Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Mémoire de fin d'étude

En vue d'obtention le diplôme de Master

Spécialité : *Maintenance Industrielle et Electromécanique*

Thème :

Analyse et optimisation de l'effet de raidisseur sur la distribution des contraintes dans les plaques avec entaille semis circulaire.

Présente et soutenu publiquement par :

Nom : **BENSELIM** Prénom : **SOFIANE**

Nom : **BENSEDJAD** Prénom : **MOHAMED YASSER**

Devant le jury :

Bachir Bouiadjra Bachir

Résumé :

L'ajout de raidisseurs sur des plaques présentant une entaille semi-circulaire vise à réduire la concentration des contraintes générées autour de l'entaille, zone particulièrement sensible à l'amorçage de fissures et à la rupture. L'analyse montre que la présence d'une entaille induit une augmentation locale des contraintes, ce qui affaiblit la plaque. L'intégration de raidisseurs, judicieusement positionnés et dimensionnés, permet de redistribuer ces contraintes, limitant ainsi les pics au voisinage de l'entaille. L'optimisation de leur effet repose sur le choix de la géométrie, du matériau et de l'emplacement des raidisseurs, ainsi que sur l'épaisseur de la plaque. Les simulations numériques et les méthodes analytiques montrent que le couplage flexion-traction, favorisé par des raidisseurs excentrés ou adaptés, améliore significativement la rigidité et la résistance globale de la structure. Ainsi, une conception optimisée permet d'augmenter la durée de vie des plaques entaillées tout en minimisant le risque de rupture prématurée.

Abstract:

The addition of stiffeners to plates with a semi-circular notch aims to reduce the stress concentration generated around the notch, an area particularly susceptible to crack initiation and failure. Analysis shows that the presence of a notch causes a local increase in stress, which weakens the plate. The integration of well-positioned and properly sized stiffeners allows for the redistribution of these stresses, thus limiting peaks in the vicinity of the notch. Optimizing their effect depends on the choice of geometry, material, and placement of the stiffeners, as well as the thickness of the plate. Numerical simulations and analytical methods show that the flexion-tension coupling, promoted by appropriately designed or offset stiffeners, significantly improves the overall stiffness and strength of the structure. Thus, an optimized design increases the service life of notched plates while minimizing the risk of premature failure.

ملخص:

يهدف إضافة المصلبات إلى الصفائح التي تحتوي على شق شبه دائري إلى تقليل تركيز الإجهادات المتولدة حول الشق، وهي منطقة شديدة الحساسية لبدء التشققات والانهيار. تُظهر التحليلات أن وجود الشق يؤدي إلى زيادة محلية في الإجهاد، مما يضعف الصفيحة. يسمح دمج المصلبات، التي يتم وضعها وتحديد أبعادها بشكل مناسب، بإعادة توزيع هذه الإجهادات، مما يحد من القمم في منطقة الشق. وتعتمد فعالية هذه المصلبات على اختيار الشكل الهندسي، والمادة، وموقع المصلبات، بالإضافة إلى سمك الصفيحة. وتوضح المحاكاة العددية والأساليب التحليلية أن اقتران الانحناء مع الشد، الذي تعززه المصلبات المصممة أو الموضوعة بشكل مناسب، يحسن بشكل كبير من صلابة ومتانة البنية ككل. وبالتالي، فإن التصميم الأمثل يزيد من عمر خدمة الصفائح ذات الشقوق مع تقليل خطر الانهيار المبكر.

Table des matières :

Introduction générale 8

Chapitre 1:

1.1 Historique 9

1.2 Introduction 11

1.3 Généralités ..... **Erreur ! Signet non défini.**

1.4 Loi d'endommagement et de propogation en fatigue 13

1.5 Modèles de propagation d'une fissure de fatigue 16

1.5.1 Introduction 16

1.5.2 Modèles de la prédiction de la durée de vie 16

1.5.3 Modèles basés sur la fermeture d'une fissure 23

1.6 Paramètres affectant le comportement d'une fatigue 30

Chapitre 2 :

2.1 Introduction 33

2.2 Historique sur le collage 37

2.3 Avantages et desavantages du collage structural 38

2.4 Différentes types du collage 40

Chapitre 3 :

3.1.0 Définition de l'Abaqus 63

3.1.1 Description des possibilités de l'Abaqus 63

3.1.2 Les unités 64

3.1.3 Modules 64

Chapitre 4:

Introduction 90

4.1 Analyse du facteur de concentration des contraintes 91

4.2 Analyse du facteur d'intensité des contraintes 95

4.3 Analyse des contraintes du cisaillement de l'adhésif 98

Chapitre 4:

Optimisation numérique 99

Conclusion générale 110

Références bibliographiques..... 112

Liste des figures :

Figure 1.1 Loi de propagation générale 16

Figure 1.2 Principe d'ouverture et de fermeture de la fissure.....24

Figure 1.3 Developpement d'enveloppe de zones plastiques autour d'une fissure de fatigue en cour de propagation.....26

Figure 1.4 Fermeture induit par rugosité.....27

Figure 1.5 Fermeture par oxydation.....27

Figure 1.6 Effet de Bauchinger.....30

Figure I.7 : Effet de Rochet 31

Figure 1.8 Adoucissement 32

Figure 1.9 Durcissement.....32

Figure 2.1 Applications.....47

Figure 2.2 Applications.....49

Figure 2.3 Applications.....50

Figure 2.4 Bolted Bonded joint.....61

Figure 2.5 River Bonded joint 61

Figure 2.6 62

Figure 2.7 62

Figure 2.8 63

Figure 2.9 63

Figure 2.10 64
Figure 3.1 Types d'éléments 66
Figure 3.2 Plaque à réaliser 67
Figure 3.3 Création de la plaque 68
Figure 3.4 Désignation de la plaque 69
Figure 3.5 Désignation de l'épaisseur 69
Figure 3.6 Le module PROPERTY 70
Figure 3.7 Définition les propriétés du matériau 70
Figure 3.8 Définition la section du plaque 71
Figure 3.9 Sélection de la section 71
Figure 3.10 Sélection la pièce entière 72
Figure 3.11 Choix de section 73

Figure 3.12 Affectation la section 73
Figure 3.13 Module ASSEMBLY 74
Figure 3.14 Créer une instance 76
Figure 3.15 Création de STEP 77
Figure 3.16 Création de l'encastrement 78
Figure 3.17 Selection la face à encastrée 79
Figure 3.18 Affectation de l'encastrement 80
Figure 3.19 Création de l'encastrement 81
Figure 3.20 Sélection la face de traction 81
Figure 3.21 Affectation de champ magnitude 82
Figure 3.22 Module MESH 83
Figure 3.23 Création d'une partition 84
Figure 3.24 Partition de la plaque 85
Figure 3.25 Affectation la taille des élements 85
Figure 3.26 Confirmation d'une maillage 86
Figure 3.27 Attribution du type d'élement 87
Figure 3.28 Création de JOB 88
Figure 3.29 Visualisation les résultats 89
Figure 3.30 Plaque avec raidisseur 90
Figure 3.31 Maillage de la plaque avec raidisseur avec fissure 91
Figure 3.32 Localisation de la fissure 92
Figure 4.1 Influence de l'épaisseur de la plaque sur le facteur de concentration des contraintes pour un raidisseur de 3 mm d'épaisseur 95

Figure 4.2 Influence de l'épaisseur du raidisseur sur le facteur de concentration des contraintes pour une plaque de 5 mm d'épaisseur 96
Figure 4.3 Influence de la position du raidisseur sur le facteur de concentration des contraintes pour un raidisseur de 3 mm d'épaisseur et une plaque de 5 mm d'épaisseur 97
Figure 4.4 . Influence de l'épaisseur du raisseur sur le facteur d'intensité des contraintes pour une plaque de 5 mm d'épaisseur 99
Figure 4.5 Influence de l'épaisseur du raidisseur sur le facteur d'intensité des contraintes pour une plaque de 5 mm d'épaisseur et un raidisseur de 5 mm d'épaisseur 100
Figure 4.6 Influence de l'épaisseur du raidisseur sur les contraintes du cisaillement max pour une plaque de 5 mm d'épaisseur 102
Figure 4.7 Influence de la position du raidisseur sur les contraintes du cisaillement max pour un raisseur de 5 mm d'épaisseur et une plaque de 5 mm d'épaisseur 103

Liste des tableaux :

Tableau 3.1 Fichier Abaqus 64
Tableau 3.2 Les unités 65

Introduction général :

L'étude des assemblages collés renforcés par raidisseur s'inscrit dans une problématique centrale de la mécanique des structures modernes : comment garantir la fiabilité, la durabilité et la performance des assemblages soumis à des sollicitations complexes, notamment la fatigue et les concentrations de contraintes. L'évolution des exigences industrielles – réduction de poids, assemblage de matériaux hétérogènes, optimisation des coûts et des performances – a conduit à un recours croissant au collage structural, en particulier dans les secteurs aéronautique, automobile et des matériaux composites.

Historiquement, la compréhension du comportement en fatigue des matériaux a joué un rôle déterminant dans la conception des structures : la fatigue, phénomène d'endommagement progressif sous sollicitations cycliques, peut entraîner la rupture d'un composant à des niveaux de contrainte bien inférieurs à la limite d'élasticité du matériau. Cette réalité impose d'intégrer, dès la conception, des critères de résistance à la fatigue et de maîtrise des concentrations de contraintes, notamment dans les zones d'assemblage où les discontinuités géométriques et les interfaces adhésives sont particulièrement sollicitées.

Le collage structural présente des avantages majeurs : il permet d'assembler des matériaux de nature différente, d'alléger les structures, d'obtenir une répartition plus homogène des contraintes et d'éviter les amorces de rupture liées au perçage ou au rivetage. Cependant, la fiabilité des assemblages collés dépend fortement de la qualité de l'adhésion, de la préparation des surfaces, du choix de l'adhésif et de la maîtrise des phénomènes de concentration des contraintes et de propagation des fissures.

Face à ces enjeux, la démarche scientifique actuelle combine :
- Modélisation numérique avancée (par éléments finis, ex. : Abaqus) pour simuler le comportement mécanique et identifier les zones critiques d'un assemblage,
- Optimisation multi-critères (logiciel MODDE5) pour déterminer les configurations géométriques optimales minimisant simultanément le risque de propagation de fissures (facteur d'intensité des contraintes) et la contrainte de cisaillement maximale dans l'adhésif.

Les analyses statistiques (R^2 élevé, Q^2 satisfaisant) démontrent la robustesse des modèles prédictifs, validant ainsi la pertinence de l'approche pour guider la conception vers des assemblages plus fiables et durables. Les résultats mettent en évidence l'importance de l'épaisseur et de la position du raidisseur : une optimisation fine de ces paramètres permet de limiter la concentration des contraintes, de réduire la propagation des fissures et d'améliorer la tenue au cisaillement.

En synthèse, l'intégration de la simulation numérique, de l'optimisation statistique et de la compréhension fine des phénomènes de fatigue et d'adhésion constitue aujourd'hui la voie privilégiée pour la conception d'assemblages collés performants. Cette approche multidisciplinaire fournit aux ingénieurs des outils robustes pour répondre aux exigences croissantes de sécurité, de légèreté et de durabilité dans l'industrie moderne.

Chapitre 1 :

1.1 Historique

À partir du début de la première révolution industrielle (fin XVIIIe - début XIXe), La fatigue des matériaux devient une problématique majeure [Schütz, 1996, Schijve,2003]. On remarque à cette époque que la répétition d'un chargement sur une pièceengendre sa rupture alors que ce chargement appliqué une seule fois n'implique aucunendommagement visible.

Les premiers travaux sur la fatigue remontent à 1837 où Albert publie des résultatsd'essais de fatigue menés sur des chaînes de convoyeur utilisées dans les mines. Parla suite, Rankine en 1842 travaille sur la fatigue des essieux utilisés dans le milieuferroviaire et remarque l'influence des concentrations de contraintes. La même année,un accident ferroviaire à Versailles causé par la fatigue d'un essieu de locomotivecoûte la vie à 60 passagers. En 1853, Morin propose le remplacement systématiquedes essieux de carrosse, c'est l'introduction d'une notion de durée de vie associée à unepièce. Avec le développement industriel et l'essor de technologies comme les pompes,moteurs, locomotives, les cas de rupture de pièce par fatigue sont de mieux en mieuxconnus et c'est en 1839 que Poncelet mentionne pour la première fois le mot fatiguelors d'une conférence pour décrire ce phénomène. Le mot fatigue est par la suite utiliséexplicitement par Braithwaite en 1854[ ].

À partir de 1858, August Wöhler met en place des essais de fatigue sur des essieuxde locomotives. Il remarque alors que la rupture du matériau peut être induite par larépétition d'un chargement. Il introduit alors la notion de coefficient de sécurité, dedispersion et la notion de durée de vie en fatigue. Ces premiers résultats permettentalors de relier la charge appliquée à un essieu au nombre de cycles nécessaire pourcourbe SN (Stress - Number of cycles) et par d'autres courbe de Wöhler.

En 1903, les premières observations métallurgiques menées par Ewing et Humfreymettent en évidence les bandes de glissement. Ce sont les premières descriptions desmécanismes microstructuraux de la fatigue des matériaux.

Dans les années 1920, les travaux de Haigh et de McAdam sur la corrosion enfatigue sont publiés. À la même époque, Gough s'intéresse aux effets de l'état desurface sur la limite de fatigue.

La mise au point des jauges de déformations en 1939 est un fait majeur car ilmarque le début du développement des essais de fatigue à amplitude variable. De nombreuxessais, notamment dans le domaine aéronautique pendant la Seconde Guerremondiale, sont menés pour connaitre l'histoire du chargement subi par les différentespièces mécaniques.

Après la Seconde Guerre mondiale, la fatigue est toujours un phénomène importantdans le milieu industriel et particulièrement dans le domaine aéronautique. En 1954,deux avions «De Havilland Comet» s'écrasent. Ces accidents conduisent à la mise aupoint d'essais de fatigue à échelle réelle reproduisant les conditions de pressions quesubit le fuselage. En 1958, deux avions de l'United States Air Force s'écrasent à causede rupture par fatigue des ailes.

Dans les années soixante, le développement des machines hydrauliques est l'occasiond'étudier la fatigue de manière plus élaborée, comme par exemple d'appliquerdes histoires de chargement complexes, de s'intéresser à l'effet de la fréquence de sollicitationou la propagation de fissures. On peut citer par exemple les premiers travauxde Paris en 1962 sur ce dernier point.

Depuis cette période, de nombreux travaux scientifiques ont été développés pouraméliorer la compréhension de la fatigue des matériaux. On peut par exemple mentionnerl'usage de nouvelles techniques telles que la micro tomographie aux rayons Xou des systèmes piézoélectriques. Ces systèmes piézoélectriques permettent de solliciterdes échantillons à des fréquences ultrasoniques. Ils donnent alors

facilement accès àdes domaines de sollicitation à des nombres de cycles très grands. D'autres techniquestelles que la thermographie infrarouge (IR) et la corrélation d'image numérique (CIN)sont également apparues. La technique de thermographie infrarouge donne accès à deschamps de température, en général considérés comme un indicateur de l'état d'avancementde la fatigue. Enfin la technique de corrélation d'images permet d'accéderà des champs cinématiques. Ce sont des techniques qui se révèlent pertinentes pouraméliorer la connaissance du comportement des matériaux et des structures.

L'étude de la fatigue des matériaux a démarré avec la première révolution industrielle,de nombreux travaux ont été réalisés dans ce domaine. Malgré cela, il restetoujours des zones d'ombre dans la compréhension des mécanismes de fatigue commepar exemple l'existence d'une limite de fatigue et de l'effet de fréquence de sollicitation.

1.2 Introduction :

Le terme fatigue généralement utilisée pour décrire la déformation et la rupture des matériaux sous chargement cyclique. L'endommagement des matériaux par fatigue provient du caractère cyclique des sollicitations qui leur sont appliquées.

Ce dommage peut conduire à la ruine du composant ou de la structure elle même lorsque son accumulation atteint une valeur critique qui est fonction des matériaux.

Cette notion d'endommagement par fatigue même si elle est très ancienne demeure aujourd'hui un domaine de préoccupation important en fatigue car sa modélisation reste par fois en décalage avec les observations expérimentales. Sans déformation plastique répétée,même de très faible amplitude, il n'y a pas de fatigue. La limite conventionnelle de fatigue à 10^7 cycles correspond à une amplitude de déformation cyclique de l'ordre de 10^{-5}. Une déformation plastique d'une telle amplitude, appliquée une seule fois, ne provoque pas une évolution considérable de la

microstructure des matériaux. Par contre sa répétition prolongée entraine un endommagement cumulatif résultant du mouvement inversible des dislocations qui peut conduire au bout du compte à la rupture. L'objectifd'une loi d'endommagent en fatigue est de fournir un outil de prévision de durée de vie pour des structures soumises à des sollicitations variables. Le dimensionnement d'une structure à la fatigue est plus difficile que pour les charges statiques, car les ruptures par fatigue dépendent fortement des contraintes locales.

1.3 Généralités :

De nombreuses structures aéronautiques et maritimes et industrielles qui subissent au fil des jours l'action des charges variable et répétées présentent des dommages. Le cas des voilures les chasées les tabliers les barrages et les arbres sous un chargement répété sont des exemples vivant des phénomènes de fatigue.

Le phénomène de fatigue est lié à l'amorçage est la propagation d'une fissure à partir d'un défaut au sein de la pièce, (situation favorable à une cohésion local du matériau du fait une forte concentration de contraintes).

On peut identifier deux grandes classes de comportement dus à la fatigue[ ].

- La fatigue associée à un grand nombre de cycles : c'est la plus courantes, la rupture a lieu sans aucune déformation permanente et la déformation se produit dans les limites du domaine élastique.
- La fatigue plastique associée à un petit nombre de cycles (fatigue olygocyclique) : c'est celle qu'on rencontre dans le cas du fil de métal plié et déplié.

La contrainte est t'elle qu'elle provoque à chaque cycle, une déformation plastique, dans ce cas la durée de vie est beaucoup plus court ($N<10^4$ cycle).

Ce phénomène de fatigue qui entraine une détérioration progressive de la structure des matériaux puis leur rupture notamment quand les ouvrages sont soumis à des cycles complexes, a été observé dès le début de cycles, mais il n'a été développé que durant ces dernières années. La méthode la plus utilisée pour aborder la fatigue des structures est la relevée de la courbe de Wohler. Cependant différents travaux entrepris à ce jour n'ont pas permis de mettre en évidence une limite d'endurance de ce matériau.

1.4 **Loi d'endommagement et de propagation en fatigue :**

1) **Loi d'endommagement :**

L'endommagement de fatigue correspond à la naissance et la croissance de microfissure généralement intracristalines dans les métaux, sous l'effet de sollicitations cyclique, jusqu'à l'amorçage d'une fissure macroscopique.

Les lois classiques s'expriment en fonction de grandeurs définie sur un cycle :

-Amplitude de contrainte $\Delta\sigma/2$ ou de déformation $\Delta\varepsilon/2$

-valeur moyenne (sur un cycle) de contrainte σ_{moy} ou de déformation ε_{moy}.

-Rapport du minimum au maximum de la contrainte $R\sigma=\sigma_{min}/\sigma_{max}$

Ou de la déformation $R\varepsilon=\varepsilon_{min}/\varepsilon_{max}$.

La loi de Palmgreen-miner suppose l'additivité de ces cycles, et l'existence d'une relation biunivoque entre le dommage élémentaire induit par un cycle et l'amplitude de chargement. La règle linéaire de cette loi définit les dommages par le facteur d'usage associé n_i/N_i ou n_i est le nombre de cycle effectues avec chargement donné pour lequel le nombre de cycles a rupture serait N_i l'évolution du dommage est donc linéaire [ ] :

$$D = \sum_i \frac{ni}{Ni} \text{1-1}$$

Cette loi repose sur l'utilisation des courbes de Wohler, donnant une relation entre le nombre N_i et l'amplitude des cycles on peut alors récrire la loi de Miner par une fonction de fonction de l'amplitude de chargement

$$\frac{\boldsymbol{\delta D}}{\boldsymbol{\delta N}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{f}(\Delta\boldsymbol{\sigma})} \text{1-2}$$

2) Loi de propagation d'une fissure :

Les phénomènes liés à la propagation de la fissuration en fatigue sont très complexes. Les modèles qui se proposent de décrire cette propagation devrait tenir compte de tous les paramètres qui conditionnent cette propagation dans un matériau donné. Les paramètres sont classés en deux grandes catégories :

- Les paramètresintrinsèques dépendant du matériau lui-même, par exemple, module de Young limite d'élasticité, ténacité, ……
- Les paramètres extrinsèques dépendant des conditions d'utilisation, par exemple, la température la fréquence et la forme du signal ……

La diversité de ces paramètres a conduit les mécaniciens soucieux de prévoir la rupture des pièces mécaniques sollicitées en fatigue, à établir des lois basées le plus souvent sur des constatations expérimentales et décrivant, le plus correctement possible, l'effet de certaines paramètres jugés plus prépondérants que d'autre sur la vitesse de propagation des fissures.

Le modèle le plus utilisé en pratique est basé sur le facteur d'intensité de contraintes qui caractérise les effets de la variation de contrainte et de la géométrie de la pièce, compte tenue de l'extension de la fissure, la propagation d'une fissure

sous l'effet de variation de contraintes provoque un accroissement du facteur d'intensité de contrainte ce qui implique un accroissement de la vitesse de la fissuration. Ce comportement des structures fissurées, liée à la répétition des charges, entrain la fatigue du matériau dont la résistance mécanique décroit avec l'augmentation du nombre des cycles de chargement. Pour des problèmes plan, ou la fissure est caractérisée par sa longueur 'a', la loi de propagation s'écrit donc sous la forme générale : $\frac{da}{dN} =$

$$f(\Delta k, k_M, k_m, \Delta k_c, \Delta k_s, .. cst\ du\ matérau \quad 1\text{-}3$$

Ou Δk représente la variation du facteur k($\Delta k=k_M-k_m$), Δk_c est la facteur d'intensité critique a rupture, et Δk_s le facteur d'intensité seuil. Les expériences montrent trois stades de croissance de la fissure de fatigue :

Démarrage de la propagation à partir d'un seuil de Δk (stade A), croissance régulière de la fissure (stade B) et croissance brutal jusqu'à la rupture (stade C).

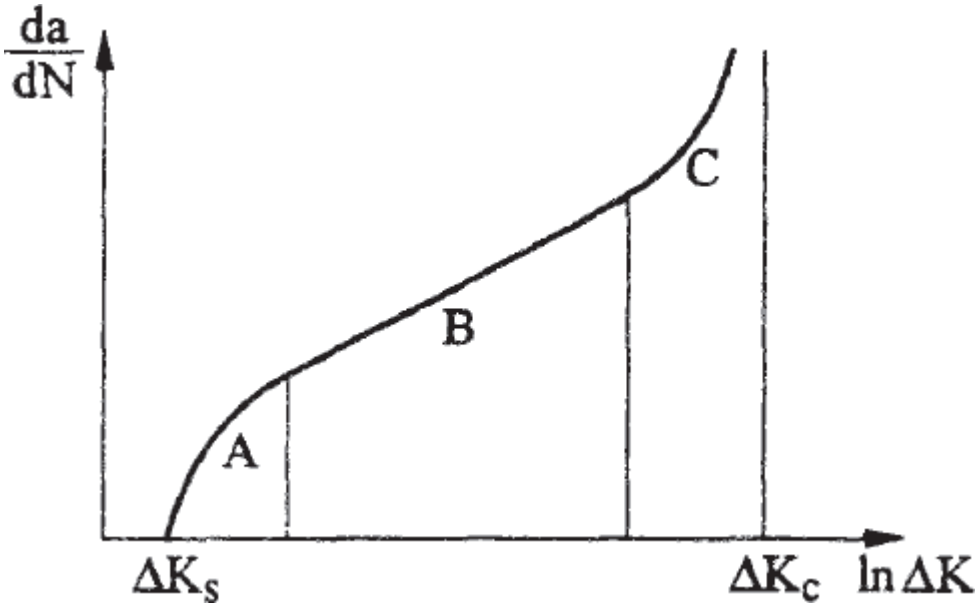


Figure 1.1 : loi de propagation général

La loi de base largement utilisée pour décrire la propagation de fissure au stade B est la loi de paris (1963).

1.5 Modèles de propagation d'une fissure de fatigue :

1.5.1 Introduction :

Plusieurs modèles ont été proposés pour prédire de vie et la vitesse de fissuration¨da/dN¨ sous différent conditions. Dans cette partie présente les modèles de prédiction de la durée de vie sous chargement a amplitude constante avec et sans effet du rapport de charge ¨R¨.

1.5.2 Modéles de prédiction de la durée de vie :

L'estimation de la vitesse de propagation des fissures et la prédiction de la durée de vie résiduelle sont importantes pour la conception des structures sous l'effet du phénomène de fatigue plusieurs contribution ont été menées dans le but de développer des modèles de propagations pour des chargements a amplitude constantes. La majorité des modèles proposés ne tient pas compte de tous les paramètres et conditions, et la totalité de la courbe de propagation da/dN (figure1) les différent modèles proposées sont basées sur l'intégration de l'équation de la vitesse de propagation afin de prédire de la durée de vie en fatigue. L'application de ces modèles et limitée dans le cas d'un robuste ou l'algorithme d'intégration compliqué.

a- Modèle de paris :

La plus part des applications actuelles de concepts de la mécanique linéaire de la rupture élastique pour décrire le comportement de fissure sont associéesà la régionII (figure1). Le modèle de paris [ ]

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta k)^m \quad 1\text{-}4$$

Représenté la première application de la mécanique de la rupture à la fatigue. L'utilisation de la loi de paris et limitée par son utilisation que dans la région II (propagation stable) et ne peut décrire les régions (I) et (III). Cette loi ne prend pas en compte l'effet du rapport de charge ¨R¨ et dépend du matériau utilisée. La valeur du coefficient ¨m¨ pour les alliages légers est entre 2 et 4.

Pour décrire plus complétement la courbe de propagation a des vitesse très lentes et pour la zone de propagation rapide, certaine autres ont intégré a la formulation des valeurs de k (seuil de propagation) et de k_c (valeur critique du facteur d'intensité de contrainte).

b- Modèle de Walker :

La principale limite de la loi de paris est son incapacité a de prendre compte de modifié par Walker [ ] afin d'améliorer le modèle de paris en incluent l'effet du rapport de charge. Walker a proposé le paramètre Δk, qui est équivalent au facteur d'intensité de contrainte à R=0 et qui provoque la même vitesse de propagation auk_{max} réel, et la combinaison du rapport R. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$\Delta k' = k_{max}(1-R)^{\gamma w} \quad 1\text{-}5$$

Ou $\Delta k_{max}=\Delta k/(1-R)$ et l'équation 1-5 devient :

$$\Delta k' = \Delta k/(1-R)^{1-\gamma w} \quad 1\text{-}6$$

Par conséquent, la loi de Walker est représenté par :

$$\frac{da}{dN} = c_w[\frac{\Delta k}{(1-R)^{1-\gamma}}]^{mw} \text{1-7}$$

Pour R=0, l'équation 1-7 est écrite sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = c_w(\Delta k)^{mw} \quad \text{1-8}$$

Les paramètres c_w et m_w sont respectivement équivalent aux paramètres c et m de loi de paris.

Le modèle de Walker est une modification du modèle de paris tenant compte de l'effet du rapport de charge ou un troisième paramètre a été introduit ¨γ_w¨.

c- Modèle de Forman :

Forman [ ] a amélioré le modèle de Walker en suggérant un nouveau modèle dont est capable décrire la région III de la courbe de la vitesse de propagation et inclut l'effet de rapport de charge.

La loi de Forman est donnée par :

$$\frac{da}{dN} = \frac{c(\Delta k)^m}{(1-R)(k_c - k_{max})} \text{1-9}$$

Ou k_c est la ténacité du matériau fonction de l'épaisseur considérée.

Le modèle de Forman est capable de représenter le stade de la propagation stable (région II). Des modifications du modèle de Forman ont été proposés par Hartman et schijve [ ] afin de tenir compte du facteur d'intensité de contrainte seuil Δk_{th} (région 1). Le modèle est modifié est représenté par l'équation 1-10.

$$\frac{da}{dN} = \frac{c(\Delta k - \Delta k_{th})^m}{(1-R)(k_c - \Delta k)} \quad 1\text{-}10$$

L'inconvénient majeur de modèle est la stabilité et la dépendance de Δk_{th} au rapport de charge ¨R¨ ce qui été démontré par Dowling [ ].

d- Modèle de Collipriest :

En 1972 Collipriest [ ] a proposé une loi propagation de la fissure capable de décrire les trois régions (figure 1) incluent l'effet du rapport de charge. Le modèle décrit ci-dessus (équation 1-10) semble compliqué vu le nombre de paramètres pris en compte.

$$\frac{da}{dN} = c(k_c \Delta k)^{\frac{m}{2}} \exp\left[\ln\left(\frac{k_c}{\Delta k_{th}}\right)^{\frac{m}{2}} \operatorname{arctanh}\left(\frac{\ln\left[\frac{\Delta k^2}{(1-R)k_c \Delta k_{th}}\right]}{\ln\left[\frac{(1-R)k_c}{\Delta k_{th}}\right]}\right)\right] 1\text{-}11$$

e- Modèle de McEvily :

En 1974 McEvily [ ] a proposé un modèle relient la propagation de la fissure par cycle dans le mode de striation en fonction de l'ouverture de la fissure ou l'effet seuil (Δk_{th}) est inclut (équation 1-12).

$$\frac{da}{dN} = \frac{8}{\pi E^2}(\Delta k^2 - \Delta k_{th}^2) \quad 1\text{-}12$$

Une modification de ce modèle a été proposé afin de tenir compte de l'effet du rapport de charge ¨R¨ et de la zone de propagation instable.

$$\frac{da}{dN} = \frac{8}{\pi E^2}(\Delta k^2 - \Delta k_{th}^2)\left(1 + \frac{\Delta k}{k_c - k_{max}}\right) 1\text{-}13$$

L'amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil Δk_{th} est exprimée par la relation 1-14.

$$\Delta k_{th} = \frac{1.2(\Delta k_{th0})}{1+0.2(\frac{(1+R)}{1-R})} \quad 1\text{-}14$$

f-Modèle de Zheng :

Zheng and Manfred [ ] ont élaboré un modèle de propagation en expliquant l'émoussement en point de la fissure contrairement aux travaux Lal et Weiss [ ].

Le modèle décrit par l'équation dépend de la résistance à la rupture σ_f et coefficient de ductilité ε_f ainsi que du facteur d'intensité de contrainte seuil k_{th}.

$$\frac{da}{dN} = \frac{1}{2\pi E \sigma_f s_f}(k_{max} - k_{th})^2 \quad 1\text{-}15$$

g-Modèle de Wang :

Wang et al [ ] ont proposé une théorie cumul de dommage ou ils considèrent le composant plastic de l'intégral J comme un facteur d'endommagement résultant d'une formulation simple de la propagation des fissures de fatigue ils ont montré que la vitesse de propagation de fissure ne dépend pas seulement Δk mais elle dépend de la valeur moyenne de la résistance à la rupture et de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte effective dans la région II et III. Le modèle ainsi développé est donné par l'équation 1-16

$$\frac{da}{dN} = \alpha \frac{k_{max}^4}{\sigma_m y^2}\left[\frac{1}{1-\xi^2} - \frac{1}{1-(R\xi)^2}\right]\left[\frac{1}{(1-\xi)^{1/2}} - \frac{1}{(1-(R\xi)^2)^{1/2}}\right]^2 \quad 1\text{-}16$$

Ou $\xi^2 = \frac{k_{max}^2}{2k_{eff}}$

$$k_{max} = \sigma_y\sqrt{\sigma_a}$$

α=constante dépendent du matériau

σ_y=résistance local à la rupture

σ_{my}=résistance local moyenne à la rupture

h-Modèle de Dowling et Begley :

Les modèles décrit précédemment de la propagation des fissures de fatigues ont le facteur de fatigue ont le facteur d'intensité de contrainte Δk comme paramètre commun de caractérisation de la rupture reste toujours valable.

Dans certaines situation discutées de la propagation de la fissure de fatigue ou le paramètre Δk n'est pas plus valide, Dowling et Begley [ ] ont suggéré d'employer l'intégral de contour ΔJcomme paramètre de rupture. Ils ont adapté les vitesses de propagation de la fissure de fatigues selon une loi puissance en employant ΔJ dont l'expression donnée par l'équation 1-17.

$$\frac{da}{dN} = c_{BD}\Delta J^{mDB} \qquad 1\text{-}17$$

Cette loi est semblable à celle de paris [ ] dont elle décrit bien la région II et ne tenant pas de l'effet du rapport de charge R certain modèles ne tiennent pas explicitement des propriétés des matériaux. Ces propriétés ont été prise dans le modèle de propagation développé par Duggan [ ]. La vitesse de propagation dépend du module d'élasticité, la ténacité et la ductilité.

$$\frac{da}{dN} = (\frac{\pi}{32})^{\frac{1}{2\eta}} \frac{1}{\eta} [\frac{2}{\varepsilon_1 E(k_{ic} - k_{max})} (1 - \frac{k}{k_{ic}})]^{\frac{1}{\eta}} k^{\frac{2}{\eta}} \quad 1\text{-}18$$

Adib et Baptista [ ] ont développé une nouvelle relation exponentielle (équation 1-18), appelé modèle αβ, dans le but de fournir une meilleure description de la vitesse de fissuration.

$$\frac{da}{dN} = A e^{\beta/\Delta k} 1\text{-}19$$

Ou $A=e^{\alpha}$.

Un paramètre γ est introduit afin de reliant les paramètres α,β et l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes Δk.

$$\gamma = \ln(\frac{da}{dN}) \Delta k = \alpha \Delta k + \beta \quad 1\text{-}20$$

α,β représente respectivement l'instruction et la pente des courbes γ=f(Δk).

Le modèle développé, a été appliqué sur les résultats expérimentaux de la propagation des fissures de fatigue du Titanium.

Le résultat obtenu, a montré que la trajectoire du modèle αβ suit exactement les résultats expérimentaux comparativement par rapport au modèle de paris [ ] pour les mêmes résultats expérimentaux. Récemment le modèle exponentiel en terme de vitesse de fissuration développer par Adib et Baptista [ ]a été validé sur le comportent en fatigue de l'alliage d'aluminium 2524T3 [ ] donnant de meilleurs performances comparativement aux modèles d'Elber [ ] et Kujawaski[ ].

1.5.3 Modèle basé sur la fermeture de fissure :

a-Modèle d'Elber :

Elber [ ] a suggéré qu'une fissure de fatigue peut se fermer sous une charge de traction appliquée à une distance de la zone de contraintes résiduelles de compression laissées dans le sillage de la pointe de la fissure. La figure 2 illustre le concept de fermeture de fissure induit par plasticité (figure 3). La zone plastique développé au niveau de la pointe de la fissure (figure3).

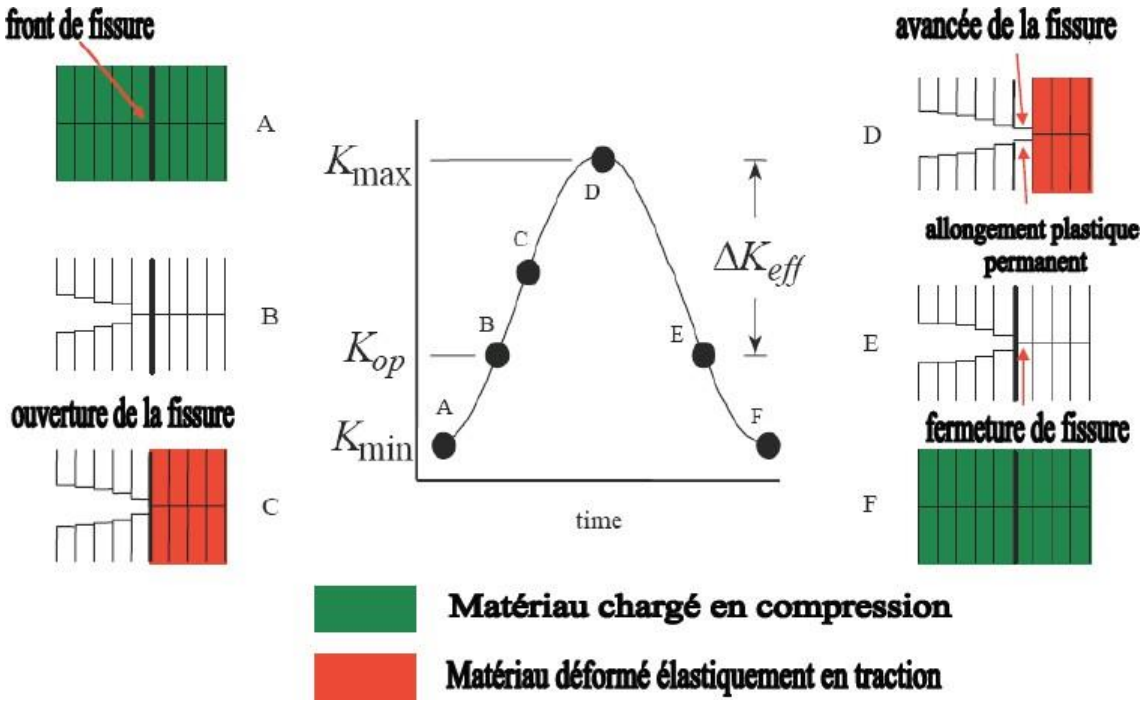


Figure 1.2 : Principe d'ouverture et de fermeture de la fissure

La vitesse de fissuration et exprimé par :

$$\frac{da}{dN} = c\Delta k_{eff}^{m} \quad 1\text{-}21$$

C et m sont des paramètres expérimentaux du modèle d'Elber.

Le facteur d'intensité de contrainte peut être exprimé par la fonction U(R) :

$$\Delta k_{eff} = U(R)\Delta k \quad 1\text{-}22$$

Avec :

$$U(R) = \frac{k_{max} - k_{ouv}}{k_{max} - k_{min}} \quad 1\text{-}23$$

La fonction U(R) a fait l'objet de plusieurs études. Elber [ ] fut le premier à déterminer la fonction U(R) pour l'alliage d'aluminium 2024T351 dans un état de contrainte plane :

$$U(R) = 0.5 + 0.4R \qquad 0.1 \leq R \ll 0.7 \quad 1\text{-}24$$

Benguediab [ ] a montré que dans le cas de l'alliage d'aluminium 2024T351, le rapport de charge k_{op}/k_{max} ne devient constant que lorsque k_{max} dépasse une valeur critique de 15Mpa $(m)^{1/2}$. La fonction U(R) déterminée en déformation plane, et sous la forme suivante :

$$U(R) = 0.35 + 0.081R + 0.6R^2 \qquad R \geq 0.1 \qquad 1\text{-}25$$

D'autre modèles de fermetures de fissures basés sur le modèle d'Elber ont été développé pour différents type d'alliages d'aluminium [ ]. A titre d'exemple ont cité le modèle de Katcher et Kaplan [ ] (équation 1-26) pour l'alliage 2219T851,le modèle de Kumar et Garg [ ] (équation 1-27) pour l'alliage 6061T6 et le modèle Chand et Garg [ ] (équation 1-28).

$$U = 0.68 + 0.91R \qquad 0.08 < R < 0.3 \quad 1\text{-}26$$

$$U = 0.69 + 0.5R + 0.21R^2 \qquad 0.2 < R < 0.31\text{-}27$$

$$U = \frac{k_{max}}{1000}\frac{(8.8R+60)}{8.8} + 1.3R + 0.2 \quad 1\text{-}28$$

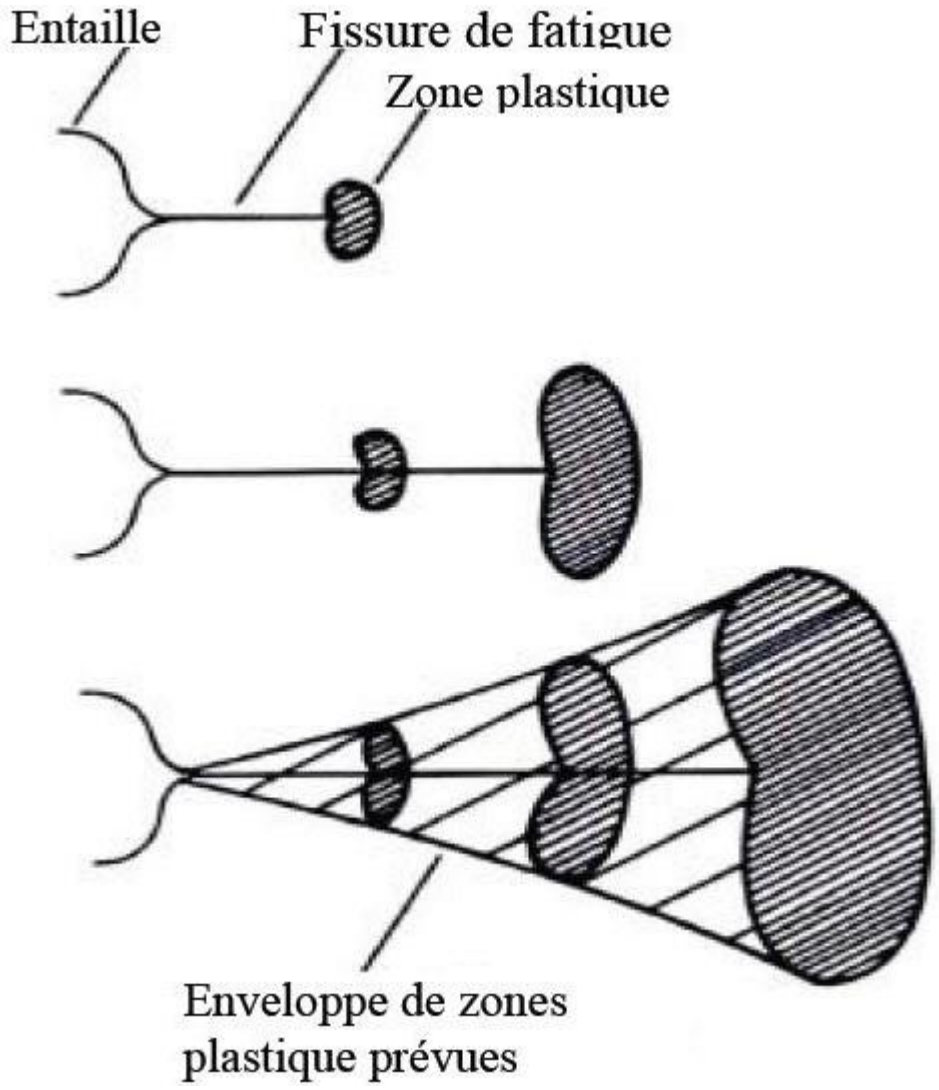


Figure 1.3 : Développement d'enveloppe de zones plastiques autour d'une fissure de fatigue en cour de propagation

D'autre mécanisme peuvent participer à la fermeture de la fissure induit par rugosité (figure 4) et la fermeture induit par oxydation (figure 5).

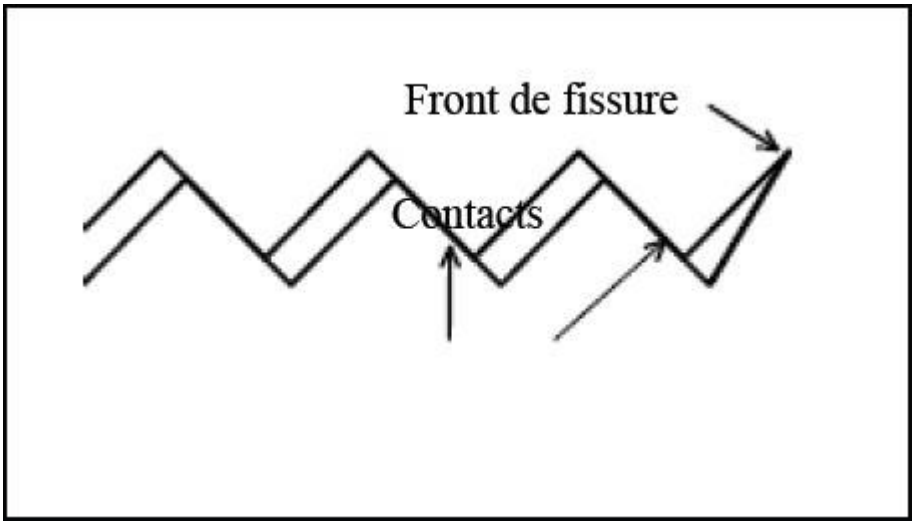


Figure 1.4 : Fermeture induit par rugosité

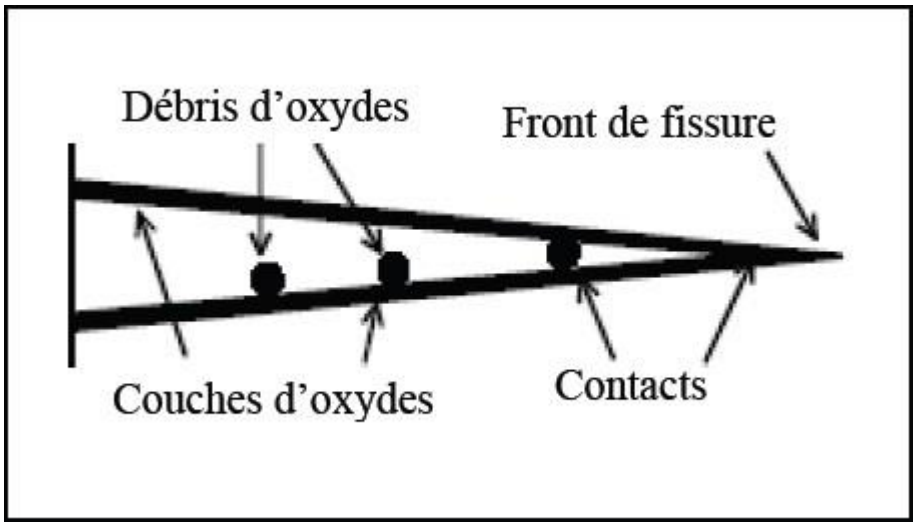


Figure 1.5 : Fermeture induit par oxydation

b-Modèle de Nasgro :

Le modèle de Nasgro utilisée dans la prédiction de la vitesse de fissuration pour les trois domaines est sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = c[(\frac{1-f}{1-R})\Delta k]^n \frac{(1-\frac{\Delta k_{th}}{\Delta k})^p}{(1-\frac{\Delta k_{max}}{\Delta k_{crit}})^q} \quad 1\text{-}29$$

C,m,p,q sont des paramètres empirique

$K_{max}k_{crit}$sont respectivement le facteur d'intensité de contrainte et le facteur d'intensité de contrainte critique.

f représente la contribution de la fermeture de la fissure :

$$f = \frac{k_{op}}{k_{max}} = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3) & R \geq 0 \\ A_0 + A_1 R & -2 \leq R \leq 0 \\ A_0 + 2A_1 & R < -2 \end{cases} \quad 1\text{-}30$$

Les coefficients A_i sont données par :

$$A_i = \begin{cases} A_0 = (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2)[\cos(\frac{\frac{\pi}{2}\sigma_{max}}{\sigma_0})]^{\frac{1}{\alpha}} \\ A_1 = (0.415 - 0.071\alpha)\sigma_{max}/\sigma_0 \\ A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \\ A_3 = 2A_0 + A_1 - 1 \end{cases} \quad 1\text{-}31$$

α : Rapport de contrainte / déformation plane

σ_{max}/σ_0 : Rapport de la contrainte maximal appliquée sur la contrainte d'écoulement.

Δk_{th} : Amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil donnée par :

$$\Delta k_{th} = \Delta k_0 (\frac{a}{a+a_0})^{\frac{1}{2}} / (\frac{1-f}{(1-A_0)(1-R)})^{(1+c_{th}R)} \quad 1\text{-}32$$

Δk_0 : amplitude du facteur d'intensité de contrainte seuil à R=0

a : longueur de la fissure

a_0 : longueur de la fissure initiale

c_{th} : coefficient seuil

Les valeurs de Δk et c_{th}sont donnée par la base de données matérielle

L'effet d'épaisseur est inclut dans le modèle et dépend rapport k_{crit}/k_{ic} donnée par :

$$\frac{k_{crit}}{k_{ic}} = 1 + B_k e^{-(A_k \frac{t}{t_0})^2} \quad 1\text{-}33$$

k_{ic} : ténacité du matériau

A_k,B_k : paramètres d'ajustement

t : Epaisseur

t_0 : Epaisseur de référence (condition de déformation plane)

La condition de déformation plan définie par :

$$t_0 = 2.5(k_{ic}/\sigma_e)^2 \quad 1\text{-}34$$

On remarque que ce modèle d'écrit tous les domaines de propagation et tient compte des caractéristiques du matériau : la ténacité, la limite élastique et des paramètres de chargement : rapport de charge et l'effet de fermeture de fissure. L'évaluation de durée de vie en fatigue par ce modèle demandes des procédures numérique lourdes pour l'évaluation de tous les paramètres et l'intégration numérique. Afin de balayer ces inconvénients, un nouveau modèle très simple a été élaboré par Mohanty et al [ ] nommé modèle exponentiel reliant la longueur de la fissure au nombre de cycles et dépend des paramètres du matériau.

1.6 Paramètres affectant le comportement en fatigue :

a-Effet de Bauchinger :

Il ne s'observe que dans les essais traction\compression [ ]. La traction écrouit le matériau dans le sens traction (augmentation de la limite d'élasticité) mais l'adouci dans le sens de la compression donc on a déplacement du centre du domaine élastique.

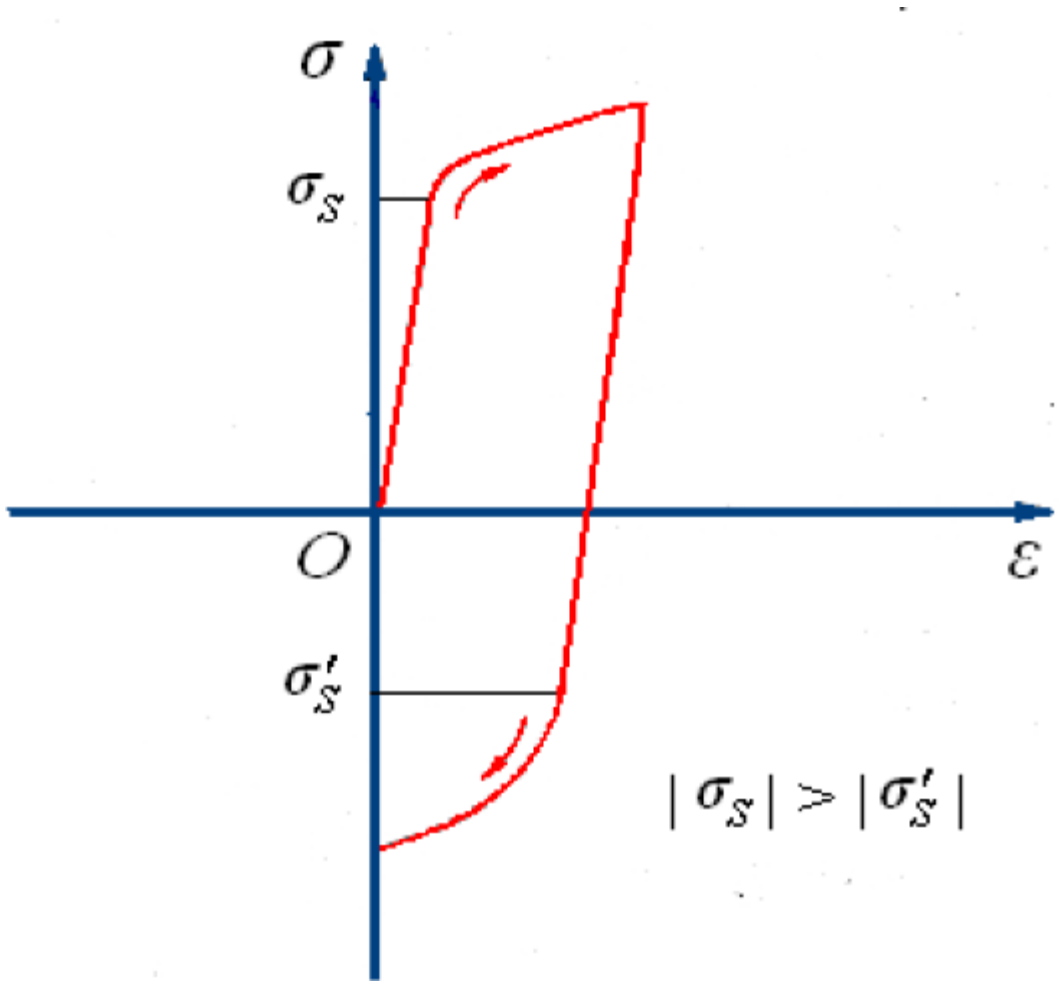


Figure 1.6 : Effet de Bauchinger

b-Effet de Rochet :

En appel l'augmentation progressive de la déformation à chaque cycle, même en régime stabilisé effet de Rochet (adoucissement de matériaux figure7) [ ].

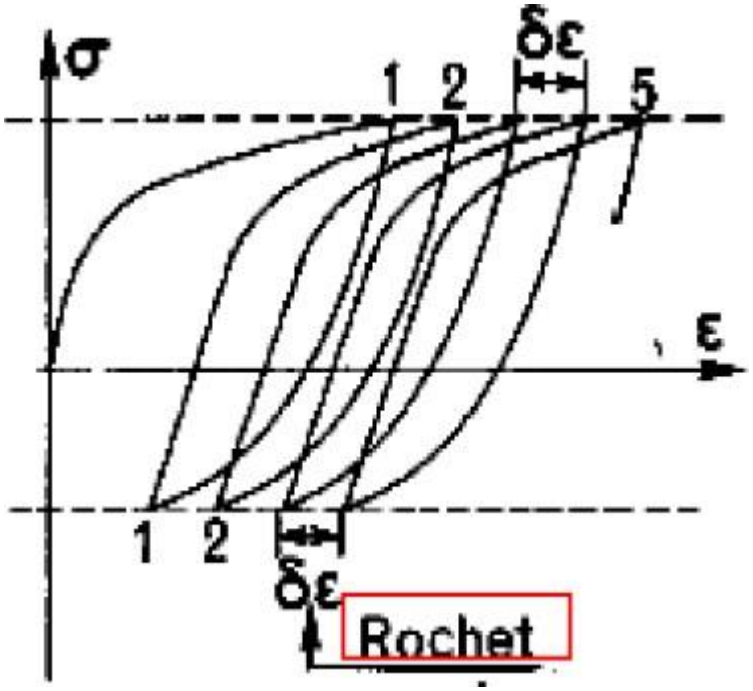


Figure 1.7 : Effet de Rochet

c-Durcissement-adoucissement cyclique :

L'étude du comportement sous sollicitation cyclique induit l'examen de l'évolution de l'amplitude de contrainte au cours des cycliques en fonction de l'amplitude de déformation imposée. Il est souvent possible de distinguer deux stades de consolidation cyclique un stade d'évolution rapide de l'amplitude de contrainte reste constante on quasi-constante [ ]. L'adoucissement se manifeste lorsque l'amplitude de contrainte $\Delta\sigma$ diminue au cours de cycle successif a déformation imposé, on lorsque la déformation $\Delta\sigma$ augmente a contrainte imposé.

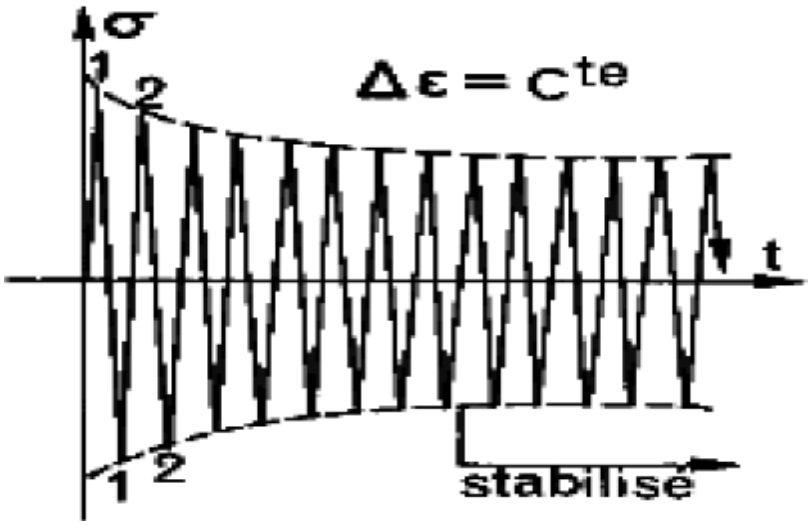


Figure 1.8 : Adoucissement

Le durcissement (figure 9) se manifeste lorsque l'amplitude de contrainte Δσ augmente au cours de cyclique successifs a déformation imposé, ou lorsque la déformation Δε diminue a contrainte imposé.

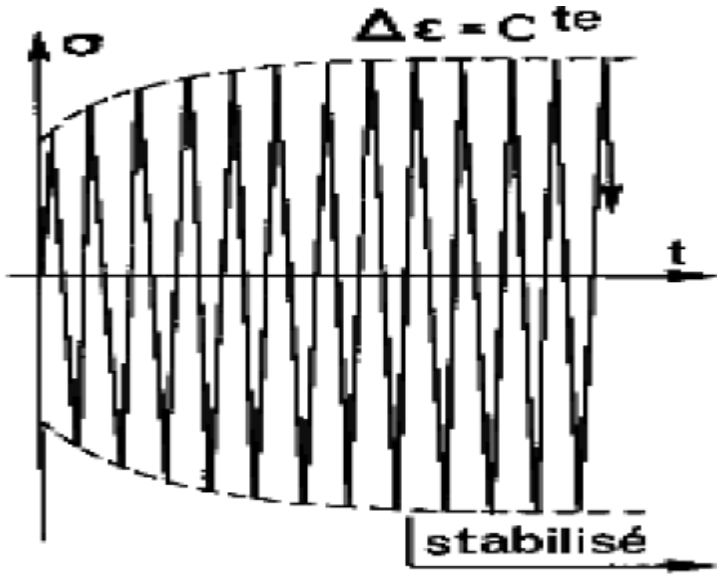


Figure 1.9 : Durcissement

Chapitre 2 :

2.1 Introduction :

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

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

A partir du milieu du vingtième siècle, les avancées dans le domaine des sciences des matériaux et la constante nécessité de disposer de structures plus performantes, plus légères, plus résistantes et plus fiables, ont motivé le développement de nouvelles méthodes d'assemblage structural.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dans ce cadre, on part du postulat suivant:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Les essais sur les structures collées sont donc indispensables.

2.2 Historique sur le collage :

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

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

Dès la plus haute antiquité, la cire d'abeille fut par exemple utilisée pour les sceaux. Cette technique permettait de fermer un pli et de graver, par moulage, une signature attestant l'identité de l'expéditeur.

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

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

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

La notion de colle structurale apparaît dans les années 1940.

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

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

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

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

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

Diverses théories et modèles sont proposés pour comprendre les mécanismes du collage, pour déterminer les principaux paramètres actifs ainsi que leurs importances respectives selon les conditions de réalisation de l'assemblage souhaité.
Les domaines d'application sont d`es lors de plus en plus vastes, ils ne sont plus cantonnés a l'aérospatial et a l'industrie.
Les médecins et dentistes sont en effet intéressés par ces techniques de collages.
Des colles biocompatibles ont été mises au point pour résoudre des problèmes de fixation en chirurgie et en odontologie.
Par exemple, en orthopédie dento-faciale, les verrous sont collés sur la face externes des dents pour modifier la denture en cas de malocclusion et d'esthétisme ingrat.

2.3 Avantages et désavantages du collage structural :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mais cette technique connait aussi des désavantages :

- les surfaces doivent être parfaitement propres,
- les traitements de surfaces mécaniques ou chimiques sont souvent nécessaires pour, respectivement, modifier la rugosité pour augmenter les surfaces de contact et augmenter les énergies libres de surface,
- le manque de moyens fiables de contrôle non-destructif.

2.4 Différent type du collage :

Il existe une multitude de colle, et la technique du collage n'est pas récente, puisque l'on colle depuis l'antiquité.

Depuis les « colles » ancestrales : bitumes, cires etc.

Jusqu'aux colles les plus modernes : de plus en plus impliquées dans les procédés industriels, le monde du collage est en constante évolution.

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

Leur origine : « naturelle » ou « synthétique ».

Leur usage : colle à bois, colles de freinage.

Leur composition : vinylique, acrylique.

Leur méthode de prise.

Nous proposerons une vision plus transversale et simplificatrice :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

a- Colles à séchage par évaporation :

Technologie utilisée

Ces colles sont constituées de polymères dissous dans un solvant (Polychloroprène, Polyuréthane) ou dispersés dans l'eau (colle blanche vinylique).
(Composition à base d'acétate de polyvinyle, de cellulose, de caséine, d'alcool polyvinylique ou de polyvinylpyrrolidone).

Procédé de collage

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

Applications

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

b-Colles thermoplastique :

Technologie utilisée

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

Procédé de collage

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

Applications

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

C-Colles contact :

Technologie utilisée

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

Procédé de collage

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

Applications

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

D-Colles auto-adhésives (PSA) :

Technologie utilisée

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

Procédé de collage

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

Applications

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

E-Colles polyuréthane :

Technologie utilisée

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

Elles existent en structure mono ou bi-composants.

Procédé de collage

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

Applications

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

F-Colles à basse de résine époxy :

Technologie utilisée

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

Procédé de collage

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

Applications

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

G-Colles anaérobiques :

Technologie utilisée

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

Procédé de collage

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

•Contact avec une surface métallique.

• Absence d'oxygène ou d'air.

Applications

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

H-Colles cyanoacrylates :

Technologie utilisée

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

Procédé de collage

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

Applications

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

I- colles à base polymères silylés :

Technologie utilisée

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

Procédé de collage

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

Applications

De par leur structure chimique, ces types de polymères offrent une bonne résistance aux intempéries et au vieillissement ainsi qu'une capacité d'adhésion sur quasiment

tous les supports, sans avoir recours à des primaires. Ces colles se distinguent surtout dans les cas où des joints de construction élastiques sont nécessaires.

J-colles silicone :

Technologie utilisée

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

Procédé de collage

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

Applications

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

2.5.2.1 Définition de l’adhérence

L’adhérence constitue une propriété de l’assemblage collé. Dans le cas d’une rupture inter faciale, elle peut être assimilée à l’énergie nécessaire pour séparer les deux parties d’un assemblage. Elle tient compte du travail à fournir pour rompre les liaisons inter faciales, du travail nécessaire pour déformer les substrats et l’adhésif ainsi que de l’énergie dissipée au cours du travail mécanique. L’une des grandeurs physiques retenue pour traduire l’adhérence est le taux de restitution d’énergie, noté G en hommage au physicien Gibbs. Selon Roche [ ], plusieurs facteurs sont susceptibles d’affecter l’adhérence. Ces facteurs concernent les propriétés physico-chimiques du substrat (nature chimique, rugosité, etc) ainsi que de la couche générée

à sa surface à la suite de traitements (nature chimique, rugosité, épaisseur...), et de l'adhésif polymère (nature chimique de la résine, du durcisseur, viscosité...). Les conditions de mise en œuvre de la résine ainsi que les conditions d'essai et de vieillissement de l'assemblage sont également à prendre en compte.

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

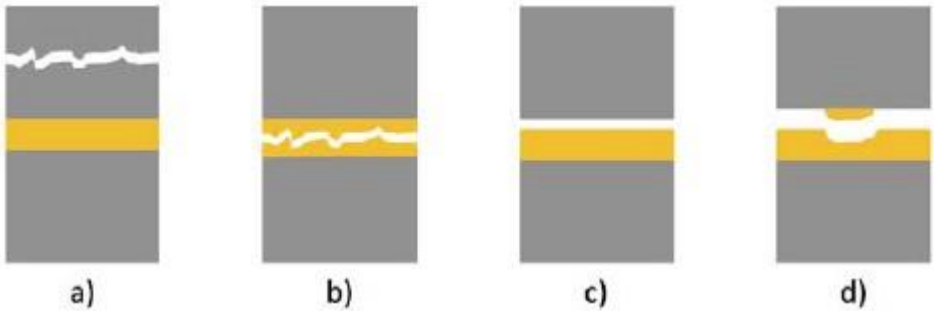


Figure 2.1

Lorsque le substrat est plus fragile que l'adhésif et que l'interface entre les deux est forte alors la rupture a lieu dans le substrat, (Figure 2.35a). La rupture est alors qualifiée de cohésive dans le substrat. D'un point de vue technologie, elle constitue le cas de figure idéal, à condition toutefois, que la sollicitation du test mécanique soit comparable pour le substrat, l'adhésif et l'interface.

A l'inverse, quand l'adhésif constitue la zone de faiblesse, mais que l'interface avec le substrat reste forte, la rupture est cohésive dans l'adhésif. La rupture dans ce dernier est également considérée comme représentative d'un « bon » collage.

L’énergie mesurée dans cette configuration ne dérive pas forcément des propriétés intrinsèques de l’adhésif.

Bien que théoriquement l’énergie de rupture devrait être constante quand la fracture est localisée au sein de l’adhésif, Cognard [ ] a démontré qu’elle peut s’accroître avec le traitement de surface. Il relie cette augmentation à la transmission dans l’adhésif de la force appliquée au substrat, qui est fonction de la densité de points d’ancrage à l’interface et de la quantité de chaînes qu’ils entraînent lorsqu’ils sont contraints.

La Figure 2.35c représente l’unique configuration dans laquelle l’adhérence peut être mesurée. Il s’agit de la rupture inter faciale, ou adhésive. L’interface substrat/adhésif devient la zone vulnérable de l’assemblage. Pourtant, il n’est pas évident que ce type de rupture soit le reflet d’un mauvais collage. En effet, plusieurs facteurs sont susceptibles de déplacer la zone de la fracture sans nécessairement changer la résistance à la rupture.

Ces facteurs comprennent la rugosité, la composition de l’adhésif ainsi que la vitesse de sollicitation. Sener et Delannay[ ], lors d’un essai de pelage sur un assemblage acier/époxyde, ont constaté le passage d’une rupture inter faciale, aux basses vitesses, à une rupture cohésive avec l’accélération de la sollicitation.

Enfin, la rupture peut se manifester simultanément dans l’adhésif (ou le substrat) et à l’interface substrat/adhésif, comme décrit sur la Figure 2.35d. La rupture est dite mixte.

2.5.2.2 Les tests de rupture

De multiples éléments influent sur l’adhérence d’un joint collé. Les caractéristiques physico-chimiques superficielles des adhérés, les propriétés rhéologiques et le protocole de réticulation des adhésifs, ainsi que les conditions de sollicitation de l’assemblage sont autant de paramètres qui peuvent gouverner l’énergie de rupture des assemblages et sont propres à chaque essai mécanique. Cette variété de facteurs amène donc à un large panel de tests mécaniques destructifs. Allen [ ] n’a recensé

pas moins de 300 essais d'adhérence différents. Les plus couramment utilisés sont en général normalisés et font l'objet de nombreux travaux [ ].

Malgré cette diversité, ces essais mécaniques peuvent être classés suivant trois grandes classes selon le mode de sollicitation qu'ils privilégient. Ces différents modes de sollicitation sont exposés dans la Figure 2.36.

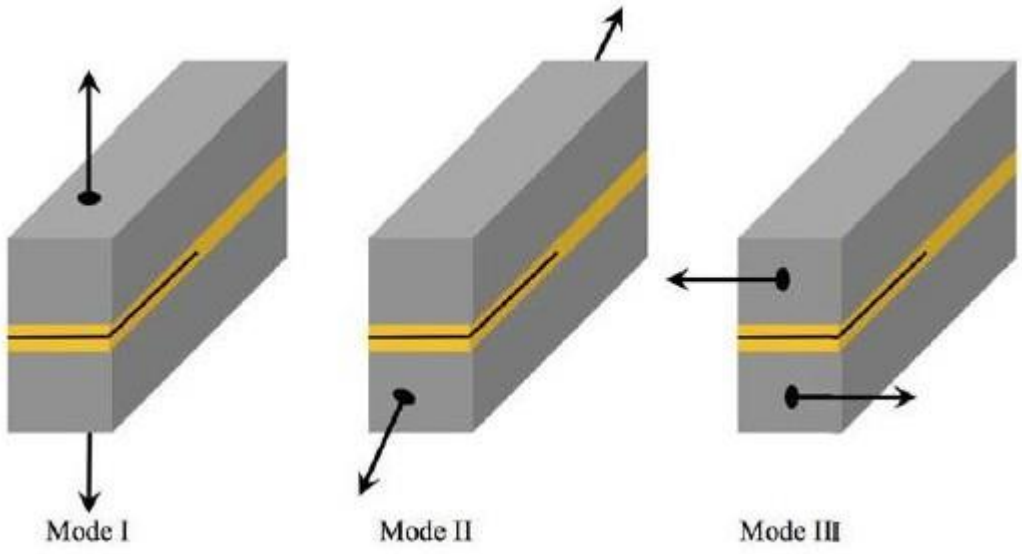


Figure 2.2

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

Le choix du mode de sollicitation est fonction des matériaux, du type d'information recherché et surtout de la représentativité du comportement vis-à-vis d'une configuration en service [ ]. Par exemple, certains tests seront réservés à la caractérisation substrat/adhésif spécifique, alors que d'autres se focaliseront plutôt

sur les conditions d'utilisation. Parmi les 300 essais d'adhérence inventoriés par Allen, la Figure 2.37 regroupe ceux qui sont le plus fréquemment employés.

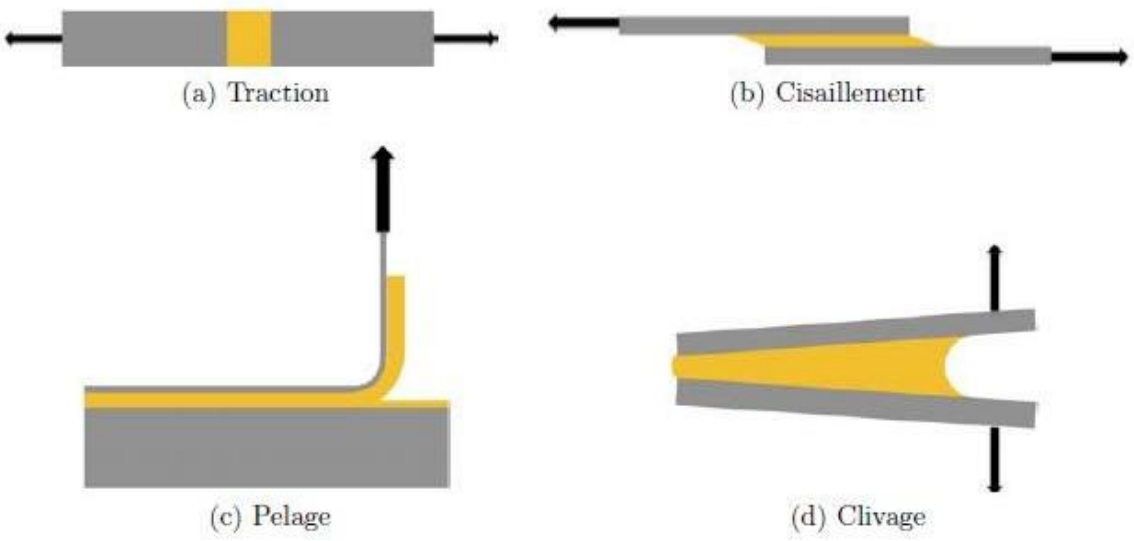


Figure 2.3

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

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

L'essai de pelage (Figure 2.37c) doit posséder au moins un substrat de flexible. Il consiste à arracher une fine couche d'adhésif. La force de pelage pourrait être assimilée à la mesure directe de l'énergie de rupture. A nuancer cependant, puisqu'elle varie avec l'angle de pelage. Il convient alors de considérer la déformation de la partie pelée [ ]. La sollicitation prépondérante est également le

mode d'ouverture I. Cet essai constitue une méthode de choix quant à l'évaluation de l'adhérence de matériaux tels que les rubans adhésifs.

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

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

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

Mécanisme d'adhésion directe :

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

1- La théorie mécanique :

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

du substrat afin de pouvoir pénétrer les anfractuosités de sa surface. Mais l'adhésion sur des surfaces parfaitement lisses suppose d'autres théories.

2- La théorie électrique :

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

3- La théorie de la diffusion :

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

4- La théorie thermodynamique :

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

5- La théorie des couches de faible cohésion :

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

6- La théorie chimique :

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

La préparation des surfaces :

La préparation des surfaces est une phase essentielle dans l'assemblage par collage. Elle a pour premier objectif d'éliminer les contaminants et les couches superficielles de faible cohésion (agents de démoulage des matières plastiques, composés de faible masse moléculaire ayant migré à la surface des polymères, oxydes fragiles, résidus de corrosion…). Des traitements plus poussés peuvent permettre de modifier la chimie de surface afin d'augmenter la tension superficielle ou de favoriser la création de liaisons chimiques avec l'adhésif.

L'adhésif doit être appliqué peu de temps après le nettoyage afin d'éviter la recontamination de la surface. Différentes méthodes de traitement peuvent être utilisées :

Les traitements mécaniques :

Leur principal objectif est de supprimer les couches de faible cohésion et d'augmenter la rugosité de surface. Diverses méthodes sont couramment mises en œuvre : le ponçage avec des toiles abrasives, le sablage, le grenaillage. A l'issue du traitement, un nettoyage des objets est toujours nécessaire pour éliminer les restes de grenaille ou d'abrasif. .

Les traitements chimiques :

Ce sont les traitements les plus utilisés à l'heure actuelle pour la préparation de surface. Par contre, ils sont soumis aux critiques notamment sur le plan environnemental. Des solutions sont cependant développées pour répondre aux nouvelles exigences réglementaires. Les traitements chimiques ont trois fonctions principales : le dégraissage, le décapage et la conversion. Les chaînes de production permettent de cumuler aisément les différents traitements de surface : le passage de cuve à cuve ou l'utilisation de tunnels entraîne moins de manipulation et diminue les risques de contaminations inter-opératoires. Le cumul de fonctionnalités peut se faire avec plusieurs bains en série ou avec un seul bain polyfonctionnel.

Le dégraissage :

Le dégraissage est à la base de tous les traitements de surface. Son objectif est d'éliminer les matières grasses et également les poussières et autres agents formant une couche intermédiaire de faible cohésion. Il existe deux grands types de dégraissage chimique : le dégraissage solvant et le dégraissage alcalin.

-Le principe du dégraissage solvant réside dans la capacité du solvant à solubiliser les corps gras sans altération du corps dissout ou du solvant lui-même. Quatre grandes catégories de solvants peuvent être utilisées : les solvants oxygénés (peu utilisés mais présentent des avantages environnementaux), les solvants hydrocarbonés (très inflammables), les solvants chlorés (efficace, ininflammable mais avec un impact sur l'environnement), et les solvants fluorés (gamme et

propriétés larges). En règle générale, le choix du solvant doit tenir compte des critères suivants : le pouvoir solvant, le point d'ébullition, la concentration seuil pour la sécurité et l'inertie vis à vis des matériaux à nettoyer.

-Le dégraissage alcalin en phase aqueuse est basé sur deux actions principales : la saponification des matières grasses saponifiables et la mise en émulsion des corps gras et particules solides restantes. Les pièces à dégraisser sont immergées dans un bain contenant la « lessive » adéquate, constituée de 60 à 90 % de matière minérale et de 10 à 40 % de matière organique. Dans la plupart des cas, le dégraissage alcalin est constitué de plusieurs bains : deux dégraissages alcalins et au moins deux rinçages. Les temps de trempage sont assez longs (5 à 30 minutes). Le rinçage qui suit un dégraissage alcalin est une opération primordiale car il permet d'éliminer les tensioactifs qui nuisent à l'adhésion.

Le décapage : L'objectif du décapage est d'éliminer les composés indésirables intimement liés à la surface : oxydes, peintures, vernis, revêtements métalliques… Les décapages mécaniques sont souvent préférés à la solution chimique pour des pièces à géométrie simple car ils sont plus rapides et plus sélectifs. Par contre pour des pièces à géométrie complexe la solution chimique reste la référence. Les polluants les plus communs sur les métaux sont les oxydes et les hydroxydes. Le principe du décapage chimique réside dans la dissolution et l'éclatement de ces oxydes.

Les produits de base sont constitués principalement d'acides ou de bases enrichis de composés destinés à optimiser leur action. Le décapage peut se faire par aspersion ou par immersion (procédé le plus couramment utilisé). Le rinçage est une étape très importante car il garantit l'absence de composés de faible cohésion qui sont à l'origine de décollements ou de piqûres. Il est réalisé en cascade pour augmenter son efficacité et réduire la consommation d'eau. Le décapage chimique est peu utilisé

pour les matières plastiques. Pour ces dernières, on a principalement recourt aux voies physiques (sablage, ponçage,…).

Les conversions :

L'opération de conversion est l'étape ultime de la préparation de surface avant collage. Toutes les surfaces ne nécessitent pas cette opération et parfois un simple dégraissage peut suffire. La conversion consiste à créer une nouvelle surface sur un substrat soit en modifiant localement la surface existante, soit en déposant une couche se superposant à la surface d'origine. Les conversions chimiques concernent principalement les métaux. Les plus utilisées sont : la phosphatation, la chromatisassions, l'oxydation anodique, la métallisation et le dépôt de primaires. Le traitement de conversion a pour fonction première de protéger le métal de la corrosion et d'augmenter la durabilité de l'interface et de l'adhésion. Il peut également favoriser l'accroche de l'adhésif en augmentant la rugosité et la réactivité de la surface.

Les traitements énergétiques :

La fluoration :

La fluoration est utilisée sur les matières plastiques afin d'augmenter leur énergie superficielle et les rendre aptes au collage. Le procédé de fluoration consiste à exposer un matériau polymère, pendant un temps assez court (~ 3 min), à un gaz de fluor dilué dans un gaz inerte, dans un réacteur sous vide à température ambiante. Cette opération permet de remplacer des atomes d'hydrogène par des atomes de fluor sans attaquer la chaîne polymérique. La fluoration de la structure conduit à une polarisation très forte des molécules du polymère et donc à une amélioration de la mouillabilité. Ce procédé n'est pas encore applicable aux matières métalliques et céramiques.

Les traitements par plasma froid :

Un plasma est un gaz électriquement neutre dont les espèces sont excitées et/ou ionisées, ce qui lui confère une réactivité élevée. Dans un plasma froid, contenant des espèces ionisées, seuls les électrons sont portés à haute température, les autres particules (ions, radicaux, molécules) restant à température ambiante. Ce procédé est particulièrement adapté au traitement de matériaux thermosensibles tels que les polymères. Les principales actions du plasma froid sont : la désorption des produits en surface, le nettoyage de la surface, l'érosion du matériau, le greffage de fonctions chimiques et le dépôt d'un matériau en couches minces.

Un exemple de plasma froid couramment utilisé dans l'industrie est le traitement corona. Le plasma est obtenu par l'application d'une décharge contrôlée dans l'air à pression atmosphérique. Ce procédé permet de traiter le matériau directement sur la ligne de production. Cette technologie est utilisée depuis plus d'une trentaine d'années pour augmenter la mouillabilité et l'adhésion des polymères. Néanmoins, elle ne permet de traiter que des pièces en deux dimensions. Le traitement en enceinte fermée et avec une atmosphère contrôlée permet de traiter des pièces de forme plus complexe et d'apporter un plus grand nombre de fonctionnalités à la surface.

Le flammage :

Ce traitement consiste à exposer la surface d'un matériau polymère à une flamme oxydante générée par la combustion d'un hydrocarbure. L'oxydation thermique qui en résulte permet l'introduction de fonctions polaires dans les molécules de la surface du matériau. Cela a pour effet d'une part d'augmenter l'énergie de surface et donc la mouillabilité et d'autre part de créer des fonctions chimiques en surface pouvant interagir avec les fonctions présentes dans l'adhésif. Ce traitement permet également de brûler les contaminations organiques résiduelles telles que les huiles et les graisses pour lesquelles le dégraissage serait resté inefficace. Le flammage est un procédé simple à mettre en œuvre. Il est appliqué industriellement à des matériaux suffisamment épais et avec des géométries relativement simples.

Les traitements laser :

Les traitements laser peuvent être utilisés pour le nettoyage et la préparation de surface en vue d'améliorer l'adhésion. Le décapage laser permet d'éliminer totalement ou de manière sélective une couche superficielle recouvrant différents matériaux sans altérer le substrat. Selon la densité d'énergie et le taux de répétition appliqués sur la surface, l'irradiation laser peut également permettre d'obtenir, aussi bien sur les matériaux métalliques que sur les polymères, une rugosité très fine qui favorisera l'ancrage mécanique de l'adhésif. Dans le cas des polymères, lorsqu'on travaille à des densités d'énergie inférieures au seuil d'ablation du matériau, il y a formation de fonctions polaires sur la surface qui conduisent à une amélioration des propriétés d'adhésion du matériau.

I.1. Reparation de structures endommagées en composite

Le développement des matériaux composites dans les industries de pointe au cours de ces dernières décennies touche désormais des domaines de plus en plus nombreux : aéronautique, spatial, automobile, ferroviaire, construction civile, électronique, sport et loisirs, médical ……...

La grande diversité des types de renforts, de résines et de procèdes de transformation associes montre que les matériaux composites, qu'ils soient structuraux ou fonctionnels, sont en pleine expansion. Leur succès est dû aux nombreux avantages qu'ils offrent par rapport aux matériaux traditionnels : légèreté, bonne tenue à la fatigue, bonne résistance a la corrosion, possibilité d'obtenir des formes complexes et d'intégrer des fonctions. Ces matériaux comportent cependant des particularités qui limitent leurs utilisations. Dans l'aéronautique, par exemple, la sensibilité des composites au perçage de trous, aux chocs, au vieillissement, la mauvaise tenue à la foudre sont quelques inconvénients qui expliquent une certaine réticence vis-à-vis de ces matériaux. Pour faciliter leur utilisation, il est donc nécessaire de mieux cerner leur comportement, d'améliorer les méthodes de calcul associées tout en réduisant le

cout de réalisation des pièces en composites. La cadence de fabrication doit également être améliorée pour pouvoir atteindre le marché de l'automobile.

Les composites dits à ≪ haute performance ≫ utilisent des fibres très résistantes et très rigides comme le bore et le carbone. Ainsi, le type carbone/époxyde est utilisé actuellement pour une grande variété de pièces dans les avions et hélicoptères, les satellites, les automobiles haut de gamme, les trains, les voiliers multicoques etc. Dans le domaine aéronautique, le carbone/époxyde est maintenant employé pour les structures primaires comme par exemple : les caissons de voilure, l'empennage, le fuselage, les ailerons, les volets, les dérivés.

Comme toutes les structures mécaniques, les structures composites peuvent être soumises à des chocs et a des impacts basses vitesses qui sont souvent de nature accidentelle. Les endommagements engendres peuvent alors se propager jusqu'à provoquer la rupture prématurée de la pièce; ce qui peut s'avérer très dangereux. Mais dans de nombreuses applications, le cout élevé des structures stratifiées complexes ne permet pas l'échange systématique des éléments endommages. On peut alors envisager la réparation comme une bonne alternative économique et mécanique.

La réparation des structures composites peut être considérée comme étant un problème d'assemblage. Les méthodes classiques utilisées pour l'assemblage des structures mécaniques sont classées en deux catégories : mécanique (boulonnage, rivetage…) et physico-chimique (soudage, collage…). Ces différentes technologies engendrent des chargements spécifiques dans le matériau composite : compression dans le plan de la stratification (matage pour un boulonnage ou un rivetage), compression hors plan (pré charge d'un boulon), cisaillement hors plan (collage).

I.1.1. Réparations par boulonnage et rivetage

Aujourd'hui, la plupart des assemblages mécaniques aéronautiques constitues de boulons ou de rivets comporte un mastic a l'interface (Figure I.2) pour assurer

l'étanchéité et éviter les problèmes de corrosion [3]. Par ailleurs, les avionneurs cherchent à donner au mastic une fonctionnalité structurale et ainsi réduire le nombre de fixations.

Le dimensionnement de ce type d'assemblage mixte doit s'appuyer sur des modèles de comportement qui permettent d'optimiser les paramètres de conception (dimensions, propriétés de l'adhésif, couple de serrage, ...) optimaux en termes de résistance ou de raideur.

La difficulté réside alors dans la détermination du taux de transfert de charge entre le boulon ou le rivet et le joint de colle.

Cette réparation est très rapide mais elle nécessite le perçage de trous. Cette opération peut introduire des endommagements ou/et de fortes concentrations de contraintes. En outre, une masse supplémentaire est ajoutée à cause du recouvrement et du boulon ou du rivet. Cette méthode est donc utilisée comme une réparation temporaire.

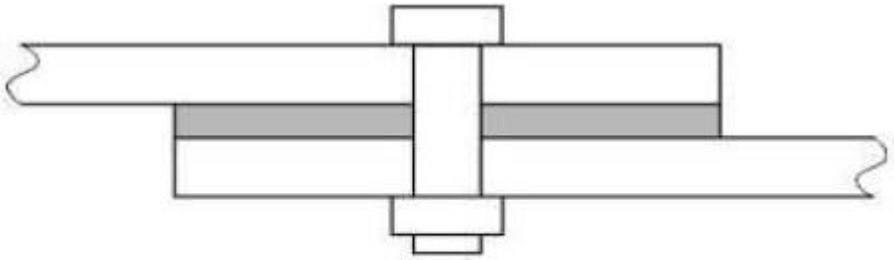


Figure 2.4

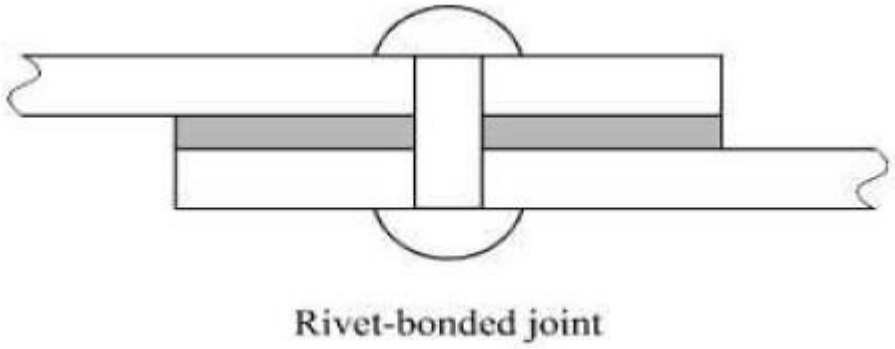


Figure 2.5

I.1.2. Reparations par remplissage de la zone endommagée

La réparation par remplissage de la zone endommagée demande dans un premier temps une préparation de la partie endommagée en réalisant un angle biseaute de 2 a 3° (Figure I.3) ou une surface en escalier sur le pourtour (Figure I.4) afin de garantir une bonne adhésion.

Ensuite, la partie éliminée est remplie par des prés imprégnés déposes couche par couche.

Finalement un cycle de cuisson doit être applique afin de polymériser l'ensemble. Cette méthode, utilisée souvent dans l'industrie, produit de bonnes performances mécaniques et permet de reproduire la forme initiale. En revanche, le processus de réparation est long et difficile. Une bonne technique de réalisation est la clé de la réussite de la réparation.

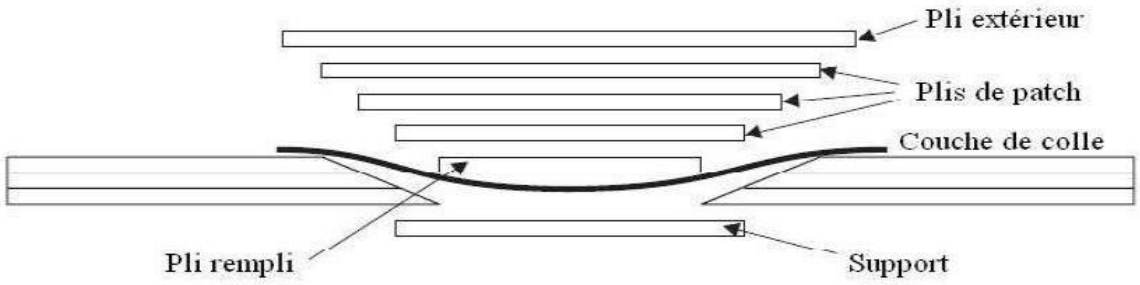


Figure 2.6

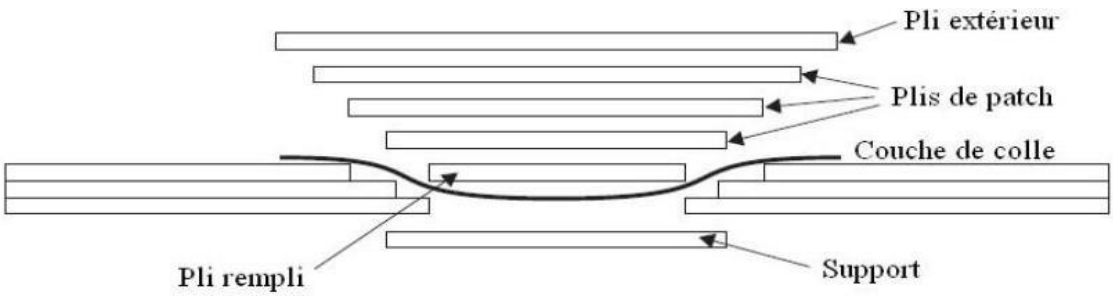


Figure 2.7

Grabovac. I et D. Whittaker [5] ont utilisé cette méthode pour réparer des grands bateaux métalliques (Figure I.5). Ils ont préparé la zone endommagée en escalier et reconstruit la partie éliminée par des composites plis par pli. On peut citer aussi les travaux de Breitzman T.et al. [6] et ceux de Ridha M. et al. [7]. Les premiers ont étudié le comportement mécanique en traction d'un composite réparé par des patchs biseautes (Figure I.6) dans l'objectif d'optimiser les paramètres de réparation. Les deuxièmes se sont intéresses a la modélisation
numérique d'un stratifie [45/0/-45/90]s réparé par un patch en escalier (Figure I.7).

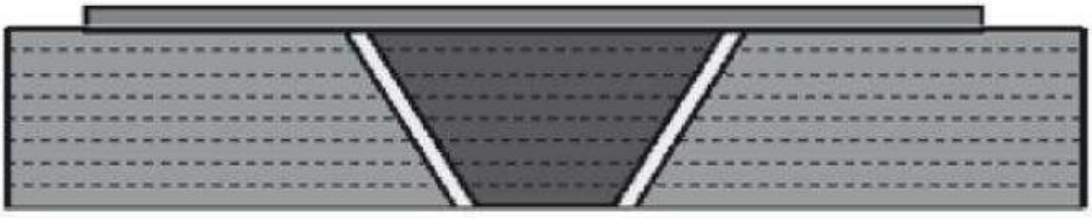


Figure 2.8

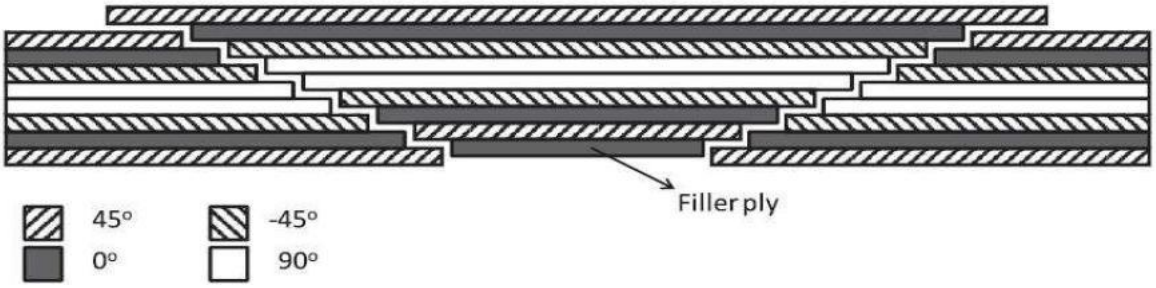


Figure 2.9

I.1.3. Reparations par collage des patches composites externes

La réparation par patchs déjà polymérisé (dits dur) externes consiste à insérer (ou non) un bouchon dans la zone nettoyée, puis à coller le patch externe (Figure I.8) [4]. Cette réparation est relativement rapide et facile à réaliser, puisque le nettoyage de la zone endommagée est très localise. La transmission des charges passe essentiellement par le joint colle entre la pièce à réparer et les patchs externes. Actuellement les industries aéronautiques s'intéressent beaucoup à cette solution. La performance et la fiabilité de ce type de réparation dépendent non seulement des paramètres des patchs, mais aussi du comportement mécanique de l'adhésif utilise. La conception et l'optimisation de ce type de réparation reposent sur une meilleure compréhension du comportement de ce type d'assemblage.

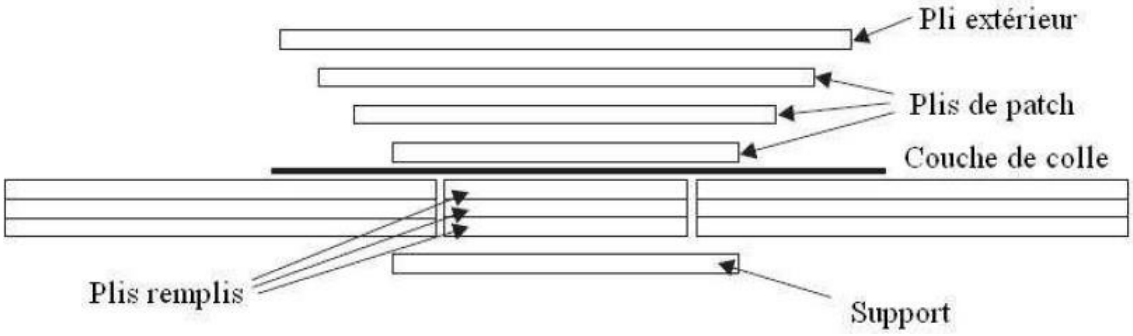


Figure 2.10

Chapitre3

3.10. Définition d'ABAQUS

ABAQUS est un logiciel de calcul en éléments finis développé par DASSAULT. Il est composé de trois produits qui sont : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour analyse par éléments fini, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

3.11. Description des possibilités d'ABAQUS

ABAQUS est un solveur (Standard, Explicit, Implicit, etc.) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier (entrée) ou fichier de données d'extension (.inp) et qui écrit la solution dans un fichier (de sortie) ou fichier de résultats d'extension (.odb) (Tableau 1.1).

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

Tableau 3.1 : fichier abaqus

La réalisation d'une simulation numérique se fait en créant son propre fichier d'entrée grâce à un éditeur texte en connaissant les divers mots clés ou bien en utilisant l'interface graphique d'ABAQUS CAE.

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

Domaines physiques:

- Mécanique
- Thermique

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

ABAQUS offre un très large choix d'éléments (plus de 100) avec la possibilité de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard) (Figure 3-3).

3.12. Les unités

Avant de commencer de définir n'importe quel modèle sous ABAQUS, on doit décider quel système d'unités on emploie. ABAQUS n'a aucun système d'unités intégré. Toutes les données doivent être spécifiées dans un système d'unités conforme.

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

Tableau 3.2 : Les unités

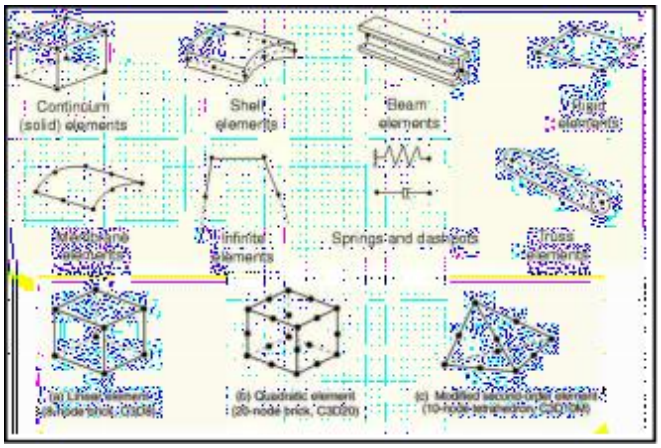


Figure 3-1 : types d'éléments

3.13. Modules

ABAQUS est structuré en plusieurs modules. La réalisation complète d'un projet de simulation sous ABAQUS, s'effectue après un passage successif dans les ces modules. Nous essayons de présenter les principaux modules d'ABAQUS. Considérons une plaque trouée, Soit une plaque d'aluminium 2024 de section rectangulaire S=50x100 mm² et d'épaisseur e=5 mm, avec trois trous identiques de diamètre d=12mm et la distance entre ses centres 30 mm, la plaque encastrée par une extrémité et libre de l'autre. On applique un champ de traction sur sa face supérieure de 70 MPA (Figure 3-4). La plaque est supposée élastique, de module d'Young E = 73 100 MPA et de coefficient de Poisson =0.3.

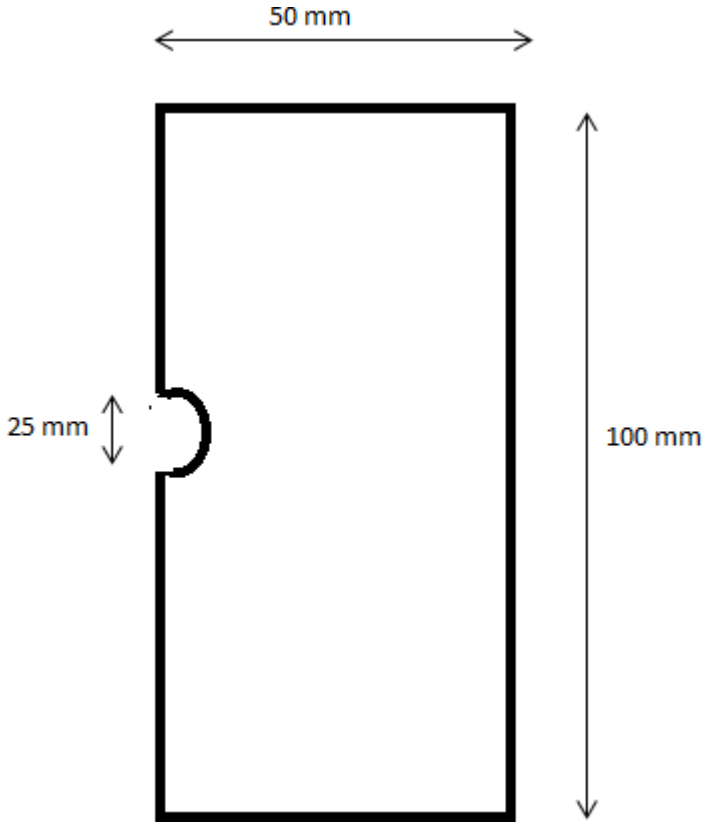


Figure 3-2 : plaque à réaliser

3.13.1. Module PART

Ce module permet de modéliser des pièces par révolution ou par extrusion. Il permet aussi de créer et d'éditer des géométries et des entités (points, traits, et plans de référence). Ces

entités comprennent à la fois les parties déformables et les parties rigides. Pour les créer, il faut utiliser l'icône de création.

- Création de la plaque : Dans l'arbre du modèle on cliquer deux fois sur (Parts) Dans la boite de dialogue Create Part On Nommer la pièce plaque On Sélectionner (3D/Déformable /Solid/Extrusion) on Mettre (Approximate size) : mettre 400 (Figure 3-5) Cliquer Continue ,On Créer un rectangle de 50 x 100 mm² de sommets (25,50) et (-25,-50) puis on créer trois cercles de diamètre 12mm (Figure 3-6) et on cliqué sur Done la fenêtre (Edit Base Extrusion) s'affiche, mettre la valeur 5 dans la case (Depth) (Figure 3-7) et on cliqué sur OK (Figure 3-8)

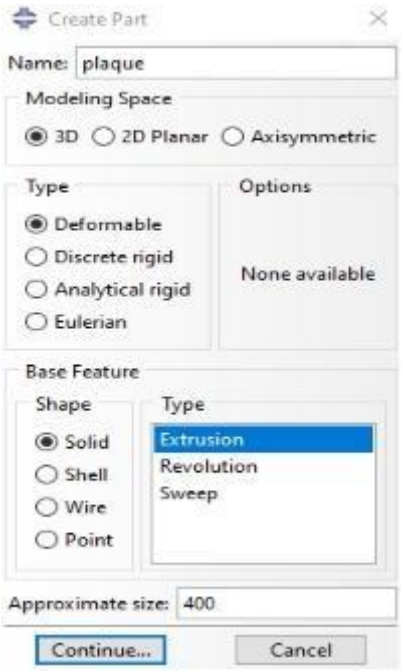


Figure 3-3: Création de la plaque

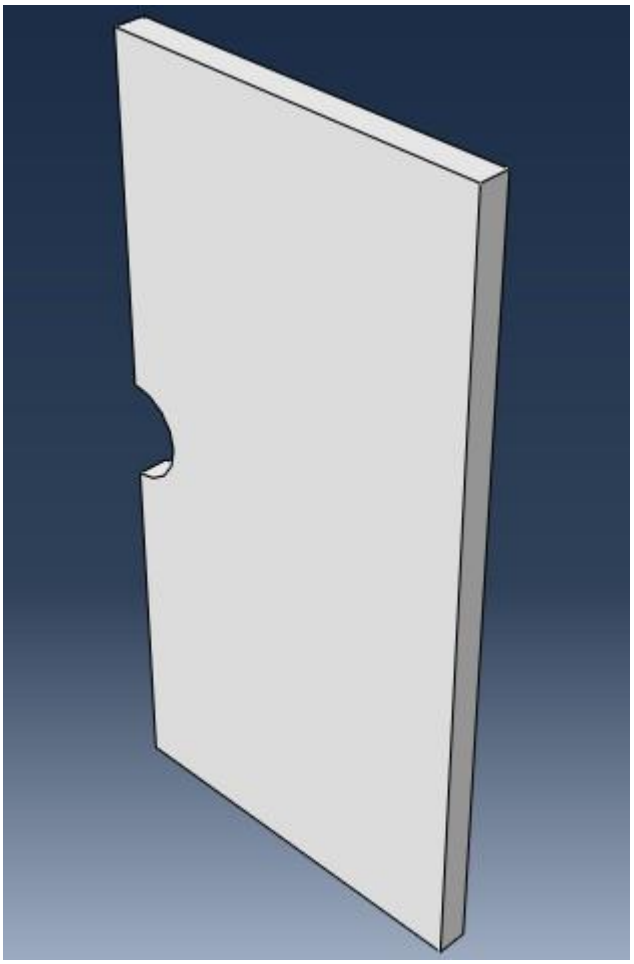


Figure 3-4 : désignation de la plaque

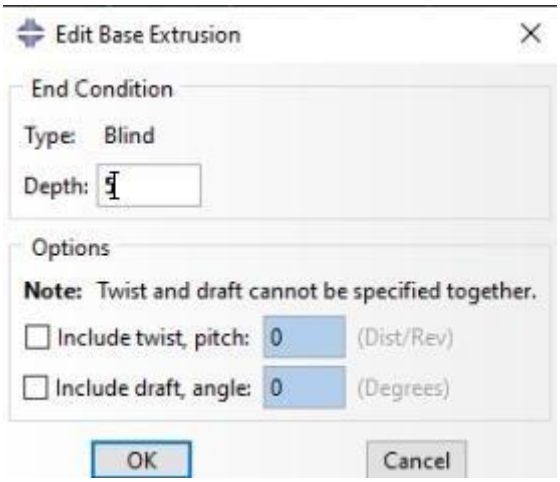


Figure 3-5 : désignation de l'épaisseur

3.13.2. Module PROPERTY

Le module PROPERTY permet de définir les propriétés du ou des matériaux des parties déformables qui constituent le modèle ainsi que et la masse des corps rigides si nécessaire. Dans ce module et selon le cas étudié, on est amené à définir des propriétés élastiques et/ou plastiques (ou autres). Pour ce faire il suffit de cliquer sur l'icône (Création d'un matériau) (Figure 3-9). Il est préférable de donner un nom spécifique à chacun des matériaux ce qui permet la création d'une base de données propre au projet. On définit par la suite : les propriétés élastiques via (Mechanical/ Elasticity/Elastic) (module d'Young et le coefficient de Poisson pour le cas par exemple d'un matériau isotrope) et les propriétés plastiques via (Mechanical/Plasticity/Plastic). Dans ce module on crée aussi la section du matériau et l'assignement à toutes les parties de la pièce ou du mécanisme étudiés (Fig.1.8).

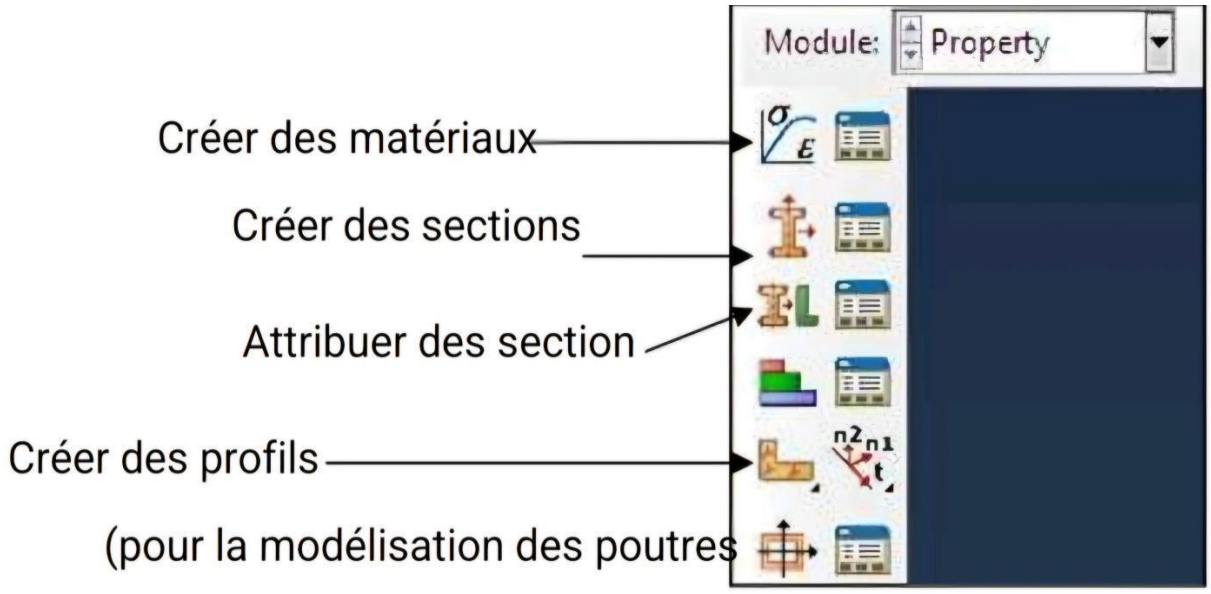
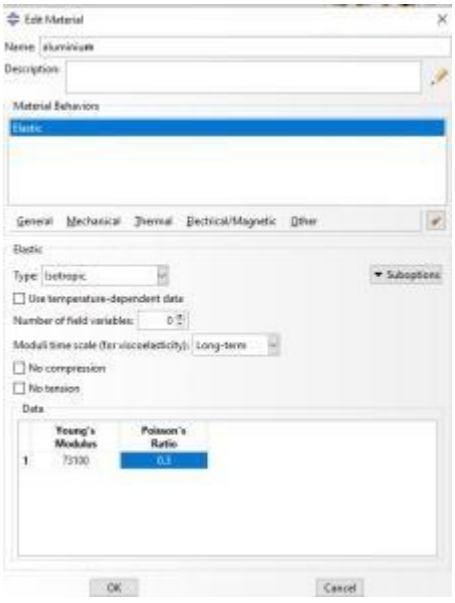


Figure 3-6 : Le module PROPERTY



Pour Notre plaque :

Définition du matériau et ses propriétés Dans l'arbre du modèle double cliquer sur (Materials) on Renomme le matériau aluminium 2024 ,on Donne une description (au choix) On Cliquer sur l'onglet: (Mechanical/Elasticity/Elastic) Introduire le module d'Young : 73100 MPa Introduire le coefficient de Poisson : 0.3 (Figure 3-10) on Clique sur OK

Définition et affectation des propriétés de la section Dans l'arbre modèle on double-cliquer sur Sections Dans la boite de dialogue (Create Section) qui s'affiche

Figure 3-7: Définition les propriétés du matériau.

On Renomme la section (Section_plaque) Dans la liste

(Category), on sélectionne Solid Dans la liste Type, on sélectionne (Homogeneous) (Figure 3-11) On Clique sur Continue Dans la boite de dialogue Edit Section on Accepte la sélection par défaut du matériau aluminium 2024 (Figure 3-12) On Cliquer sur OK

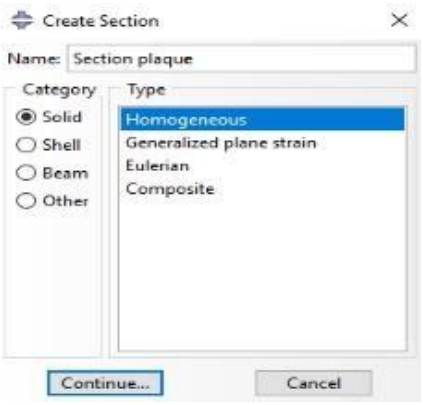
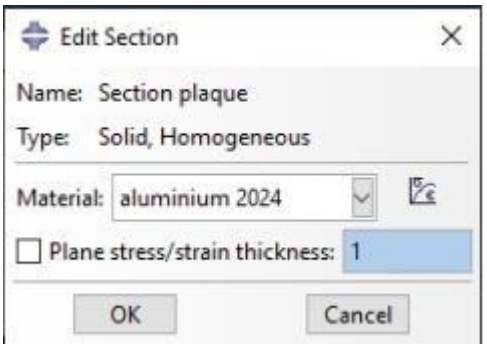


Figure 3-8 : Définition la section de la plaque



. **Figure 3-9** : sélection de la section

• Affectation de la section à la structure Pour affecter la section Section_plaque à la structure, double-cliquer sur (Section Assignements) dans la liste des attributs de la pièce qui apparaît. Dans le (Viewport), on sélectionne la pièce entière. ABAQUS/CAE mets la structure en surbrillance (Figure 3-13), on cliqué sur Done. Dans la boite de dialogue (Edit Section Assignement) on accepte la sélection par défaut de la section (Section_plaque) puis on

cliquer OK (Figure 3-14). ABAQUS/CAE affecte la section à plaque et colore la structure entière en turquoise (Figure 3-15). on Clique sur (Done)**.**

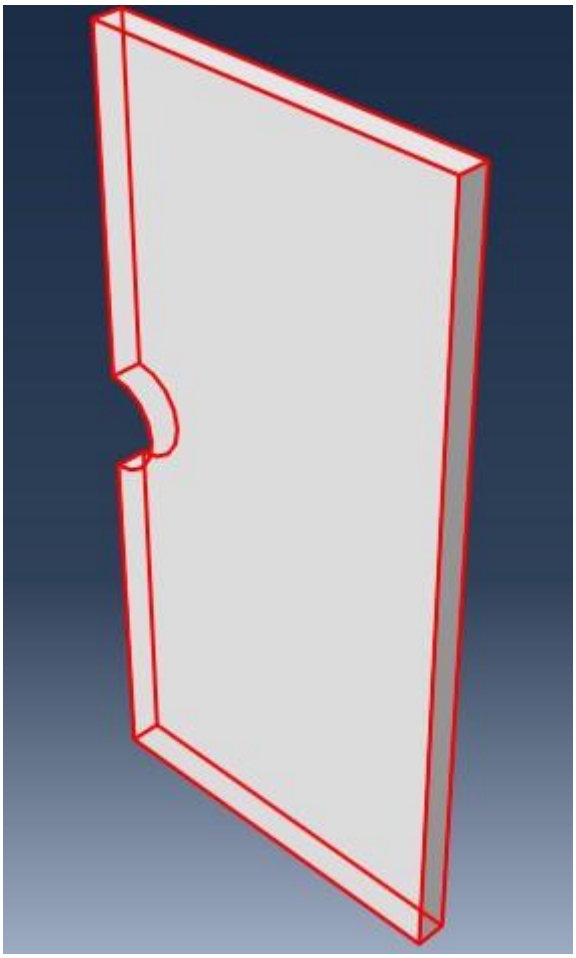


Figure 3-10:

Sélection la pièce entière.

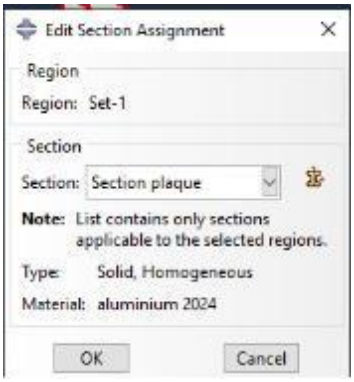


Figure 3-11 :

Choix de section.

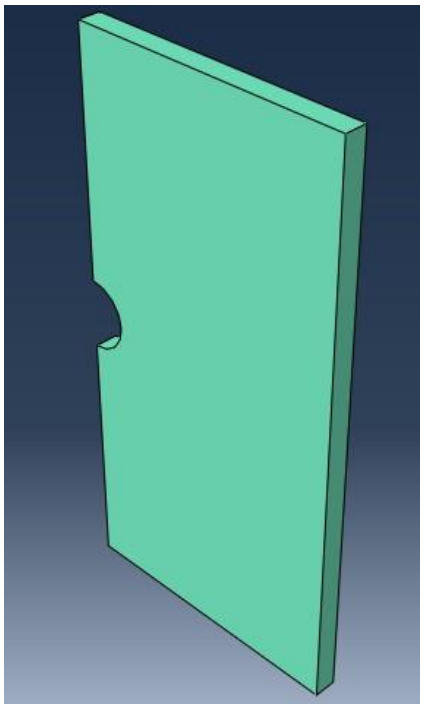


Figure 3-12 :

Affectation la section.

3.13.3. Module ASSEMBLY

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

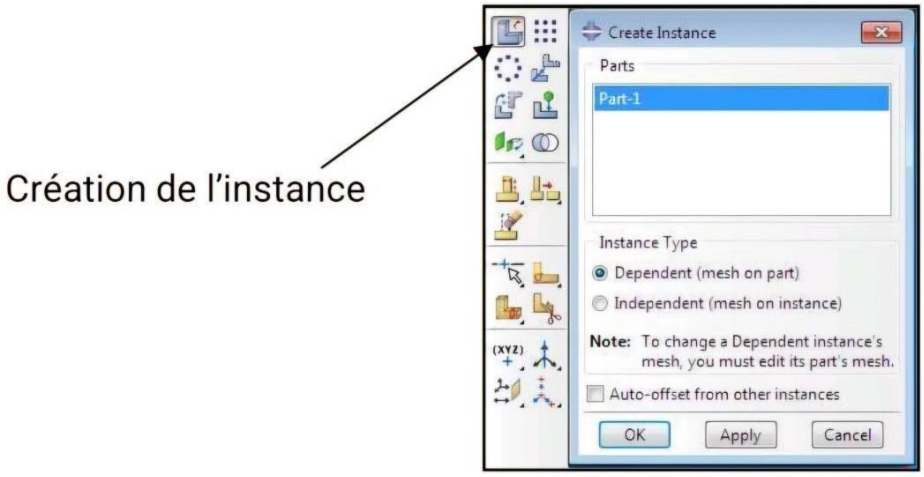
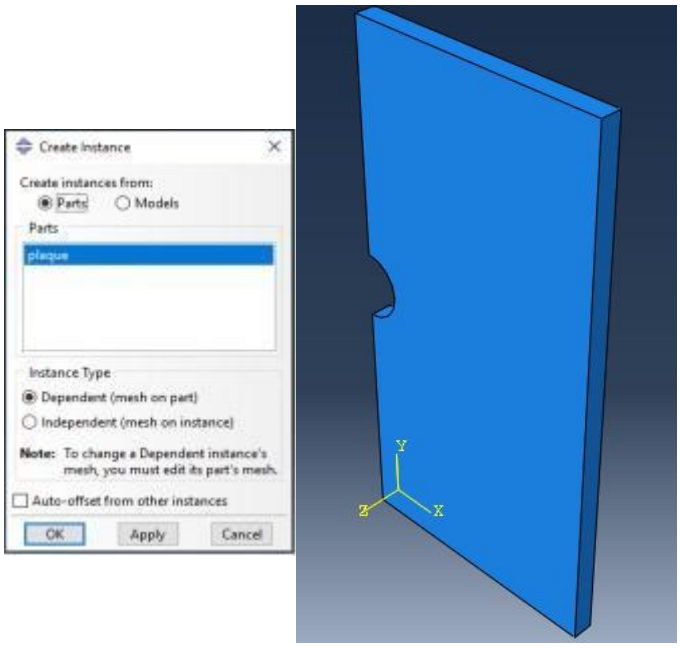


Figure 3-13 : Module ASSEMBLY

Pour notre pièce : Assemblage Dans l'arbre modèle développer la base Assembly Double cliquer sur (Instances) dans la liste qui apparait Dans la boite de dialogue (Create Instance) on sélectionner plaque et on cliquer OK (Figure 3-17).



(b)

Figure 3-14: créer une instance

3.13.4. Module STEP

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

Création d'un step pour notre pièce : Configuration du pas de l'analyse Dans ce cas, nous nous intéressons à la réponse statique de cette plaque sollicitée en traction par une charge répartie appliquée sur sa face supérieure de 70 MPa. Nous avons un chargement unique, alors un seul pas d'analyse est nécessaire pour la simulation. L'analyse se compose de deux pas au total :

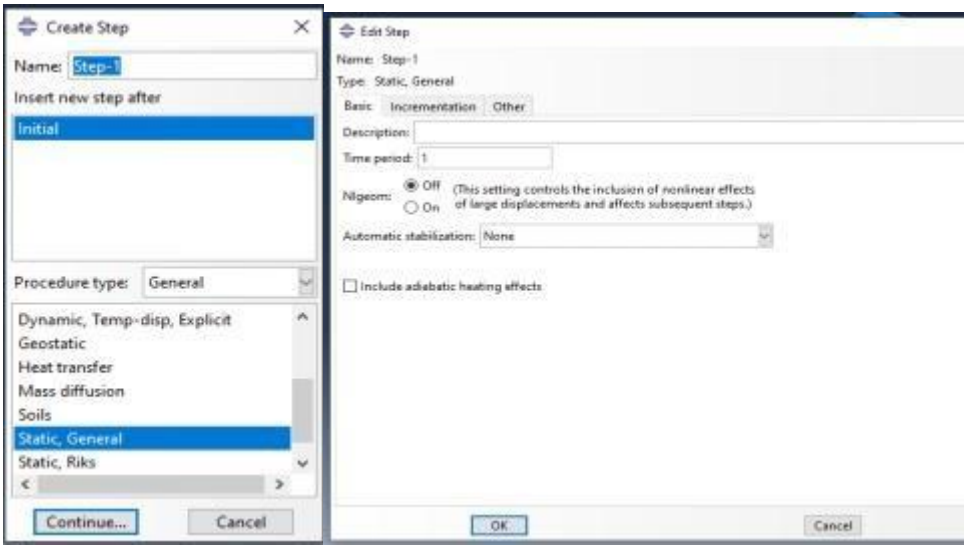
- Un premier pas (généré automatiquement par ABAQUS/CAE), dans lequel on applique les conditions aux limites en déplacements (encastrement).

- Un second pas d'analyse, on applique une pression de 70 Mpa sur la face supérieure.

- Création du pas d'analyse On crée un pas d'analyse statique qui suit le pas initial de l'analyse. Double cliquer sur Steps pour créer un pas. ABAQUS/CAE passe au module Step et la boîte de dialogue Create Step apparaît (Figure 3-18) Une liste de toutes les procédures générales et un nom du pas Step-1 est fourni par défaut On Sélectionne Static General,

comme Procedure type On Clique sur Continue La boîte de dialogue Edit Step apparaît avec les paramètres par défaut pour un pas d'analyse Static General L'onglet Basic est sélectionné par défaut

- On Accepte les valeurs par défaut fournies pour le pas, On Clique sur OK pour créer le pas et pour quitter la boîte de dialogue Edit Step.



(b)

Figure 3-15 : création de step

3.13.5. Module Interaction

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

3.13.6. Module LOAD

Application des conditions aux limites à la plaque dans l'arbre modèle double cliquer sur la base (BCs) . ABAQUS/CAE passe au module LOAD et la boîte de dialogue Create

(Boundry Condition) s'affiche. Dans la liste des pas Steps, on sélectionne (Initial). Dans la liste (Category) on accepte (Mechanical) comme catégorie par défaut. Dans la liste (Types for Selected Step) on sélectionne (Symmetry/Antisymmetry/Encastre) et on clique sur Continue (Figure 3-19). Dans le (Viewport), on sélectionne la face à encastrée et on clique sur Done (Figure 3-20). La boîte de dialogue (Edit Boundry Condition) s'affiche on Coche la case Encastre et on clique sur OK (**a**)et(**b**) (Figure 3-21).

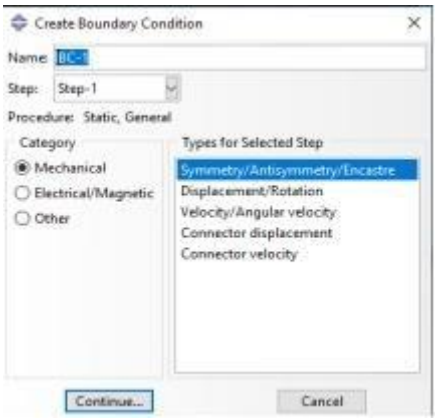


Figure 3-16 : création de l'encastrement.

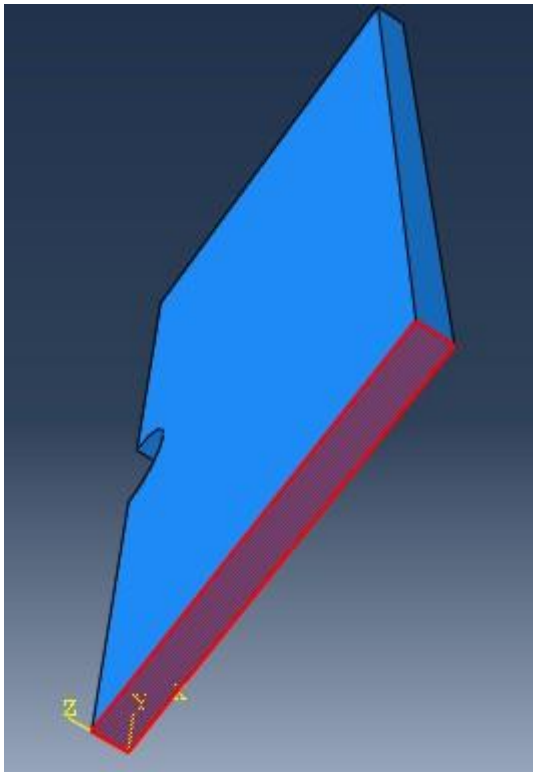


Figure 3-17 : sélection la face à encastrée**.**

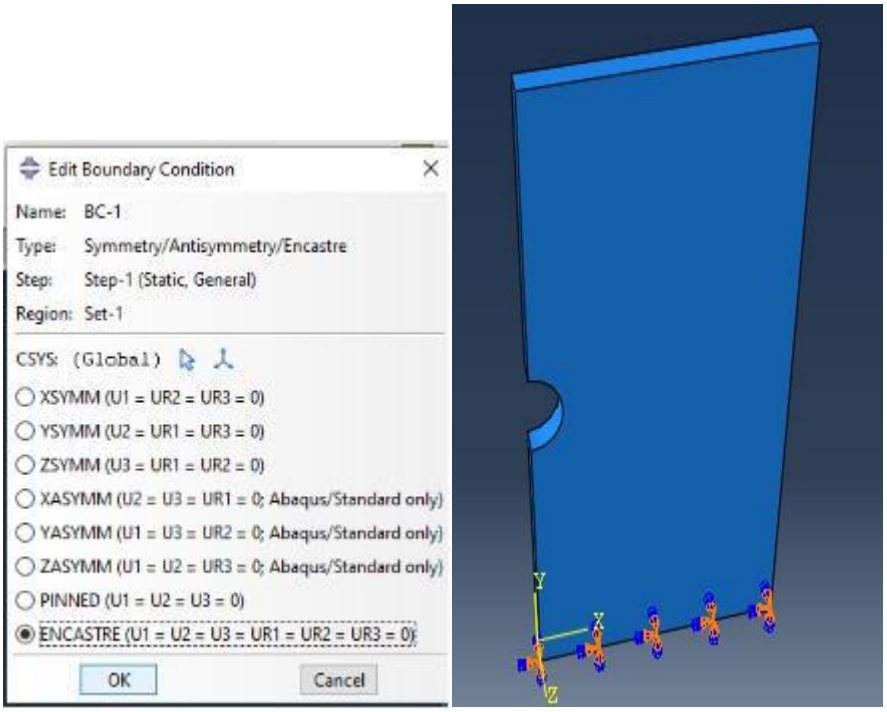


Figure 3-18 : affectation de l'encastrement.

Application du chargement sur la poutre :

On Clique sur (Create Load), La fenêtre (Edit Load) apparait, Dans la liste (Category), On accepter (Mechanica)l comme catégorie. Dans la liste (Types for Selected Step) on sélectionne (Pressure) (Figure 3-22) et on clique sur Continue. Dans le (Viewport), on sélectionne la face supérieure (Figure 3-23) et on clique sur (Done). La boîte de dialogue (Edit Load) s'affiche. On Remplir le champ Magnitude, avec la valeur (-70) et on cliquer sur OK (**a**) et (**b**) (Figure 3-24).

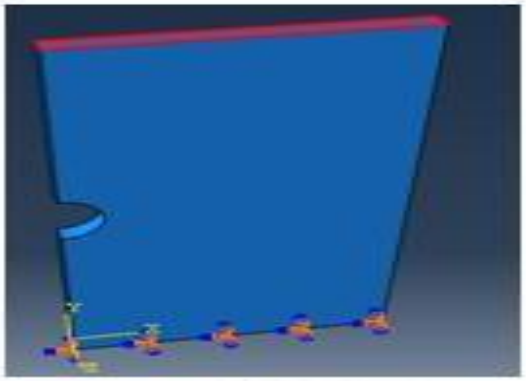




Figure 3-19 : création de l'encastrement.

Figure 3-20 : sélection la face de traction**.**

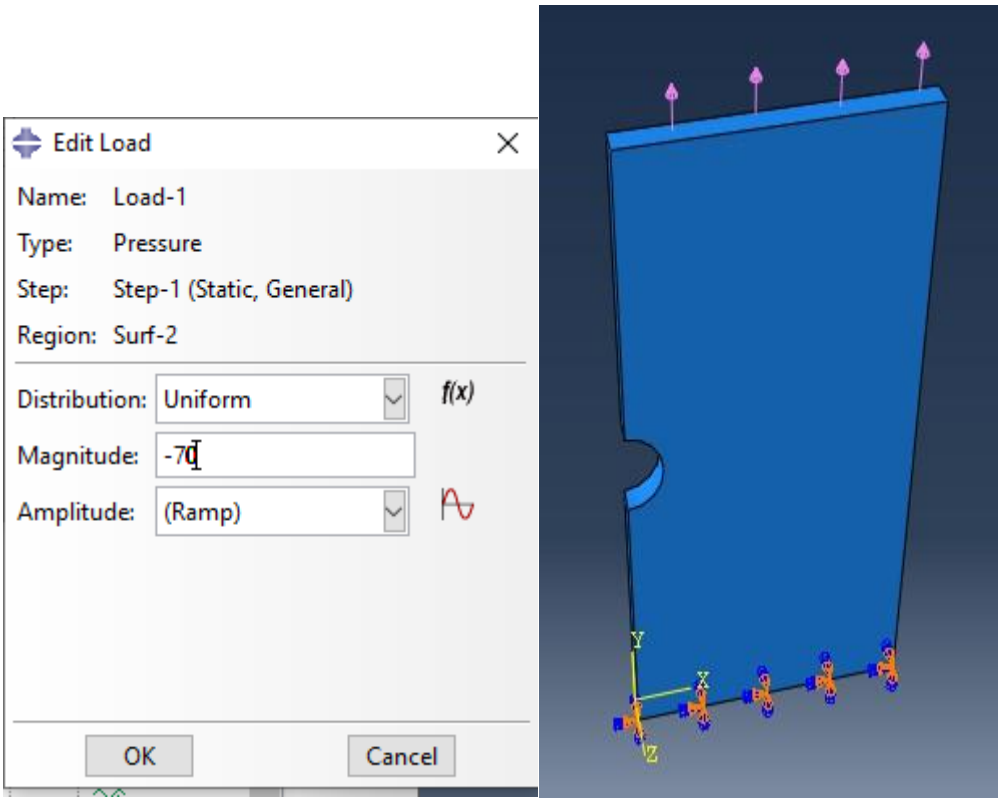


Figure 3-21: affectation de champ Magnitude.

3.13.7. Module MESH

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

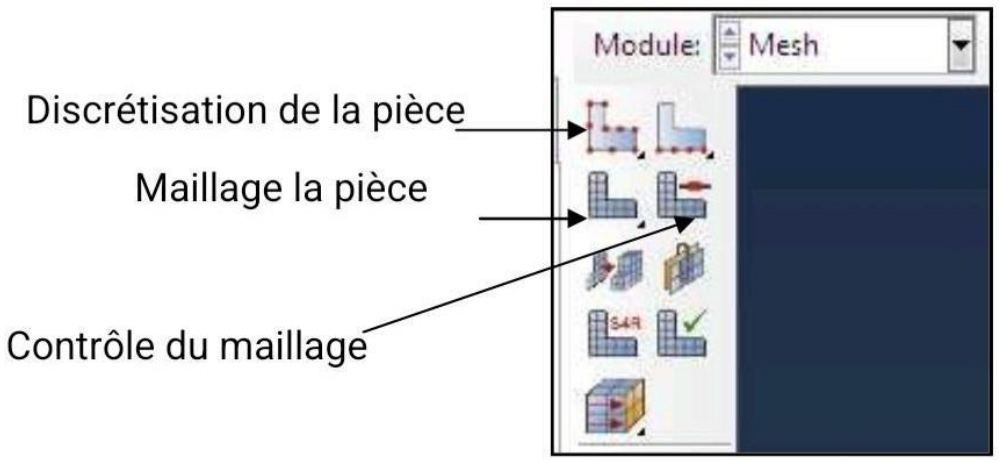


Figure 3-22 : Module MESH

Pour notre pièce : Pour pouvoir créer par la suite un maillage structuré, on réalise une partition de la plaque dans le Module MESH. On Cliquer sur (Tools/Partition). La fenêtre (Create Partition) apparait, on sélectionne (Face/Sketch) et on choisir une surface et une arrête sur le côté droit de la plaque. ABAQUS permet à l'utilisateur de partitionner la plaque en utilisant les options graphiques mises à disposition (**a**), (**b**) et (**c**) (Figure 3-26).

On partitionne la plaque en utilisant l'option (Create Lines rectangle 4 lines) pour créer des carrés égaux avec longueur de chaque côté 20 mm .et utilisant l'option (Create circle centre and perimetre) de rayon 10 mm. On Clique sur Done (**d**) et (**e**) (Figure 3-27) En suit-on choisir (cell) puis (exrude/Sweep edges) dans La fenêtre (Create Partition) on sélectionne les bords

crées par Sketch et on choisir une direction et on Clique sur Done (**f**) et (**g**)(Figure 3-28)

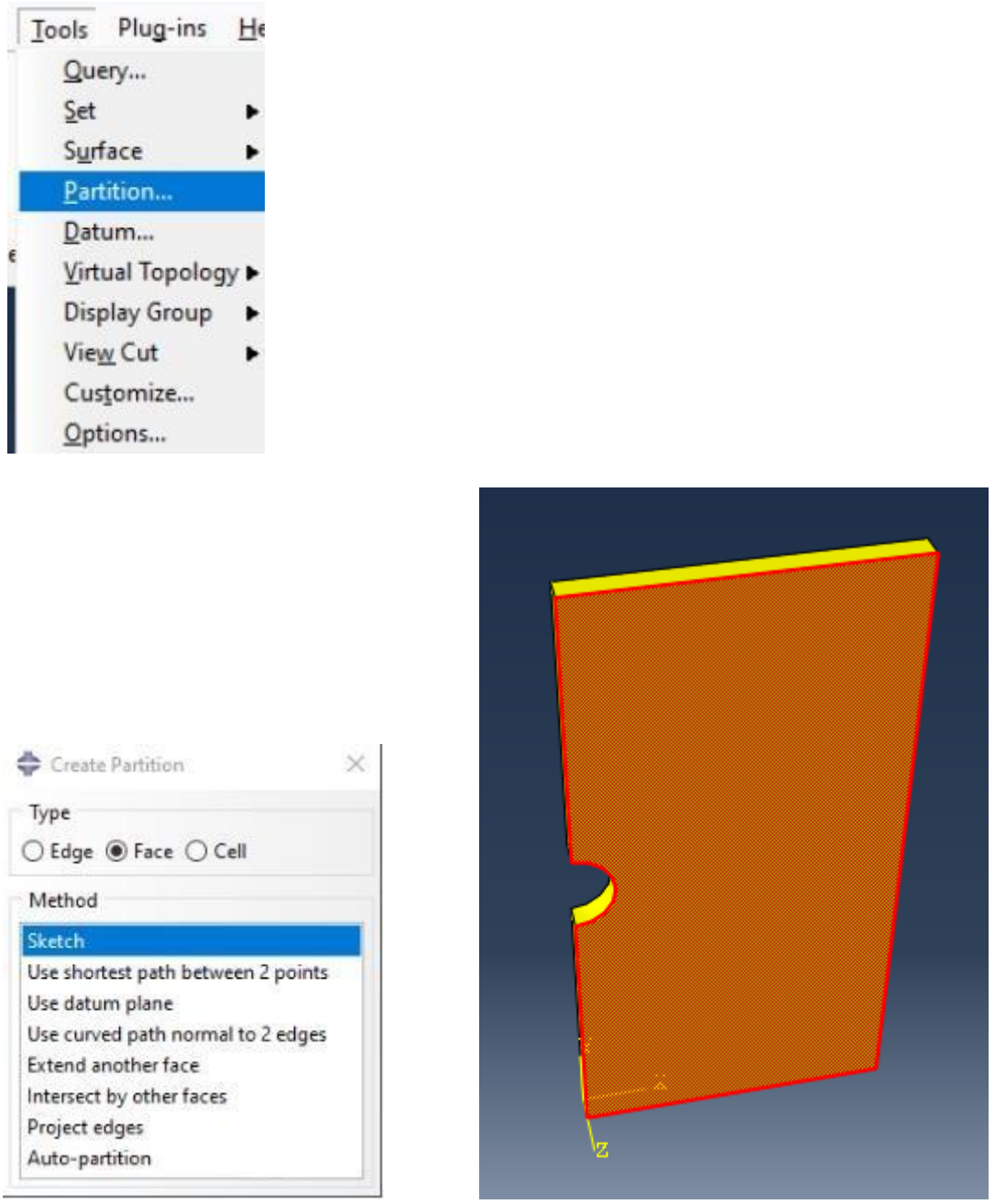


Figure 3-23 : création d'une partition

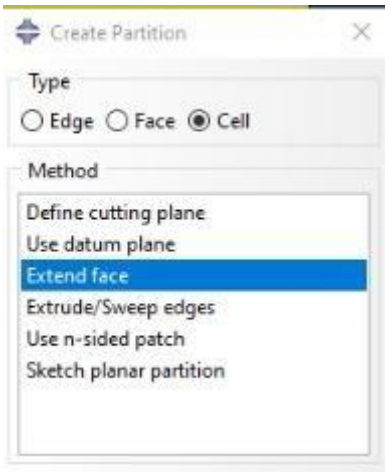


Figure 3-24 : partition de la plaque

Dans le module MESH on Cliquer sur (Seed edges), et on sélectionne les cercles qui nous fixons en (Sketch) on choisir (BY number) et on Mettre la valeur 5 dans (number of element) , même chose pour les cercles des trous mais en mettre la valeur 20 (**i**) et(**j**) (Figure 3-29) en suit on Cliquer sur (Seed/Part), la fenêtre (Global Seeds) apparait, on Mettre la valeur 2 dans (Approximate global size) et on cliquer sur OK (Figure 3-30) A la fin on cliquer sur (Mesh Part) et confirmer le maillage (Figure 3-31).



Figure 3-25 : affectation la taille des éléments

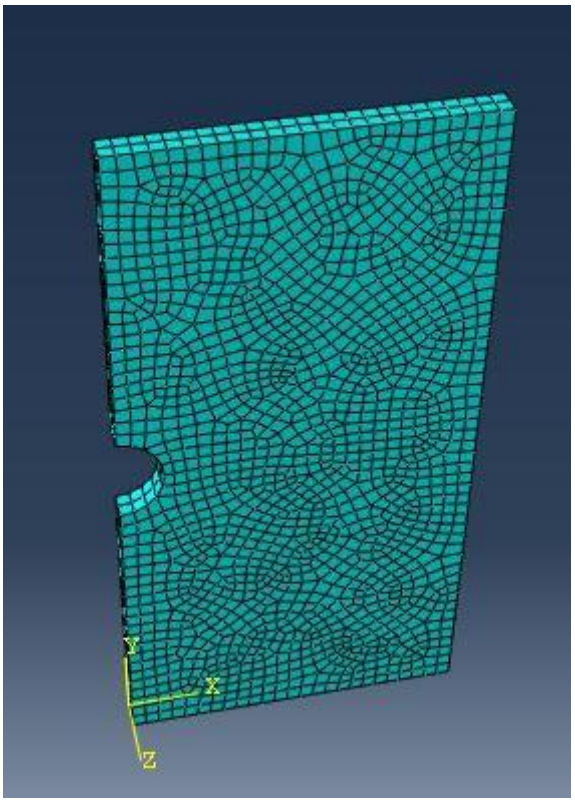


Figure 3-26 : confirmation de maillage.

Attribution du type d'élément :

nous avons choisis de modéliser la plaque avec des éléments de type (Hex/Sweep/Medial axis) pour les zones en jaune et (Wedg/sweep) pour les zones en vert de la famille Solid, quadratiques à 4 nœuds à intégration réduites C3D8R (**k**) et (**l**) (**Figure 3-32**) . Ces éléments sont très efficaces pour la capture des concentrations de contraintes

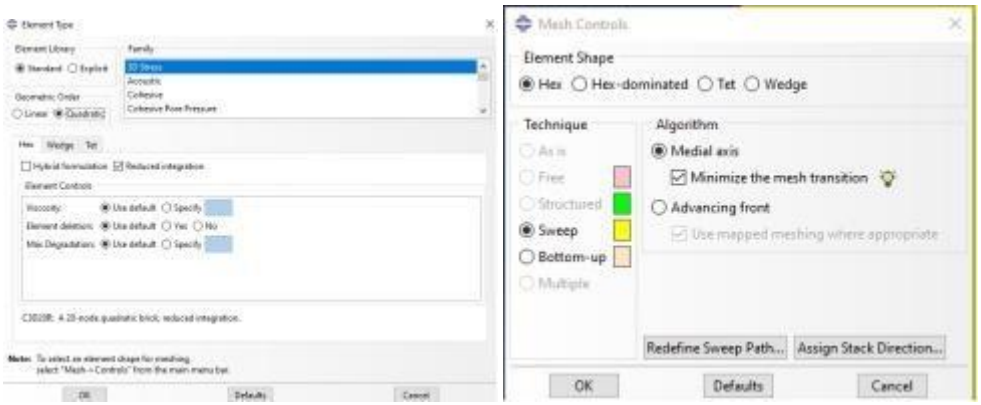


Figure 3-27 : Attribution du type d'élément

3.13.8. Module JOB

Le module JOB permet de lancer le calcul. Les contraintes, les déformations et les déplacements de notre pièce ou système étudié sont ainsi calculés. Création du job : Double cliquez sur Jobs pour ouvrir la boîte de dialogue (Create Job), On Créer un nouveau travail, On Nomme le job plqaue_3D et on clique sur OK, Pour soumettre le travail on Cliquer sur (Submit)(**m**) et (**n**) (Figure 3-33). A la fin de l'analyse en bas du (Viewport), ABAQUS affiche (Completed Successfully) (Figure 3-34)

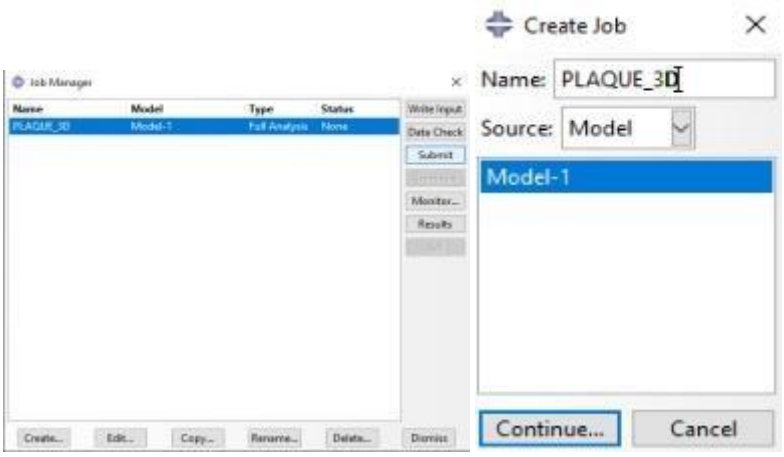


Figure 3-28 : création de job



Figure 3-34 : affichage le message de réussite**.**

3.13.9. Module VISUALIZAION

Le module VIZUALISATION permet de visualiser les résultats des calculs lancés précédemment (Figure 3-35).

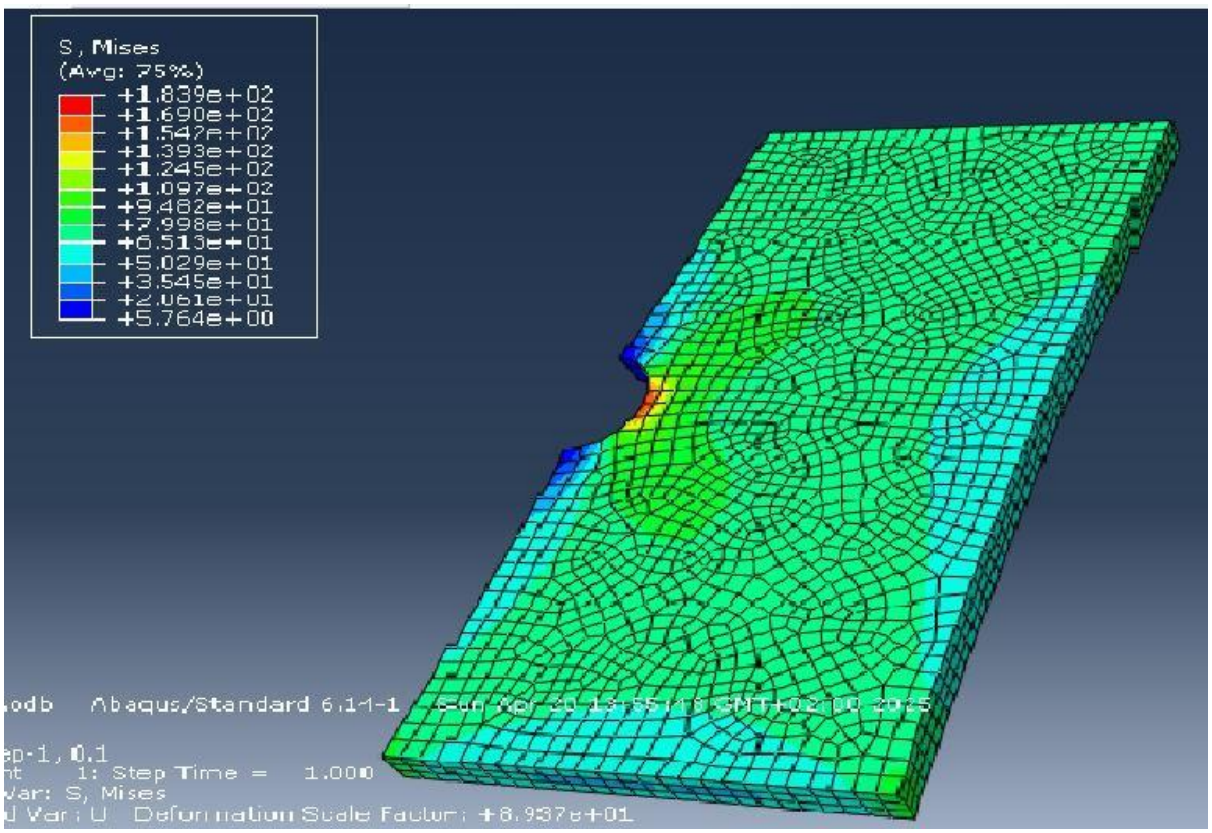


Figure 3-29 : visualisation les résultats .

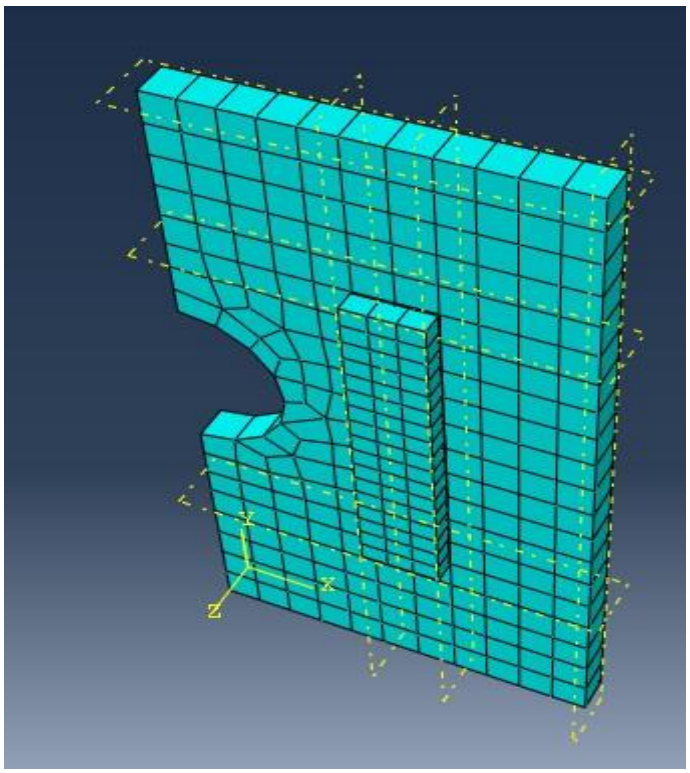


Figure 3-30 : Plaque avec raidisseur.

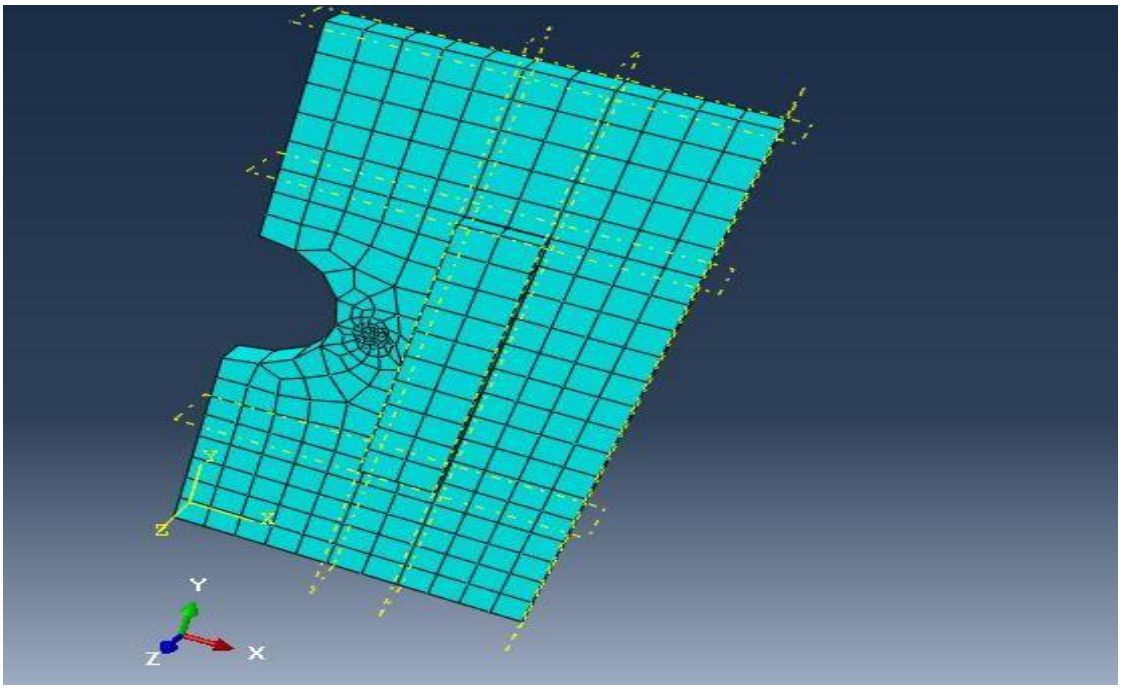


Figure 3-31 : Maillage de la plaque avec raidisseur avec fissure.

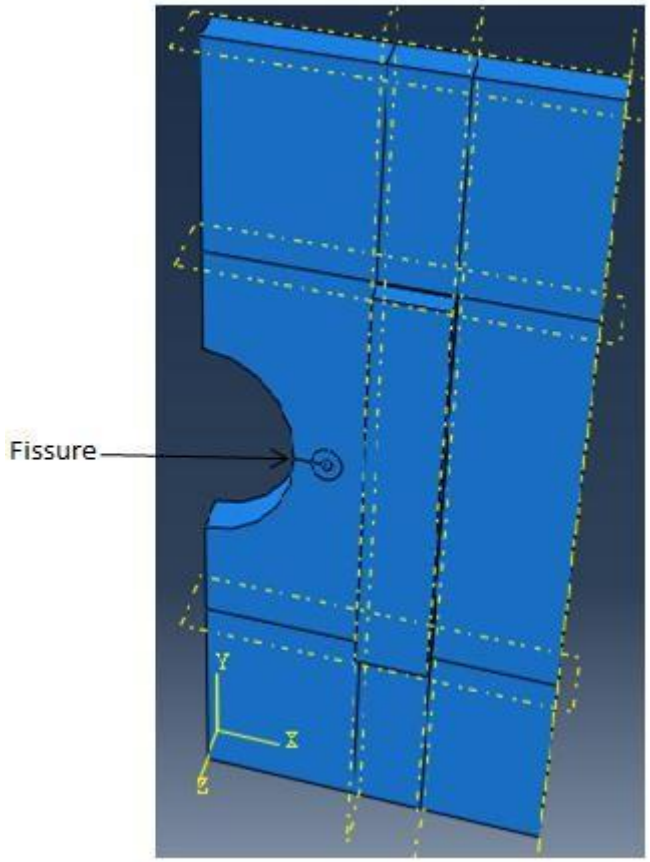


Figure 3-32 : Localisation de la fissure

Chapitre4

Introduction

L'étude des structures mécaniques sollicitées met en évidence l'importance de la distribution des contraintes, en particulier lorsqu'elles présentent des discontinuités géométriques ou des assemblages spécifiques. Ce chapitre s'intéresse à l'analyse approfondie de trois aspects fondamentaux de la mécanique des structures : le facteur de concentration des contraintes, le facteur d'intensité des contraintes et les contraintes de cisaillement dans les adhésifs.

Dans un premier temps, l'accent est mis sur le facteur de concentration des contraintes, paramètre clé pour comprendre l'amplification locale des contraintes autour des singularités telles que les trous, encoches ou raidisseurs. L'influence de la géométrie, de l'épaisseur des plaques et des raidisseurs, ainsi que de leur positionnement, est analysée afin de mieux anticiper les risques de rupture ou d'endommagement prématuré.

Le chapitre aborde ensuite le facteur d'intensité des contraintes, notion centrale en mécanique de la rupture. Ce paramètre permet de caractériser l'intensité du champ de contraintes au voisinage d'une fissure et d'évaluer la propension d'une structure à la propagation de fissures sous sollicitation, en tenant compte de la géométrie, du type de chargement et de la taille des défauts.

Enfin, une attention particulière est portée à l'étude des contraintes de cisaillement dans les adhésifs, cruciales pour la fiabilité des assemblages collés. L'analyse met en lumière les mécanismes de transfert de charge, les modes de rupture et l'influence des paramètres géométriques et de conception sur la répartition et l'intensité des contraintes de cisaillement.

Ce chapitre vise ainsi à fournir une compréhension globale et comparative de ces phénomènes, essentiels pour le dimensionnement, la sécurité et la durabilité des structures mécaniques modernes.

4-1 Analyse du facteur de concentration des contraintes :

Le facteur de concentration des contraintes (FCC, ou souvent noté Kt) est un paramètre sans dimension qui caractérise l'amplification locale des contraintes dans une structure mécanique lorsqu'elle présente une discontinuité géométrique (trou, encoche, épaulement, changement brutal de section, etc.) ou une hétérogénéité de matériau. Cette amplification fait que la contrainte maximale au voisinage de la discontinuité est supérieure à la contrainte nominale calculée pour une section uniforme, ce qui peut entraîner une initiation de fissures ou une rupture prématurée.

Formule générale

Le facteur de concentration des contraintes est défini par le rapport :

$$\mathrm{Kt} = \frac{\sigma max}{\sigma nominal}$$

où :

- σmax est la contrainte maximale mesurée ou calculée au voisinage de la discontinuité,
- σnominal est la contrainte moyenne ou nominale loin de la discontinuité, calculée comme si la section était homogène.

Les causes principales de concentration des contraintes sont :
- Les modifications géométriques (trous, encoches, filets, congés, etc.)
- Les discontinuités de matériau (inclusions, interfaces)
- Les charges externes appliquées localement ou de façon non uniforme
Les conséquences sont :
- Une réduction de la résistance mécanique locale
- Un risque accru d'initiation de fissures, notamment en fatigue
- Une diminution de la durée de vie en service de la pièce ou de la structure.
Exemples typiques
- Un trou circulaire dans une plaque soumise à une traction uniaxiale : pour une plaque infinie, $K_t = 3$
- Un arbre avec un congé (rayon de raccordement) : la valeur de Kt dépend du rapport des rayons et de la géométrie précise.
Méthodes de détermination
Trois grandes familles de méthodes existent pour évaluer le FCC :
- Méthodes analytiques : pour des géométries simples, il existe des formules ou des abaques issues de la littérature (par exemple, trou circulaire, encoche en V, etc.).
- Méthodes numériques : l'analyse par éléments finis (FEA) permet de modéliser des géométries complexes et d'obtenir la répartition locale des contraintes.
- Méthodes expérimentales : l'extensométrie (jauges de déformation) permet de mesurer localement les déformations et d'en déduire le FCC.
Utilisation en conception
La prise en compte du FCC est essentielle lors du dimensionnement des structures :
- On multiplie la contrainte nominale par Kt pour obtenir la contrainte locale maximale.
- On compare cette contrainte à la limite admissible du matériau, en tenant compte du coefficient de sécurité.
- On peut atténuer la concentration des contraintes par des modifications géométriques (ajout de congés, augmentation du rayon de raccordement, etc.).
Le facteur de concentration des contraintes est un outil fondamental en mécanique des structures pour anticiper les zones critiques, optimiser la conception et prévenir les ruptures prématurées. Sa valeur dépend fortement de la géométrie, des matériaux et des conditions de chargement, et il doit être déterminé avec soin pour chaque cas particulier.

La figure 4-1 illustre l'influence de l'épaisseur de la plaque sur le facteur de concentration des contraintes (Kt) pour un raidisseur de 3 mm d'épaisseur, en fonction de la charge appliquée (Load, en MPa).
On observe que, pour une charge donnée, le facteur de concentration des contraintes diminue lorsque l'épaisseur de la plaque augmente. Plus précisément :
- Les plaques les plus fines (3 mm) présentent les valeurs de Kt les plus élevées pour toutes les charges appliquées.
- À épaisseur de plaque intermédiaire (4 mm), Kt est inférieur à celui de la plaque de 3 mm mais supérieur à celui de la plaque de 5 mm.
- Les plaques les plus épaisses (5 mm) montrent le facteur de concentration des contraintes le plus faible.

Cette tendance indique que l'augmentation de l'épaisseur de la plaque permet de mieux répartir les contraintes autour du raidisseur, réduisant ainsi les pics de concentration. Cela améliore la résistance globale de la structure face à des charges croissantes. En résumé, pour un raidisseur de 3 mm d'épaisseur, une plaque plus épaisse limite significativement la concentration des contraintes et donc le risque de rupture locale sous charge.

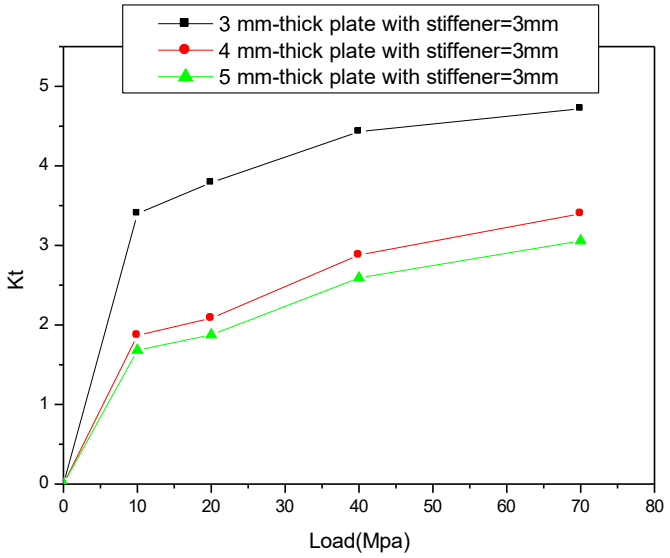


Fig 4-1 Influence de l'épaisseur de la plaque sur le facteur de concentration des contraintes pour un raidisseur de 3 mm d'épaisseur

La figure 4-2 présente l'évolution du facteur de concentration des contraintes (Kt) en fonction de la charge appliquée (Load, en MPa) pour une plaque de 5 mm d'épaisseur, selon différentes épaisseurs de raidisseur (3 mm, 4 mm, 5 mm) et en l'absence de raidisseur.

- Effet du raidisseur : La présence d'un raidisseur réduit significativement le facteur de concentration des contraintes par rapport à une plaque sans raidisseur, quel que soit le niveau de charge appliquée. La courbe « Without stiffener » (sans raidisseur) montre des valeurs de Kt nettement supérieures à celles des plaques raidies.
- Influence de l'épaisseur du raidisseur : Plus l'épaisseur du raidisseur augmente, plus le facteur de concentration des contraintes diminue. Les courbes montrent que Kt est le plus faible pour un raidisseur de 5 mm d'épaisseur, suivi de près par celui de 4 mm, puis de 3 mm.
- Tendance avec la charge : Pour toutes les configurations, Kt augmente avec la charge appliquée, mais l'écart entre les différentes épaisseurs de raidisseur reste constant : l'épaisseur plus importante du raidisseur permet toujours de mieux répartir les contraintes, limitant ainsi leur concentration.
- Comparaison générale : L'ajout d'un raidisseur, et en particulier l'augmentation de son épaisseur, améliore la résistance de la plaque en diminuant les pics de contraintes, ce qui est bénéfique pour la durabilité et la sécurité de la structure.

En résumé, la figure montre que l'utilisation d'un raidisseur, et surtout l'augmentation de son épaisseur, permet de réduire efficacement la concentration des contraintes dans une plaque soumise à des charges croissantes.

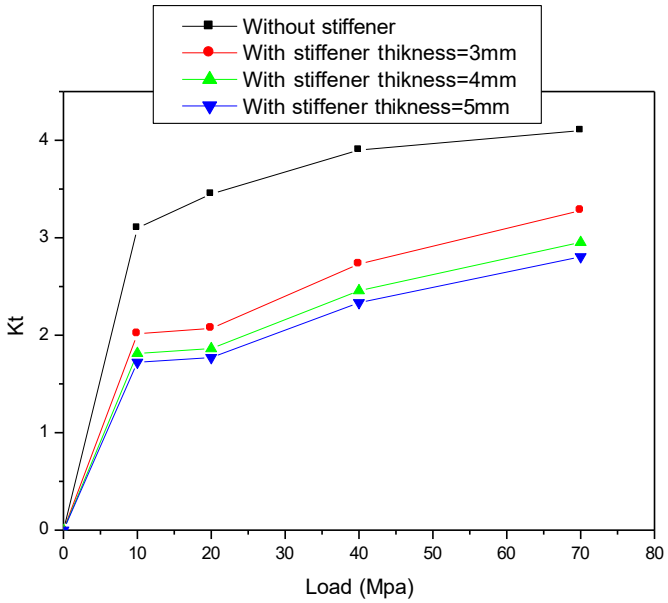


Fig 4-2 Influence de l'épaisseur de raidisseur sur le facteur de concentration des contraintes pour une plaque de 5 mm d'épaisseur

La figure 4-3 montre l'influence de la distance entre l'entaille (notch) et le raidisseur (stiffener) sur le facteur de concentration des contraintes (Kt) pour un raidisseur et une plaque de 5 mm d'épaisseur, en fonction de la charge appliquée (Load, en MPa).

- Pour toutes les valeurs de charge appliquée, le facteur de concentration des contraintes Kt augmente avec la charge.
- À faible charge, les différences entre les espacements (10 mm, 15 mm, 20 mm) sont minimes.
- Lorsque la charge augmente, l'écart entre les courbes devient plus marqué :
  - L'espacement de 15 mm (courbe rouge) donne systématiquement les valeurs de Kt les plus faibles.
  - Les espacements de 10 mm (noir) et 20 mm (vert) présentent des valeurs de Kt plus élevées, surtout à forte charge.
- Cela signifie qu'un espacement intermédiaire (15 mm) entre l'entaille et le raidisseur permet de mieux répartir les contraintes et de limiter leur concentration maximale, comparé à des espacements plus faibles ou plus élevés.
- À l'inverse, un raidisseur trop proche (10 mm) ou trop éloigné (20 mm) de l'entaille n'optimise pas la réduction du facteur de concentration des contraintes.

La position du raidisseur par rapport à l'entaille influence significativement la concentration des contraintes. Un espacement optimal (15 mm) permet de minimiser le facteur Kt, ce qui améliore la résistance de la structure sous charge croissante.

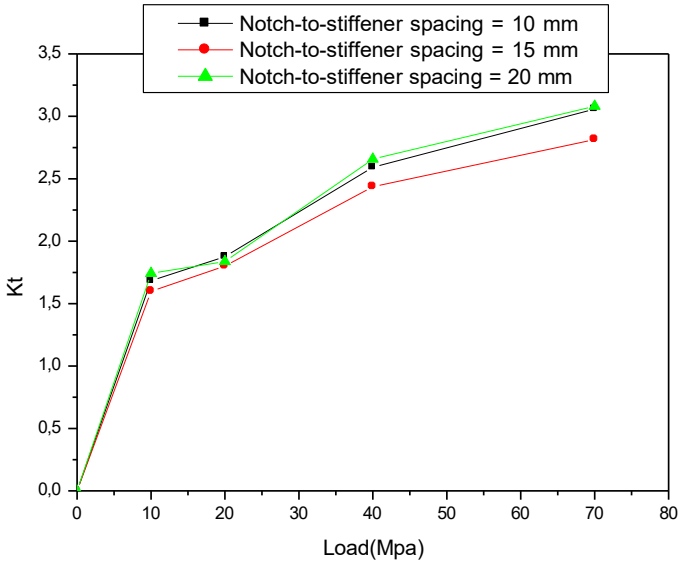


Fig 4-3 Influence de la position du raidisseur sur le facteur de concentration des contraintes pour un raidisseur de 5 mm d'épaisseur et une plaque de 5mm d'épaisseur

4-2 Analyse du facteur d'intensité des contraintes

Le facteur d'intensité des contraintes (FIC), généralement noté K, est un paramètre fondamental de la mécanique de la rupture. Il caractérise l'intensité du champ de contraintes au voisinage de la pointe d'une fissure dans un matériau soumis à un chargement. Ce facteur permet de prédire la tendance d'une fissure à se propager sous l'effet des contraintes appliquées, même lorsque la contrainte nominale dans le matériau reste inférieure à la limite d'élasticité.

Formulation générale

La valeur de K dépend de plusieurs paramètres :

- La géométrie de la pièce
- La taille et la position de la fissure
- Le type et la magnitude du chargement

La formule générique pour le mode I (ouverture) est :

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} f(\frac{a}{W})$$

où :

- sigma est la contrainte appliquée,
- a la longueur de la fissure,
- W la largeur de l'éprouvette,
- f(a/W) est une fonction de la géométrie.

Modes de rupture

Le FIC se décline selon les trois modes de sollicitation d'une fissure :

- Mode I (ouverture) : les lèvres de la fissure s'écartent perpendiculairement au plan de la fissure.
- Mode II (glissement en plan) : les lèvres glissent parallèlement au plan de la fissure, perpendiculairement au front de fissure.
- Mode III (déchirement hors plan) : glissement parallèle au front de fissure.

Les facteurs correspondants sont notés K_I, K_{II} et K_{III}.

Utilisation et importance

Le FIC est utilisé pour :

- Prédire la propagation des fissures dans les structures
- Déterminer la ténacité à la rupture (KIC), qui est la valeur critique du FIC au-delà de laquelle la propagation rapide de la fissure se produit
- Concevoir des structures résistant à la rupture fragile ou à la fatigue
- Évaluer la durée de vie résiduelle des composants fissurés

Méthodes de calcul

Plusieurs méthodes existent pour déterminer le FIC :

- Analytique : Formules pour géométries et chargements simples (ex. plaque infinie, fissure centrale)
- Numérique : Méthodes par éléments finis, particulièrement utiles pour les géométries complexes
- Expérimentale : Mesures par jauges de déformation, photoélasticimétrie, etc.

Facteurs influents

Le FIC augmente avec la taille de la fissure, même si la contrainte nominale reste constante.

Ainsi, une fissure qui s'allonge rend la structure de plus en plus vulnérable à la rupture.

Le facteur d'intensité des contraintes est un outil essentiel pour anticiper la rupture des matériaux fissurés. Il permet d'établir des critères de sécurité et de fiabilité dans la conception et la maintenance des structures, en tenant compte de la présence potentielle de fissures et de leur évolution sous contrainte.

La figure 4-4 illustre l'influence de l'épaisseur du raidisseur sur le facteur d'intensité des contraintes (K) pour une plaque de 5 mm d'épaisseur, en fonction de la longueur de l'entaille (a).

- Pour chaque valeur de la longueur de l'entaille (a), le facteur d'intensité des contraintes K diminue lorsque l'épaisseur du raidisseur augmente.
- Les courbes montrent que, pour une entaille donnée, un raidisseur de 3 mm d'épaisseur (carrés noirs) conduit à des valeurs de K plus élevées, tandis qu'un raidisseur de 5 mm (triangles verts) permet d'obtenir les valeurs de K les plus faibles.
- Cette tendance est constante sur toute la plage de longueurs d'entaille étudiées : plus l'épaisseur du raidisseur est importante, plus la réduction du facteur d'intensité des contraintes est marquée.
- On observe également que K augmente avec la longueur de l'entaille, quel que soit le raidisseur, mais l'effet bénéfique d'un raidisseur plus épais reste présent à chaque étape.

Augmenter l'épaisseur du raidisseur permet de diminuer le facteur d'intensité des contraintes dans une plaque de 5 mm d'épaisseur, ce qui améliore la résistance de la structure face à la propagation des fissures ou à la concentration des contraintes. Un raidisseur plus épais est donc plus efficace pour limiter les risques de rupture ou d'endommagement localisé.

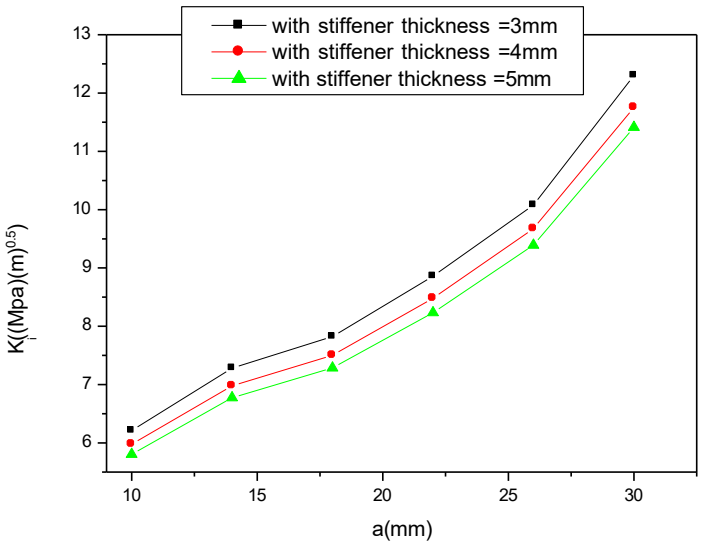


Fig 4-4 Influence de l'épaisseur du raidisseur sur le facteur d'intensité des contraintes pour une plaque de 5 mm d'épaisseur

La figure 4-5 montre l'influence de la position du raidisseur, exprimée par l'espacement entre l'entaille (notch) et le raidisseur (stiffener), sur le facteur d'intensité des contraintes KI en fonction de la longueur de l'entaille a (en mm). Le raidisseur a une épaisseur de 5 mm, tout comme la plaque.

- Le facteur d'intensité des contraintes KI augmente globalement avec la longueur de l'entaille a pour tous les espacements étudiés (10 mm, 15 mm, 20 mm).
- Pour chaque longueur d'entaille, l'espacement de 15 mm entre l'entaille et le raidisseur (courbe rouge avec cercles) donne systématiquement les valeurs les plus faibles de KI, ce qui indique une meilleure réduction de la concentration des contraintes.
- Les espacements de 10 mm (carrés noirs) et 20 mm (triangles verts) présentent des valeurs plus élevées de KI, proches l'une de l'autre, et supérieures à celles obtenues avec un espacement de 15 mm.
- Cela suggère qu'un positionnement intermédiaire du raidisseur par rapport à l'entaille optimise la diminution du facteur d'intensité des contraintes, tandis qu'un raidisseur trop proche ou trop éloigné est moins efficace.

La position du raidisseur influence fortement la concentration des contraintes autour de l'entaille. Un espacement optimal (15 mm) permet de minimiser le facteur d'intensité des contraintes, améliorant ainsi la résistance de la plaque face à la propagation des fissures. Un mauvais positionnement, trop proche ou trop éloigné, conduit à une augmentation du facteur KI, et donc à un risque plus élevé de défaillance locale.

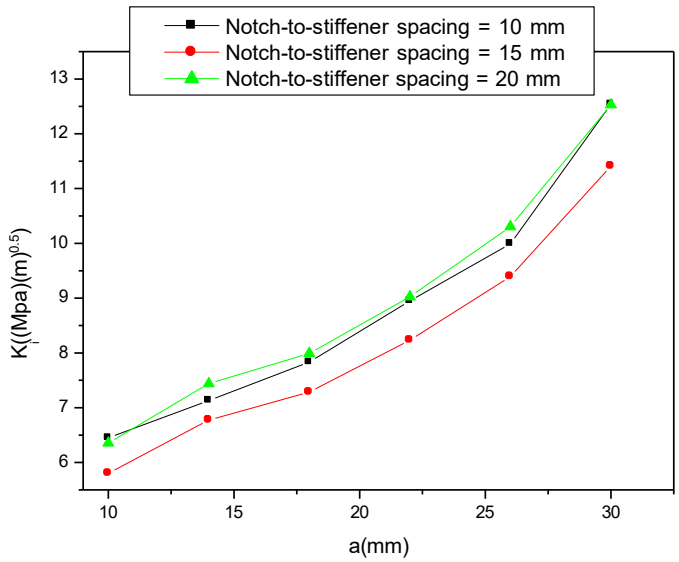


Fig 4-5 Influence de la position du raidisseur sur le facteur d'intensité des contraintes pour un raidisseur de 5 mm d'épaisseur et une plaque de 5mm d'épaisseur

4-3 Analyse des contraintes de cisaillement de l'adhésif

La contrainte de cisaillement dans un adhésif correspond à la force appliquée parallèlement au plan de collage, forçant les deux substrats à glisser l'un par rapport à l'autre. Ce mode de sollicitation est courant dans les assemblages collés, notamment dans les joints à simple ou double recouvrement, où la colle travaille principalement en cisaillement.

Caractéristiques du cisaillement dans les adhésifs

- La résistance au cisaillement d'un adhésif est la contrainte maximale qu'il peut supporter avant la rupture, généralement exprimée en mégapascals (MPa).
- Les adhésifs rigides (dits "tenaces") présentent généralement une résistance au cisaillement plus élevée que les adhésifs souples.
- Plus la couche d'adhésif est fine, plus la résistance au cisaillement est élevée, car l'épaisseur influe sur la distribution des contraintes et la déformation.
- Les conditions d'essai, telles que la température et la vitesse de sollicitation, influencent fortement la résistance au cisaillement : une température élevée ou une vitesse d'essai faible tend à diminuer la résistance.

Essais et modes de rupture

- La norme ASTM D1002 est une référence pour mesurer la résistance au cisaillement des adhésifs utilisés dans le collage des métaux. L'essai consiste à appliquer une traction sur une éprouvette à recouvrement jusqu'à la rupture, la force étant transmise sous forme de cisaillement dans la zone adhésive.
- Trois modes de rupture sont observés lors de ces essais :
  - Rupture cohésive (dans l'adhésif)
  - Rupture adhésive (à l'interface adhésif/substrat)
  - Rupture mixte (combinaison des deux)

Répartition des contraintes et conception

- Idéalement, la contrainte de cisaillement doit être répartie uniformément sur toute la surface de collage. Cependant, dans la pratique, des concentrations de contraintes apparaissent, notamment aux bords de la zone collée, ce qui peut initier la rupture.
- Les assemblages conçus pour solliciter l'adhésif principalement en cisaillement (plutôt qu'en pelage ou en clivage) offrent une meilleure durabilité et une résistance accrue, car la charge est mieux répartie.
- Des solutions de conception, comme le double recouvrement ou l'ajout de décroché, permettent de maintenir la contrainte dans le plan et de limiter les effets de concentration locale.

Comportement mécanique et suivi de la rupture

- Les essais spécifiques (par exemple, essais Arcan ou I-ELS) permettent de caractériser le comportement de l'adhésif en cisaillement pur et de suivre l'amorçage et la propagation de fissures dans le joint collé.
- L'adhésif peut présenter un comportement élasto-visco-plastique, avec une sensibilité marquée à la température et à la vitesse de sollicitation.

L'analyse des contraintes de cisaillement de l'adhésif est cruciale pour prédire la performance et la durabilité des assemblages collés. Elle implique de mesurer la résistance au cisaillement, de comprendre les effets des paramètres de conception et des conditions d'utilisation, et d'anticiper les modes de rupture pour optimiser la sécurité et la longévité des structures assemblées.

La figure 4-6 présente l'influence de l'épaisseur du raidisseur sur la contrainte de cisaillement maximale (τxy) dans une plaque de 5 mm d'épaisseur, en fonction de la charge appliquée (en MPa).

- Pour chaque niveau de charge appliquée, la contrainte de cisaillement maximale augmente avec l'épaisseur du raidisseur.
- Les plaques renforcées par un raidisseur de 5 mm d'épaisseur (triangles verts) présentent systématiquement les valeurs de τxy les plus élevées, suivies par celles avec un raidisseur de 4 mm (cercles rouges), puis de 3 mm (carrés noirs).
- Cette tendance est visible pour toutes les charges appliquées, mais l'écart entre les courbes devient plus marqué à mesure que la charge augmente.
- Après un certain seuil de charge (environ 40 MPa), la contrainte de cisaillement maximale tend à se stabiliser pour chaque configuration, mais reste toujours plus élevée pour les raidisseurs plus épais.

L'augmentation de l'épaisseur du raidisseur conduit à une élévation de la contrainte de cisaillement maximale dans la plaque. Cela s'explique par le fait qu'un raidisseur plus épais transfère une plus grande partie de la charge à la zone renforcée, augmentant ainsi localement les contraintes de cisaillement. Ce phénomène doit être pris en compte lors de la conception, afin d'optimiser à la fois la rigidité et la résistance de la structure.

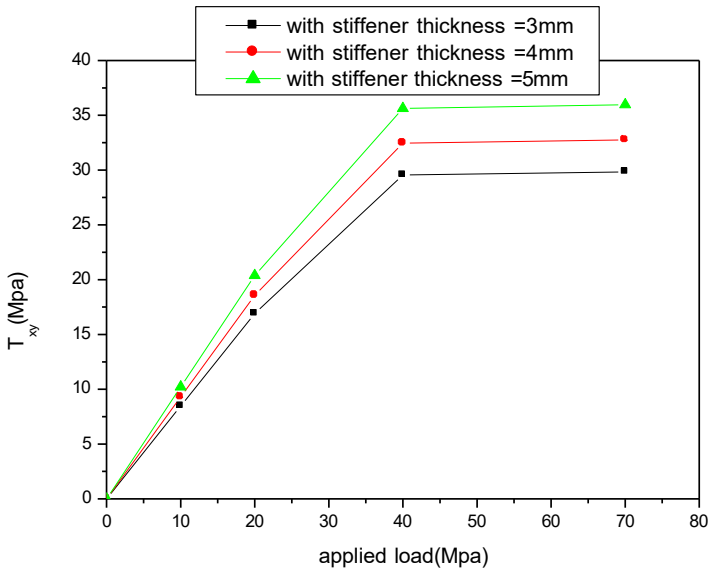


Fig 4-6 Influence de l'épaisseur du raidisseur sur les contraintes de cisaillement max pour une plaque de 5 mm d'épaisseur

La figure 4-7 présente l'influence de la position du raidisseur (distance entre l'entaille et le raidisseur : 10 mm, 15 mm et 20 mm) sur la contrainte de cisaillement maximale (τxy dans une plaque de 5 mm d'épaisseur renforcée par un raidisseur de 5 mm d'épaisseur, en fonction de la charge appliquée.

- Pour toutes les configurations, la contrainte de cisaillement maximale augmente avec la charge appliquée, puis tend à se stabiliser à partir d'environ 40 MPa.
- L'espacement de 15 mm entre l'entaille et le raidisseur (carrés noirs) conduit systématiquement à la contrainte de cisaillement maximale la plus élevée pour chaque niveau de charge.
- Les espacements de 10 mm (triangles verts) et 20 mm (cercles rouges) donnent des valeurs de τxy légèrement inférieures et très proches l'une de l'autre, surtout à forte charge.
- L'écart entre les différentes positions du raidisseur devient plus marqué lorsque la charge appliquée augmente.

La position du raidisseur a un effet notable sur la contrainte de cisaillement maximale dans la plaque. Un espacement intermédiaire (15 mm) entre l'entaille et le raidisseur conduit à une augmentation de la contrainte de cisaillement maximale par rapport à des espacements plus faibles (10 mm) ou plus élevés (20 mm). Cela suggère qu'il existe une configuration où le transfert des efforts de cisaillement est maximal, ce qui doit être pris en compte lors de la conception pour éviter des concentrations locales de contraintes trop élevées.

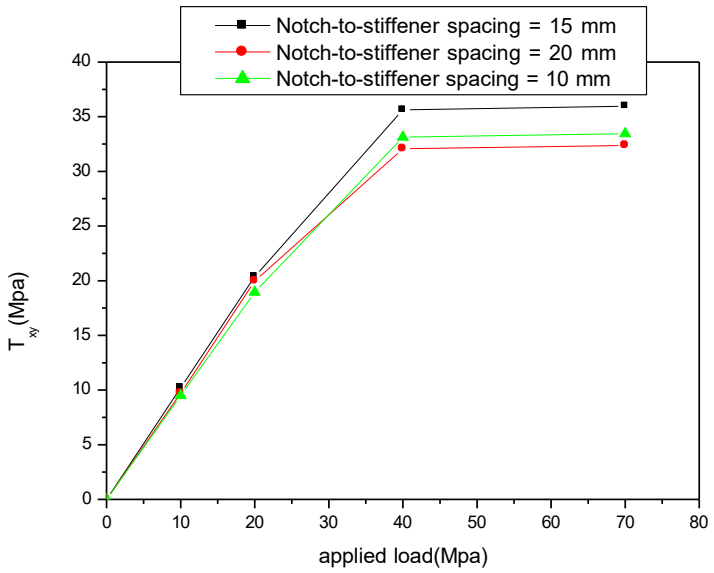


Fig 4-7 Influence de la position du raidisseur les contraintes de cisaillement max pour un raidisseur de 5 mm d'épaisseur et une plaque de 5mm d'épaisseur

Conclusion

L'analyse menée dans ce chapitre a permis de mettre en lumière l'importance des facteurs de concentration et d'intensité des contraintes, ainsi que des contraintes de cisaillement dans les adhésifs, pour la conception et la durabilité des structures mécaniques.

L'étude du facteur de concentration des contraintes (Kt) a montré que la présence de discontinuités géométriques ou de raidisseurs influence fortement la répartition des contraintes dans une pièce. L'augmentation de l'épaisseur de la plaque ou du raidisseur contribue à réduire les pics de concentration, améliorant ainsi la résistance à la rupture locale. De plus, un positionnement optimal du raidisseur par rapport à une entaille permet de minimiser la concentration des contraintes et d'optimiser la performance structurelle.

L'analyse du facteur d'intensité des contraintes (K) a souligné son rôle fondamental dans la prédiction de la propagation des fissures. Les résultats indiquent que l'épaisseur et la position du raidisseur influencent significativement la valeur de K, et donc la capacité de la structure à résister à la rupture fragile ou à la fatigue. Un raidisseur plus épais ou judicieusement positionné permet de limiter l'intensité des contraintes au voisinage des fissures, renforçant la sécurité de l'ensemble.

Enfin, l'étude des contraintes de cisaillement dans l'adhésif a mis en évidence que la géométrie de l'assemblage, l'épaisseur du raidisseur et sa position modifient la répartition et l'intensité des contraintes dans la zone collée. Une conception appropriée permet de limiter les concentrations locales et d'augmenter la durabilité des assemblages collés, tout en évitant les modes de rupture prématurés.

En synthèse, ce chapitre démontre que la maîtrise des paramètres géométriques et des conditions de chargement est essentielle pour optimiser la résistance et la fiabilité des structures mécaniques. L'intégration de ces analyses dans la phase de conception permet d'anticiper les zones critiques, de réduire les risques de rupture et d'améliorer la longévité des assemblages, qu'ils soient métalliques ou collés.

Chapitre5

Introduction

L'optimisation des assemblages collés renforcés par raidisseur constitue un enjeu majeur pour la fiabilité et la durabilité des structures mécaniques modernes. Ce chapitre présente une démarche intégrée combinant la simulation numérique (via le logiciel Abaqus) et l'optimisation statistique multi-critères (avec MODDE5) afin d'identifier les configurations géométriques les plus performantes. L'analyse s'appuie sur l'étude de deux indicateurs essentiels : le facteur d'intensité des contraintes, qui renseigne sur la propension à la propagation des fissures, et la contrainte de cisaillement maximale, déterminante pour la tenue de l'adhésif.

Après avoir établi la base de données par simulations numériques, le chapitre détaille la robustesse des modèles statistiques employés, puis expose les résultats de l'optimisation : influence des paramètres géométriques (largeur, épaisseur, emplacement du raidisseur, longueur de recouvrement, épaisseur de l'adhésif), interactions entre ces paramètres, et identification des zones optimales pour minimiser simultanément les risques de rupture et de propagation de fissures. L'ensemble vise à fournir des recommandations concrètes pour la conception d'assemblages collés plus sûrs et plus efficaces, en s'appuyant sur une approche scientifique rigoureuse et prédictive.

Table5-1 les valeurs obtenues à partir du logiciel Abaqus

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	Stifenner thicness	Stifenner place	Stress intensity factor	maximum shear stress
1	1	N1	11	Incl	3	10	17	32
2	2	N2	2	Incl	5	10	12,6	35
3	3	N3	10	Incl	3	20	16,9	28
4	4	N4	3	Incl	5	20	12,9	29
5	5	N5	1	Incl	3	15	14	33
6	6	N6	6	Incl	5	15	11,4	36
7	7	N7	8	Incl	4	10	13,5	32,4
8	8	N8	4	Incl	4	20	13,4	28,6
9	9	N9	5	Incl	4	15	12,2	34
10	10	N10	7	Incl	4	15	12,2	34
11	11	N11	9	Incl	4	15	12,2	34

Table 5-1 : Recense les valeurs issues des simulations Abaqus, servant de base à l'évaluation des performances mécaniques des assemblages, notamment le facteur d'intensité des contraintes et la contrainte de cisaillement maximale.

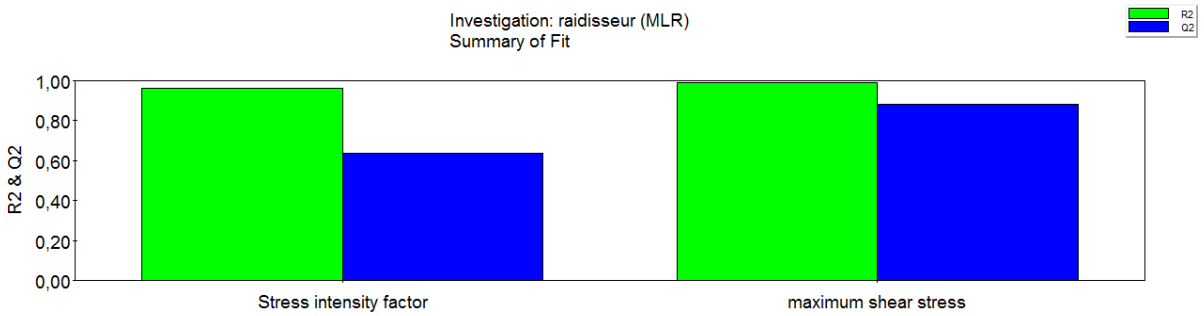


Fig 5-1 Facteur du l'optimisation

La figure 5-1 présente un résumé de l'ajustement statistique (Summary of Fit) pour deux critères d'optimisation dans l'étude des assemblages avec raidisseur : le facteur d'intensité des contraintes (Stress intensity factor) et la contrainte de cisaillement maximale (maximum shear stress).

- Barres vertes (R^2) : Indiquent le coefficient de détermination, c'est-à-dire la proportion de la variance des données expliquée par le modèle statistique utilisé pour l'optimisation.
- Barres bleues (Q^2) : Indiquent la capacité prédictive du modèle (validation croisée), c'est-à-dire la performance du modèle pour prédire des données non utilisées lors de l'ajustement.

Analyse des résultats

- Pour les deux critères (facteur d'intensité des contraintes et contrainte de cisaillement maximale), les valeurs de R^2 sont élevées (proches de 0,9), ce qui signifie que le modèle explique très bien la variabilité observée dans les données issues des simulations ou expériences.
- Les valeurs de Q^2 sont également bonnes (autour de 0,7 pour le facteur d'intensité des contraintes et légèrement supérieures pour la contrainte de cisaillement maximale), indiquant une bonne capacité du modèle à prédire des résultats nouveaux, ce qui valide la robustesse de l'optimisation.

Cette figure montre que les modèles statistiques construits pour optimiser à la fois le facteur d'intensité des contraintes et la contrainte de cisaillement maximale sont fiables : ils expliquent bien les phénomènes physiques étudiés et permettent des prédictions pertinentes pour guider la conception des assemblages avec raidisseur. Cela valide la démarche d'optimisation multi-critères utilisée dans l'étude.

Table5-2 Les valeurs optimales obtenues à partir du logiciel modde5

	Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
1	Stifenner width	Free		3	5
2	Stifenner place	Free		10	20

	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	Stress intensity factor	Minimize	1		10,8772	11,4246
2	maximum shear stress	Minimize	1		27,6517	28,415

Iteration: 5001 Iteration slider:

	1	2	3	4	5	6
	Stifenner width	Stifenner place	Stress intensity factor	maximum shear stress	iter	log(D)
1	4,6841	16,4976	11,3922	33,9267	3562	1,5345
2	4,684	16,4986	11,3924	33,9258	3567	1,5343
3	4,7156	16,5704	11,395	33,9108	5001	1,5323
4	4,6822	16,4941	11,3922	33,9269	3883	1,5345
5	4,6845	16,4967	11,3917	33,9284	3565	1,5347
6	4,7156	16,5704	11,395	33,9108	5001	1,5323
7	4,7131	16,5672	11,3952	33,9096	4926	1,5322
8	4,6845	16,4967	11,3917	33,9284	3565	1,5347

Ce tableau 5-2 présente les résultats de l'optimisation multi-critères réalisée avec le logiciel MODDE5, visant à minimiser à la fois le facteur d'intensité des contraintes (Stress intensity factor) et la contrainte de cisaillement maximale (maximum shear stress) dans un assemblage avec raidisseur.

1. Facteurs étudiés
- Stiffener width (largeur du raidisseur) : variable entre 3 et 5.
- Stiffener place (emplacement du raidisseur) : variable entre 10 et 20.

2. Critères d'optimisation
- Stress intensity factor : à minimiser (objectif de réduire la propension à la propagation de fissures).
- Maximum shear stress : à minimiser (objectif de limiter le risque de rupture de l'adhésif).

3. Résultats optimaux
- Les différentes lignes du tableau montrent les meilleures combinaisons trouvées après 5001 itérations d'optimisation.
- Les valeurs optimales des facteurs sont très proches d'une ligne à l'autre, indiquant une zone optimale bien définie :
  - Largeur du raidisseur : autour de 4,68 à 4,72.
  - Emplacement du raidisseur : autour de 16,49 à 16,57.
- Facteur d'intensité des contraintes : les valeurs minimisées se situent autour de 11,39.
- Contrainte de cisaillement maximale : les valeurs minimisées sont autour de 33,91 à 33,93.

4. Lecture technique
- Convergence : Le nombre d'itérations élevé (jusqu'à 5001) et la faible variation des résultats attestent d'une bonne stabilité de l'optimisation.

- Log(D) : La colonne log(D) (probablement un indicateur de la distance ou de la qualité de la solution) reste stable, ce qui confirme la robustesse des résultats.

Le tableau met en évidence que pour minimiser simultanément le facteur d'intensité des contraintes et la contrainte de cisaillement maximale, il faut :
- Choisir une largeur de raidisseur d'environ 4,7.
- Positionner le raidisseur à environ 16,5 sur l'axe de la structure.

Cette approche permet d'atteindre un compromis optimal entre la résistance à la propagation des fissures et la tenue au cisaillement de l'adhésif, guidant ainsi la conception vers une solution fiable et durable.

Table5-3 liste des coefficients pour le facteur d'intensité des contraintes

	1	2	3	4	5
1	**Stress intensity factor**	**Coeff. SC**	**Std. Err.**	**P**	**Conf. int(±)**
2	**Constant**	12,0105	0,269331	1,07051e-007	0,692339
3	**Sw**	-1,83333	0,21434	0,000359769	0,550979
4	**Sti**	0,0166659	0,21434	0,941039	0,550979
5	**Sw*Sw**	0,973686	0,329862	0,0318192	0,847939
6	**Sti*Sti**	1,72369	0,329862	0,00339445	0,847939
7	**Sw*Sti**	0,0999999	0,262512	0,7189	0,674809
8					
9	N = 11	Q2 =	0,636	Cond. no. =	3,0822
10	DF = 5	R2 =	0,960	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	0,921	RSD =	0,5250
12				Conf. lev. =	0,95

Le modèle mathématique proposé est :

K_{IC}=12.0105-1.83333*Sw+0.0166659*Sti+0.973686*Sw^2+1.72369*Sti^2+0.09999999*Sw*Sti

Ou :

K_{IC} :Facteur d'intensité des contraintes

Sw : l'épaisseur de raidisseur

Sti : la distance entre l'entaille et le raidisseur

Table5-4 liste des coefficients pour la contrainte de cisaillement max

	1	2	3	4	5
1	maximum shear stress	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	34	0,206899	1,58318e-010	0,531852
3	Sw	1,16667	0,164655	0,000866877	0,42326
4	Sti	-2,3	0,164655	3,38051e-005	0,42326
5	Sw*Sw	0,500004	0,253399	0,105493	0,651383
6	Sti*Sti	-3,5	0,253399	3,57191e-005	0,651383
7	Sw*Sti	-0,5	0,20166	0,0558809	0,518385
8					
9	N = 11	Q2 =	0,882	Cond. no. =	3,0822
10	DF = 5	R2 =	0,989	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	0,978	RSD =	0,4033
12				Conf. lev. =	0,95

Le modèle mathématique proposé est :

$\tau max=34+1.16667*Sw-2.3*Sti+0.500004*Sw^2-3.5*Sti^2-0.5*Sw*Sti$

Ou :

τmax :contraintes de cisaillement max

Sw : l'épaisseur de raidisseur

Sti : la distance entre l'entaille et le raidisseur

La figure 5-2 présentée est un diagramme de contours représentant la variation du facteur d'intensité des contraintes (Stress Intensity Factor) en fonction de deux paramètres : l'épaisseur du raidisseur (Stiffener thickness, axe vertical) et la position du raidisseur (Stiffener place, axe horizontal).

Analyse des résultats :

- Zones de couleur : Les différentes couleurs indiquent les niveaux du facteur d'intensité des contraintes. Les zones bleues correspondent aux valeurs les plus faibles (autour de 11.15), tandis que les zones jaunes et oranges indiquent des valeurs plus élevées (jusqu'à 15.5).
- Influence de l'épaisseur du raidisseur : Plus l'épaisseur du raidisseur augmente (vers le haut du graphique), plus le facteur d'intensité des contraintes diminue. Cela signifie qu'un raidisseur plus épais contribue à réduire l'intensité des contraintes au voisinage de la zone étudiée.
- Influence de la position du raidisseur : Lorsque le raidisseur est positionné plus à droite sur l'axe horizontal (valeurs croissantes), le facteur d'intensité des contraintes a tendance à diminuer légèrement, mais l'effet est moins marqué que celui de l'épaisseur.
- Interaction entre les deux paramètres : La combinaison d'un raidisseur épais et d'une position optimale permet d'atteindre les valeurs minimales du facteur d'intensité des contraintes, ce qui est favorable pour la résistance à la propagation des fissures.

Cette figure met en évidence que l'augmentation de l'épaisseur du raidisseur est le paramètre le plus efficace pour réduire le facteur d'intensité des contraintes, et donc pour améliorer la durabilité et la sécurité de l'assemblage. L'optimisation conjointe de l'épaisseur et de la position du raidisseur permet de minimiser les risques de propagation de fissures dans la structure.

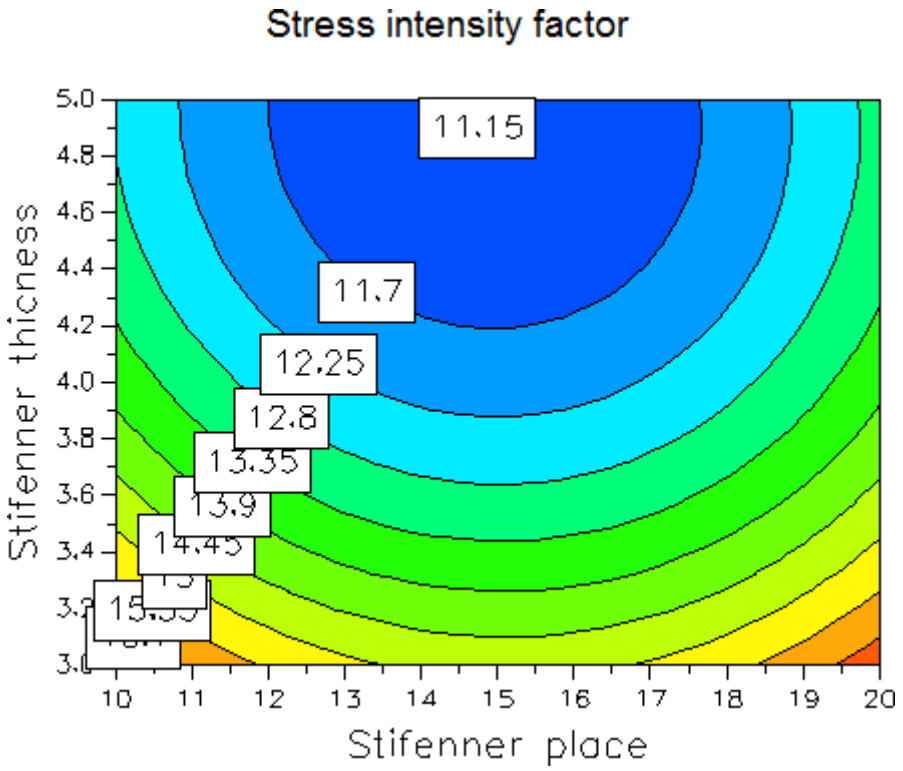


Fig5-2 Diagramme des contours du facteur d'intensité des contraintes illustrant l'interaction entre l'épaisseur de l'adhésif et la longueur du recouvrement

La figure 5-3 présentée est un diagramme de contours illustrant la variation de la contrainte de cisaillement maximale (maximum shear stress) en fonction de deux paramètres géométriques : l'épaisseur du raidisseur (stiffener thickness, axe vertical) et la position du raidisseur (stiffener place, axe horizontal).

Analyse des résultats :

- Distribution des contraintes :
Les couleurs chaudes (rouge, orange) indiquent des valeurs élevées de contrainte de cisaillement maximale, tandis que les couleurs froides (vert, bleu) correspondent à des valeurs plus faibles.
- Effet de l'épaisseur du raidisseur :
Pour une position donnée du raidisseur, l'augmentation de l'épaisseur tend à augmenter la contrainte de cisaillement maximale, notamment dans la zone située entre 10 et 15 sur l'axe horizontal.
- Effet de la position du raidisseur :

Lorsque le raidisseur est déplacé vers la droite (valeurs croissantes de stiffener place), la contrainte de cisaillement maximale diminue de façon significative, passant de 36.18 à 27.98. Cela suggère qu'un positionnement plus éloigné du raidisseur par rapport à l'origine du recouvrement permet de réduire les contraintes maximales dans l'adhésif.

- Interaction entre les deux paramètres :

La combinaison d'un raidisseur plus mince et d'un positionnement avancé (vers la droite) permet d'obtenir les plus faibles contraintes de cisaillement maximales dans la zone collée.

Cette figure met en évidence l'importance du positionnement et de l'épaisseur du raidisseur pour maîtriser la contrainte de cisaillement maximale dans l'adhésif. Pour minimiser les risques de rupture ou de décollement, il est préférable de choisir une position avancée du raidisseur et d'optimiser son épaisseur, en évitant les combinaisons qui conduisent à des concentrations de contraintes élevées. Ce type d'analyse permet d'orienter la conception des assemblages collés vers une meilleure fiabilité et une plus grande durabilité.

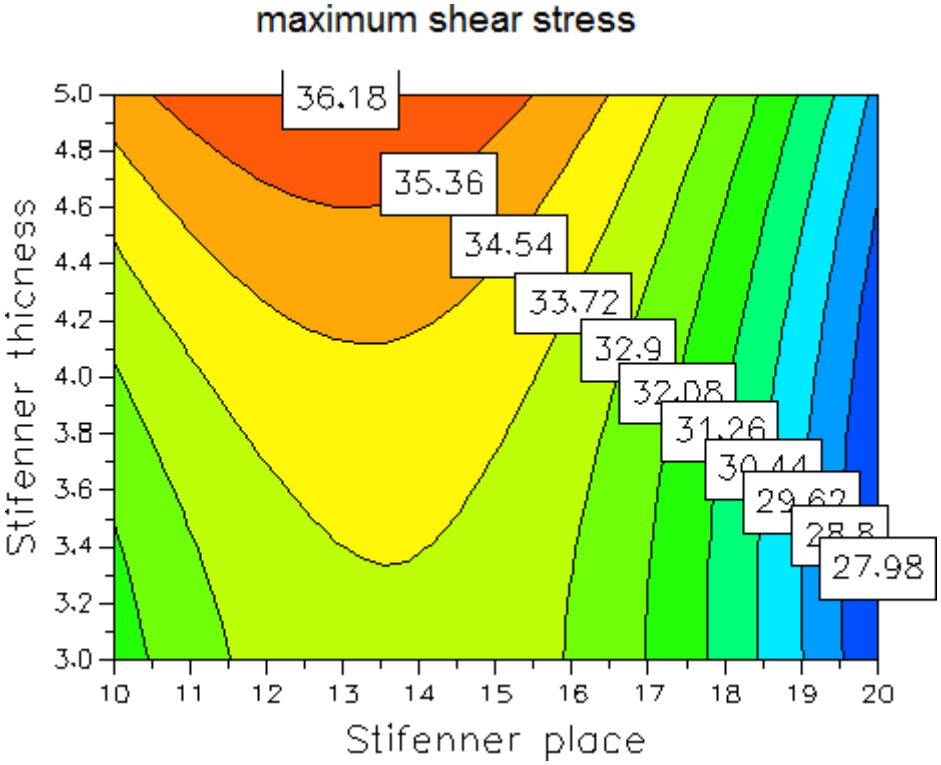


Fig5-3 Diagramme des contours des contraintes du cisaillement max illustrant l'interaction entre l'épaisseur de l'adhésif et la longueur du recouvrement

La figure 5-4 présentée est un diagramme en barres illustrant l'influence de différents facteurs et interactions sur la contrainte de cisaillement maximale dans un assemblage avec raidisseur. Les coefficients sont « scaled & centered », ce qui signifie qu'ils sont normalisés pour permettre la comparaison directe de leur effet relatif.

Lecture des axes et légende

- Axe vertical (Y) : Valeurs des coefficients en MPa, représentant l'effet sur la contrainte de cisaillement maximale.
- Axe horizontal (X) : Facteurs principaux et interactions étudiés :
  - Sw : Largeur du raidisseur (Stiffener width)
  - Sti : Épaisseur du raidisseur (Stiffener thickness)
- Sw*Sw, Sti*Sti, Sti*Sw : Interactions quadratiques ou croisées entre les paramètres.

Analyse des résultats

- Effets principaux :
  - Sw (largeur du raidisseur) : Influence positive, ce qui signifie qu'une augmentation de la largeur du raidisseur tend à augmenter la contrainte de cisaillement maximale.
  - Sti (épaisseur du raidisseur) : Influence négative marquée, indiquant qu'une augmentation de l'épaisseur du raidisseur réduit significativement la contrainte de cisaillement maximale.
- Interactions :
  - Sw*Sw : Effet positif mais faible, suggérant une légère augmentation de la contrainte avec la largeur élevée.
  - Sti*Sti et Sti*Sw : Effets négatifs importants, montrant que l'augmentation simultanée de l'épaisseur (ou de son interaction avec la largeur) contribue à réduire la contrainte de cisaillement maximale.
  - Sw*Sti : Effet légèrement négatif, indiquant que la combinaison des deux paramètres a un effet réducteur modéré sur la contrainte.

- Barres d'erreur : Les barres verticales sur chaque colonne représentent l'incertitude ou la variabilité statistique de chaque coefficient.

Cette figure met en évidence que :
- L'épaisseur du raidisseur est le facteur le plus déterminant pour réduire la contrainte de cisaillement maximale dans l'assemblage.
- La largeur du raidisseur a un effet opposé, tendant à augmenter la contrainte.
- Les interactions entre paramètres, notamment l'épaisseur et la largeur, jouent également un rôle important et doivent être prises en compte pour une optimisation fine de la conception.

En résumé, pour minimiser la contrainte de cisaillement maximale dans un assemblage collé avec raidisseur, il est préférable d'augmenter l'épaisseur du raidisseur tout en maîtrisant sa largeur, et de tenir compte des effets d'interaction entre ces paramètres.

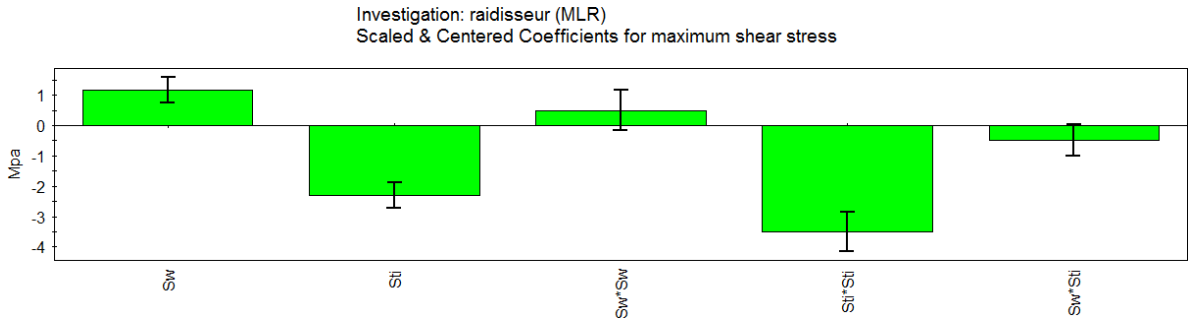


Fig5-4 Diagramme des facteurs influe sur le facteur d'intensité des contraintes

La figure 5-5 présente deux graphiques montrant la prédiction de la contrainte de cisaillement maximale (maximum shear stress) en fonction de deux paramètres du raidisseur : son épaisseur (Stiffener thickness, à gauche) et son emplacement (Stiffener place, à droite).

1. Influence de l'épaisseur du raidisseur (graphique de gauche)

- Observation principale : La contrainte de cisaillement maximale augmente de façon quasi linéaire avec l'augmentation de l'épaisseur du raidisseur.
- Interprétation : Plus le raidisseur est épais, plus la contrainte de cisaillement transmise à l'adhésif est élevée. Cela peut s'expliquer par une rigidité accrue du raidisseur, qui concentre davantage les efforts dans la zone collée.
- Conséquence technique : Pour limiter la contrainte de cisaillement maximale dans l'adhésif, il est préférable de ne pas augmenter excessivement l'épaisseur du raidisseur.

2. Influence de l'emplacement du raidisseur (graphique de droite)

- Observation principale : La contrainte de cisaillement maximale augmente d'abord avec le déplacement du raidisseur, atteint un maximum aux alentours de 15, puis diminue significativement lorsque le raidisseur est placé plus loin (vers 20).
- Interprétation : Il existe une position optimale du raidisseur : trop proche ou trop éloigné, la contrainte de cisaillement maximale diminue, mais elle atteint un pic intermédiaire. Cela traduit une interaction complexe entre la répartition des efforts et la géométrie de l'assemblage.
- Conséquence technique : Pour minimiser la contrainte de cisaillement maximale, il convient d'éviter de placer le raidisseur dans la zone où la contrainte atteint son maximum (autour de 15) et de privilégier un emplacement plus éloigné.

3. Synthèse

- Courbes : Les trois courbes sur chaque graphique (probablement différentes conditions limites ou configurations) montrent le même comportement général, ce qui renforce la robustesse de l'analyse.
- Optimisation : Ces résultats permettent d'orienter la conception vers une épaisseur modérée du raidisseur et un emplacement suffisamment éloigné pour limiter les contraintes maximales dans l'adhésif, et donc améliorer la durabilité de l'assemblage.

En résumé, la figure met en évidence que l'augmentation de l'épaisseur du raidisseur accroît la contrainte de cisaillement maximale, tandis que l'emplacement optimal du raidisseur permet de la réduire. Un compromis judicieux entre ces deux paramètres est essentiel pour garantir la fiabilité de l'assemblage collé.

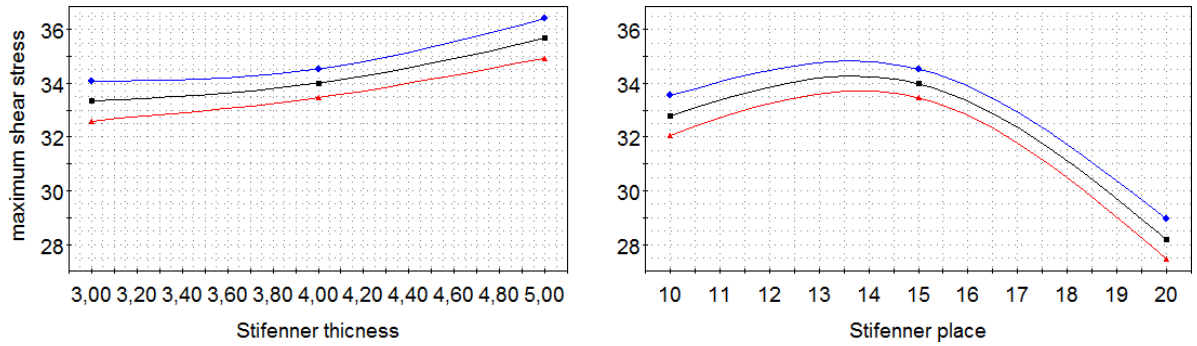


Fig5-5 Diagramme de la prédiction du l'épaisseur et l'emplacement du raidisseur en fonction des contraintes de cisaillement max

La figure 5-6 présente deux graphiques de prédiction du facteur d'intensité des contraintes (Stress Intensity Factor) en fonction de deux paramètres du raidisseur : son épaisseur (Stiffener thickness, à gauche) et son emplacement (Stiffener place, à droite).

1. Influence de l'épaisseur du raidisseur

- Observation : Le graphique de gauche montre que le facteur d'intensité des contraintes diminue de manière continue et significative lorsque l'épaisseur du raidisseur augmente, pour toutes les courbes présentées (bleue, noire, rouge).
- Interprétation : Une augmentation de l'épaisseur du raidisseur permet de mieux redistribuer les efforts et de réduire la concentration de contraintes à la pointe d'une fissure ou d'une discontinuité. Cela rejoint les résultats de la littérature, où des raidisseurs plus rigides ou plus épais abaissent le facteur d'intensité des contraintes, améliorant ainsi la résistance à la propagation de fissures et la durabilité de la structure.
- Conséquence technique : Pour limiter la propagation des fissures et augmenter la durée de vie de l'assemblage, il est avantageux d'augmenter l'épaisseur du raidisseur.

2. Influence de l'emplacement du raidisseur

- Observation : Le graphique de droite montre que le facteur d'intensité des contraintes suit une courbe en U inversé : il diminue lorsque le raidisseur est déplacé de la position 10 à environ 15, puis il augmente à nouveau lorsque le raidisseur est encore déplacé vers la position 20.
- Interprétation : Il existe une position optimale du raidisseur (autour de 15) pour laquelle le facteur d'intensité des contraintes est minimal. Cela s'explique par le fait qu'un positionnement judicieux du raidisseur permet de mieux contrer l'effet de la fissure et de répartir les efforts, tandis qu'un positionnement trop proche ou trop éloigné réduit cette efficacité.

- Conséquence technique : Placer le raidisseur à une position optimale permet de minimiser le risque de propagation des fissures dans la structure.

3. Synthèse

- Courbes multiples : Les trois courbes (bleue, noire, rouge) représentent probablement différentes configurations ou conditions limites, mais la tendance générale reste la même : l'épaisseur et la position du raidisseur sont des paramètres clés pour la maîtrise du facteur d'intensité des contraintes.
- Optimisation : Pour une conception optimale, il faut à la fois augmenter l'épaisseur du raidisseur et choisir son emplacement de façon à minimiser le facteur d'intensité des contraintes.

En résumé, la figure montre que l'augmentation de l'épaisseur du raidisseur et le choix d'un emplacement optimal permettent de réduire significativement le facteur d'intensité des contraintes, limitant ainsi la propagation des fissures et augmentant la fiabilité de l'assemblage.

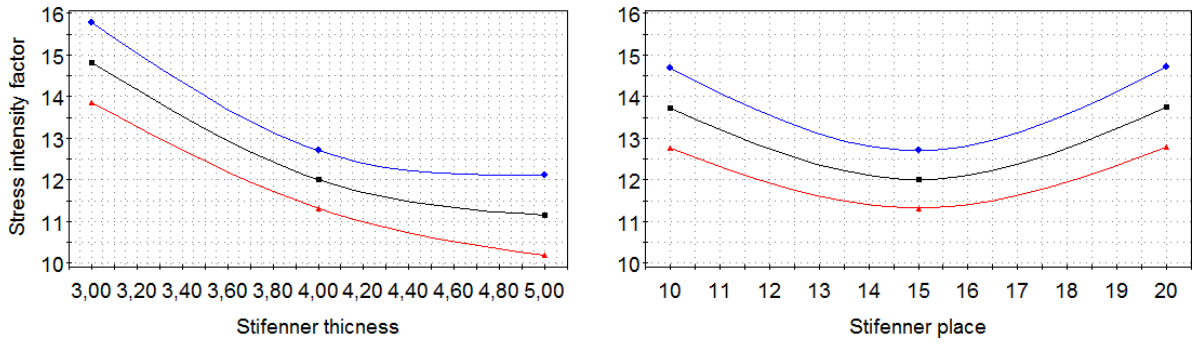


Fig5-6 Diagramme de la prédiction du l'épaisseur et l'emplacement du raidisseur en fonction des facteurs d'intensité des contraintes

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a démontré l'efficacité d'une approche intégrée combinant la simulation numérique (Abaqus) et l'optimisation statistique multi-critères (MODDE5) pour la conception optimale des assemblages collés renforcés par raidisseur. Les modèles statistiques développés présentent une forte capacité explicative et prédictive, comme l'attestent les valeurs élevées de R^2 et Q^2 pour les deux critères principaux : le facteur d'intensité des contraintes et la contrainte de cisaillement maximale.

L'analyse des résultats d'optimisation a permis d'identifier des configurations géométriques précises – notamment une largeur de raidisseur d'environ 4,7 et un positionnement autour de 16,5 – qui assurent un compromis optimal entre la résistance à la propagation des fissures et la tenue au cisaillement de l'adhésif. Les diagrammes de contours et les analyses de sensibilité ont mis en évidence l'influence prépondérante de l'épaisseur et de la position du raidisseur, ainsi que l'importance de maîtriser les interactions entre paramètres pour limiter les zones de concentration de contraintes et améliorer la durabilité des assemblages.

En synthèse, cette démarche permet de guider efficacement la conception vers des assemblages plus fiables et durables, tout en offrant un outil prédictif robuste pour l'ingénierie des structures collées. Ces résultats ouvrent la voie à des études complémentaires sur d'autres paramètres ou configurations, et confirment l'intérêt de l'optimisation multi-critères pour l'amélioration des performances mécaniques des assemblages industriels.

Conclusion général :

L'ensemble des chapitres consacrés à l'étude des assemblages collés renforcés par raidisseur met en lumière l'intérêt croissant de ces solutions pour la conception de structures mécaniques modernes, où la fiabilité, la durabilité et la performance sont des exigences majeures. Le recours au collage structural, combiné à l'optimisation géométrique des raidisseurs, s'impose aujourd'hui comme une réponse pertinente aux défis posés par la réduction de poids, l'assemblage de matériaux hétérogènes et la maîtrise des phénomènes de concentration de contraintes.

Les travaux présentés montrent que l'intégration d'une démarche scientifique rigoureuse – associant modélisation numérique avancée (éléments finis sous Abaqus), optimisation statistique multi-critères (MODDE5) et analyses expérimentales – permet d'identifier des configurations optimales pour les assemblages collés. Les modèles statistiques développés ont démontré une forte capacité explicative et prédictive, avec des coefficients de détermination (R^2) élevés et une robustesse avérée (Q^2), validant ainsi la pertinence de l'approche.

L'optimisation conjointe du facteur d'intensité des contraintes (propension à la propagation des fissures) et de la contrainte de cisaillement maximale (tenue de l'adhésif) a permis de dégager des recommandations précises : une largeur de raidisseur d'environ 4,7 et un positionnement autour de 16,5 offrent un compromis optimal entre résistance mécanique et durabilité. Les analyses de sensibilité ont mis en évidence l'importance de l'épaisseur et de la position du raidisseur, ainsi que des interactions entre paramètres, pour limiter les zones de concentration de contraintes et améliorer la tenue à la rupture et à la fatigue.

Les résultats obtenus confirment que l'assemblage par collage, lorsqu'il est bien maîtrisé (préparation des surfaces, choix de l'adhésif, conception adaptée), présente de nombreux avantages par rapport aux techniques traditionnelles : répartition homogène des efforts, allègement, absence de modification thermique des matériaux, isolation vibratoire et électrique, et adaptation à des matériaux fragiles ou minces. Toutefois, la durabilité des assemblages en service exige une attention particulière à la qualité de l'adhésion, au vieillissement des adhésifs et aux conditions d'environnement, notamment en milieux humides ou agressifs.

En synthèse, cette démarche intégrée offre un outil prédictif robuste pour guider la conception vers des assemblages collés plus fiables et durables, tout en ouvrant la voie à des études complémentaires sur d'autres paramètres (type d'adhésif, environnement, sollicitations complexes). Elle confirme l'intérêt de l'optimisation multi-critères et de la simulation numérique pour l'amélioration continue des performances mécaniques des assemblages industriels, répondant ainsi aux exigences croissantes de sécurité, de légèreté et de longévité dans l'ingénierie moderne.

Références :

[1] Schütz, W. (1996). A history of fatigue. Engineering Fracture Mechanics,54(2):263 – 300.
[2] Schijve, J. (2003). Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. International Journal of Fatigue, 25(8):679 – 702.
[3] A. Bazergui, T. Bui-cuok, A. Biron, G. Muntyre, C. Laberge
[4]Miller, K.J., and Zachariah, K.P. (1977) : Cumulative Damage Laws for Fatigue Crack Initiation and Stage I Propagation, Journal of Strain Analysis, Vol.12, No.4.
[5] R.C. Dimitriu, H.K.D.H. Bhadeshia (2010), Fatigue crack growth rate model for metallic alloys. Materials and Design 31, pp 2134–2139.
[6] Walker, EK., 1970. "The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7076-T6 aluminum. In: Effect of environment and complex load history on fatigue life", ASTM STP 462. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, pp.1–14.
[7] Forman, R. G., 1972. "Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory". Engineering Fracture Mechanics.4(2), pp. 333– 345.
[8] Hartman, A. and J. Schijve, 1970. "The Effects of Environment and Load Frequency on the crack propagation law for macro fatigue crack growth in aluminum alloys". Engineering Fracture Mechanics, 1(4), pp. 615-631.
[9] Dowling, Norman E., 1993. "Mechanical Behavior of Materials": Engineering Methods for Deformation Fracture and Fatigue, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
[10] Collipriest, J. E. Jr., 1972. "An Experimentalist's View of the Surface Flaw Problem.Physical Problems and Computational Solutions", J. L. Swedlow, Ed., American Society of Mechanical Engineers, New York pp. 43-62.
[11] McEvily, A. J., 1974. "Phenomenological and microstructural aspects of fatigue". Third International Conference on the Strength of Metals and Alloys, Cambridge, England; published by The Instituteand The Iron and Steel Institutes, Publication, W36, pp. 204-213.
[12] Zheng, Xiulin, A. Manfred, 1983. "Fatigue Crack Propagation in Steels".Engineering Fracture Mechanics, 18(3), pp. 965-973.
[13] Lal, D. N. and V. Weiss, 1978. "A notch analysis of fracture approach to fatigue crack propagation", Metallurgical Transactions, 9A, pp. 413-425.
[14] Wang, Wei and Cheng Thomas, 1994. "Fatigue Crack Growth Rate of Metal by Plastic Energy Damage Accumulation Theory". Journal of Engineering Mechanics, 120(4), pp. 776-795.
[15] Dowling, N. E. and J. A. Begley, 1976. "Fatigue crack growth during gross plasticity and the J integral: Mechanics of crack growth", ASTM STP 590, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 82-105.
[16] T.V. Duggan, 1977. "A theory for fatigue crack propagation". Engineering fracture Mechanics, 9, 735-747.
[17] A.M.L. Adib, C.A.R.P. Baptista. "An exponential equation of fatigue crack growth in titanium". Materials Science and Engineering A, 452- 453, pp.321-325.
[18] C.A.R.P. Baptista, A.M.L. Adib, M.A.S. Torres, V.A. Pastoukhov. "Describing fatigue crack growth and load ratio effects in Al 2524 T3 alloy with an enhanced exponential model".Mechanics of Materials 51 (2012) 66– 73.
[19] Elber, W., 1970. "Fatigue crack closure under cyclic tension". Engineering

FractureMechanics, 2, pp. 37-45.
[20] D. Kujawski. “Correlation of long and physically short-crack growth in aluminumalloys”, International Journal of Fatigue, 68(12): 1357-1369, 2001.
[21] D. Kujawski, S. Dinda. “Correlation and prediction of fatigue crack growth for different R-ratios using Kmax and K+ parameters. Eng. Fract.Mech. 71, 1779–1790, 2004.
[22] Elber, W., 1971. “The significant of fatigue crack closure” . In: Damage tolerance in aircraft structures, ASTM STP 486. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, pp. 230-242.
[23] M. Benguediab. “Etude de la propagation des fissures de fatigue sous spectres de chargement réduits”, Thèse de Doctorat d’Etat, Université de Poitiers, 1989.
[24] S. Chand, S. B. L. Garg. “Crack propagation under constant amplitude loading”. Engng Fracture Mech. 21, 1-30, 1985.
[25] M. Katcher, M. Kaplan. “Effect of R-factor and crack closure on fatigue crack growth for aluminium and titanium alloys”.ASTM STP 559, 264-282, 1974.
[26] V. Bachmann, D. Munz. “Crack closure in fatigue of titanium alloy”. Int.J. Fracture 11, 713-716, 1975.
[27] R.G Forman, S.R Mettu. “Behavior of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in Ti-6Al-4V alloy”. Fracture Mechanics 22nd Symposium, Vol. 1, ASTM STP 1131, H.A. Saxena and D.L. McDowell, eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
[28] J.R. Mohanty, B.B. Verma, P.K. Ray. “Prediction of fatigue crack growth and residual life using an exponential model: Part I (constant amplitude loading)”. International Journal of Fatigue 31 (2009) 418– 424.
[29] J.R. Mohanty, B.B. Verma. “Determination of fatigue crack growth rate from experimental data: a new approach”. Int. J. Microstructure and Materials Properties, Vol. 5, No. 1, 2010
[30] R.G. Forman, V.E. Hearney and R.M. Engle, "Numerical analysis of crack propagation in cyclic loaded structures ", Journal of Basic Engineering, Trans of ASME, Vol. 89, pp. 459-463, 1967.
[31] AA Roche. Le vide, les couches minces, vol. 257, page 197, 1991.
[32] Jacques Cognard. Journal of Adhesion, vol. 57, page 31,1996.
[33] Sener and Delannay. On the transition between adhesiveand cohesive modes of debonding during peeling of thin plates bonded with an epoxide adhesive. International Journal of Adhesion and Adhesives, vol. 21, no 4, pages 339–348, 2001.
[34] K. W. Allen. Adhesion measurement of films and coatings.Polymer International, vol. 39, no 1, page 77–77, 1996.
[35] Patrice Couvrat. Le collage structural moderne : théorie et pratique. Tec & Doc-Lavoisier, Paris, 1992.
[36] R. D. Adams. Adhesion, London, vol. 15, page 1, 1991.
[37] A. J. Kinloch. Adhesion and adhesives : Science and technology. Springer, 1987.
[38].Paroissien E., Contribution aux assemblages hybrides (boulonnes/colles)-Application aux jonctions aeronautiques. These de doctorat, Universite Toulouse III, 2006.
[39].Cheng P.C. Etude et optimisation de la reparation des composites stratifies par collage des patchs externes. These de doctorat, Universite de Bourgogne, 2010.
[40].Grabovac I., Whittaker D., Application of bonded composites in the repair of ships

structures - A 15-year service experience. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40, 2009, pg. 1381-1398.
[41].Breitzman T., Iarve E., Cook B., Schoeppner G., Lipton R. Optimization of a composite scarf repair patch under tensile loading. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40, 2009, pg. 1921-1930.
[42].Ridha M., Tan V., Tay T. Traction-separation laws for progressive failure of bonded scarf repair of composite panel. Composite Structures, 93, 2011, pg. 1239-1245.