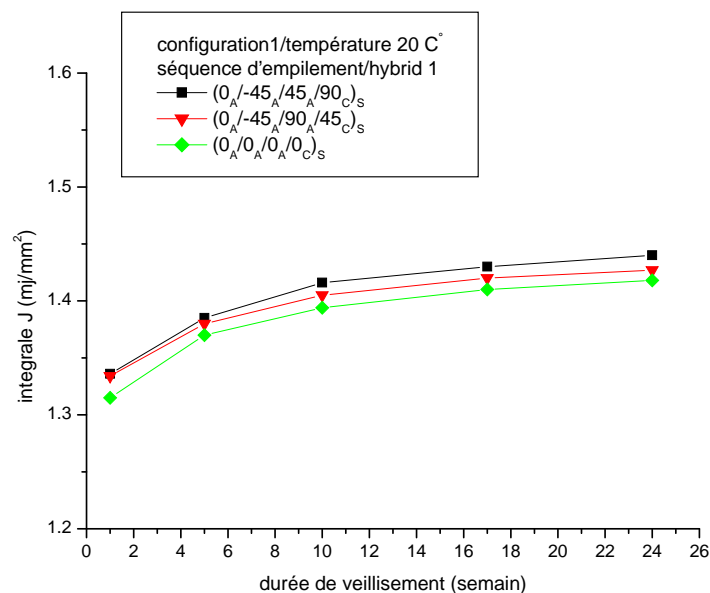


Figure V.10 : Présentation d'un patch de réparation hybride

V.5.3.1 Variation de l'intégrale J

a)- cas 1 : Patch configuration N°1

- Vieillissement à 20°C (hybride 1)



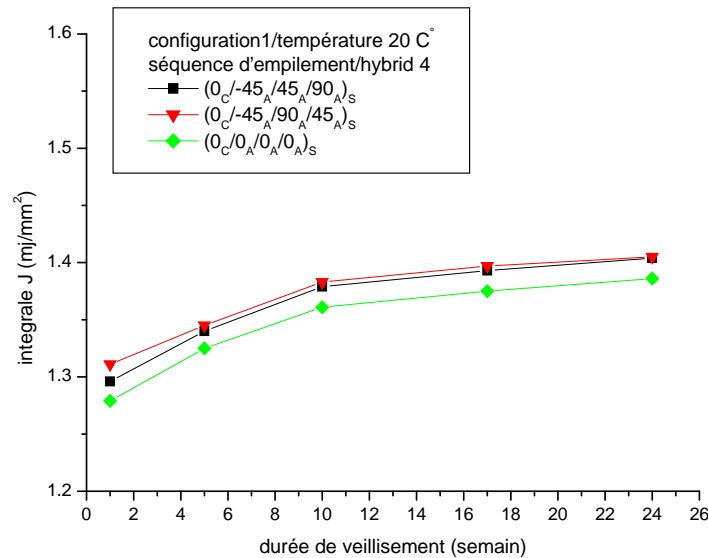
- Vieillessement à 20°C (hybride 4)

Figure IV.11 : Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement. [cas configuration N°1 à $T=20^\circ\text{C}$].

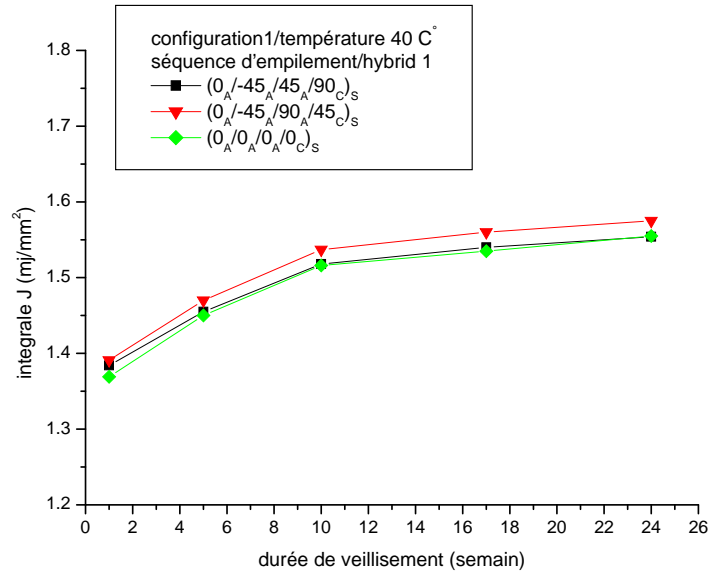
Pour le patch de configuration N°1, c'est-à-dire, l'épaisseur des couches est uniforme dans le composite, le renforcement des couches d'aramide par des couches en carbone modifie faiblement la valeur de l'intégrale J.

Si la couche externe qui est en contact avec l'adhésif est en carbone, le transfert de charge sera meilleur que pour le cas où les couches de carbone se présentent au milieu du composite.

De même, quelque soit la position des couches de carbone dans le composite de réparation, la séquence d'empilement $[0^\circ]_8$ présente un meilleur transfert et donc des valeurs d'intégrale J un peu faibles.

Par contre, pour les séquences d'empilement $[0/-45/45/90]_S$ et $[0/-45/90/45]_S$, les propriétés mécaniques de ces deux composites sont identiques et l'existence de deux couches de carbone dans ce composite modifie le transfert de charge et donc modifie la valeur de l'intégrale J. si les couches en carbone se trouvent au milieu du patch, la séquence d'empilement $[0_A/-45_A/90_A/45_C]_S$ présente des valeurs faibles de l'intégrale J. Par contre, si le carbone se trouve à l'extérieur, la séquence d'empilement $[0_C/45_A/90_A/45_A]_S$ est celle qui présente des valeurs d'intégrale J faibles pour la séquence d'empilement $[0_C/-45_A/45_A/90_A]_S$.

-Vieillessement à 40°C (hybride 1)



-Vieillessement à 40°C (hybride 4)

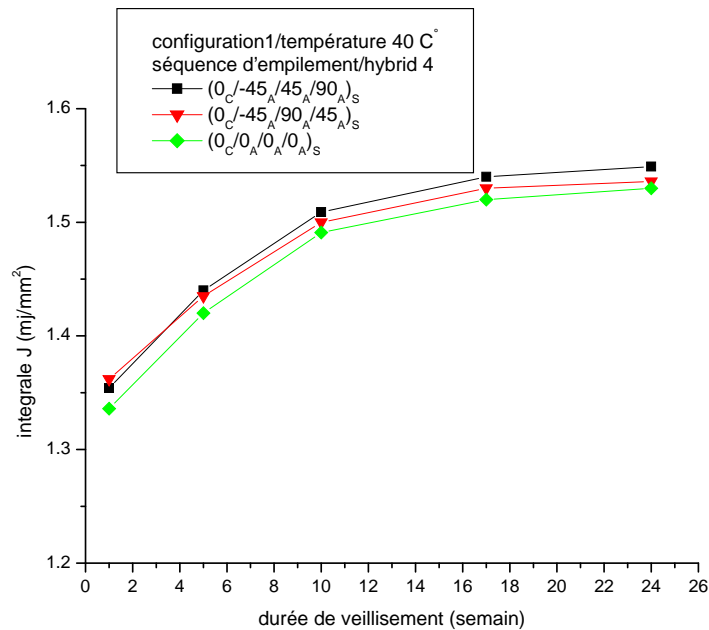


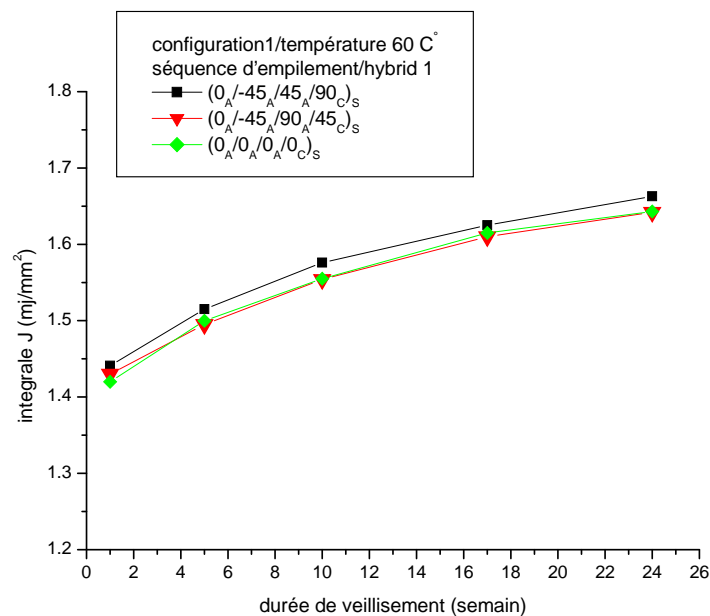
Figure IV.12 : Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°1 à 40°C].

En augmentant la température, le processus de diffusion de l'eau dans l'adhésif s'accélère et donc une dégradation de ses propriétés mécaniques. En conséquence, le transfert de charge sera un peu faible vu que l'adhésif sera meilleur en résistance au cisaillement et donc faible au pelage. La valeur de l'intégrale J est un peu plus élevée que pour le cas où la température est 20°C. Pour ce cas, la séquence d'empilement joue un rôle faible dans la réduction de la valeur de l'intégrale J.

Si les deux couches de carbone se trouvent au milieu du composite, la séquence d'empilement $[0_C/-45_A/90_A/45_A]_S$ présente les plus grandes valeurs de l'intégrale J. Cependant, les deux séquences d'empilement $[0]_8$ et $[0_C/45_A/90_A/45_A]_S$ donnent des valeurs faibles.

Par contre, si les couches en carbone se trouvent à l'extérieur, la valeur de l'intégrale J sera un peu faible que dans le premier cas et le transfert de charge sera meilleur. La séquence d'empilement $[0^\circ]_8$ présente les plus faibles valeurs de l'intégrale J et $[0_C/-45_A/45_A/90_A]_S$ présente les valeurs les plus élevées vu que les propriétés du composite seront pour ce cas faibles.

-Vieillissement à 60°C (hybride 1)



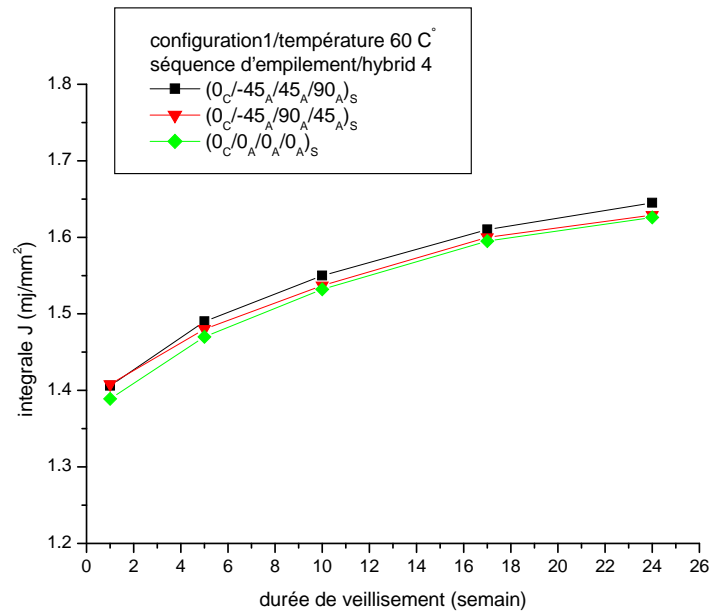
-Vieillissement à 60°C (hybride 4)

Figure V.13 : Variation de l'intégrale J en fonction de la durée de vieillissement pour différentes séquences d'empilement du composite hybride [configuration 1 à 60°C].

De même, si la température augmente, l'adhésif perd plus ses caractéristiques de résistance et devient trop ductile avec un domaine plastique important, ce qui procure à l'adhésif une meilleure résistance au cisaillement, par contre, une faible résistance au pelage et donc un faible transfert de charge vers le patch en conséquence, des valeurs un peu élevées de l'intégrale J que pour le cas des températures 20°C et 40°C.

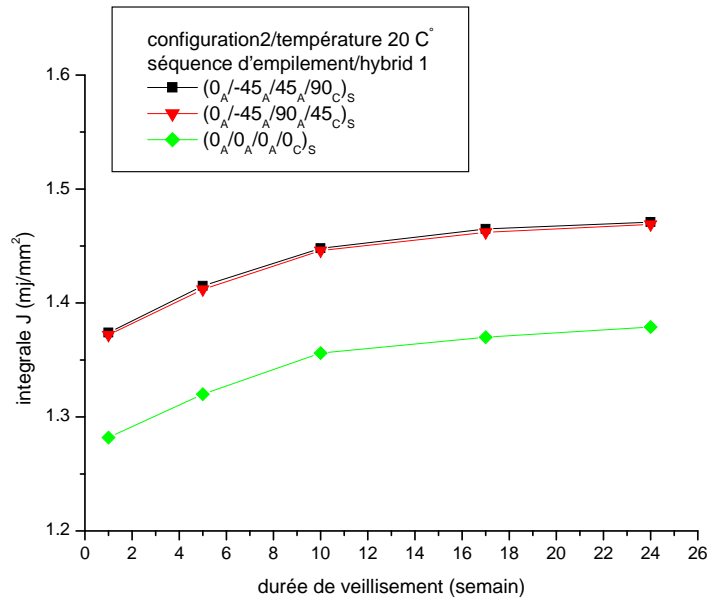
A cette température, l'effet de la séquence d'empilement disparaît et la position des couches de carbone dans le composite par rapport aux couches d'aramide n'a que peu d'influence. La différence en valeur de l'intégrale J est faible pour les trois séquences d'empilement.

Si les couches de carbone se trouvent à l'extérieur, le transfert de charge même s'il est faible sera meilleur que par le cas où les couches de carbone se trouvent au milieu du composite hybride.

La durée d'immersion a aussi une conséquence sur la valeur de l'intégrale J.

b) cas 2 : Patch configuration N°2

- Vieillissement à 20°C (hybride 1)



- Vieillissement à 20°C (hybride 4)

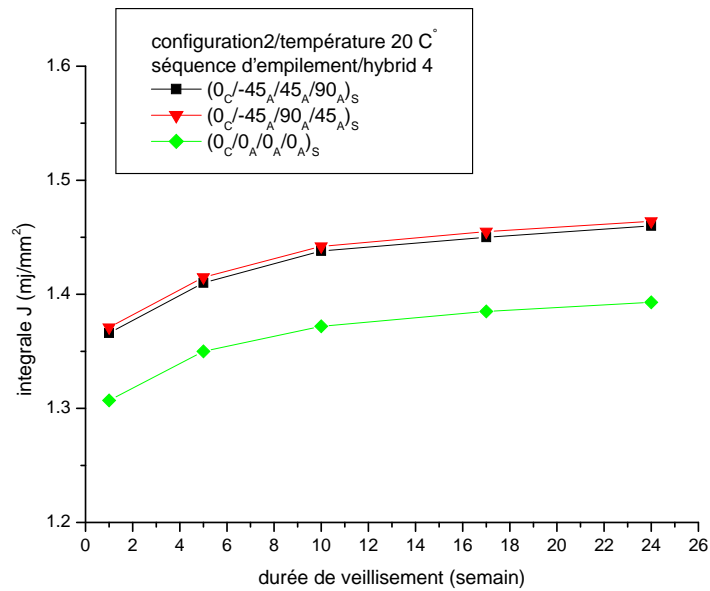


Figure IV.14 Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°2 à 20°C].

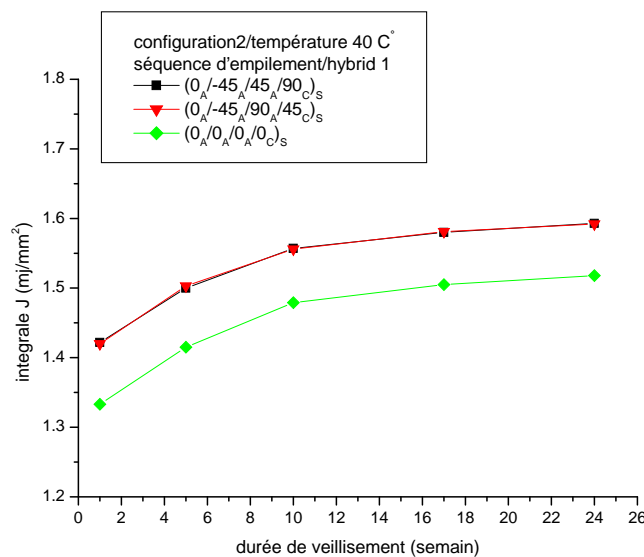
Si on modifie l'épaisseur des couches de composite de sorte que l'épaisseur soit dégradée de l'intérieur vers l'extérieur et le renforcement des couches de composite en aramide par des couches en carbone, l'amélioration dans la diminution de la valeur de l'intégrale J sera nettement meilleure.

A la température de 20°C[ambiante], l'adhésif est rigide et sera faible en résistance au cisaillement, par contre, meilleur dans le transfert de charge vers le patch. La séquence d'empilement $[0^\circ]_S$ présente des propriétés mécaniques meilleurs que pour le cas $[0/-45/45/90]_S$ et $[0/45/90/-45]_S$ et donc, une bonne résistance au pelage et un meilleur transfert de charge. Les deux séquences d'empilement $[0/-45/45/90]_S$ et $[0/45/90/-45]_S$ présentent des valeurs presque identiques de la valeur de l'intégrale J, donc, la position des deux couches de carbone dans le composite n'a que peu d'influence sur la valeur de l'intégrale J.

Pour ce cas de patch composite, la configuration 2 présente une différence nettement visible des résultats de l'intégrale J.

Pour cette configuration, la présence des deux couches de carbone au milieu de composite apporte une bonne résistance à la structure et donc un meilleur transfert de charge que pour le cas où les deux couches de carbone se trouvent à l'extérieur. La modification de l'épaisseur améliore aussi le transfert de charge.

-Vieillissement à 40°C (hybride 1)



- Vieillissement à 40°C (hybride 4)

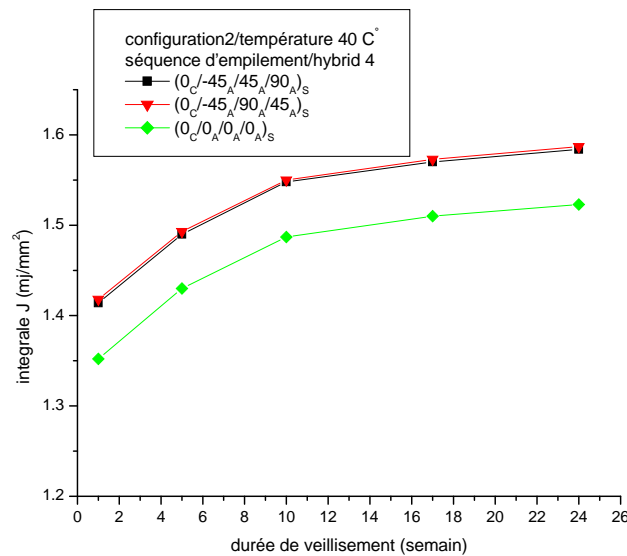


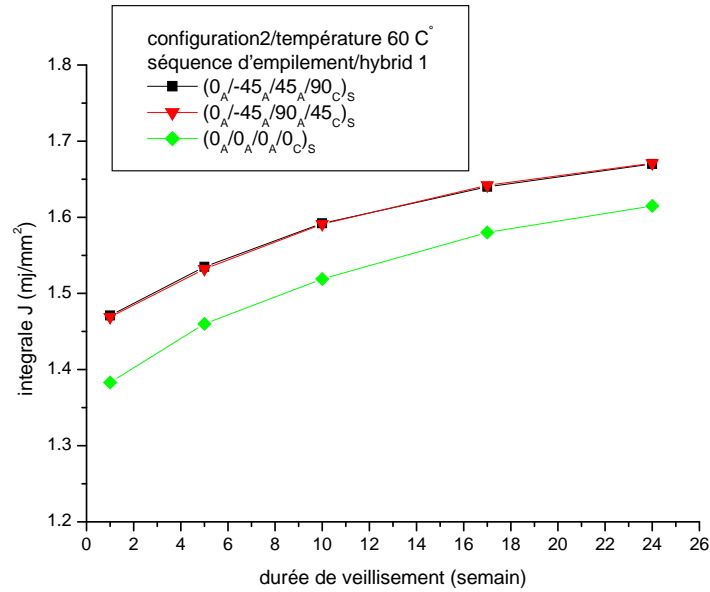
Figure IV.15 : Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement. [cas configuration N°2 à 40°C].

Si on augmente la température, la valeur de l'intégrale J augmente. La séquence d'empilement [0°] présente toujours des faibles valeurs de l'intégrale J comparées aux cas des deux autres séquences d'empilement. A cette température et pour cette configuration du patch la position des deux couches de carbone dans le composite hybride n'a aucune influence sur le transfert de charge et donc sur la valeur de l'intégrale J.

La séquence d'empilement [0°] est nettement meilleur quelque soit la position des deux couches de carbone dans le composite hybride.

La différence de l'intégrale J entre le cas de la séquence d'empilement [0°] et les deux autres séquences d'empilement [0/-45/45/90]_S et [0/45/90/-45]_S sera moins faible que pour le cas de la température 20°C. Cette différence de l'intégrale J reste quasiment constante quelque soit la durée de vieillissement.

- Vieillissement à 60°C (hybride 1)



- Vieillissement à 60°C (hybride 4)

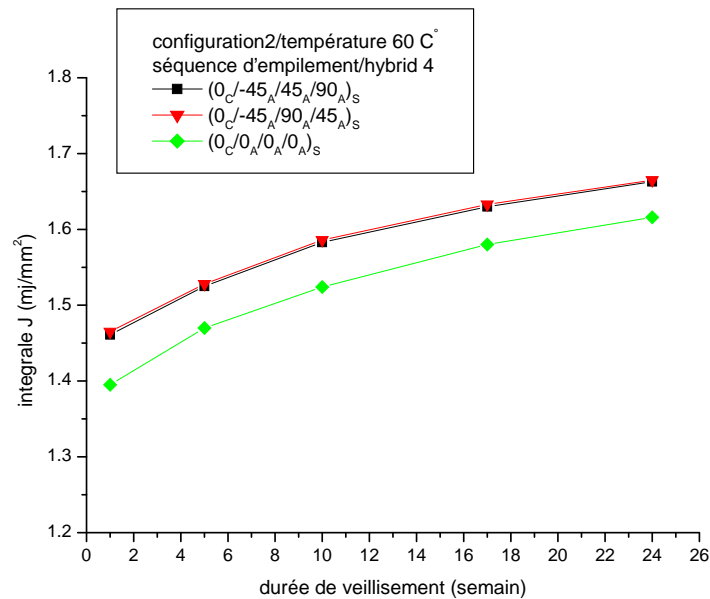


Figure V. 16 : Variation de l'intégrale J en fonction de la durée de vieillissement pour différentes séquences d'empilement du composite hybride [configuration 2 à 60°C].

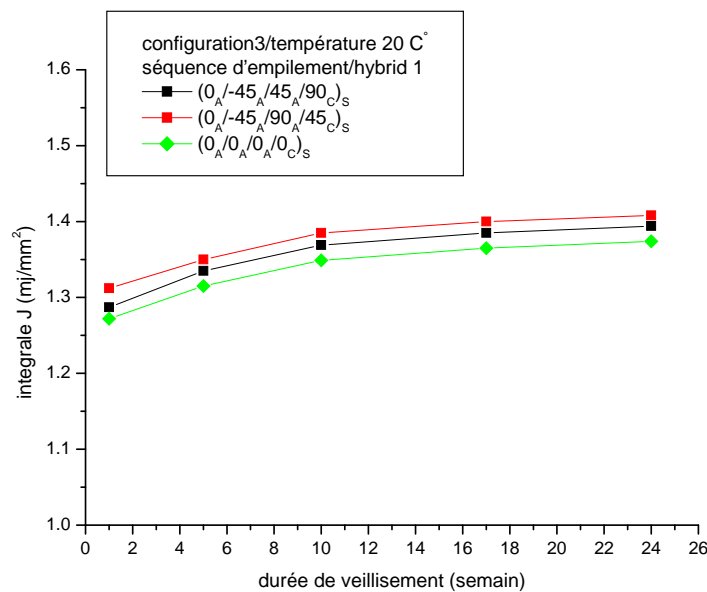
Si la température augmente [T=60°C], les valeurs de l'intégrale J augmentent en fonction de la durée de vieillissement et en fonction du type du composite hybride de réparation.

Si les deux couches de carbone sont à l'extérieur du composite, la valeur de l'intégrale J sera un peu faible que pour le cas de la réparation du composite hybride avec des couches de carbone au milieu. Les deux séquences d'empilement $[0/-45/45/90]_S$ et $[0/45/90/-45]_S$ présentent quasiment des valeurs identiques de l'intégrale J. A cette température, le transfert de charge sera faible de la plaque endommagée vers le patch hybride à travers l'adhésif et donc, l'effet de l'orientation des fibres est un peu remarquable.

La séquence d'empilement $[0^\circ]$ est nettement meilleur dans ce cas, sauf que la différence des valeurs de l'intégrale J entre cette séquence d'empilement et les deux autres séquences sera nettement meilleur dans le cas où les deux couches de carbone se trouvent à l'extérieur.

c)- cas 3 : Patch configuration N°3

- Vieillissement à 20°C (hybride 1)



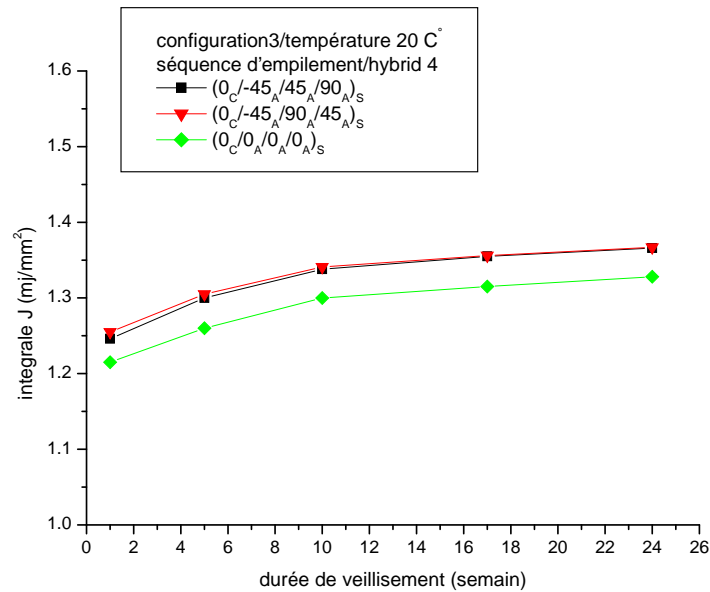
-Vieillessement à 20°C (hybride 4)

Figure IV.17 : Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement. [cas configuration N°3 à 20°C].

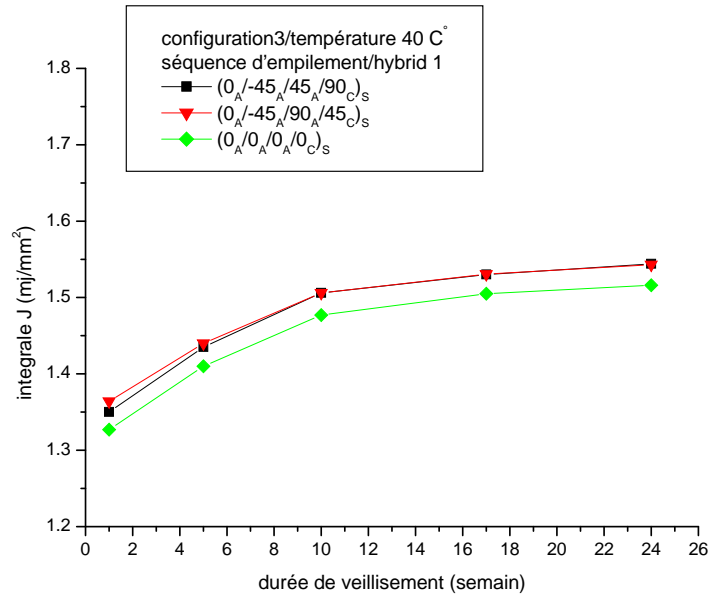
Si la plaque endommagée sera réparée par un composite de configuration 3 [ou les couches d'épaisseur ont tendance à diminuer vers l'intérieur], l'orientation des fibres dans le composite joue un rôle déterminant dans la variation de la valeur de l'intégrale J.

Les valeurs les plus élevées de l'intégrale J sont pour le cas où le composite hybride de réparation présente des couches de carbone à l'extérieur. Si les deux couches de carbone sont au milieu du composite, le transfert de charge sera moins que pour le premier cas.

Quel que soit la position des deux couches de carbone dans ce composite hybride de réparation, cette configuration de ce patch lui procure un meilleur transfert de charge que pour les deux autres configurations 1 et 2 du patch hybride de réparation.

Si les deux couches de carbone sont au milieu du composite, la séquence d'empilement $[0_A/-45_A/45_A/90_C]_S$ présente des valeurs les plus élevées de l'intégrale J, par contre, si les couches de carbone sont à l'extérieur du composite, la différence de l'intégrale J est minimale dans le cas des deux séquences d'empilement $[0_A/-45_A/90_A/45_C]_S$ et $[0_C/45_A/90_A/45_A]_S$.

- Vieillissement à 40°C (hybride 1)



- Vieillissement à 40°C (hybride 4)

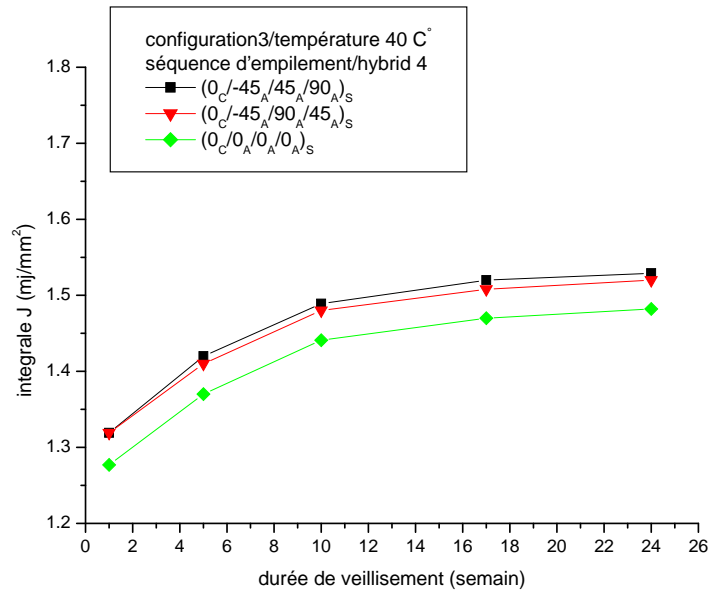


Figure IV.18 : Variation de l'intégrale J en fonction de la durée d'immersion en eau pour une plaque réparée par patch hybride avec différentes séquences d'empilement.[cas configuration N°3 à 40°C].

Si la température augmente, la valeur de l'intégrale J augmente et la séquence d'empilement n'a que peu d'influence sur la valeur de l'intégrale J dans le cas où les deux couches de

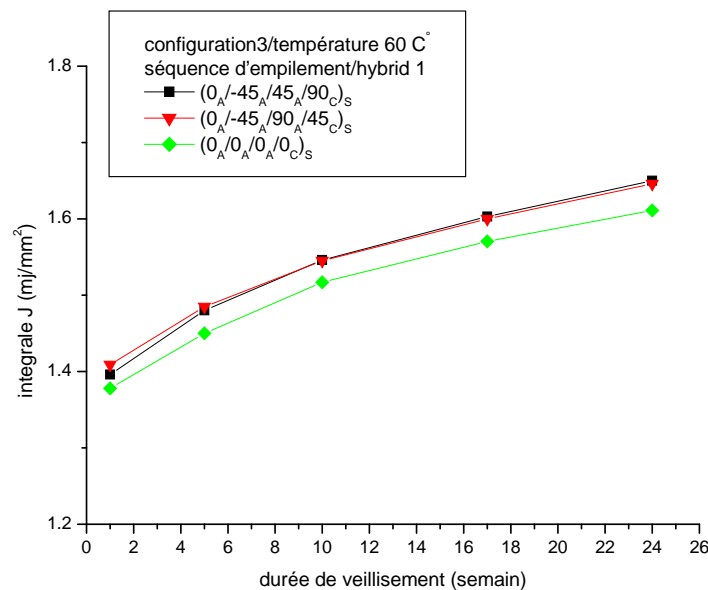
carbone se trouvent au milieu de composite de réparation. Par contre, cette différence est nettement claire si les deux couches de carbone sont à l'extérieur du composite.

Quelque soit la position des couches de carbone par rapport aux couches d'aramide dans le composite, la séquence $[0^\circ]$ présente les plus faibles valeurs de l'intégrale J.

Pour des faibles durées de vieillissement, les séquences d'empilement $[0_A/-45_A/90_A/45_C]_S$ et $[0_A/45_A/45_A/90_C]_S$ présentent une différence de la valeur de l'intégrale J, cette différence disparaît au fur et à mesure que la durée de vieillissement augmente. Par contre, pour le cas où les deux couches se trouvent à l'extérieur, au début de vieillissement, les deux séquences d'empilement $[0_A/-45_A/90_A/45_C]_S$ et $[0_A/45_A/45_A/90_C]_S$ présentent les mêmes valeurs de l'intégrale J.

Si la durée de vieillissement augmente, on remarque une légère différence dans les valeurs de l'intégrale J.

- Vieillissement à 60°C (hybride 1)



- Vieillissement à 60°C (hybride 4)

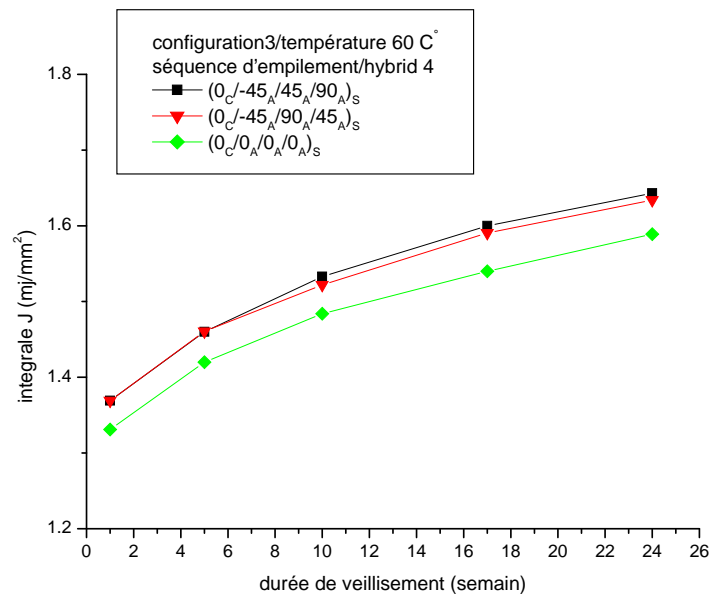


Figure V.19 : Variation de l'intégrale J en fonction de la durée de vieillissement pour différentes séquences d'empilement du composite hybride [configuration 3 à 60°C].

Pour la température de 60°C, le même comportement de la structure endommagée et réparée par patch est observé et cela quelque soit la durée de vieillissement et la position des couches de carbone dans le composite hybride.

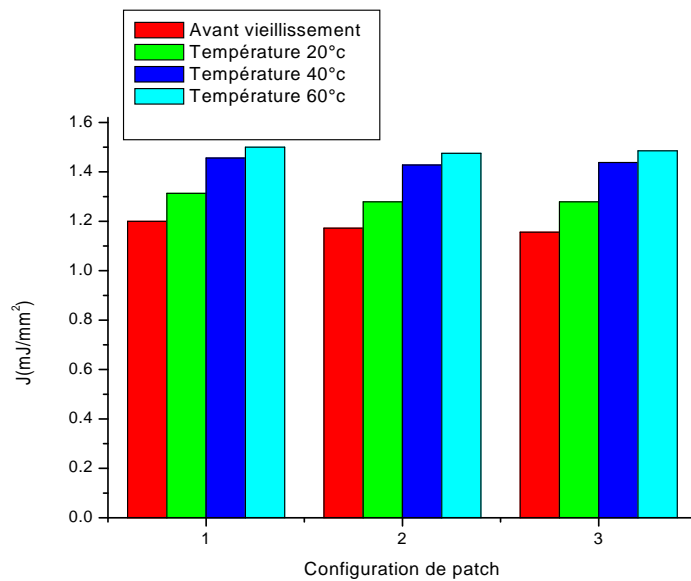
Les plus faibles valeurs sont toujours pour le cas d'une réparation par patch de séquence d'empilement [0°] et cela quelque soit la position des deux couches de carbone dans le composite hybride.

La différence de la valeur de l'intégrale J en fonction de la séquence d'empilement sera un peu faible que pour le cas de la température 20°C et 40°C. les deux séquences d'empilement [0_A/-45_A/90_A/45_C]_S et [0_C/45_A/90_A/45_A]_S présentent quasiment les mêmes valeurs de l'intégrale J quelque soit la position des deux couches de carbone dans le composite hybride.

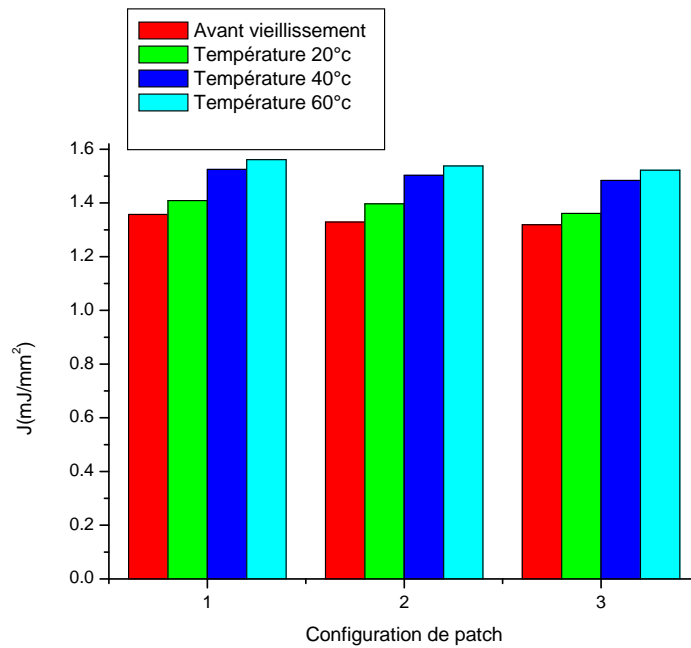
V.5.4. Comparaison de l'intégrale J pour différentes configurations du patch et séquences d'empilement après le vieillissement]

V.5.4.1 Effet de la température pour les différentes configurations du patch en carbone/époxyde et aramide/époxyde

(Pour une séquence d'empilement 0° et une durée de vieillissement de 10 semaines)



a)



b)

Figure V.20 : Variation de l'intégrale J en fonction de la configuration du patch pour différentes températures de vieillissement [durée 10 semaines].

a)- carbone/époxyde b)- aramide/époxyde

Afin de voir clairement les différents paramètres qui peuvent influencer sur la valeur de l'intégrale J, on a présenté, dans la figure V.21, la variation de l'intégrale J en fonction du type de configuration du patch pour les trois différentes températures de vieillissement. On a pris le cas d'une durée 10 semaines.

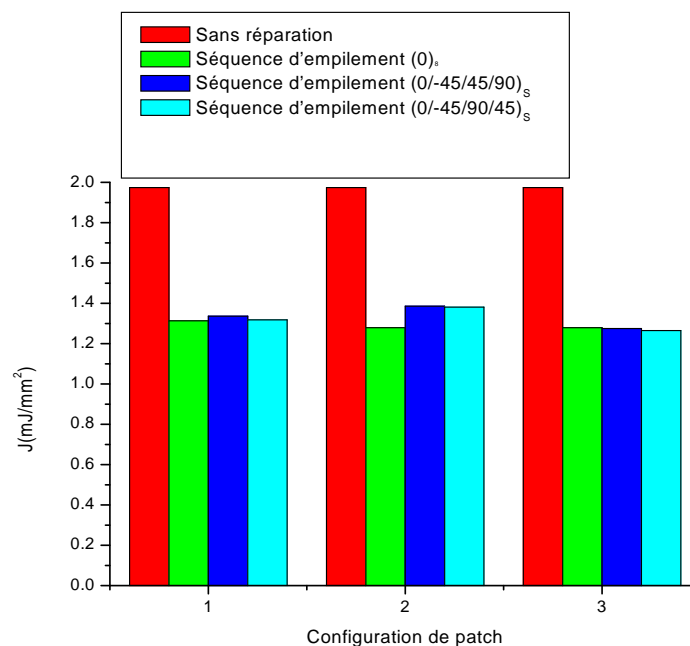
On remarque clairement que quelque soit la configuration du patch de réparation, si la structure sera exposée à l'eau et simultanément à la température, la valeur de l'intégrale J augmente.

La nature du composite joue un rôle dans la réduction de l'intégrale J. Le patch qui présente des propriétés mécaniques élevées absorbe mieux les contraintes au niveau de la zone endommagée et donc minimise la valeur de l'intégrale J. Cette caractéristique disparaît de plus en plus si la structure sera exposée à l'eau à des températures élevées.

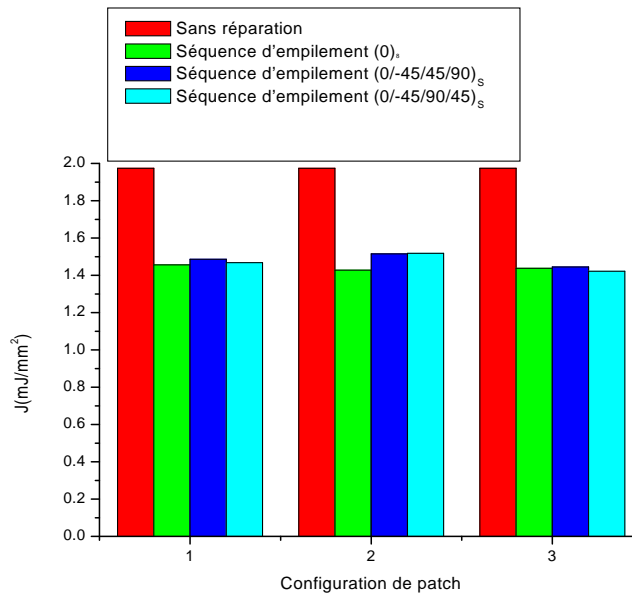
De même, la configuration du patch selon la modification d'épaisseur de ses couches a aussi un rôle sur le transfert de charge et donc sur la valeur de l'intégrale J.

V.5.4.2 Effet de la séquence d'empilement pour les différentes températures

- Pour le patch en carbone/époxyde à 20°



- Pour le patch en carbone/époxyde à 40°



- Pour le patch en carbone/époxyde à 60°

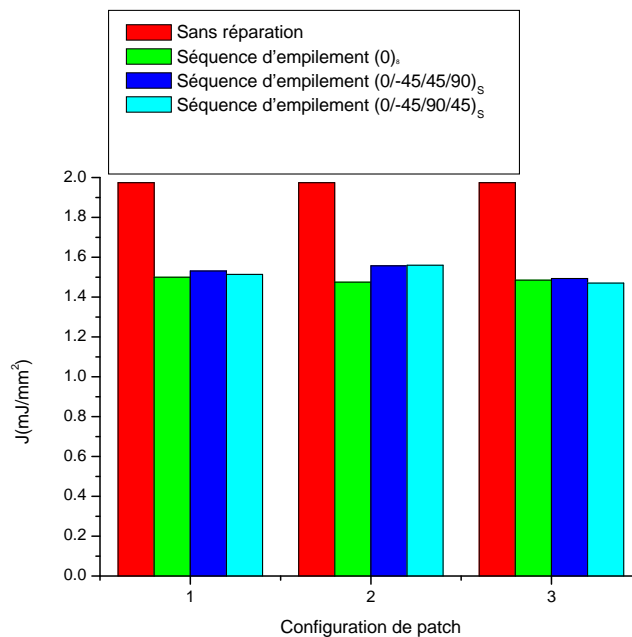


Figure V. 21 : Variation de l'intégrale J en fonction de la configuration du patch pour différentes températures de vieillissement [durée 10 semaines].

Le patch de réparation améliore la tenue mécanique de la structure endommagée et réduit considérablement la concentration des contraintes au niveau de la fissure et réduit la valeur de l'intégrale J.

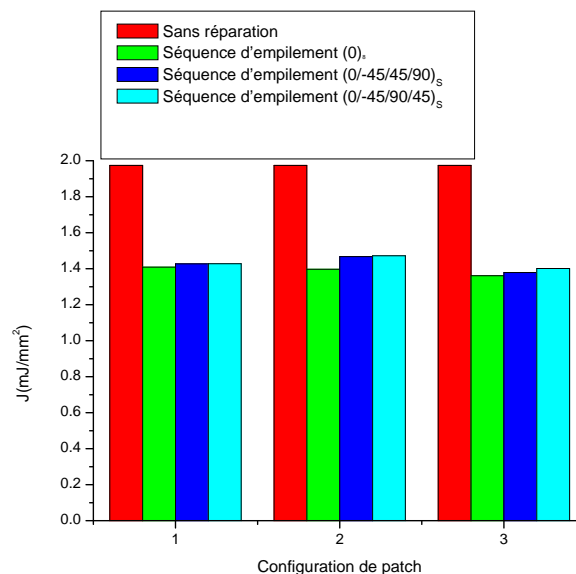
Quelque soit l'orientation des fibres, et par conséquent la séquence d'empilement dans le composite de réparation, la valeur de l'intégrale J diminue.

La modification de l'épaisseur des couches du composite améliore la réduction de l'intégrale J. La séquence d'empilement $[0^\circ]_8$ présente les plus faibles valeurs de l'intégrale J puisque pour cette séquence d'empilement les propriétés mécaniques du composite sont les plus élevées.

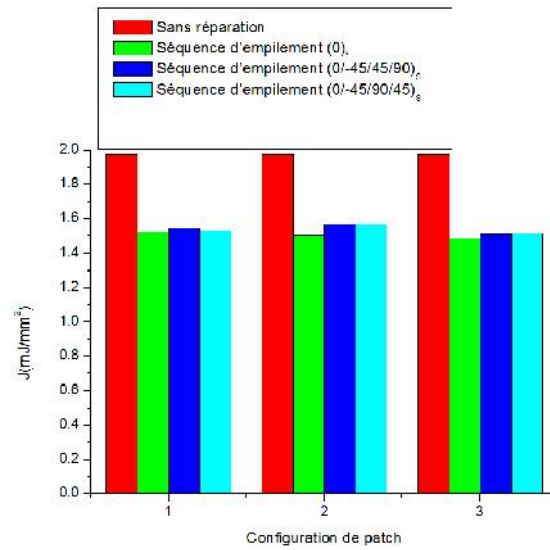
L'augmentation de la température affaiblit la résistance de l'adhésif et donc minimise le transfert de charge et donc la valeur de l'intégrale J augmente, l'effet de la séquence d'empilement disparaît petit à petit si la température et la durée de vieillissement augmentent.

La même remarque est à noter si la nature des fibres du composite change sauf que la valeur de l'intégrale J augmente si les propriétés mécaniques du composite diminuent [cas d'un composite aramide].

- Pour le patch en aramide/époxyde à 20°



- Pour le patch en aramide/époxyde à 40°



- Pour le patch en aramide/époxyde à 60°

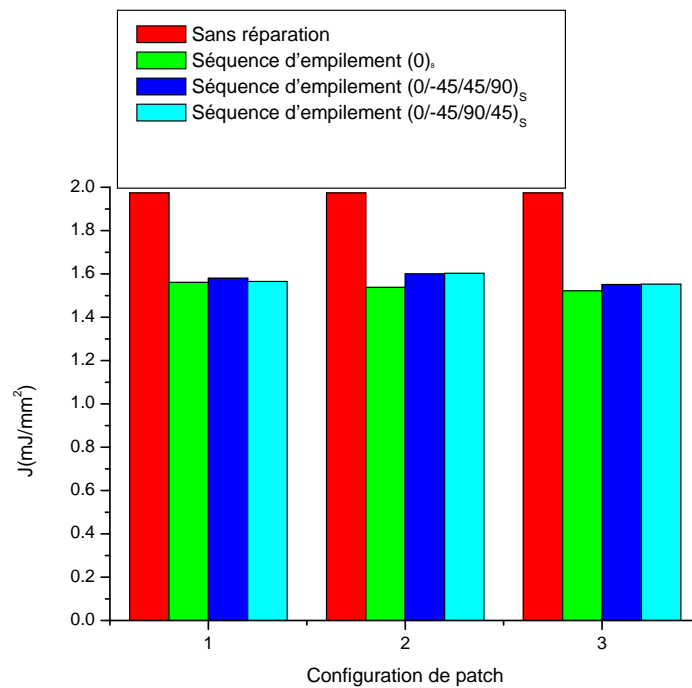


Figure V.22 : Variation de l'intégrale J pour différentes configurations pour une durée d'immersion en eau de 10 semaines.

Pour voir clairement l'effet de la température et la séquence d'empilement au cours de vieillissement, on a tracé les histogrammes de la comparaison de la variation de l'intégrale J pour les différentes configurations du patch en fonction de la durée d'immersion en eau.

La figure IV- 20 montre clairement que l'intégrale J varie en fonction de la durée d'immersion pour les différentes configurations du patch ainsi que leurs séquences d'empilement dans tous les cas étudiés, une augmentation considérable de l'intégrale J avec l'augmentation de la température et le temps d'immersion. La dégradation des propriétés mécaniques de l'adhésif provoque une augmentation de l'intégrale J. L'effet du vieillissement de l'adhésif apparaît plus clairement pour les différentes séquences d'empilement.

Conclusion

La dégradation des propriétés mécaniques du matériau est causée par la modification des propriétés physiques de l'adhésif qui est due non seulement à l'absorption de l'eau mais également en raison des variations de l'environnement (l'humidité, la température). En conséquence, cette modification physique affaiblira les propriétés mécaniques et réduit considérablement la résistance globale des assemblages collés. Des résultats expérimentaux avec une modélisation numérique par l'élément finis étudié dans ce chapitre nous ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- L'absorption d'eau par l'adhésif augmente sa ductilité et réduit sa rigidité, donc les matériaux secs étant toujours les plus résistants et les matériaux humides étant toujours les plus fragiles ;
- L'absorption d'eau se traduit par une diminution des caractéristiques mécaniques, une reprise en eau entraîne nettement une réduction de la résistance mécanique de l'adhésif ;
- La dégradation des propriétés mécaniques de l'adhésif est provoquée par l'augmentation de l'intégrale J.
- On peut optimiser l'absorption d'eau pour arriver à un équilibre entre l'efficacité et la

longévité de l'adhésif, plus la durée de vieillissement est importante plus l'adhésif perd ses caractéristiques de la résistance essentielle ;

REFERENCE

- [1] Marie-Pierre Moutrille, R 2008 « Analyse du comportement mécanique des joints collés par méthodes expérimentales ».
- [2] Hosseini Toudeshky, H., Sadeghi, G. & Daghyani, H.R. 2005 Experimental fatigue crack growth and crack-front shape analysis of asymmetric repaired aluminium panels with glass-epoxy composite patches. *Composite Structures*. 71, 401-406.
- [3] Mathias, J.D., Balandraud, X. & Grédiac, M. 2006 Applying a generic algorithm to the optimization of composite patches. *Computers and Structures*. 84, 823-834.
- [4] T.H.G.Megson, Aircraft structures for engineering students third edition ELSEVIER 1999.
- [5] Baker, A.A. "Repair of Cracked or Defective Metallic Aircraft Components with Advanced Fibre Composites—an Overview of Australian Work." *Composite Structures*. Elsevier Applied Science Publishers Ltd. Printed in Great Britain. 1984. Pgs. 153-181.
- [6] Denney, J.J. Fatigue Response of Cracked Aluminium Panel with Partially Bonded Composite Patch. MS thesis, AFIT/GAE/ENY/95D-7. School of Engineering, Air Force Institute of Technology (AU), Wright-Patterson AFB OH, 1995.
- [7] Schubbe, Joel J. Thickness Effects on Cracked Aluminium Plate With Composite Patch Repair. Air Force Institute of Technology (AU), Wright-Patterson AFB OH, May 1997 (AFIT/DS/ENY/97-4).
- [8] Fredell, R.S. Damage Tolerant Repair Techniques for Pressurized Aircraft Fuselages. Ph.D.dissertation. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, June 1994 (WL-TR-93- 3134).
- [9] Schubbe JJ, Mall S. Modelling of cracked thick metallic structure with bonded composite patch repair using three-layer technique. *Compos Struct* 1999;45:185–93.
- [10] Conley, D. S. Fatigue Response of Repaired Thick Aluminum Panels with Bondline Flaws. MS Thesis, AFIT/GAE/ENY/99M-03. School of Engineering, Air Force Institute of Technology, (AU), Wright-Patterson AFB, 1999.
- [11] Baker, A.A. "Crack Patching; Experimental Studies, Practical Applications," in *Bonded Repair of Aircraft Structures*. 107-172. A.A. Baker and R. Jones, editors. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1988.
- [12] Christian TF, Jr, Hammond DO, Cochran JB. Composite material repairs to metallic airframe components. *J Aircraft* 1992;29:470-6.
- [13] Umamaheswar T, Singh R. Modeling of patch repair to a thin cracked sheet. *Eng Fract Mech* 1999;62:267–89

[14] Belason B, Rutherford P, Miller M, Raj S. Evaluation of bore-epoxy doublers for commercial aircraft aluminum structures. NASA CP 3274, 1994. p. 49±60.

[15] K. Madani · S. Touzain · X. Feaugas · [...] · M. Ratwani, Experimental and numerical study of repair techniques for panels with geometrical discontinuities, Mar 2010 · Computational Materials Science.

[16] K. Madani · S. Touzain · X. Feaugas · [...] · M. Ratwani, Stress distribution in a 2024-T3 aluminum plate with a circular notch, repaired by a graphite/epoxy composite patch. Apr 2009 · International Journal of Adhesion and Adhesives.

[17] L. Rezgani · K. Madani · X. Feaugas · [...] · J. Vallette, Influence of water ingress onto the crack propagation rate in a AA2024-T3 plate repaired by a carbon/epoxy patch ; Jun 2016 · Aerospace Science and Technology.

[18] W. Oudad · K. Madani · B. Bachir Bouiadjra · [...] · X. Feaugas, Effect of humidity absorption by the adhesive on the performances of bonded composite repairs in aircraft structures, Dec 2012 · Composites Part B Engineering.

[17] Thèse, Laid Rezgani, Etude des effets de l'environnement sur le comportement des panneaux composites: application a la réparation des structures aéronautiques, (2014).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail que nous avons mené, nous a permis de traiter et d'analyser la résistance d'un joint adhésif sollicité à des charges mécaniques couplées à l'effet de vieillissement. Plusieurs paramètres ont été mis en évidence à savoir l'effet des modifications de la géométrie et de la séquence d'empilement du composite d'un assemblage collé, la dégradation d'une structure endommagée et réparée par patch en composite hybride ainsi que la durée de vieillissement.

Dans la première partie, une analyse numérique par éléments finis sur l'influence des modifications géométriques et mécaniques des matériaux de l'assemblage sur la distribution des contraintes dans le joint d'adhésif pour un simple recouvrement a été menée. On peut tirer, à partir des résultats obtenus, les conclusions suivantes:

La valeur des différentes contraintes dans le joint adhésif dépend fortement en premier lieu de la valeur du déplacement imposé et de la nature des substrats.

Le comportement de l'adhésif dépend des propriétés mécaniques du composite (la nature de la fibre). Quelque soit la nature de la fibre, on a toujours de fortes contraintes au niveau des bords de l'adhésif et des valeurs faibles au niveau du milieu de l'adhésif.

Le cœur de l'adhésif devient de plus en plus actif si les propriétés mécaniques du composite sont très élevées.

Pour la plupart des cas, le composite présente des caractéristiques mécaniques élevées par rapport à celles de l'adhésif, donc un faible déplacement imposé entraîne l'adhésif dans son domaine plastique.

La séquence d'empilement a aussi un rôle déterminant sur la valeur des contraintes, si la séquence d'empilement présente des orientations des fibres suivant la direction de chargement, le composite devient résistant. La majorité de la charge appliquée sera transmise à l'adhésif, donc des valeurs élevées des contraintes.

Par contre, si l'orientation des fibres tend vers 90° , le composite aura des propriétés mécaniques plus faibles selon la direction de chargement et par conséquent, une petite quantité de la charge sera transmise vers l'adhésif, donc de faibles valeurs des contraintes.

La méthode de simulation du composite comme étant un seul bloc et multicouches a une importance sur la valeur des contraintes dans le joint adhésif.

L'utilisation d'un composite hybride a aussi une importance dans la réduction des contraintes dans le joint adhésif.

Le plus important dans les composites hybrides est que les couches en milieu du composite doivent être en carbone ou en aramide.

Le composite qui a de faibles propriétés mécaniques transmet moins de contraintes vers l'adhésif. Par contre, celui qui a des propriétés mécaniques élevées transmet presque toute la charge appliquée vers l'adhésif.

Dans la deuxième partie de l'étude, l'effet des paramètres géométriques et mécaniques du patch composite et l'utilisation d'un patch hybride sur la réduction de la valeur de l'intégrale J dans une plaque réparée et la distribution des contraintes de Von Mises dans la couche adhésive sont étudiés numériquement. En conséquence, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

La présence d'un patch réduit considérablement la concentration de contraintes qui peut retarder la naissance de la fissure et par la suite l'augmentation de la durée de vie de la structure. La distribution des contraintes dans les différents plis est quasi-identique quelque soit le type de la modification effectuée sur le patch.

La distribution des contraintes est identique quelque soit la configuration du patch, la valeur est maximale au niveau de la fissure et au niveau du bord. La flexion due à l'excentricité de l'axe neutre provoquée par la réparation par simple patch induit des contraintes maximales aux niveaux du bord.

Le transfert de charge à travers l'adhésif est très important pour les différentes couches de patch. Quelque soit le type de la modification géométrique du patch ainsi que la séquence d'empilement, la valeur de l'intégrale J reste toujours minimale par rapport au cas où la séquence d'empilement est $[0^\circ]_8$.

la valeur de la contrainte de Von Mises est influencée par le type de la modification du patch ainsi que la séquence d'empilement.

la valeur de l'intégrale J varie selon la séquence d'empilement et en même temps en fonction de la disposition des couches de carbone par rapport aux autres couches du stratifié [constituant le composite hybride].

Le patch en aramide absorbe lui-même des contraintes de la plaque endommagée mais restent inférieures à celle du patch en carbone.

La valeur de l'intégrale J est très influencée par l'effet de la séquence d'empilement et par la position des couches en carbone par rapport aux couches d'aramide.

La valeur de l'intégrale J est diminuée en utilisant un composite hybride mais en prenant en considération le type de la séquence d'empilement.

La durabilité de l'assemblage est influencée en premier lieu par le type d'adhésif utilisé pour coller des matériaux en composite.

La valeur des contraintes dans le joint d'adhésif dépend fortement de la valeur des propriétés mécaniques du matériau de l'adhérent, plus le matériau présente des caractéristiques mécaniques élevées plus est le transfert de charge vers le joint d'adhésif.

L'orientation des fibres, la séquence d'empilement et la nature des fibres influencent fortement sur le niveau de contrainte dans le joint d'adhésif.

Si la direction des fibres tend vers 0° le matériau aura des propriétés mécaniques élevées et donc un transfert des contraintes élevées pour l'adhésif.

La valeur de l'intégrale J est influencée par la séquence d'empilement.

Une orientation de 0° est préférable pour la première couche du patch composite car, pour cette orientation, le transfert de charge sera meilleur.

Le patch composite en carbone / époxyde absorbe mieux les contraintes que le patch aramide / époxyde et donc une réduction de la valeur de l'intégrale J est observée.

Un patch composite possédant une orientation des fibres [0/-45/45/90] est préférable pour un meilleur transfert de charge, sauf que la disposition de ces couches avec des angles différents doit être optimisée pour minimiser la valeur de l'intégrale J et donc réduire les contraintes dans la couche adhésive.

L'utilisation d'un composite hybride est essentielle dans le cas où le composite réparé a une faible rigidité par rapport à la plaque endommagée.

Pour le composite hybride, l'utilisation des couches de carbone par rapport aux couches d'aramide doit être optimisé pour avoir un meilleur transfert de charges et donc une valeur minimale de l'intégrale J.

Les résultats de l'analyse de l'effet de l'absorption d'eau sur l'endommagement de l'adhésif dans les réparations des structures endommagées par patch en composite montrent que l'absorption d'eau accélère l'endommagement de l'adhésif. La réparation est fortement affectée par l'absorption d'eau car l'humidité augmente la plasticité du matériau adhésif. La durabilité de la réparation est affectée par l'absorption d'eau lorsque le temps d'immersion dans l'eau dépasse quelques semaines. De plus, l'absorption d'eau dégrade l'efficacité de la réparation. L'intégrale J augmente lorsque l'adhésif absorbe l'eau, ce qui réduit la durée de vie des structures réparées.

L'influence du vieillissement de l'adhésif a aussi une conséquence sur le transfert de charge et donc sur l'intégral J. Plus la durée d'immersion en eau de l'adhésif est importante, l'adhésif perd une grande partie de sa résistance et donc un mauvais transfert de charge, par conséquent, la valeur de l'intégral J augmente.

Si la température augmente, l'absorption de l'eau par l'adhésif augmente et donc une chute considérablement dans propriétés mécaniques de l'adhésif entraînant ainsi une augmentation considérable de la valeur de l'intégral J.