



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité

Thème

Etude de relaxation des contraintes autour d'une fissure par perçage des trous:

Modélisation numérique

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom: Brai

Prénom: Fadel Allah

Nom: Daoud

Prénom: Smain Walid

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
NOUREDDINE Rachid	MCA	IMSI - Univ. Oran 2	Président
YAHIAOUI Reda	MCB	IMSI - Univ. Oran 2	Encadreur
ADJELOUA Abdelaziz	MAA	IMSI - Univ. Oran 2	Examineur

Juin 2018

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier en premier lieu Allah, le tout puissant, de m'avoir donné autant de courage, de patience et de volonté pour atteindre ce but.

- Mes premiers remerciements vont naturellement à mon Directeur de mémoire, Monsieur YAHIAOUI Reda pour ses conseils et le partage de ses compétences scientifiques. Ce fut un plaisir de travailler avec lui. J'ai également apprécié la grande liberté qu'il m'a accordée pour finaliser ce mémoire ainsi que sa passion pour la recherche.
- Merci également au Président du jury Monsieur NOUREDDINE Rachid d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire. Je remercie Monsieur ADJELOUA Abdelaziz d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour sa participation au jury.
- Je ne peux pas trouver les bons mots à adresser à ma famille. Pour ma mère et mon père, mon frère et ma sœur, ma femme, qui sont tous formidables.

Table des Matières

Chapitre I : La mécanique de la rupture	2
I.1 Notions de la mécanique de la rupture	3
I.2 Mécanismes de rupture.....	4
I.2.1 Mode de la rupture	4
I.3 Description du champ des contraintes a l'extrémité d'une fissure a l'aide du facteur d'intensité des contraintes	5
I.3.1 Facteur d'intensité de contraintes.....	8
I.3.2 Concentration e contrainte près d'un défaut	8
I.4 Taux de restitution d'énergie	9
I.5 Propagation de fissure par fatigue	10
I.6 Mécanisme de propagation.....	12
I.7 Loi de propagation.....	12
I.8 Conclusion.....	14
ChapitreII : Techniques de réparation des structures fissurées.....	16
II.1 Introduction.....	17
II.2 Méthodes de réparations des structuresmétalliques	17
II.2.1 Méthode demeulage	17
II.2.2 Méthodes de perçage.....	18
II.2.2 Méthodes d'nfiltrqtion	20
II.2.2 Méthodes de perçage avec expansion(cold working)	21
II.2.2 Réparation par collage de patch	21
II.2.2 Procédé pour reparation par patches mous	23
II.2.2 Procédé pour reparation par patches durs	24
II.3 Conclusion	25
Chapitre III : La méthode des éléments finis	31
III. 1Introduction.....	32
III.2 Historique	32

III.3 Modélisation et discrétisation	33
III. 5 Les Avantages de la M.E.F.....	34
III. 6 Étapes de la méthode des éléments finis.....	34
III.6.1 Classement d'éléments fini	34
III.6.3 les nœuds	35
III.6.4 Les forces nodales.....	35
III.6.5 Degrés de liberté	35
III.6.6 Condition d'équilibre	36
III.6.7 Condition de compatibilité	36
III.7 Présentation du code de calcul Abaqus/CAE™	37
III.7.1 Code de calcul Abaqus/CAE™	37
III.7.2 Système d'unités dans le code de calculAbaqus.....	38
III.8 Conclusion	38

Chapitre IV : Modélisation et discussion..... 39

IV. 1Introduction	40
IV.2 Présentation de l'éprouvette	40
IV.3 Le maillage	41
IV.4 Calcul du facteur de concentration de contrainte	42
IV. 5 Influence du diamètre du trou d'arrêt.....	44
IV.6 Influence de la distance entre le trou d'arrêt et les trous auxiliaires.....	45
IV. 7 Influence de l'angle et du diamètre des trous auxiliaires	45
IV. 8 Conclusion.....	48

Conclusion Générale 49

LISTE DES FIGURES

Liste des Figures

Chapitre I : La mécanique de la rupture..... 2

Figure I.1: Schématisation des trois modes de rupture4
 Figure I.2: Champ de Contraintes au voisinage de l'extrémité5
 Figure I.3: Définition des modes de sollicitation6
 Figure I.4 : Contrainte σ_{yy} ($\theta = 0$) perpendiculaire au plan de fissuration7
 Figure I.5 : défaut elliptique dans une plaque infinie.....9
 Figure I.6 : Sollicitation de fatigue a amplitude constante.....10
 Figure I.7 : Courbe de propagation12

Chapitre II : Technique de réparation des structures fissurées 16

Figure II.1: Méthode de meulage, (a) défaut de fissure, (b) réparation par meulage,(c)18
 Figure II.2: Perçage au fond de la fissure19
 Figure II.3: Dimensions géométrique de la fissure et trou de réparation19
 Figure II.4 : Processus de l'expansion21
 Figure II.5 : Schéma de réparation par patch externe23
 Figure II.6 : Schéma de la réparation biseautée par patch24
 Figure II.7 : Procédé final pour la réparation par patches mous25

Chapitre III : La méthode des éléments finis 31

Figure III.1: Étape de l'analyse d'un problème aux limites33
 Figure III.2: Maillage du domaine en éléments triangulaires à trois nœuds33
 Figure III.3: Étapes à suivre pour la programmation37

Chapitre IV : Modélisation et discussion..... 40

Figure IV.1: Géométrie et dimensions de l'éprouvette étudiée41
 Figure IV.2: La géométrie du quart de l'éprouvetteétudiée42
 Figure IV.3: Type du maillage utilisé43
 Figure IV.4 : la répartition des contraintes sur le plan de l'éprouvette.....44
 Figure IV.5 : variation de la contrainte le long de l'axe central de l'éprouvette.....44
 Figure IV.6 : variation du K_t en fonction de d_1 au point A du type de base45
 Figure IV.7 : La variation du K_t normalisé en fonction de δ 46
 Figure IV.8 : la répartition des contraintes sur le plan de l'éprouvette ou $\delta=1\text{mm}$ 46
 Figure IV.8 : la répartition des contraintes sur le plan de l'éprouvette ou $\delta=6\text{mm}$ 46
 Figure IV.10: variation du facteur de K_t pour différentes dispositions de θ et d_247
 Figure IV.11: Variation de l'angle limite en fonctiondu diamètre du trou.....48

LISTE DES TABLEAUX

Liste Des Tableaux

Chapitre III : La méthode des éléments finis	31
TableauIII.1: Système d'unités pour la programmation	38
Chapitre IV : Modélisation et discussion.....	40
TableauIV.1: Caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé	41
TableauIV.2: les minimum valeurs de K_t pour $d_1=2\text{mm}$, 3mm, 4mm.....	46
TableauIV.3: les valeurs de l'angle limite en fonction du d_i	47

Introduction Générale

Introduction Générale

De nombreuses défaillances dans les applications d'ingénierie ou les composants de machines ont été causées par une fissure de fatigue initiée à partir des zones où il y avait une concentration de contrainte. Cependant la croissance de la fissure occupe une grande proportion de la durée de vie des composants en service. Par conséquent, il devient nécessaire de développer des techniques permettant de ralentir ou d'arrêter la croissance de ces fissures. Plusieurs études ont été menées dans ce sens et qui ont montré l'efficacité relative de certaines d'entre elles. L'une des techniques les plus populaires consiste à percer un trou, appelé trou d'arrêt, au niveau de la pointe de la fissure pour éliminer la singularité du fond de fissure.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'intérêt de l'ajout des trous auxiliaires au trou d'arrêt de la fissure. Cet apport bénéfique ou non de la présence de ces trous auxiliaires est quantifié en terme du facteur de concentration de contrainte, qui est obtenu par modélisation en éléments finis. Pour cela, le logiciel Abaqus est utilisé dans ce cas et qui va permettre aussi d'étudier l'influence de la taille des trous et de leur disposition géométrique sur la réduction du facteur de concentration de contrainte.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres:

- Le premier chapitre présente un état de l'art sur la mécanique linéaire de la rupture d'un point de vue théorique et numérique. Il y est rappelé les différentes propriétés caractérisant l'état mécanique au voisinage de la pointe de fissure où entaille en termes de facteurs d'intensité de contrainte.
- Le chapitre deux rassemble les différentes méthodes qui ont été développées pour arrêter ou ralentir la propagation des fissures détectées dans une structure.
- Le chapitre trois traite la modélisation de la structure par simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis. Une introduction à la méthode des éléments finis, ses propriétés et caractéristiques est présentée, ainsi que le logiciel de base « Abaqus » qui a servi dans notre modélisation.
- Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation numérique dans laquelle l'effet de la présence des trous auxiliaires sur la réduction de la concentration de contraintes au voisinage du défaut. L'effet de la taille des trous et de leur disposition géométrique est étudié et les principaux résultats obtenus sont présentés

Chapitre I
La mécanique de la rupture linéaire

I.1 Notions de la mécanique de la rupture

La mécanique de la rupture a été introduite par Griffith vers 1920. Elle a pour objectif de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide de paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau. Les premiers développements théoriques d'analyse des champs de déplacements, de déformations et de contraintes au voisinage d'une fissure ont été entrepris par Westergaard vers 1940. Une théorie de la rupture basée sur la stabilité de la fissure valable uniquement pour les matériaux fragiles, ne tenant pas compte de la dissipation de l'énergie due à la plastification. En 1948, Irwin proposa une modification de la théorie de Griffith en incluant justement dans le bilan énergétique, l'énergie due à la plastification, pour que l'approche de Griffith soit applicable aux matériaux ductiles.

En 1956, un groupe de chercheurs de la marine américaine, ont développé le concept du taux de restitution d'énergie à partir de la théorie de Griffith sous une forme facilement exploitable par les concepteurs de structures. En 1957, s'appuyant sur les travaux de Westergaard, Irwin montra que les déplacements et les contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure peuvent être décrits à l'aide d'un paramètre unique relié au taux de restitution d'énergie. Ce paramètre caractérise l'état de sollicitation dans la région dans laquelle la rupture se produit, il est appelé facteur d'intensité de contrainte (FIC). La période s'étalant de 1960 à 1980 a vu une intensification des recherches sur la rupture avec deux écoles concurrentes. D'une part, les tenants de l'approche utilisant la mécanique linéaire de la rupture et d'autre part ceux qui s'intéressaient essentiellement à la plastification qui se développe à l'extrémité d'une fissure. Pour tenir compte de l'effet de cette plastification sur les champs de contraintes et de déplacements à l'extrémité d'une fissure, plusieurs auteurs comme Barenblatt proposèrent ce qu'on appelle une correction de la zone plastique. La taille de la fissure est alors augmentée de cette zone plastique pour retrouver les champs de contraintes élastiques décrits par le FIC. Plus tard, Hutchinson en 1968, Rice et Rosengren (HRR) développèrent un nouveau paramètre appelé intégrale J. Ce paramètre décrit parfaitement la répartition des contraintes dans les zones plastifiées (champ HRR). [1]

I.2 Le mécanisme de rupture:

Le mécanisme de rupture est un processus mécanique produisant au sein d'un matériau une discontinuité locale de matière appelée fissure. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture. Par rapport au facteur temps. On distingue deux types de rupture :

- **Rupture fragile** : la rupture fragile est caractérisée par l'absence de déformation plastique macroscopique, et donc par la propagation très rapide possible des fissures (consommation d'énergie faible).
- **Rupture ductile** : la rupture ductile semble liée essentiellement à la présence d'inclusion ou de précipités. Dans ce mode de rupture, la déformation plastique macroscopique est en général importante (consommation d'énergie grande).

I.2.1 Modes de rupture :

La propagation d'une fissure peut se faire suivant trois modes de déplacement des faces de la fissure dans un plan défini. Elle peut aussi se faire suivant des modes mixtes qui les combinent tous les trois. La figure (I.1) illustre les trois modes de rupture.

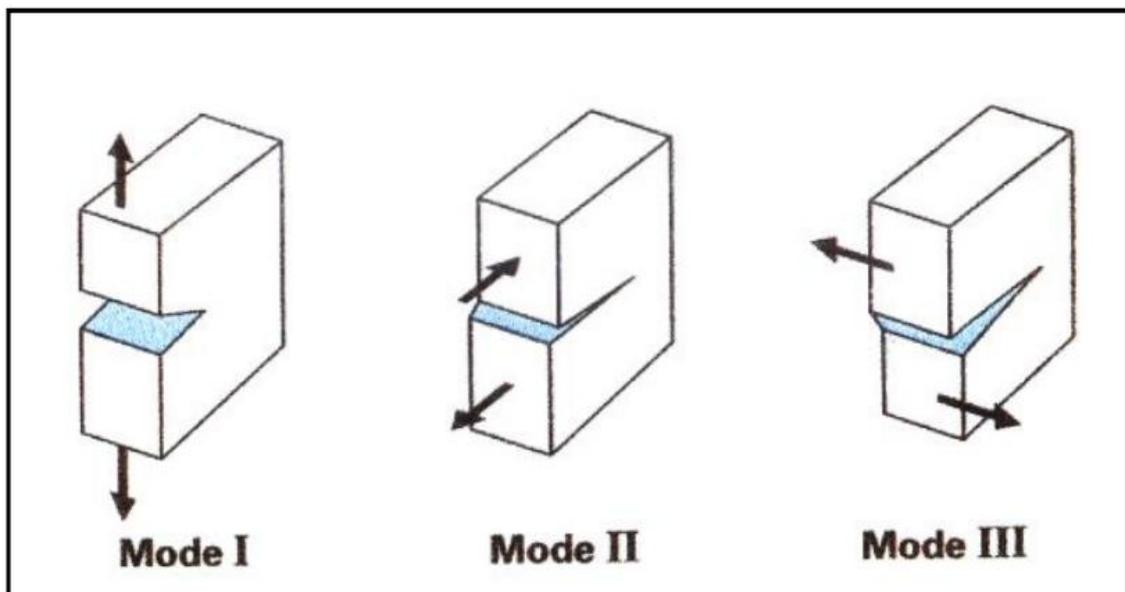


Figure I.1: Schématisation des trois modes de rupture

- **Mode I** : les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement l'une par rapport à l'autre, c'est le mode par ouverture.
- **Mode II** : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan, et dans une direction perpendiculaire au front de fissure. Il est appelé aussi mode par glissement droit.
- **Mode III** : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de fissure, c'est le mode de glissement vis.

Le mode I est considéré comme le plus dangereux en raison de l'ouverture par traction qui favorise l'initiation et la propagation des fissures. C'est le type le plus répandu dans le cas des matériaux fragiles. Par conséquent, il est le plus étudié [2].

I.3 Description du champ des contraintes à l'extrémité d'une fissure à l'aide du facteur d'intensité des contraintes

Dans un matériau dont le comportement est élastique et linéaire, la forme générale du champ des contraintes au voisinage de l'extrémité d'une fissure est de la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} a_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad (I.1)$$

Où les coordonnées (r, θ) sont repérées par rapport à l'extrémité de la fissure (figure I.2). La fonction adimensionnelle $f_{ij}(\theta)$ dépend du mode de sollicitation, l'autre fonction adimensionnelle g_{ij} dépend à la fois du mode de sollicitation, de l'état de contrainte et de la géométrie du corps fissuré.

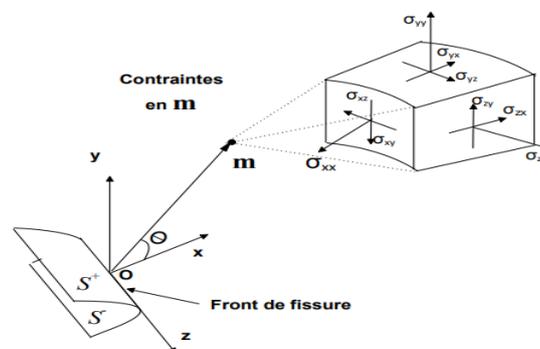


Figure I.2 : Champ de Contraintes au voisinage de l'extrémité

Au voisinage immédiat de l'extrémité de la fissure, les contraintes présentent une singularité en $1/\sqrt{r}$ (c'est à dire lorsque $r \rightarrow 0$, la contrainte tend vers l'infini). Comme les termes d'ordre plus élevé $r^{\frac{m}{2}}$ (avec $m > 2$) de la relation II.24 sont négligeables devant $1/r$, la zone la plus critique est bien le voisinage immédiat de l'extrémité de la fissure. Pour ces raisons, seuls les termes en $1/\sqrt{r}$ sont considérés. On dit que les champs de contraintes asymptotiques sont de la forme

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (I.2)$$

Ces champs asymptotiques sont décrits et exprimés à l'aide des facteurs d'intensité des contraintes K (K_I , K_{II} ou K_{III} : selon le mode de sollicitation considéré - mode I, II ou III), figure I.3 :

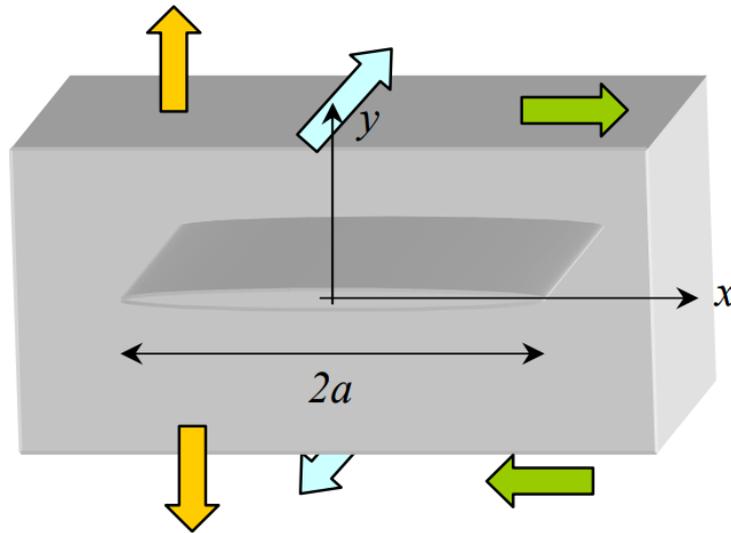


Figure I.3 : Définition des modes de sollicitation

$$\text{Mode I: } \begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{cases} \quad (I.3)$$

$$\text{Mode II: } \begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

$$\text{Mode III: } \begin{cases} \sigma_{13} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \sigma_{23} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

Figure I.4 met en évidence la zone où la singularité domine. Au delà de cette zone, on retrouve les conditions limites loin de la zone fissurée et la contrainte σ_{yy} tend progressivement vers la contrainte appliquée σ_{∞} .

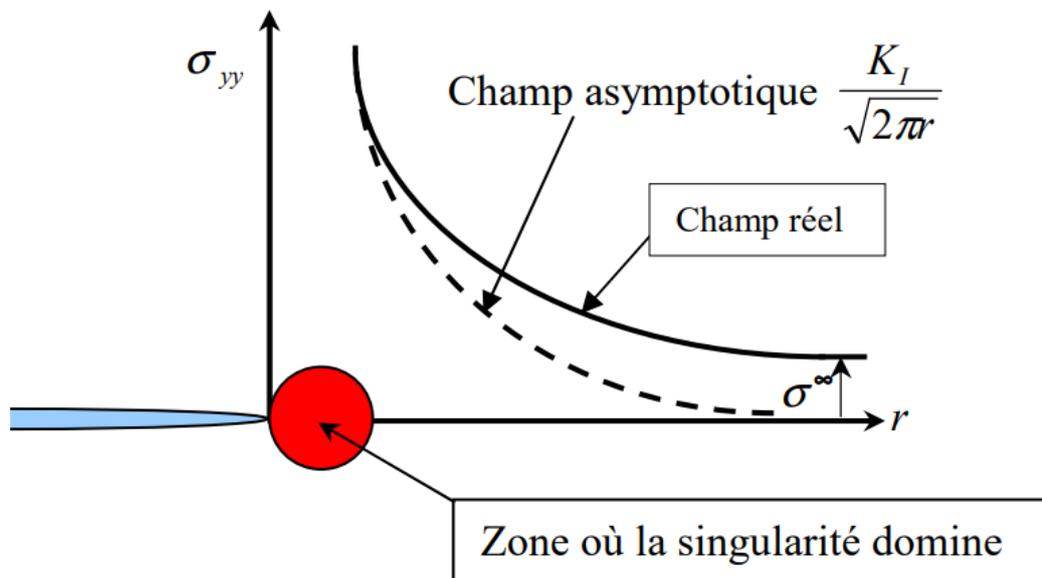


Figure I.4 : Contrainte σ_{yy} ($\theta = 0$) perpendiculaire au plan de fissuration

Le facteur d'intensité des contraintes (FIC), noté K_I en mode I, est proportionnellement attaché à l'amplitude de la zone de singularité : autrement dit, le FIC et les contraintes augmentent proportionnellement. Il s'agit donc d'un procédé de caractérisation des conditions à l'extrémité de la fissure : lorsque le FIC est connu, les champs des contraintes, des déformations et des déplacements le sont aussi. Le facteur d'intensité des contraintes est un des concepts les plus importants de la mécanique linéaire de la rupture [3].

I.3.1 Facteurs d'intensité des contraintes

Les facteurs d'intensité de contraintes correspondent à des cinématiques particulières du mouvement des fissures. Dans le cadre de la mécanique linéaire de la rupture, les contraintes et les déformations au voisinage d'une fissure admettent un développement asymptotique dont le terme singulier s'écrit [4] :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (\text{I.6})$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} g_{ij}(\theta) \quad (\text{I.7})$$

K est le Facteur d'Intensité des Contraintes (FIC) en mode α , avec $\alpha=I, II$ ou III . Les fonctions f et g donnent la répartition angulaire; leurs expressions en contraintes et déformations planes. Lorsque l'on se trouve en mode I pur, l'état local de contraintes et de déformations peut être caractérisé à l'aide du seul paramètre.

Les FIC caractérisent la force de la singularité du champ des contraintes à l'extrémité de la fissure. Ils sont proportionnels aux discontinuités des déplacements des lèvres de la fissure, et ne dépendent que de la répartition des efforts extérieurs et de la géométrie de la fissure.

I.3.2 Concentration des contraintes près d'un défaut

Si on considère un défaut de forme elliptique de longueur $2a$ et de rayon à fond d'entaille ρ (figure II.5), la contrainte locale à son extrémité A est:

$$\sigma_L(A) = \sigma_a \left(1 + \frac{2a}{b}\right) = \sigma_a \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right) \quad (\text{I.8})$$

Dans le cas d'une entaille très aiguë, $\rho \ll a$ on obtient:

$$\sigma_L(A) = 2\sigma_a \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (\text{I.9})$$

Le facteur amplifiant la contrainte, c'est à dire le rapport $K_t = 2\sqrt{a/\rho}$, est appelé le facteur de concentration de contrainte. Il peut être très grand pour des entailles aiguës dont la forme s'apparente à des fissures [3].

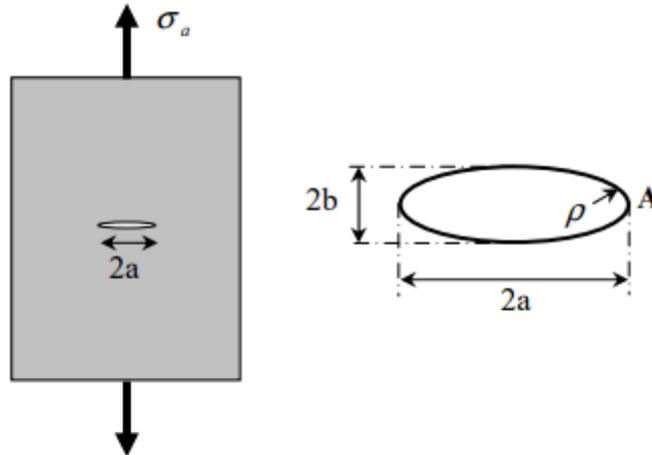


Figure I.5 : défaut elliptique dans une plaque infinie.

I.4 Taux de restitution d'énergie :

On se basant sur des considérations thermodynamiques GRIFFITH a mis en évidence le fait que la rupture est un phénomène consommateur d'énergie, car pour augmenter la surface d'une fissure dans un matériau il faut fournir un certain travail [2]. Le bilan énergétique du système composé des forces extérieures et du corps fissuré s'écrit:

$$\frac{dW}{dA} = \frac{dU}{dA} + \frac{dT}{dA} \quad (I.9)$$

W : Travail des forces extérieures

U : l'énergie élastique stockée dans les matériaux

A : surface de la fissure

T : la somme de toutes les énergies dissipées de façon irréversible

L'énergie cinétique étant supposée nulle (situation quasi-statique). De cette relation découle l'énergie nécessaire à la création de surface (G) :

$$\frac{d}{dA}(W - U) = \frac{dT}{dA} = G \quad (I.10)$$

Elle est appelée taux de restitution d'énergie. L'amorçage de la fissure se caractérise par une valeur critique du taux de restitution d'énergie notée G_{IC} d'où le critère de rupture:

$$G \geq G_{ic} \quad (I.11)$$

I.5 Propagation de fissures par fatigue

Dans le cas de charges statiques ou monotones et en s'appuyant sur la ténacité du matériau considéré, les charges maximales que la structure contenant des défauts peut supporter peuvent être calculées. Inversement, lorsque l'on connaît la valeur de charge agissant sur la structure, on peut déduire la taille critique des défauts tolérables. Où, il suffit de considérer les structures qui nous entourent pour constater qu'elles sont soumises, en service, à des charges d'amplitude variable dans le temps, qu'il s'agisse des ailes ou du train d'atterrissage d'un avion, des pièces de toutes les machines tournantes, etc. L'application et le retrait d'une charge, même si sa valeur est inférieure à la charge maximale admissible calculée par l'approche de mécanique de la rupture, répétés un grand nombre de fois, peuvent entraîner la rupture de la structure. Il s'agit du phénomène de fatigue [4].

La charge appliquée est une contrainte qui peut varier de façon sinusoïdale, périodique ou aléatoire. Cependant, par souci de simplicité on effectue les essais de fatigue, au laboratoire, en utilisant des chargements qui varient de façon simple (sinusoïdale ou triangulaire). Dans ce cas, les variables caractéristiques de l'essai sont (Fig.1.8):

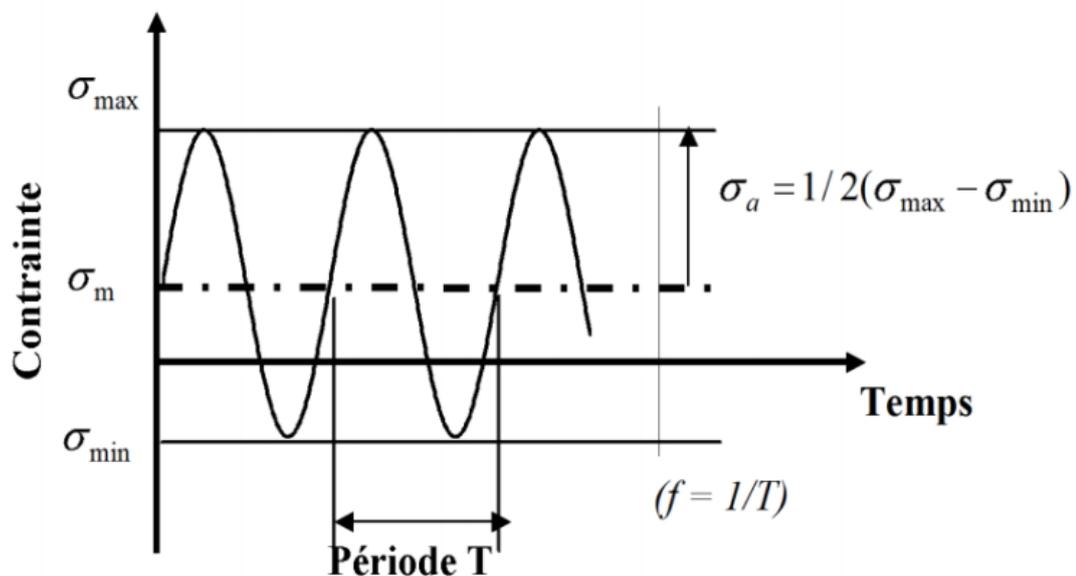


Figure I.6 : Sollicitation de fatigue à amplitude constante

- les contraintes maximale σ_{\max} et minimale σ_{\min} ;
- l'amplitude de contrainte $\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$;
- la contrainte moyenne ou contrainte statique ;
- le rapport des contraintes $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$;
- la période T (ou la fréquence $f = 1/T$)

Selon l'amplitude de la contrainte, on peut définir deux grands domaines :

- Fatigue endurance : l'amplitude de contrainte est faible. Macroscopiquement, la déformation reste pratiquement élastique. La durée de vie de la pièce (Nombre de cycles nécessaires pour entraîner la rupture) est en général supérieure à 10^4 ou 10^5 cycles.
- Fatigue oligocyclique : l'amplitude de contrainte est importante. Elle provoque à chaque cycle une déformation plastique. La durée de vie de la pièce est beaucoup plus courte ($N < 10^4$ cycles).

L'application d'un chargement cyclique (d'amplitude constante ou variable) à une pièce se traduit par l'apparition d'un dommage qui comprend trois stades :

- **Stade I**: si le chargement est en dessous d'un certain seuil, la fissure ne se propage pas au niveau macroscopique. C'est un stade de croissance rapide des microfissures qui atteignent des longueurs de l'ordre de quelques microns en surface après quelques millions de cycles.
- **Stade II**: la fissure se propage «le plus souvent» dans un plan perpendiculaire à la direction de l'effort appliqué. C'est un stade de progression plus lente de la fissure en surface dont la durée dépend de l'amplitude de la contrainte
- **Stade III**: il correspond au cas de chargements élevés (progression rapide qui précède de peu la rupture) pour lesquels une déchirure se produit dans le matériau. Les vitesses de propagation très élevées observées dans ce domaine

conduisent rapidement à la rupture de la pièce.

I.6 Mécanisme de propagation

Les ruptures en fatigue présentent généralement des stries sur la surface de rupture. Cependant ces stries ne sont pas présentes lorsque la rupture se passe sous vide. Plusieurs modèles ont été proposés pour expliquer la formation de ces stries, dont le modèle de Laird ou celui de Pelloux. Ces mécanismes concernent le domaine II (domaine de Paris).

Proche du seuil les mécanismes sont différents, à ce niveau on n’observe plus de stries ; la distance de propagation par cycle déduite des valeurs macroscopiques est alors de l’ordre des distances interatomiques. La propagation est alors discontinue et régie par d’autres mécanismes (transgranulaires, ou selon des plans cristallographiques simples).

I.7 Lois de propagation

La loi de propagation des fissures peut se réduire à une formulation générique si l’on introduit un nouveau paramètre : l’amplitude du facteur de concentration des contraintes $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$. Ainsi on observe la similarité des courbes da/dN en fonction de N pour tout essai, pour autant que le ΔK soit identique.

On peut exprimer ΔK en fonction du rapport de charge :

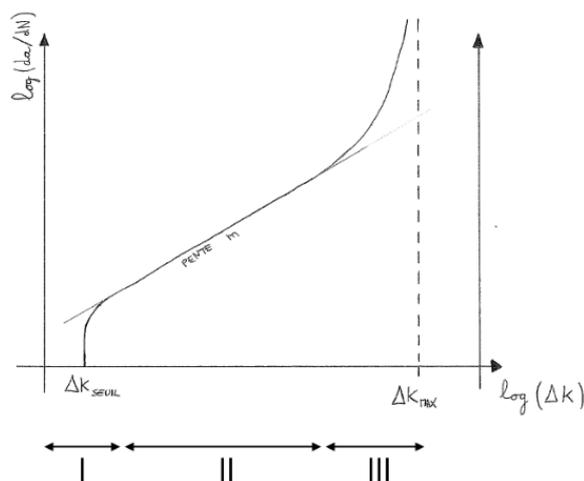


Figure I.7 : Courbe de propagation de fissure

On distingue généralement trois domaines :

- I. Pour de faibles valeurs de ΔK on observe une rapide décroissance de la vitesse de propagation jusqu'à une valeur seuil de ΔK correspondant à la limite où la progression de la fissure n'est plus mesurable ΔK_{seuil} . Dans ce domaine la microstructure, le rapport de charge et l'environnement ont une influence sur la vitesse de progression. Pour des valeurs de ΔK inférieures à ΔK_{seuil} les cracks sont considérés comme dormants.
- II. Domaine de Paris - Pour des valeurs intermédiaires de ΔK la courbe présente une partie linéaire, correspondant à une évolution des vitesses de fissuration selon la loi expérimentale de Paris :

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m$$

- III. Lorsque ΔK augmente et que K_{max} approche le paramètre de ténacité K_C du matériau la vitesse de propagation s'accélère et entraîne une rupture rapide. En pratique, ce domaine n'a pas une grande importance puisque les structures sont généralement dimensionnées pour éviter de fonctionner dans ce domaine.

I.8 Conclusion

Ce premier chapitre permet de fixer le cadre dans lequel s'inscrit notre travail. D'un point de vue théorique, l'analyse asymptotique en mécanique linéaire de la rupture a défini les paramètres décrivant la rupture. Nous avons rappelé les principaux travaux relatifs à la détermination du champ de contraintes au voisinage d'une entaille et le facteur de concentration de contraintes dans le cas élastique. La majorité des modèles permettant de déterminer la distribution des contraintes au voisinage du défaut sont basées sur les travaux de Williams. Nous constatons que pour un défaut type entaille, la distribution des contraintes peut être approximativement formulée par des caractéristiques telles que la distance effective, l'acuité d'entaille et le facteur d'intensité de contraintes.

Références

- [1] Tahar N, " Réhabilitation et Renforcement des Canalisations sous pression en présence des défauts de surfaces", Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf (2011)
- [2] Djeloun Y, "Etude de la rupture en mode 1 d'ouverture des matériaux composites", Université mohamed Khider de Biskra (2008)
- [3] Zaghloul A, "Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture", Université de lorraine.(2016)
- [4] Saib M, " Etude expérimentale et numérique d'une structure fissurée sous contrainte de fatigue", Université de M'Hamed Bougara de Boumerdes (2012)

Chapitre II

Techniques de réparation des structures fissurées

II.1 Introduction

Dans les structures mécaniques soumises à des chargements cycliques, les fissures peuvent s'amorcer et se propager. Dans de tels cas, les industriels sont amenés à faire face à ce problème et à trouver des solutions avant que la fissure n'atteigne une taille critique afin d'éviter la rupture brutale préjudiciable à la sécurité.

Pour y parvenir, le ralentissement ou l'arrêt de la propagation d'une fissure de fatigue peut être obtenu par la réduction des contraintes effectives locales, la réduction des concentrations locales de contraintes, l'introduction de contraintes résiduelles de compression, le renforcement des matériaux fissurés. Ces actions constituent des méthodes qui conduisent à la réduction des contraintes effectives au fond d'une fissure et par conséquent à la réparation (arrêt ou ralentissement notable de la fissure) des composants fissurés par fatigue.

Plusieurs méthodes ont été développées pour arrêter ou ralentir la propagation des fissures détectées dans une structure. Dans cette partie, nous donnons d'abord un aperçu de quelques méthodes de réparation des composants fissurés par fatigue. En particulier, nous soulignons les effets bénéfiques de la méthode du trou d'arrêt.

II.2 Méthodes de réparations des structures métalliques

Il est bien connu que la singularité en pointe de défaut (fissure, entaille) contribue à accentuer sa progression. Ce qui tend à réduire la durée de vie des structures endommagées. Plusieurs techniques permettant de réparer les effets néfastes d'un défaut.

II.2.1 Méthode de meulage

Cette technique de réparation est basée sur le principe d'élimination des défauts par enlèvement de matière, figure II.1. Elle permet ainsi d'éliminer la singularité créée par le front de la fissure.

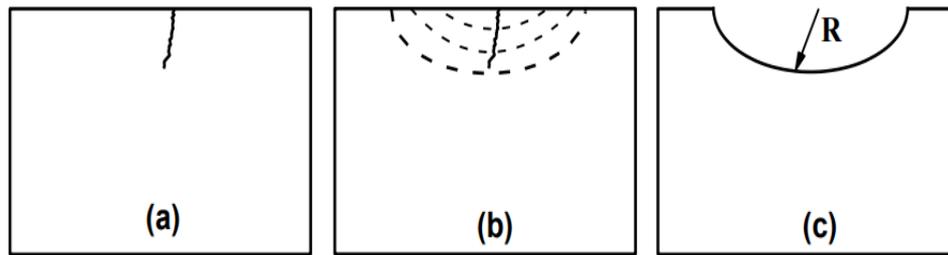


Figure II.1 : Méthode de meulage, (a) défaut de fissure, (b) réparation par meulage, (c) structure après réparation

C'est une technique simple qui nécessite des moyennes moins coûteuses. Le meulage peut donner de bons résultats en termes de durée de vie des structures réparées. Cependant, Cette technique peut fragiliser la structure du fait de la diminution localisée de la section. Cela nécessite une vérification par calculs de la tenue mécanique de telles structures après réparation.

Elle est souvent recommandée dans le cas des réparations des fissures dans des structures épaisses (appareils à pression, rails, ...). Elle est aussi utilisée comme technique de parachèvement dans le cas des joints soudés en vue de permettre l'extension de leur durée de vie [1].

II.2.2 Méthodes de perçage

Le perçage d'un trou au fond d'une fissure permet un arrêt temporaire de la propagation de la fissure. Cette méthode est basée sur la modification géométrique du fond de la fissure. C'est une méthode largement répandue pour la réparation des structures métalliques endommagées. Elle est effectuée dans le but d'augmenter la durée de vie en réduisant la contrainte maximale (figure II.2). Cette technique apporte plusieurs avantages : elle est simple à réaliser, reproductible et utilisable pour des structures qui ne sont accessibles que dans d'un seul côté. Elle permet de garder la structure en service en attendant un éventuel changement de la pièce endommagée. L'amorçage de la fissure est retardé par le perçage du trou et la durée de vie augmente avec l'accroissement du diamètre du trou. Le perçage d'un ou de plusieurs trous autour du défaut est une autre méthode proposée par plusieurs chercheurs pour réparer la structure fissurée.

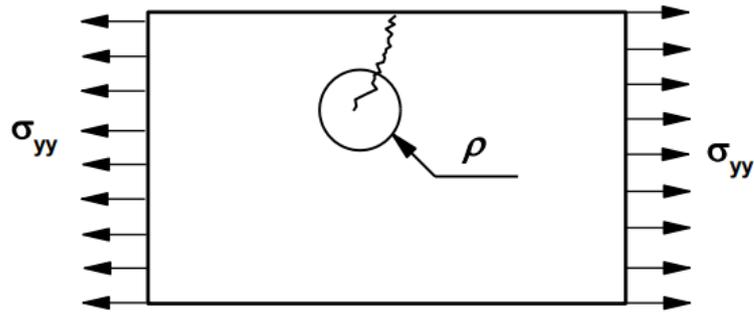


Figure II.2 : perçage au fond de la fissure

Ce processus de réparation cause le retard de propagation de la fissure. Un plus grand rayon de trou réduit le facteur de concentration de contraintes, mais il faut cependant faire attention à la diminution de la section du ligament restant.

Le facteur de concentration de contraintes, dans le cas d'un trou percé en fond d'une fissure est donné par la formule suivante :

$$Kt = 1 + 2\sqrt{a/\rho} \quad (\text{II.1})$$

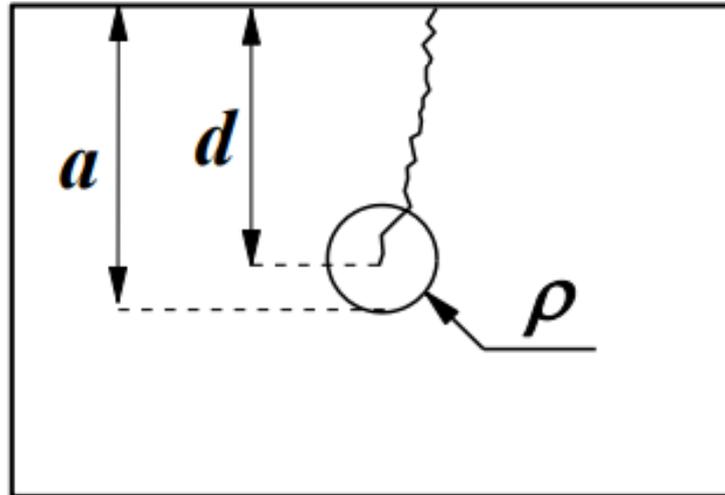


Figure II.3 : Dimensions géométrique de la fissure et trou de réparation

Avec d : longueur initiale de la fissure, ρ : le rayon du trou percé et $a=d+\rho$: la longueur de la fissure après perçage.

L'existence d'un trou en pointe d'une fissure entraîne une réduction du facteur local de concentration de contrainte K_t , du fait de l'élimination de la singularité. Dans le domaine élastique, les contraintes locales peuvent être obtenues à partir du facteur de concentration de contraintes défini par :

$$K_t = \sigma_{max}/\sigma_a \quad (II.2)$$

En figure II.3, la singularité de la fissure est éliminée par un perçage de deux trous au fond du défaut. L'évolution du facteur de concentration de contrainte est obtenue pour différentes valeurs du diamètre. Il est bien admis que l'augmentation du rayon du trou contribue à diminuer la contrainte maximale en pointe de fissure, et s'accompagne d'une réduction du facteur de concentration de contrainte K_t [1].

II.2.3 Méthode d'infiltration

Le principe de cette méthode est d'infiltrer au fond de la fissure une résine afin de provoquer artificiellement la fermeture de la fissure. Ainsi, l'amplitude efficace du chargement, qui pilote l'ouverture et la propagation de la fissure, est diminuée. Comme la vitesse de propagation dépend essentiellement de ce paramètre, celle-ci est ralentie par ce procédé.

L'infiltration de la résine époxy est capable d'arrêter la propagation d'une fissure à de faibles niveaux du facteur d'intensité de contrainte. La nature du matériau pour l'infiltration, la taille des particules de ces matériaux a une influence sur l'amélioration de la durée de vie [2].

II.2.4 Méthode du perçage avec expansion (cold working)

L'expansion d'un trou est un processus mécanique utilisé pour améliorer l'effet bénéfique du perçage en fond de fissure et pour retarder ou arrêter la propagation de la fissure. L'expansion est obtenue par un olivage du trou jusqu'à un certain diamètre final. Cette technique a en fait pour but de prolonger la durée de vie des structures en fatigue. Les éprouvettes avec expansion peuvent atteindre une amélioration de la durée de vie de 10 fois par rapport aux éprouvettes sans expansion. Cette amélioration est attribuée à l'effet des contraintes résiduelles de compression induites par la déformation plastique au bord du trou [2].

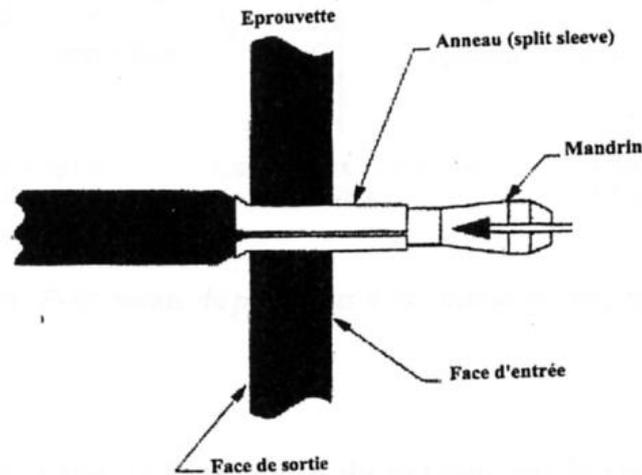


Figure II.4: Processus de l'expansion

II.2.5 Réparation par collage de patches:

- **Réparation par patches externes**

La réparation par patch externe consiste à insérer un bouchon dans la zone « nettoyée », puis à appliquer une couche de colle et un patch externe. Cette méthode demande peu de préparation. Sa mise en œuvre est simple et rapide. Par contre, la réparation induit un alourdissement de la structure ainsi qu'une augmentation de l'épaisseur de celle-ci. Bien entendu, la qualité de cette réparation dépend grandement de la qualité du joint collé.

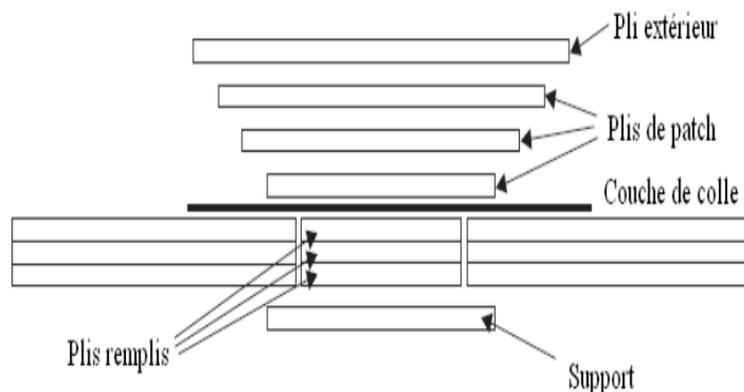


Figure II.5. Schéma de réparation par patch externe

- **Réparation par patch intérieur**

La réparation par patch biseauté intérieur demande dans un premier temps de Patches internes 23 nettoyer la partie endommagée avec un angle biseauté de 2 à 3° afin d'obtenir une surface de collage importante. Ensuite, le remplissage se fait couche par couche. Les charges sont transmises essentiellement par l'interface entre le patch et la plaque composite. Cette méthode, couramment utilisée dans l'industrie, est réputée du fait des bonnes performances mécaniques finales obtenues. En plus, la géométrie du système réparé est peu modifiée. En revanche, il est relativement difficile d'obtenir un petit angle biseauté. Certains équipements sont nécessaires et le temps de réalisation est conséquent. Enfin, la réparation demande une bonne technique de réalisation.

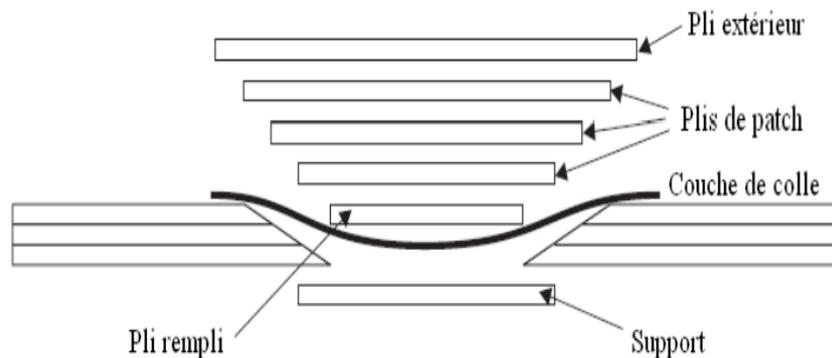


Figure II.6. Schéma de la réparation biseautée par patch intérieur

II.2.4.1 Procédé pour la réparation par patches mous

La réparation par patches mous nécessite un cycle de cuisson sous pression pour la polymérisation des patches et de la colle. La position des patches par rapport à la plaque à réparer doit être précise et l'épaisseur de joint de colle doit être uniforme afin d'obtenir une répétitivité et une fiabilité correctes. Les expériences montrent que : La position des patches peut changer lors de leur mise en place dans la presse chauffante. Il est donc préférable de chauffer le système sous vide. Les patches, une fois ramollis durant la polymérisation, peuvent glisser par rapport à la plaque à réparer. Il faut donc trouver un moyen de fixation des patches. Les patches se déforment de façon importante au niveau du trou si celui-ci n'est pas rempli. Un montage symétrique doit donc être conçu. Afin de bien évaluer la qualité de la réparation, la performance de la réparation pour une

même géométrie a été réalisée pour chaque procédé en considérant la charge à la rupture. Les réparations ainsi réalisées sont testées en traction avec une vitesse de déplacement imposée à 0,5 mm/min. Après de nombreux essais et différentes modifications du procédé de réparation, la dispersion des résultats devient de moins en moins importante. La force à la rupture mesurée sur les systèmes réparés s'améliore passant de 67,6% à 85,3% de celle mesurée sur les plaques vierges (les plaques sans trou). [3]

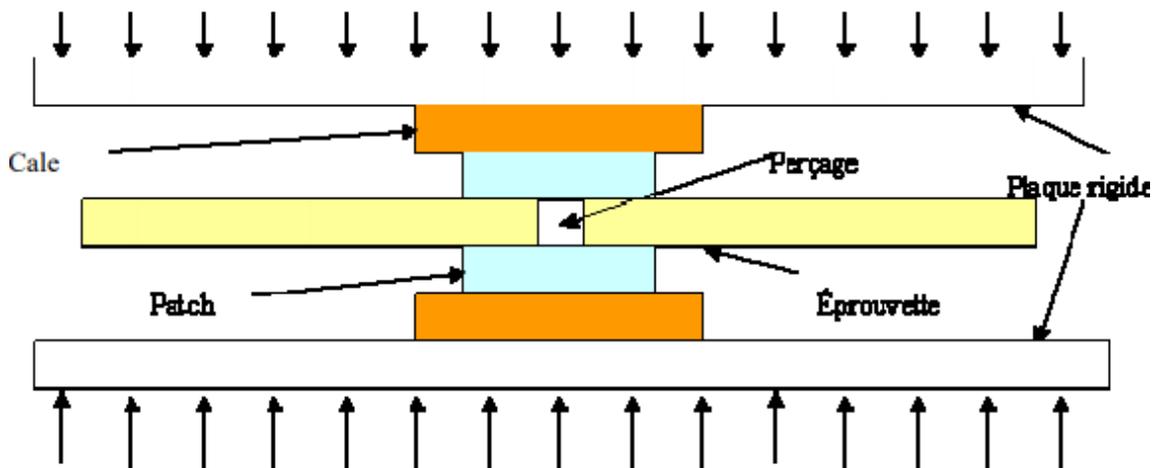


Figure II.7. Procédé final pour la réparation par patchs mous

II.2.4.2 Procédé pour la réparation par patchs durs

Pour des raisons pratiques, la réparation par patchs durs bénéficie de plus d'avantages. En effet, les patchs durs peuvent être préparés à l'avance, le collage peut ainsi être réalisé rapidement. Par rapport au procédé de réparation par patchs mous, la réalisation s'avère plus simple, car il suffit de polymériser la colle. Dans la pratique, la distribution de colle n'est pas contrôlable et l'épaisseur du joint collé varie de façon aléatoire et considérable à cause de l'écoulement de la colle. Les expériences ont montré que l'épaisseur de la colle est tellement faible à certains endroits que le décollement des patchs peut provoquer une rupture prématurée du système réparé. La performance du système réparé dépend fortement de l'uniformité de l'épaisseur du joint collé [3].

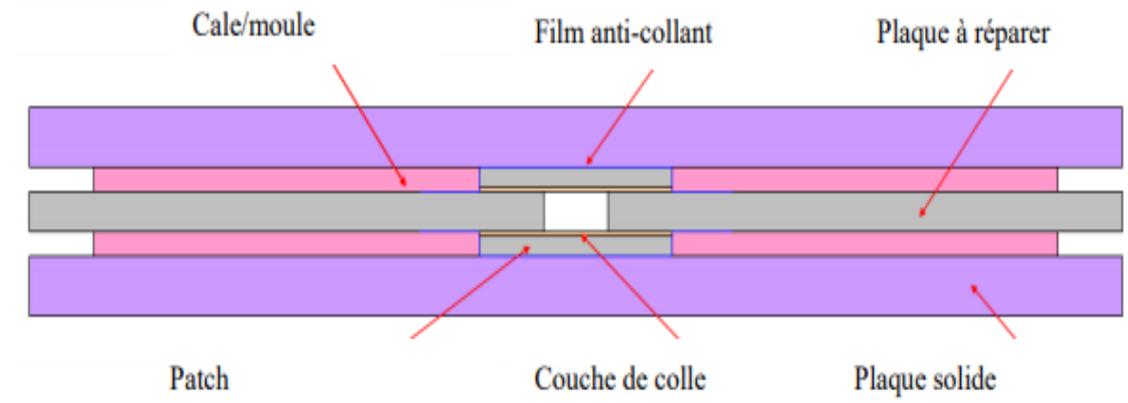


Figure II.8. Schéma de principe du montage de réparation par patches durs

II.3 Conclusion

Dans cette partie, nous avons exposé les principales techniques de réparation des structures fissurées, et présenté surtout la méthode de perçage de trou d'arrêt et des trous auxiliaires, qui constitue l'essentiel de notre travail. Les différents paramètres qui contrôlent cette technique sont présentés, où le choix de la taille des trous et leur position géométrique sont les éléments clés pour une bonne réussite de l'opération de réparation de la fissure.

Références

- [1] Tahar N, " Réhabilitation et Renforcement des Canalisations sous pression en présence des défauts de surfaces", Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf (2011)
- [2] Man S, " Etude de l'influence et de l'optimisation du degré d'expansion à froid dans les mécanismes de réamorçage d'une fissure : étude numérique et expérimentale", Université des Sciences et Technologies de Lille(2005)
- [3] Pengcheng C, " Etude et optimisation de la réparation des composites stratifiés par collage des patches externes", (2010)

Chapitre III

La méthode des éléments finis

III. 1 Introduction

Les techniques de calcul des structures ont connu ces dernières décennies un développement considérable, motivé par les besoins des industries et soutenu par les progrès effectués dans le domaine des ordinateurs. Ainsi, la méthode des éléments finis (M.E.F) est communément utilisée aujourd'hui pour l'analyse des structures dans de nombreux secteurs de l'industrie.

III.2 Historique

Les bases théoriques de la méthode des éléments finis (M.E.F) repose d'une part sur la formulation énergétique de la mécanique des structures et d'autre part sur les méthodes d'approximation. La M.E.F a été mise au point en 1953 chez Boeing (Seattle, USA, calcul des structures d'ailes d'avion) ; on y développe le premier élément fini, sa matrice de rigidité, l'assemblage et la résolution par la méthode des déplacements (publié par Turner, Clough, Martin et Topp en 1956). Quant aux bases théoriques générales, alliant l'analyse des structures en barres et poutres avec celle des solides, elles ont été développées de 1954 à 1960. Certaines idées apparurent auparavant, en particulier chez les mathématiciens pour résoudre divers problèmes aux limites par exemple celui de la torsion de Saint-Venant en divisant la section en triangles, mais elles restèrent sans suite. L'expression élément fini a été inventée par Clough en 1960.

La M.E.F s'attaque à tous les domaines du calcul de structures et beaucoup de logiciels, principalement dans le domaine de la mécanique des solides et des structures, ont conçus, tels que : ABAQUS, SAP, CATIA.

La crédibilité des résultats obtenus a permis l'utilisation de la méthode des éléments finis par des entreprises et des bureaux d'études de taille réduite. C'est évidemment l'apparition d'ordinateurs puissants qui a permis le développement de la simulation numérique. Le rythme d'évolution de l'informatique est actuellement gigantesque et les possibilités d'application augmentent sans cesse.

III.3 Modélisation et discrétisation

La méthode des éléments finis est donc une procédure générale de discrétisation pour la résolution des problèmes des milieux continus. Donc pour avoir une analyse numérique qui simulera au mieux un problème, il faut effectuer deux opérations essentielles : la modélisation et la discrétisation. Ces opérations se font en deux temps, figure III.1.

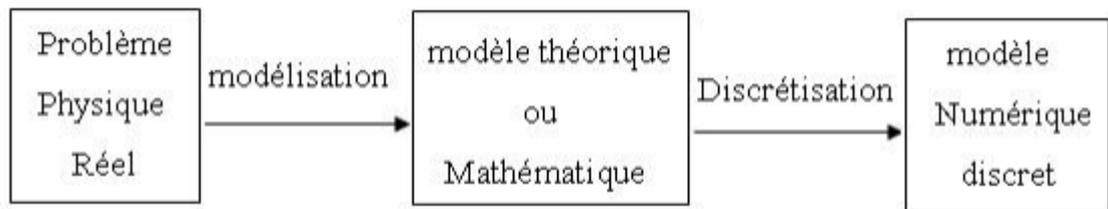


Figure III.1 Étape de l'analyse d'un problème aux limites

III. 4 Concept de la méthode des éléments finis

Le concept de base de la méthode des éléments finis est la subdivision du modèle mathématique à des composants disjoints de géométrie simple appelés (éléments finis). D'après le comportement de chaque élément est exprimé en terme d'un nombre fini de degrés de liberté, le comportement (réponse) du modèle mathématique est considéré, approximativement, celui du modèle discret obtenu par connexion ou assemblage de ces éléments.

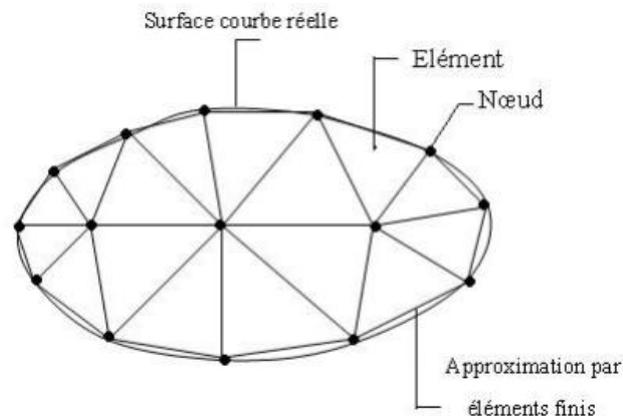


Figure III.2 Maillage du domaine en éléments triangulaires à trois nœuds

III. 5 Les Avantages de la M.E.F

La puissance de la méthode des éléments finis réside essentiellement dans sa souplesse. Elle peut être applicable à une variété de problèmes mécaniques ou bien physiques. La géométrie du domaine peut être quelconque, les forces et les conditions aux limites peuvent être aussi de natures quelconques. Le maillage peut combiner autant de types d'éléments que l'on souhaite. Et toute cette généralité est contenue dans un programme unique qu'on peut faire tourner sur un ordinateur (sélection du de problème, de la géométrie, du type d'élément, des chargements et des conditions aux limites). La méthode des éléments finis réside dans le fait que le modèle qu'elle utilise est très proche de la structure réelle.

III. 6 Étapes de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est considérée comme un outil de mathématiques appliquées destiné à résoudre les équations différentielles. Néanmoins, les étapes de l'étude d'un problème aux limites sont toujours les mêmes, on peut les résumer en sept étapes :

1. Découpage du domaine en un maillage d'éléments finis figure (III.2) ;
2. Interpolation en respectant les critères de convergence ;
3. Calcul des caractéristiques de chaque élément ;
4. Assemblage ;
5. introduction des conditions aux limites essentielles et résolution ;
6. Évaluation, dans chaque élément, des grandeurs utiles (contraintes, déplacements...)
7. Jugement de manière critique les résultats obtenus.

III.6.1 Classement d'éléments finis

Les différents types d'éléments finis sont classés suivant leur géométrie. Plusieurs classes d'éléments finis peuvent être distinguées :

- Les éléments 1D : barres, poutres rectilignes ou courbes.
- Les éléments 2D : élasticité plane (déformation ou contrainte plane), plaque en flexion, coques courbes.
- Les éléments 3D : éléments de volume ou coques épaisses.

III.6.2 Les propriétés d'un élément finis

Le découpage en éléments finis permet d'isoler un élément fini pour l'étudier tout en établissant son état de contrainte, de déformation ou de déplacement.

Un élément fini peut être 1 D, 2D ou 3D, avec des formes qui peuvent être simples, comme :

- segment d'une droite ou de courbe (plan ou courbe)
- triangle ou quadrilatère
- tétraèdre, prisme ou hexaèdre

Le matériau de l'élément est défini par une loi de comportement (loi de Hooke dans le cas de l'élasticité), avec des propriétés mécaniques qui dans le cas d'un matériau isotrope se réduisent à deux paramètres : E et ν .

III.6.3 les nœuds

Les nœuds définissent la géométrie et assurent la connexion des éléments les uns aux autres, ils occupent des positions stratégiques comme les extrémités, les sommets, les milieux des arêtes et faces.

III.6.4 Les forces nodales

À travers les nœuds transitent des forces associées aux degrés de liberté, selon les unes sont les réactions internes, les autres les forces F dues aux charges appliquées à l'élément (poids propre, charge uniforme, température...).

III.6.5 Degrés de liberté

Pour tout élément fini, on doit faire le choix d'une ou de plusieurs fonctions (en général le champ des déplacements), elles sont exprimées en fonction des valeurs particulières qu'elles prennent aux nœuds. Ces valeurs deviennent les inconnues nodales, par leurs degrés de liberté nodaux communs des différents éléments adjacents et qui permettent de reconstituer la solution complète (ASSEMBLAGE), tout en veillant à respecter certaines règles, dites critères de convergence.

III.6.6 Condition d'équilibre

Pour chaque élément on doit établir :

- sa matrice de rigidité K
- son vecteur force F

Ainsi, pour chaque élément on a une relation entre la force et les déplacements :

$$F = K U \quad (\text{III.1})$$

Les forces agissant sur toute la structure ou sur chacun des éléments doivent être en équilibre.

III.6.7 Condition de compatibilité

Les déplacements de l'ensemble de la structure ou de chacun de ses éléments doivent être compatibles, en d'autres termes, les déplacements des extrémités des éléments qui sont connectés à un même point doivent être identiques. On peut encore dire que si on effectue une section sur un élément, les déplacements d'élément à gauche et à droite de cette section doivent être égaux. Pour que cette cohésion soit respectée (c.à.d. pour que les volumes élémentaires ; auxquels ont été appliquées les déformations, continuent de rester accolés), il faut que le champ de déformation dérive d'un champ de déplacement, continûment dérivable, tel que :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_i} u_j \quad (\text{III.2})$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_j} u_i + \frac{\partial}{\partial x_i} u_j \right) \quad (\text{III.3})$$

Les équations de compatibilité en élasticité tridimensionnelle sont données par :

$$\frac{\partial^2}{\partial x_j^2} \varepsilon_{ii} = \frac{\partial^3}{\partial x_j^2 \partial x_i} u_i \quad (\text{III.4})$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \varepsilon_{jj} = \frac{\partial^3}{\partial x_i^2 \partial x_j} u_j \quad (III.5)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x_j^2} \varepsilon_{ii} + \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \varepsilon_{jj} = 2 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \varepsilon_{ij} \quad (III.6)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_k \partial x_l} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{kl}}{\partial x_k \partial x_l} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{ik}}{\partial x_j \partial x_l} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{jl}}{\partial x_i \partial x_k} = 0 \quad (III.7)$$

III.7 Présentation du code de calcul Abaqus/CAE™

III.7.1 Code de calcul Abaqus/CAE™

Abaqus/CAE™ est un code de calcul qui résout les problèmes de divers champs par la technique des éléments finis (M.E.F). Dans ce cadre il présente un système complet intégrant non seulement les fonctions de calculs proprement dites mais également les fonctions de construction du modèle (pré-processeur) et les fonctions de traitement des résultats (post- traitement). Abaqus/CAE™ est un programme qui traite des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statiques et dynamiques, des problèmes non linéaire, des problèmes thermiques etc...

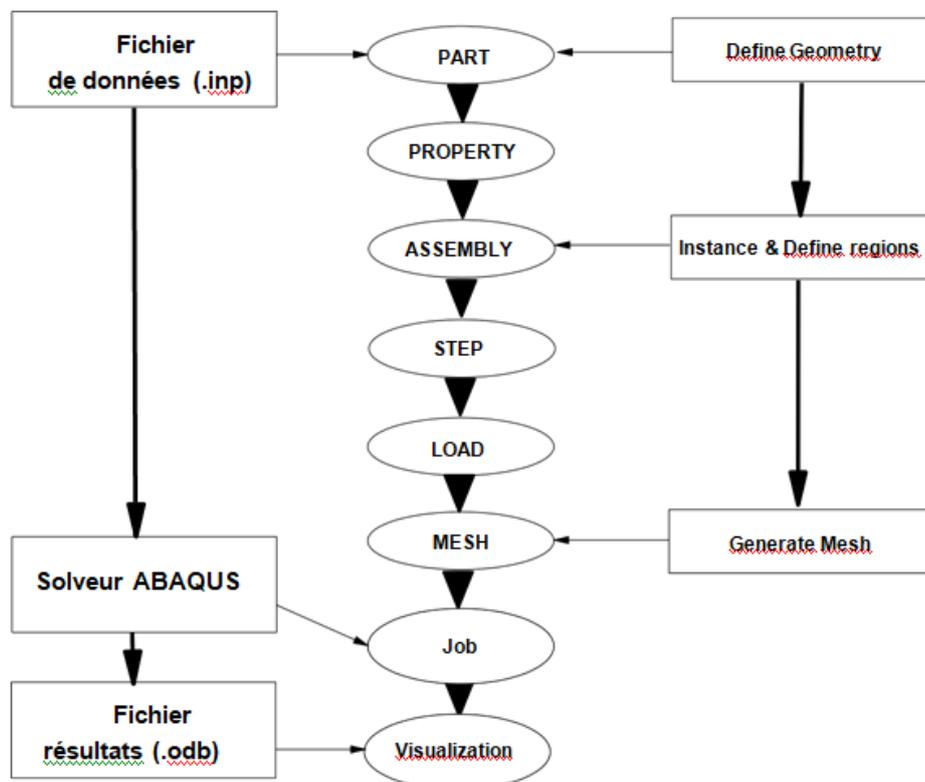


Figure III.3 : Étapes à suivre pour la programmation

La résolution complète d'un calcul numérique s'effectue après un passage successif dans les modules suivants :

Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job (pour lancer le calcul) [6].

Dans le code de calcul Abaqus le fichier de données décrit les géométries, les matériaux, les conditions aux limites avec une extension (.inp) et le fichier de résultats décrit les contours et les courbes résultats avec l'extension (.odb).

III.7.2 Système d'unités dans le code de calcul Abaqus

Comme dans beaucoup de logiciels, il n'ya pas de système d'unités fixé. C'est à l'utilisateur de définir son propre système (Tableau III.1).

Masse	Longueur	Temps	Force	Pression	Energie
M	L	T	$\frac{MLT^{-2}}{2}$	$ML^{-1}T^{-2}$	ML^2T^{-2}
kg	m	s	N	Pa	J
g	mm	ms	N	MPa	mJ
Tonne	mm	s	N	MPa	mJ

Tableau III.1 : Système d'unités pour la programmation

III.8 Conclusion

La M.E.F c'est une méthode approchée de calcul numérique permettant de déterminer l'état d'équilibre d'un milieu continu élastique à deux ou trois dimensions. Elle consiste à déterminer de manière approximative les déplacements d'un certain nombre de points du milieu appelés « nœuds ». Le Modèle de déformation présente une interpolation directe sur les déformations et permet d'avoir une meilleure précision sur ces grandeurs, sur les contraintes et sur les déplacements (obtenus par intégration), contrairement à la formulation classique où les déformations sont obtenues par dérivation du champ adopté pour déplacements.

Chapitre IV

Modélisation et discussion

IV. 1 Introduction

Parmi les différentes techniques qui permettent de réparer les structures ou pièces fissurées, celle qui permet de réduire le niveau de contrainte au voisinage du défaut, par le perçage d'un trou à la pointe de la fissure, est la plus répandue. Cependant, il s'avère que la réalisation de trous auxiliaires près du trou d'arrêt permet de réduire encore plus le niveau de contrainte, comme le montrent plusieurs auteurs. D'où l'intérêt de cette dernière technique qui constitue l'essentiel de notre travail.

Toutefois, l'ajout de trous auxiliaires doit respecter certains critères de taille des trous et de disposition géométrique afin de mener à bien cette technique. Pour cela, une modélisation par éléments finis, sous le logiciel Abaqus, a été effectuée afin d'obtenir le coefficient de concentration de contrainte pour différentes configurations de trous auxiliaires.

IV.2 Présentation de l'éprouvette

L'étude est menée sur une éprouvette plate de hauteur $2H$ de 70 mm et de largeur $2W$ de 50 mm, figure IV.1, contenant une fissure au centre d'une longueur $2a$ et d'une hauteur de $2b$ de 0.2 mm. Les extrémités de la fissure ont été percées par un trou d'arrêt de diamètre d_1 .

Quatre trous auxiliaires ont été réalisés au voisinage du trou d'arrêt et qui sont définis par leur distance δ , qui sépare les périmètres du trou d'arrêt et du trou auxiliaire, et l'angle θ entre le centre des deux trous par rapport à l'axe du chargement, dans lequel une contrainte externe $\sigma_0 = 62$ MPa est appliquée sur le bord supérieur et le bord inférieur de l'éprouvette.

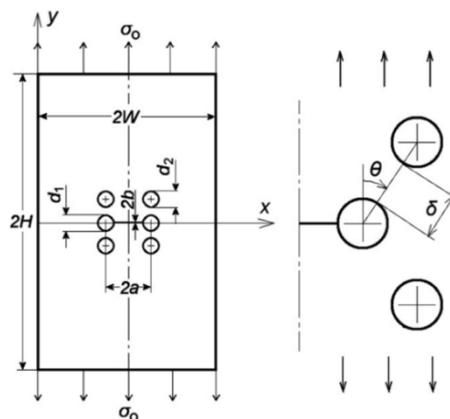


Figure IV.1 : Géométrie et dimensions de l'éprouvette étudiée

L'éprouvette est en acier qui est fréquemment utilisé dans les structures et dont les propriétés mécaniques sont :

Module de young (E)	210 GPa
Coefficient de poisson (ν)	0.3

Tableau IV.1 Caractéristiques mécaniques de l'acier

IV.3 Le maillage

L'éprouvette est modélisée en état de contrainte plane ce qui est suffisant dans notre cas. D'autre part, l'éprouvette présente une symétrie par rapport aux deux axes, dès lors, l'étude ne portera que sur le quart de l'éprouvette, (Figure IV.2)

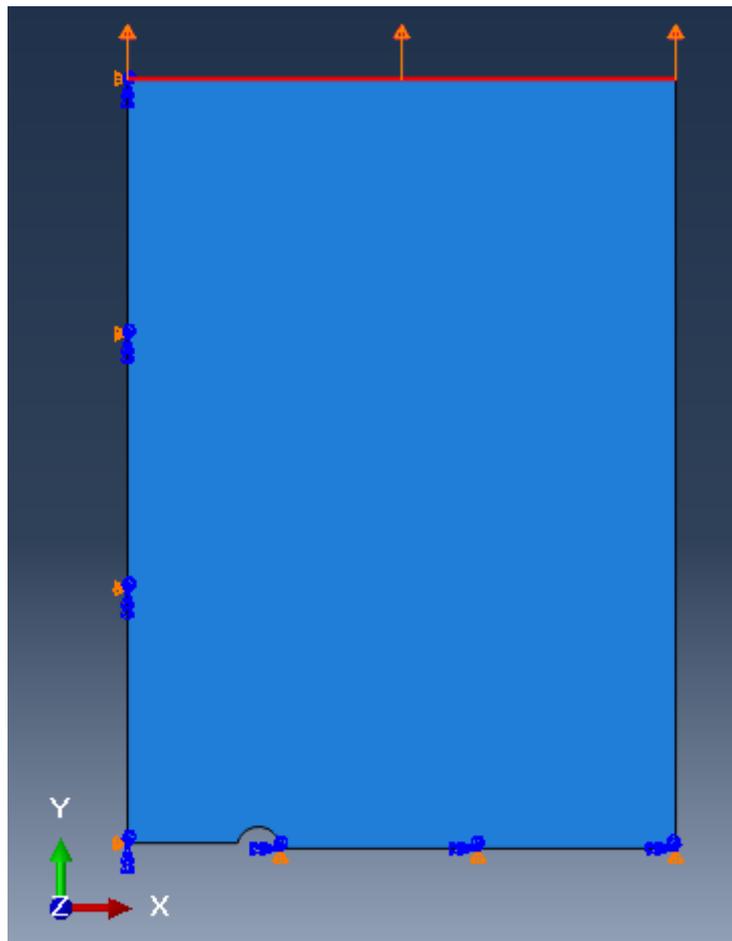


Figure IV.2 La géométrie du quart de l'éprouvette étudiée

Un maillage plus fin est utilisé autour des trous pour avoir une meilleure évaluation de la concentration de contrainte dans ces zones, figure IV.3.

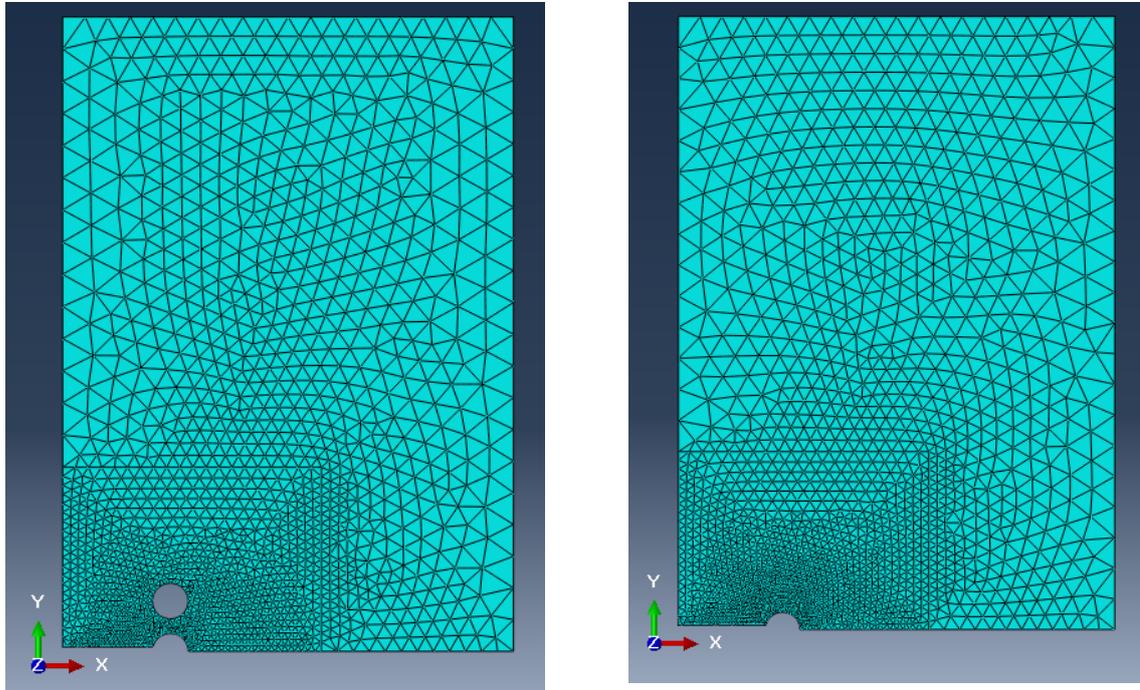


Figure IV.3 Type du maillage utilisé

IV.4 Calcul du facteur de concentration de contrainte

Afin de pouvoir comparer les différentes configurations des trous d'arrêt et de relaxation, le facteur de concentration de contrainte K_t est défini comme le critère principal de comparaison. Celui-ci est défini comme :

$$K_t = K_{t-base} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \quad (IV.1)$$

Où σ_{max} et σ_0 sont, respectivement, la contrainte maximale au bord du trou et la contrainte nominale. K_{t-base} étant le facteur de concentration de contraintes en absence des trous auxiliaires.

La Figure IV.4 montre la répartition des contraintes sur le plan de l'éprouvette de base, où on remarque une forte zone de concentration de contrainte autour du trou, avec une contrainte maximale $\sigma_{max} = 396.8$ MPa dans le cas d'un trou d'arrêt de diamètre $d_1 = 2$ mm, (Figure IV.5)

Le coefficient de concentration de contrainte peut être calculé dans ce cas, tel que :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} = 6.4$$

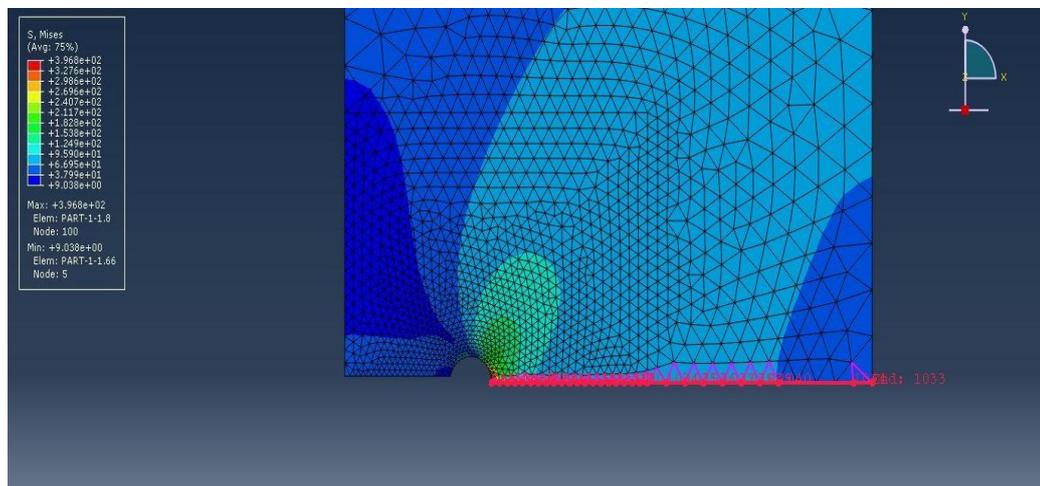


Figure IV.4 la répartition des contraintes sur le plan de l'éprouvette.

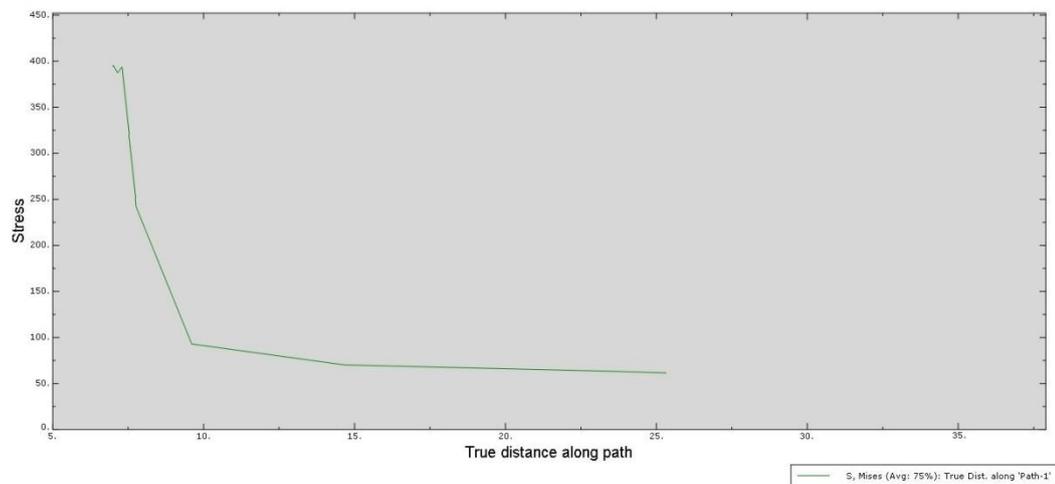


Figure IV.5 variation de la contrainte le long de l'axe central de l'éprouvette

IV. 5 Influence du diamètre du trou d'arrêt

Le choix du diamètre du trou d'arrêt joue un grand rôle sur le coefficient de concentration de contrainte K_t . Pour cela, plusieurs diamètres d_1 ont été étudiés en absence des trous auxiliaires. La Figure IV.6 montre qu'il est préférable de choisir un grand diamètre afin de réduire suffisamment le niveau de concentration de contrainte au point A. Toutefois, il est primordial de faire un choix judicieux du diamètre du trou d'arrêt pour ne pas fragiliser l'éprouvette

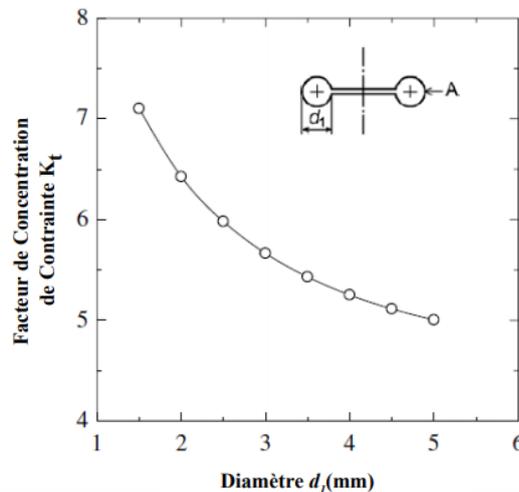


Figure IV.6 variation du facteur de concentration des contraintes K_t en fonction de d_1 au point A du type de base.

IV.6 Influence de la distance entre le trou d'arrêt et les trous auxiliaires

Afin d'étudier l'influence de la distance entre les bords des trous d_2 sur niveau de concentration de contrainte, les trous auxiliaires sont disposés perpendiculairement à l'axe de la fissure, avec $\theta = 0^\circ$ et un diamètre du trou d'arrêt $d_1 = 2\text{mm}$.

La variation du facteur de concentration de contrainte normalisé ($K_t/K_{t\text{-base}}$), obtenu pour différentes valeurs du diamètre du trou auxiliaire d_2 et différentes valeurs de la distance δ , sont représentées dans la Figure IV.7 Les résultats obtenus montrent que plus le trou auxiliaire est proche du trou d'arrêt, plus on a une réduction de K_t . Au-delà d'une certaine distance

($\delta = 3\text{mm}$ dans le cas de $d_1 = 2\text{mm}$) la présence des trous auxiliaires ne permet pas de réduire suffisamment le niveau des contraintes. Cet effet, peut être observé aussi sur la répartition des contraintes sur le plan de l'éprouvette dans deux configurations différentes des trous, Figure IV.8 et Figure IV.9.

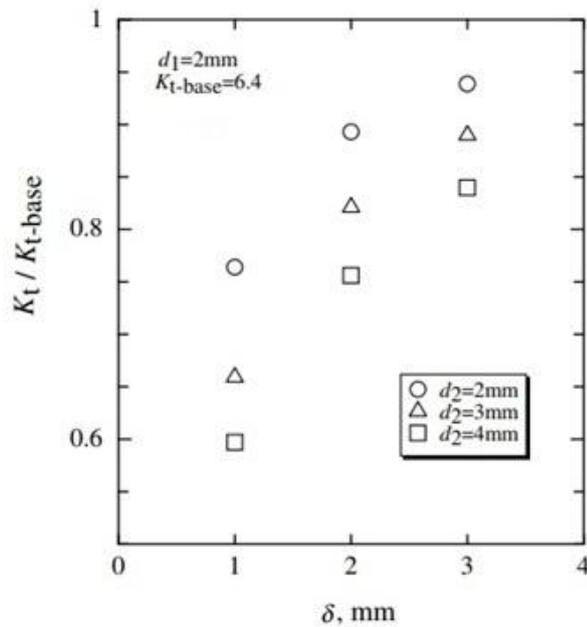


Figure IV.7 La variation du K_t normalisé en fonction de δ

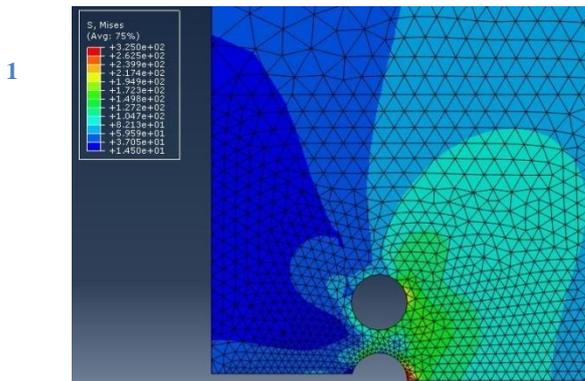


Figure IV.8a la répartition des contraintes sur le plan de l'éprouvette ou $\delta=1mm$

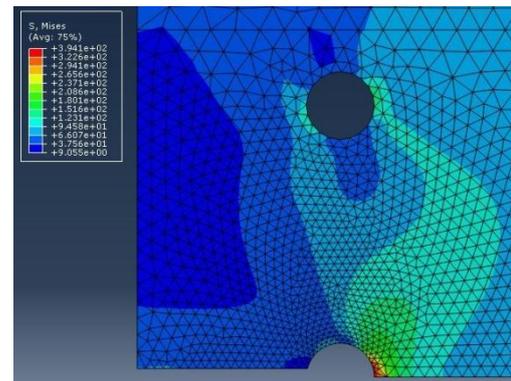
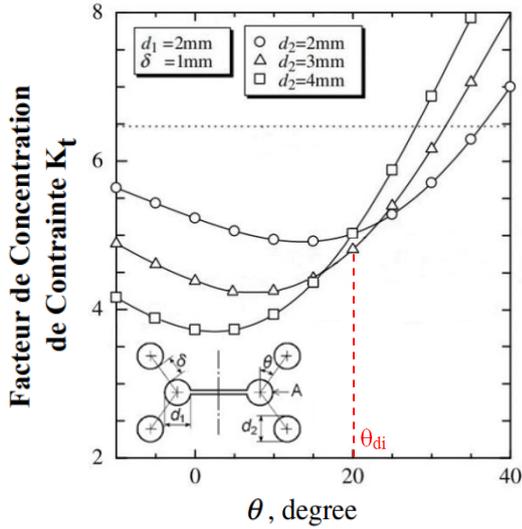


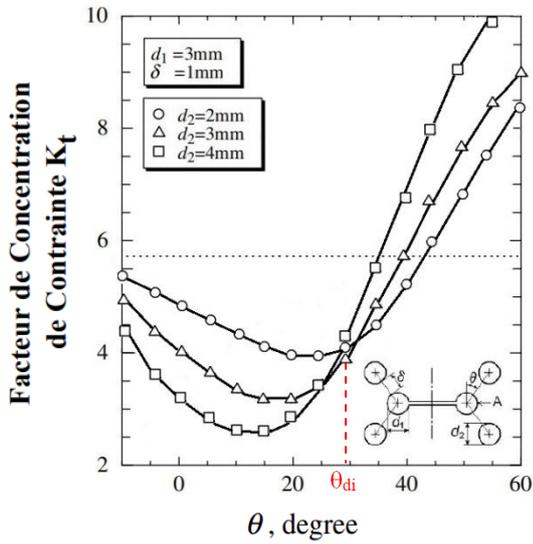
Figure IV.9a la répartition des contraintes sur le plan de l'éprouvette ou $\delta=6mm$

IV. 7 Influence de l'angle et du diamètre des trous auxiliaires

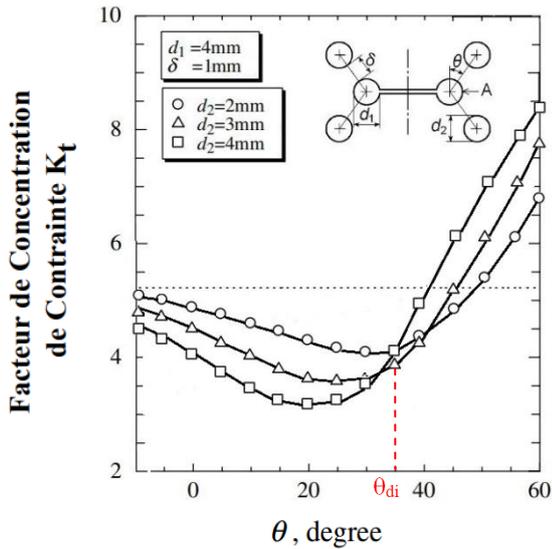
La figure IV.10 montre la variation du facteur de concentration de contrainte pour différentes dispositions de l'angle θ et différents diamètres du trou auxiliaire d_2 . Les résultats obtenus montrent que l'angle θ affecte considérablement la valeur de K_t , Tableau IV.2, et qu'au-delà d'une certaine limite on observe un effet inverse de celui qu'on recherche, où la valeur de K_t dépasse celle de base.



d_2 (mm)	K_{t-min}	$\theta(^{\circ})$	K_{t-base}	K_t/K_{t-base}
2	4.99	15°	6.4	0.78
3	4.32	5°	6.4	0.67
4	3.62	0°	6.4	0.56



d_2 (mm)	K_{t-min}	$\theta(^{\circ})$	K_{t-base}	K_t/K_{t-base}
2	4.29	25°	5.6	0.76
3	3.79	20°	5.6	0.67
4	3.42	10°	5.6	0.61



d_2 (mm)	K_{t-min}	$\theta(^{\circ})$	K_{t-base}	K_t/K_{t-base}
2	4.28	30°	5.2	0.82
3	3.69	25°	5.2	0.71
4	3.29	20°	5.2	0.63

Tableau IV.2 les minimum valeurs de K_t pour $d_1=2mm, 3mm, 4mm$

Figure IV.10 variation du facteur de K_t pour différentes dispositions de θ et d_2

D'autre part, on constate que l'effet du diamètre du trou auxiliaire est surtout observé pour des valeurs de θ entre 0° et 20° pour les différents cas étudiés. Cependant cet effet devient très faible pour des valeurs bien précises de l'angle θ , appelé angle limite (θ_d), et qu'il suffit dans ce cas de choisir un seul diamètre pour les deux types de trous.

Les valeurs de ces angles limites sont indiqués dans le (Tableau IV.3)et on constate que ces derniers peuvent êtres décrits par une relation linéaire en fonction du diamètre des trous, (Figure IV.11), avec l'expression suivante :

$$\theta_d = 7.4 d + 6.2 \tag{IV.2}$$

d(mm)	$\theta_d(^\circ)$
2	20
2.5	25
3	30
3.5	32
4	35

Tableau IV.3 les valeurs de l'angle limite en fonction du d_i

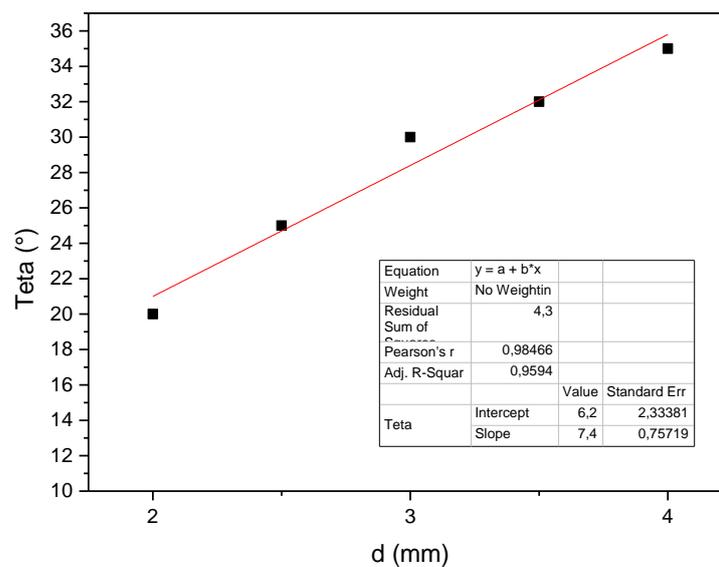


Figure IV.11 Variation de l'angle limite en fonction du diamètre du trou

IV. 8 Conclusion

La modélisation par éléments finis d'établir la distribution des contraintes autour de la fissure, et d'obtenir le facteur de concentration de contraintes au voisinage du trou d'arrêt de la fissure. L'intérêt de l'ajout de trous auxiliaires au près du trou d'arrêt a été mis en évidence, où on constate une diminution du facteur de concentration de contraintes. Afin d'étudier de plus près ce cas, deux principaux paramètres ont été analysés, à savoir, la taille des trous et la disposition géométrique des trous d'arrêt.

Les résultats obtenus montrent que la disposition des trous joue un grand rôle sur la réduction du niveau des contraintes au voisinage des trous, et pouvait même apporter l'effet inverse de celui rechercher et augmenter ainsi excessivement le facteur de concentration de contraintes.

D'autre part, bien que la taille des trous affecte à son tour le la valeur de K_t , il s'avère qu'on peut obtenir une réduction appréciable du facteur de concentration de contraintes en se limitant à un seul choix du diamètre des deux types de trous. Un choix qui doit respecter une disposition bien spécifique et qui peut s'exprimer sous une forme linéaire en fonction de diamètre du trou.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Notre étude répond à des préoccupations liées à la maintenance industrielle portant sur l'augmentation de la durée de vie des structures endommagées par la technique du perçage. L'établissement du niveau de contraintes autour du défaut est nécessaire pour pouvoir juger de l'efficacité ou non de la technique de réparation du défaut. L'analyse par éléments finis s'avère dans ce cas une bonne solution qui permet de traiter différents problèmes sous différentes situations et configurations. Le logiciel Abaqus offre un meilleur choix dans ce cas.

La modélisation de de la fissure, ayant un trou d'arrêt et des trous auxiliaires autour, montre que cela peut réduire significativement le facteur de concentration des contraintes, à condition de respecter certaines conditions, à savoir : le diamètre des trous, la distance entre les trous et leur position angulaire. Il est montré aussi que plus la taille du trou d'arrêt est grand meilleur est la réduction du niveau des contraintes. D'un autre coté, la taille des trous d'arrêt et auxiliaire peut se résumer à un seul diamètre si on respecte une position angulaire bien précise. Une position qui dépend de la taille du trou.

Toutefois, la présence des trous peut fragiliser la structure du fait de la diminution localisée de la section. Cela nécessite une vérification par les calculs de la tenue mécanique de telles structures après réparation.