



UNIVERSITE DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Spécialité

Construction mécanique

**Simulation numérique du Facteur d'Intensité de Contrainte par
le code ANSYS pour les fissures semi-elliptiques dans les cuves
chargées : Étude d'une virole fissurée soumise à des charges
gravitationnelles.**

Promoteur :

M. Madani Fateh

CO-Promoteur :

M. Boukhalfa Abdessami

Réalisé par :

siakhene Riadh

Fares Merouane

Remerciements

Tout d'abord, nous voudrions exprimer notre gratitude infinie à Dieu qui est capable de tout, qui nous a donné volonté, courage et patience, et qui nous a conduits sur le droit chemin tout au long de nos années scolaires.

Nous tenons à remercier sincèrement notre promoteur, **M. Madani Fateh** de l'Université de Saad Dahleb à Blida, pour sa patience et ses précieux conseils.

Nous exprimons à **M. Boukhalfa Abdessami** notre profonde gratitude pour votre confiance et partageons vos connaissances, et bien plus encore, pendant notre période de formation dans le cadre de l'Initiative. Merci de vos conseils d'expert et de votre présence tout au long de l'élaboration de la présente lettre. Sachez que nous vous sommes très reconnaissants.

Nous tenons également à remercier sincèrement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre projet.

Enfin, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude.

Dédicace

Ce projet est achevé avec l'aide d'ALLAH le tout puissant,

Je tiens à dédier ce travail à :

- *Mon cher père*
- *Ma chère mère*
- *Mon grand père*
- *Ma grande mère*
- *Ma sœur*
- *Mes deux frères*
- *Mon binôme RIADH*
- *Et toute la famille FARES*

A tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à ma formation universitaire.

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant mes études.

Tous mes Amis et camarades de classe du primaire Au supérieur et exceptionnellement ma promotion.

FARES MEROUANE

Dédicace

Ce projet est achevé avec l'aide d'ALLAH le tout puissant,

Je tiens à dédier ce travail à :

- Mon cher père***
- Ma chère mère***
- Ma grande mère***
- Ma sœur***
- Mon frère***
- Mon binôme MEROUANE***
- Et toute la famille SIAKHENE***

A tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à ma formation universitaire.

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant mes études.

Tous mes Amis et camarades de classe du primaire Au supérieur et exceptionnellement ma promotion.

SIAKHENE RIADH

ملخص:

العمل الذي نقدمه في هذا الموجز هو إيجاد حلول لتقليل وقت التوقف وخسائر الإنتاج بسبب الشقوق التي تتكرر وتحدث بمعدلات عالية جدًا مقارنة بالمعدلات العادية. كان الدافع لهذه الدراسة هو مشكلة الشقوق التي لوحظت في قشرة كسارة اكتشفتها طريقة التسلل. نستخدم برنامج ANSYS للمحاكاة لتقليل انتشار الكراك.

Résumé : Le travail que nous présentons dans ce mémoire consiste à trouver des solutions pour minimiser les temps d'arrêt et les pertes de production dus aux fissures qui se reproduisent et se produisent à des taux très élevés par rapport à la normale. La motivation de cette étude était le problème des fissures observées dans la virole d'un broyeur à boulets découvertes par la méthode d'infiltration. Nous utilisons le logiciel ANSYS pour les simulations afin de réduire la propagation des fissures.

Abstract : The work we present in this brief is to find solutions to minimize downtime and production losses due to cracks that recur and occur at very high rates relative to normal. The motivation for this study was the problem of the cracks observed in a crusher shell discovered by the infiltration method. We use ANSYS software for simulations to reduce crack propagation.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre1 Présentation du problème	
1.1Introduction.....	4
1.2 LEBROYEUR	4
1.2.1 Définition.....	4
1.2.2 Les broyeurs à boulets	4
1.2.3 Les Composants de broyeur	5
1.2.4 Le principe de fonctionnement	5
1.3 Les Principaux problèmes de broyeur	6
1.4 Problème de fissure semi-elliptique d'une virole.....	10
1.4.1 La virole.....	10
1.4.2 La Fissuration	10
1.4.2.1 Les fissures semi-elliptiques	10
1.4.2.2 Processus de fissuration.....	11
1.4.2.3 Zone de la pointe d'une fissure.....	11
1.4.2.4 Modélisation de la fissure	13
1.5 Maintenance de la virole en ressuage	13
1.5.1 Ressuage	13
1.5.2 Principe de ressuage.....	14
1.5.3 Domaine d'application.....	15
1.5.4 Cas d'application de ressuage sur la virole de broyeur	17
1.6Conclusion	18
 Chapitre2 Mécanique de rupture	
2.1 Historique.....	19
2.2 Mécanique de la rupture	20
2.2.1 Mécanique linéaire, et non-linéaire de la rupture	20
2.2.2 Modes de rupture	22
2.3 Facteur d'intensité de contraintes	23
2.4 Mécanismes et modèles de fissuration	26

2.5 Conclusion	26
Chapitre3 simulation par le logiciel ANSYS	
3.1 Introduction	27
3.2 Conception et la géométrie de la virole	27
3.2.1 conception et introduction de propriété de virole	28
3.3 Simulation ANSYS	32
3.3.1 Présentation du logiciel ANSYS	32
3.4 Conclusion	39
Chapitre4 Analyse d'une fissure longitudinale se développant dans la paroi d'une cuve sous pression et validation by ASME standard	
4.1 Introduction	40
4.2 Problématique	40
4.3 Méthodes de vérification de l'approche numérique.....	42
4.4 Results and discussions.....	48
4.5 Conclusion	51
Chapitre5 Résultats et interprétations	
5.1 Introduction	52
5.2 Description du modèle numérique.....	52
5.3 Résultats et interprétations	56
5.4 Conclusion	62
Conclusion générale	63
Bibliographie.	75

Liste des figures

Figure1.1: :tube-broyeur à boulets à deux compartiments	5
Figure1.2: Composant de broyeur	5
Figure1.3: fissure de tourillon	6
Figure1.4: blindage	7
Figure1.5: font d'entrée	7
Figure1.6: plaque	8
Figure1.7: satellite.....	8
Figure1.8: L'accouplement de vileur du broyeur	9
Figure1.9: ligne de force et concentration de contraintes	12
Figure1.10: zone délimitant le voisinage d'une pointe fissure	12
Figure1.11: Modélisation de la fissure en situation	13
Figure1.12: opération de ressuage.....	14
Figure1.13: Etapes de ressuage	16
Figure1.14: Apparition de la fissure sur la virole	17
Figure 2.1 : Le pont Hasselt pressa rupture en Mars 1938...	19
Figure 2.2 Rupture brutale de Schenectady en deux parties	20
Figure 2.3 Comportement d'un matériau ductile	21
Figure 2.4 Faciès de rupture ductile.....	21
Figure 2.5 Comportement d'un matériau fragile.....	21
Figure 2.6 Faciès de rupture fragile.	22
Figure 2.7 propagation en mode I.....	22
Figure 2.8 propagation en mode II	23
Figure 2.9. Propagation en mode III	23
Figure 2.10 : Contraintes près de l'extrémité d'une fissure	24
Figure 3.1 Crée le volume.	28
Figure 3.2 Révolution	29
Figure 3.3 Enlevé la matière (Crée les trous).	29
Figure 3.4 Conception et la géométrie de virole.	30
Figure 3.5 Dessin de définition	31
Figure 3.6 la fenêtre du code ANSYS 19.2- Workbench.....	32

Figure 3.7 la fenêtre de la structure statique.....	33
Figure 3.8 les principales vues géométriques de la partie étudier.	33
Figure 3.9 système de cordonnées.....	34
Figure 3.10 dimensions du maillage - taille des éléments 100 mm.....	35
Figure 3.11 dimensions du maillage (sphère d'influence) - rayon de la sphère 200 mm et taille des éléments 5 mm.....	36
Figure 3.12 le maillage de modèle par le code ANSYS.	36
Figure 3.13 les détails de fissure semi elliptique.	37
Figure 3.14 Maillage de raffinement autour de la fissur.	37
Figure 3.15 fixation de la virole	38
Figure 3.16 la force appliquée sur la virole.....	39
Figure 4.1:Fissure superficielle dans une plaque finie.....	41
Figure 4.2:Types de fissures.....	44
Figure 4.3: Répartition des contraintes radiales dans un réservoir sous pression.....	45
Figure 4.4: Valeurs SIF pour le point le plus profond($a/t = 0.25$).....	49
Figure 4.5: Valeurs SIF pour le point le plus profond ($a/t = 0.4$).....	50
Figure 4.6: Valeurs SIF pour le point le plus profond ($a/t = 0.8$).....	50
Figure 5.1 : Modèle Workbench 19.2.....	53
Figure 5.2 Modèle EF d'une virole chargée préparé avec ANSYS.....	54
Figure 5.3 : Charge appliquée et conditions aux limites.....	54
Figure 5.4 : Les différents paramètres de configuration de la fissure semi-elliptique	56
Figure 5.5 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.09$).....	57
Figure 5.6 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.15$).....	57
Figure 5.7 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.2$).....	58
Figure 5.8 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.29$).....	58
Figure 5.9 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.33$).....	59

Figure 5.10 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.35$).....	59
Figure 5.11 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.38$).....	60
Figure 5.12 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.4$).....	60
Figure 5.13 : les graphes de variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.09$) , pour différentes valeurs de Module de Young.....	61

Liste des tableaux

Tableau 4.1:Les coefficients G_0 à G_3 pour une fissure en surface au point le plus profond sont présentés dans la référence.....	46
Tableau 4.2 : Valeurs de K_I (MPa $\sqrt{m}$) calculées par ASME et ANSYS au point le plus profond ($a/t = 0,25$).....	48
Tableau4.2: K_I values (MPa $\sqrt{m}$) calculated by ASME and ANSYS at deepest point ($a/t =0.4$).48	
Tableau4.3: K_I values (MPa $\sqrt{m}$) calculated by ASME and ANSYS at deepest point ($a/t =0.8$).49	

Introduction générale

Les fissures semi-elliptiques sont l'une des formes de fissuration les plus couramment rencontrées dans les structures mécaniques, y compris les viroles de broyeurs à boulets. Une fissure semi-elliptique est une fissure en forme de demi-ellipse, avec une extrémité libre et une extrémité fixe. Ces fissures peuvent se former en raison de divers facteurs tels que les contraintes mécaniques, les variations de température, les cycles de charge répétitifs, ou même les défauts de fabrication initiaux.

Lorsque des fissures semi-elliptiques se forment dans la virole d'un broyeur à boulets, elles peuvent avoir des conséquences graves sur l'intégrité structurale de l'équipement. La présence de ces fissures peut entraîner une propagation progressive de la fissure due aux contraintes cycliques induites par le fonctionnement du broyeur. Si la fissure se propage au-delà d'une certaine longueur critique, cela peut entraîner une rupture soudaine de la virole, entraînant potentiellement des dommages matériels, des pertes de production et même des risques pour la sécurité des personnes.

L'étude de la propagation de fissures semi-elliptiques dans les viroles de broyeurs à boulets par simulation numérique ANSYS permet de mieux comprendre le comportement de la fissure et d'évaluer la durée de vie résiduelle de la structure avant une éventuelle rupture. ANSYS offre des outils avancés de modélisation et d'analyse de la mécanique de la rupture, qui permettent de prendre en compte les paramètres tels que les contraintes, les déformations, les propriétés des matériaux et la géométrie de la fissure pour prédire son évolution.

En utilisant ANSYS, il est possible de modéliser la virole du broyeur à boulets avec la fissure semi-elliptique et de simuler les conditions de fonctionnement réelles, telles que les charges appliquées et les cycles de chargement répétitifs. Les résultats de la simulation peuvent fournir des informations précieuses sur les contraintes et les déformations locales, ainsi que sur les modes de propagation de la fissure. Ces informations peuvent ensuite être utilisées pour prendre des décisions éclairées concernant la maintenance, la réparation ou le remplacement de la virole du broyeur afin d'éviter des défaillances catastrophiques.

L'étude de la propagation de fissures semi-elliptiques dans les viroles de broyeurs à boulets par simulation numérique ANSYS est essentielle pour évaluer la durée de vie résiduelle de la structure et prendre des mesures préventives appropriées. Cette approche permet de mieux comprendre le comportement des fissures et d'optimiser la maintenance et la réparation des équipements, contribuant ainsi à assurer la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des opérations industrielles.

Dans le cadre de notre étude sur la propagation de fissure de la virole au broyeur à boulets, le facteur d'intensité de contrainte (FIC) est utilisé pour évaluer la propagation de la fissure et prédire sa durée de vie. Ce FIC peut être calculé à l'aide de la simulation numérique réalisée avec le logiciel ANSYS, en utilisant les valeurs des contraintes à l'extrémité de la fissure obtenues à partir de la simulation. En comparant le FIC ainsi calculé à la ténacité à la rupture du matériau de la virole, vous pouvez déterminer si la fissure a une tendance à se propager, ce qui a des implications importantes en termes de maintenance et de réparation de la structure.

Notre sujet s'articule autour de l'étude de la propagation de fissure de la virole au broyeur à boulets par simulation numérique ANSYS.

Le présent rapport sera divisé en cinq chapitres :

Chapitre 1 : Présentation des problèmes de broyeur à boulets et mise en évidence du problème de fissure semi-elliptique sur la virole. Dans ce chapitre, vous pouvez aborder les aspects généraux du broyeur à boulets, son fonctionnement, ses composants et ses principaux problèmes rencontrés. Ensuite, vous pouvez vous concentrer sur le problème spécifique de la fissure semi-elliptique sur la virole du broyeur à boulets, en expliquant les conséquences potentielles de cette fissure sur l'intégrité structurale de l'équipement et les risques associés.

Chapitre 2 : Généralités sur la mécanique de rupture. Dans ce chapitre, vous pouvez présenter les concepts fondamentaux de la mécanique de rupture. Expliquez les mécanismes de propagation de fissures, les différents types de fissures, les paramètres influents tels que les contraintes, les déformations, les facteurs de sécurité, etc. Mettez en évidence l'importance de comprendre ces concepts pour évaluer la propagation des fissures dans la virole du broyeur à boulets.

Chapitre 3 : Application d'une simulation numérique par le logiciel ANSYS sur la virole du broyeur. Dans ce chapitre, décrivez en détail la méthodologie que vous avez suivie pour réaliser la simulation numérique de la virole du broyeur à boulets à l'aide d'ANSYS. Expliquez les étapes de modélisation, y compris la création de la géométrie, l'assignation des propriétés des matériaux, la définition des conditions aux limites et des charges appliquées, ainsi que les paramètres spécifiques utilisés pour simuler la propagation de la fissure. Soulignez les avantages de l'utilisation d'ANSYS pour obtenir des résultats précis et fiables.

Chapitre 4 : Analyse d'une fissure longitudinale se développant dans la paroi d'une cuve sous pression et validation by ASME standard

Chapitre5 : Analyse des résultats de simulation et conclusions. Dans ce chapitre, une présentation des résultats de la simulation numérique réalisée sur la virole du broyeur à boulets. Ce travail se termine par une conclusion générale résumant les résultats les plus importants.

Chapitre 1 Présentation du problème

1.1 Introduction

Le broyeur à boulets est un équipement utilisé dans diverses industries pour le broyage de matériaux en une poudre fine. Cependant, il peut être sujet à des problèmes mécaniques, tels que des fissures semi-elliptiques, qui peuvent affecter sa performance et sa durabilité. Ces fissures peuvent être causées par des contraintes excessives, une usure, des chocs ou des défauts de fabrication. Si elles ne sont pas détectées et réparées à temps, elles peuvent entraîner une défaillance du broyeur à boulets. Ce problème nécessite donc une détection précoce, une surveillance régulière et des mesures de réparation et de prévention appropriées. En comprenant mieux les mécanismes de formation des fissures semi-elliptiques, il est possible de mettre en place des stratégies efficaces pour prolonger la durée de vie des broyeurs à boulets, améliorer leur performance et assurer la sécurité des opérations industrielles.

1.2 LE BROYEUR

1.2.1 Définition

Le broyeur est un appareil destiné pour réduire un matériau en poudre fine ou en petits éléments en voie sèche ou humide. Le Broyeur constitue d'un cylindre en rotation sur son axe horizontal contenant une charge de boulets, dans lequel on introduit un matériau à broyer finement. [1]

1.2.2 Les broyeurs à boulets

Le broyeur à boulets est un outil important pour remoudre les matériels après le concassage. Le broyeur à boulets s'applique largement dans les métiers tels que le ciment, les produits de Silicate, les nouveaux matériels de construction, l'engrais chimique, le verre, la Céramique etc.

Les corps broyant sont donc des boulets dont le diamètre peut varier de 12,7 à 2,2 cm sont en Fonte alliée au chrome contenant plus de 11 % de chrome. Ils doivent être plus denses et plus Grossiers que les particules à broyer.

Les broyeurs à boulets ont un rapport $L/D \leq 1,5$. Lorsque ce rapport est supérieur à 1,5, on les appelle tubes broyeurs (figure. 1.1). [2]

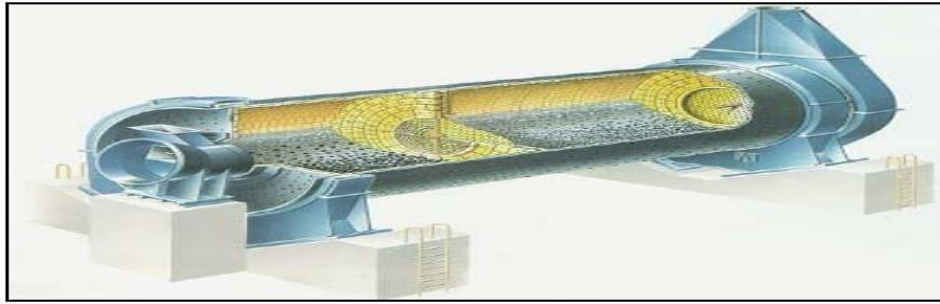


Figure 1.1: tube-broyeur à boulets à deux compartiments

Il existe aussi des broyeurs courts type Marcy pour lesquels $L/D < 1$ afin d'éviter le surbroyage.

Les broyeurs à boulets peuvent comporter plusieurs compartiments (figure 1.2), généralement au nombre de deux ou trois, contenant des corps broyant de tailles différentes. Les gros boulets se trouvent côté alimentation et les petits boulets côté décharge. La matière à broyer s'écoule d'un compartiment à l'autre par débordement à travers des parois munies de plaques relevées. Dans certains appareils, le premier compartiment joue le rôle de chambre de séchage. Ces broyeurs sont surtout utilisés dans l'industrie du ciment. [3]

1.2.3 Les Composants de broyeur

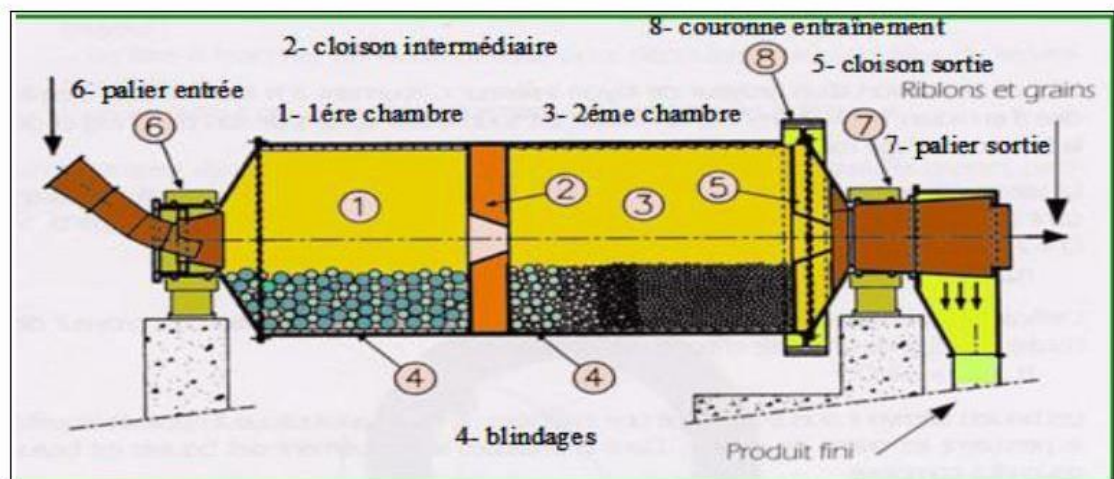


Figure 1.2 : Composant de broyeur

1.2.4 Le principe de fonctionnement

La force motrice du moteur électrique est transmise par le réducteur qui réduit la vitesse de moteur de 750 tr/min à 14.7 tr/min, cette vitesse est transmise jusqu'à l'arbre de transmission du broyeur par l'accouplement rigide, qui fait tourner la virole du broyeur.

Le broyeur tourne avec sa charge de boulets à une vitesse d'environ 70% la vitesse

Critique, qui est celle à laquelle les boulets commencent à rouler sur toute la circonférence du cylindre. De cette manière, les matériaux (c'est-à-dire le calcaire, le gypse et les ajouts) sont concassés et très broyés entre les boulets et entre le revêtement et les boulets.

Dans le compartiment de broyage grossier, la granulométrie des matériaux passe de 25mm moyenne à une taille qui (immédiatement avant leur arrivée sur la cloison de séparation) rend possible leur broyage par les boulets bien plus petits qui se trouvent dans le compartiment de broyage fin.

1.3 Les Principaux problèmes de broyeur

Pendant une période de fonctionnement, on confrontés plusieurs problèmes qui provoquent des usures. Ces dernières peuvent réduire la durée de vie de l'équipement, [4]

1.3.1 Principaux problèmes sur le tourillon

- Fissures de tourillon causées par la vibration et les charges.

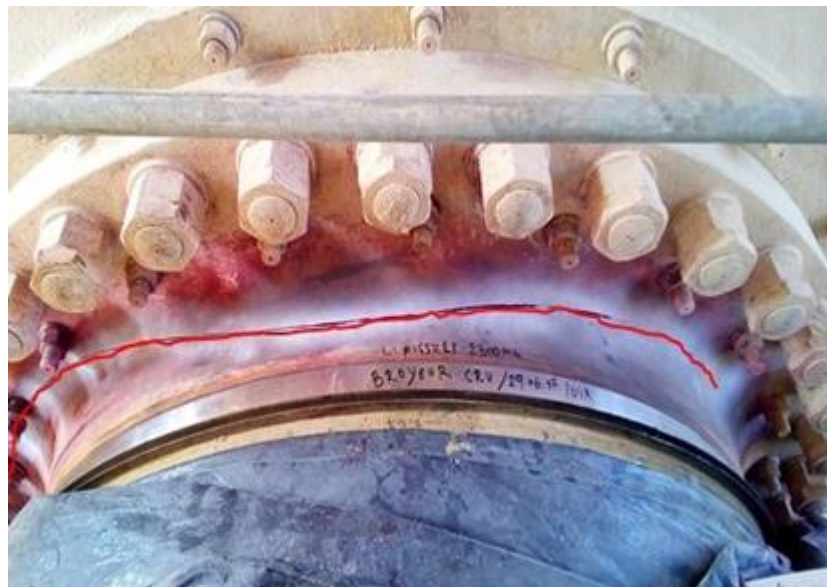


Figure 1.3: fissure de tourillon

1.3.2 Principaux problèmes sur le fond d'entrée

- Usure sur l'épaisseur du blindage. Figure 1.4
- Desserrage les plaques du blindage de fond d'entrée Figure 1.5



Figure 1.4 : blindage



Figure 1.5: font d'entrée

1.3.3 Principaux problèmes des paliers

Boulons d'ancrage desserrés ou cassés :

- En raison des vibrations
- En raison d'un mauvais calage et de la qualité du béton

Échauffement causé par :

- Problème de géométrie (réparation de la fusée du tourillon)
- Déformation ou voile
- Jeu
- Mauvaise lubrification ou répartition de l'huile
- Mauvaise qualité de la surface (rugosité, rayures ...)
- Infiltration d'eau dans l'huile
- Mauvaise isolation thermique du tourillon

1.3.4 Principaux problèmes sur la cloison

- Male fixation des plaques
- Usure sur les plaques



Figure 1.6: plaque

1.3.5 Principaux problèmes sur le réducteur du broyé

- Boîte noire : visibilité réduite
- Aucune analyse de vibration correcte possible
- Usure sur les dents du satellite aussi sur les dents de couronne
- Cisaillement les vis de fixation



Figure 1.7: satellite

1.3.6 Principaux problèmes des massifs

Affaisssement des fondations entraînant

- Un désalignement de la commande
- Une poussée axiale excessive sur les coussinets du broyeur
- Fissures du béton causées par :

- Une infiltration d'huile (mauvaise étanchéité)
- Les vibrations
- La corrosion des ferrailles du béton armé (infiltration d'eau)

1.3.7 Principaux problèmes sur L'accouplement de vireur du broyeur

- Présence un jeu axial entre l'accouplement et la bague

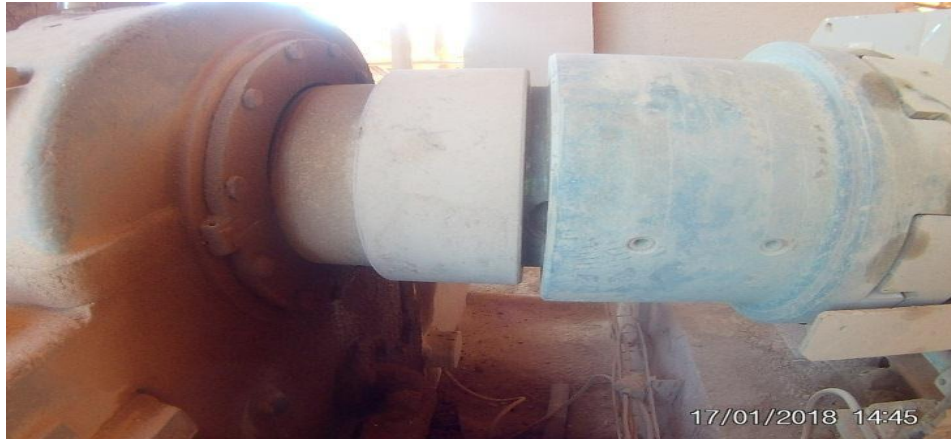


Figure 1.8: L'accouplement de vireur du broyeur

1.3.8 Principaux problèmes sur la virole

Fissures :

- Principalement circonférentielles (conception, fatigue)
- Au niveau des trous des boulons des blindages (fatigue, défauts locaux)

Déformations :

- Broyeur fonctionnant avec un blindage manquant
- Réparation de virole sur fissure circonférentielle

Usure :

- Surtout sur des points précis (cloisons, nouvelle forme de blindages)
- En cas de remplacement de cloison, il faut vérifier la virole de l'intérieur (épaisseur et défauts)

1.4 Problème de fissure semi-elliptique d'une virole

1.4.1 La virole

La virole est en tôle d'acier laminée SM50 pour construction soudées. Elle comporte

des brides en acier coule soudées à ses deux extrémités et servant à la fixation des tourillons. Chacun des deux compartiments il procède un trou d'homme permettent de remplacer les plaques de blindage. Ces trous d'homme sont de forme ovale et orientés à l'opposé l'un del'autre, soit à 180°. [5]

1.4.2 La Fissuration

La fissuration n'est pas une maladie, mais le symptôme d'une maladie ; on élimine la fièvre en soignant les maladies les plus diverses, En effet, la faible capacité de déformation et la faible résistance en traction, compression ou en pression, rendent les matériaux très sensibles à la fissuration.

Une fissure est définie comme la surface séparant localement un solide en deux parties. Le champ des déplacements est alors discontinu à travers cette surface L'objet de mécanique de la rupture est l'étude des évolutions de cette surface (propagation de la fissure) en fonction des chargements appliqués etdes caractéristiques du matériau constituant [6].

1.4.2.1 Les fissures semi-elliptiques

Une fissure semi-elliptique est une forme spécifique de fissure qui présente une section transversale en forme de demi-ellipse. Elle se produit généralement dans des matériaux solides tels que le métal, le béton ou la céramique, et elle est souvent associée à des contraintes ou des charges appliquées.

La fissure semi-elliptique est caractérisée par une extrémité pointue, qui s'étend progressivement jusqu'à une extrémité plus large en forme de demi-ellipse. La fissure peut être ouverte (c'est-à-dire qu'elle s'étend jusqu'à la surface) ou fermée (elle reste à l'intérieur du matériau).

Les fissures semi-elliptiques sont d'une importance particulière dans les domaines de l'ingénierie et de la mécanique des matériaux, car elles peuvent provoquer une concentration de contrainte aux extrémités de la fissure, ce qui peut entraîner une propagation de la fissure et éventuellement une défaillance structurale. La taille, la forme et l'orientation de la fissure semi-elliptique ont un impact significatif sur le comportement mécanique du matériau et doivent être prises en compte lors de l'évaluation de la durée de vie résiduelle ou de la résistance structurale d'un composant présentant une telle fissure.

1.4.2.2 Processus de fissuration

Dans le cas général, la fissuration se produit dans un matériau suivant quatre étapes [7] :

- a) La plastification locale au voisinage des défauts et singularités géométriques ou matériels : le degré de la singularité a une influence primordiale sur

- l'ampleur de la zone plastique ainsi que sur la concentration de contraintes.
- b) La formation des fissures : cette étape peut se réaliser à partir des traitements de surface, des traitements ou chargement thermique générant des contraintes résiduelles dépassant largement le seuil plastique.
 - c) La propagation des fissures réelles naissantes : cette propagation peut être brutale ou successive. Souvent on assiste à une propagation successive faisant augmenter la taille de la fissure jusqu'à atteindre une taille critique, entraînant une propagation brutale.
 - d) Cette propagation brutale constitue la dernière étape. Elle peut être accompagnée de grandes déformations généralisées (striction), ou sans déformations importantes (rupture fragile). La mécanique de la rupture étudie l'interaction entre la discontinuité géométrique (fissure) et le milieu continu avoisinant, ainsi que l'évolution de cette discontinuité, Schématiquement.

1.4.2.3 Zone de la pointe d'une fissure

Dans un matériau homogène qui possède une entaille et soumis à une contrainte uniaxiale, les lignes de force doivent contourner cette entaille, ce qui conduit à une concentration de ces lignes au voisinage de la pointe de l'entaille. la contrainte dans cette région est concentrée.

La mécanique de la rupture étudie l'interaction entre la discontinuité géométrique (fissure) et le milieu continu avoisinant, ainsi que l'évolution de cette discontinuité. D'un point de vue mécanique, on peut distinguer schématiquement, dans un milieu fissuré, trois zones successives [8].

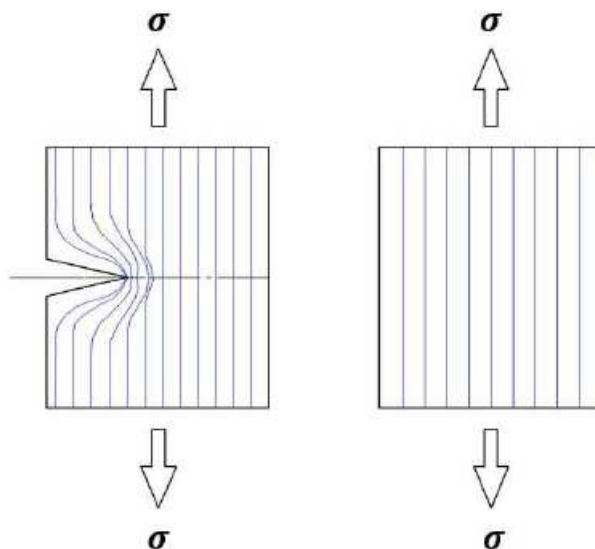


Figure 1.9 : ligne de force et concentration de contraintes

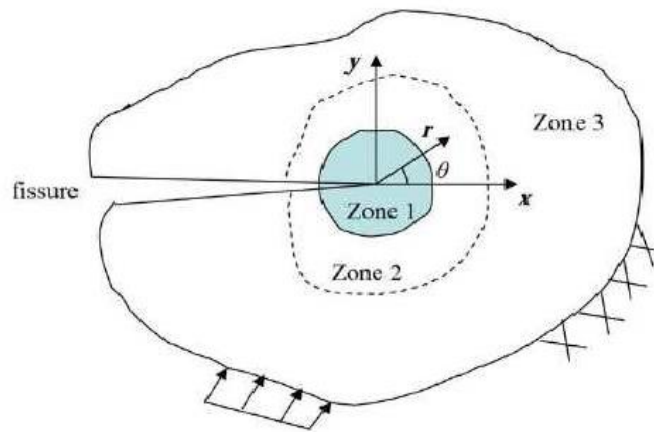


Figure 1.10 : zone délimitant le voisinage d'une pointe fissure

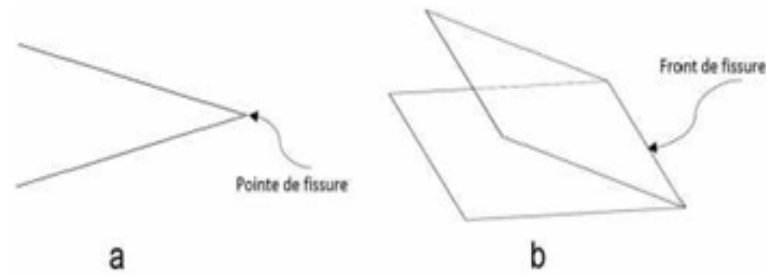
La zone d'élaboration 1 : elle se trouve à la pointe de fissure et dans le sillage laissé par la fissure au cours de sa propagation. L'étude de cette zone est très complexe à cause des contraintes importantes qui ont fortement endommagé le matériau. On réduit cette zone à un point pour les problèmes plans et à une courbe pour les problèmes tridimensionnels.

La zone singulière 2 : dans cette zone, les composantes de champ de contraintes sont infinies au voisinage du front de fissure ($r \rightarrow 0$). Où les champs de déplacements, déformations et contraintes sont continus et possèdent une formulation indépendante de la géométrie lointaine de la structure.

La zone extérieure 3 : les champs de déplacements, déformations et contraintes varient peu et peuvent être approximatés par des polynômes communément utilisés dans la méthode des éléments finis. Cette zone comprenant les champs lointains se raccordant d'une part, à la zone singulière, et d'autre part aux conditions aux limites en charges et en déplacements. [8]

1.4.2.4 Modélisation de la fissure

En deux dimensions (2D), une fissure peut être modélisée en deux surfaces qui se réduisent à deux lignes se joignant en un point appelé pointe. En trois dimensions (3D), elle est modélisée par deux surfaces appelées faces (ou lèvres), dont la courbe d'intersection est appelée front, La courbe d'intersection peut être sous plusieurs formes (droite, circulaire, elliptique, etc...). [9]



a- bidimensionnelle b- tridimensionnelle

Figure 1.11: Modélisation de la fissure en situation

1.5 Maintenance de la virole en ressuage

1.5.1 Ressuage

Le ressuage est une extension de l'inspection visuelle qui peut s'appliquer sur tout matériau à l'exception de certaines fontes qui présentent une surface poreuse.

C'est un terme qui désigne la sortie d'un fluide (liquide ou gazeux) d'une discontinuité dans laquelle ce fluide s'était précédemment accumulé au cours d'une opération d'imprégnation. C'est une méthode de contrôle non destructif qui permet de détecter des défauts débouchant en surface de pièce pour des matériaux non absorbants (alliages métalliques, matières plastiques, caoutchouc moulés, verres, certaines céramiques...).

Les défauts observés sont principalement : les reprises de coulée, les criques, les tapures, les microporosités, les décohésions et les reprises de fonderie. L'opération de ressuage peut s'effectuer à tous les stades d'élaboration d'une pièce (brut de fonderie, après usinage, après traitements thermiques...) [10].

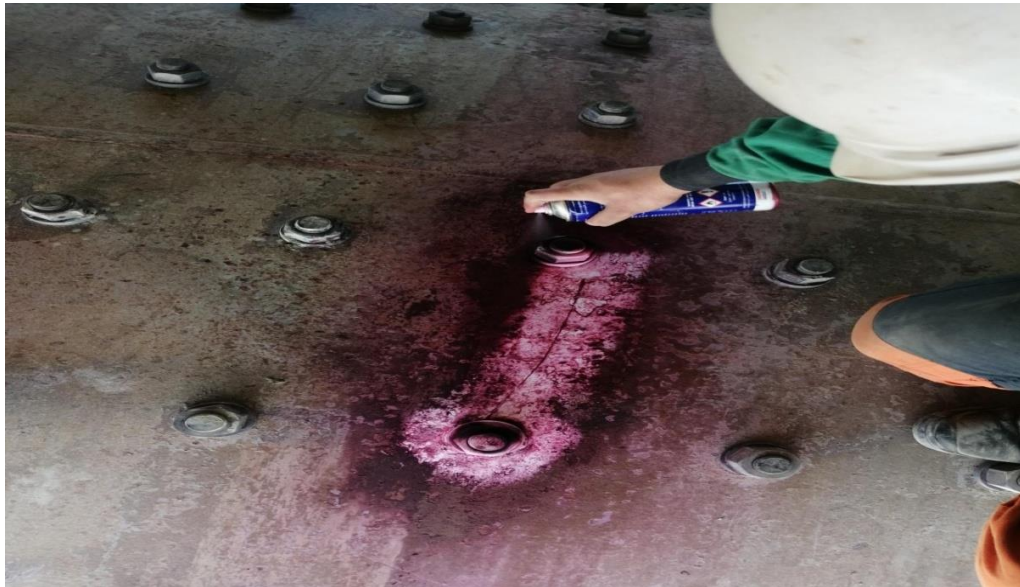


Figure 1.12: opération de ressuage

1.5.2 Principe de ressuage

La méthode consiste à appliquer un pénétrant de faible tension superficielle (de bonne capillarité) sur la surface de la pièce.

On lui laisse un certain temps de sorte qu'il puisse s'introduire dans les discontinuités aboutissantes à la surface, On élimine ensuite le pénétrant sur la surface mais cette opération laisse cependant en place la partie qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités.

Un révélateur, produit opaque et absorbant est appliqué sur la surface, le pouvoir absorbant du révélateur fait que le pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités est alors aspiré vers la surface (effet buvard) et y laisse une trace.

Cette trace à cause de la diffusion du pénétrant dans le révélateur, est toujours plus importante que la discontinuité.

L'efficacité de cette méthode de contrôle repose sur la possibilité de détecter les indications de discontinuité afin d'améliorer cette détectabilité. Le pénétrant contient en général un produit coloré visible à la lumière blanche ou un produit fluorescent visible à la lumière noire (ultra-violet) [10]

1.5.3 Domaine d'application

Le ressuage ne peut détecter que les défauts superficiels débouchant sur la surface. Les défauts obturés ne sont que partiellement détectés. Par contre les défauts internes ne peuvent pas être décelés.

On peut ainsi localiser les défauts de : moulage, de fatigue, d'usinage, de traitement thermique et de soudage.

Le ressuage donne des résultats intéressants avec des métaux tels que l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, l'acier inoxydable et la plupart des alliages non métalliques comme les céramiques, les plastiques, le caoutchouc moulé, (mais il faut, pour les plastiques et les composés caoutchouc moulé, se méfier de leur réactivité vis à vis des produits utilisés et donc procédé à des essais préliminaires) [10].

Les étapes de ressuage :

- 1er temps : Nettoyage de la surface à contrôler de toutes traces de matériaux étrangers solides ou liquides qui risqueraient de gêner l'entrée du pénétrant dans les discontinuités.
- 2ème temps : Application du pénétrant sur toute la surface à examiner et maintien d'une couche continue de pénétrant pendant tout le temps d'imprégnation.
- 3ème temps : Élimination du pénétrant étalé à la surface de la pièce (c'est une phase très délicate : il ne faut pas enlever le pénétrant situé dans les défauts).
- 4ème temps : Application régulière du révélateur sur toute la surface à examiner.
- 5ème temps : Pendant et après développement des indications, inspection soignée en lumière blanche ou/et sous lumière ultraviolette pour repérer la présence, localiser, donner la « nature » et la « grandeur » des discontinuités débouchant à la surface.
- 6ème temps : Nettoyage de la pièce pour éliminer toutes traces de produits de ressuage [21].

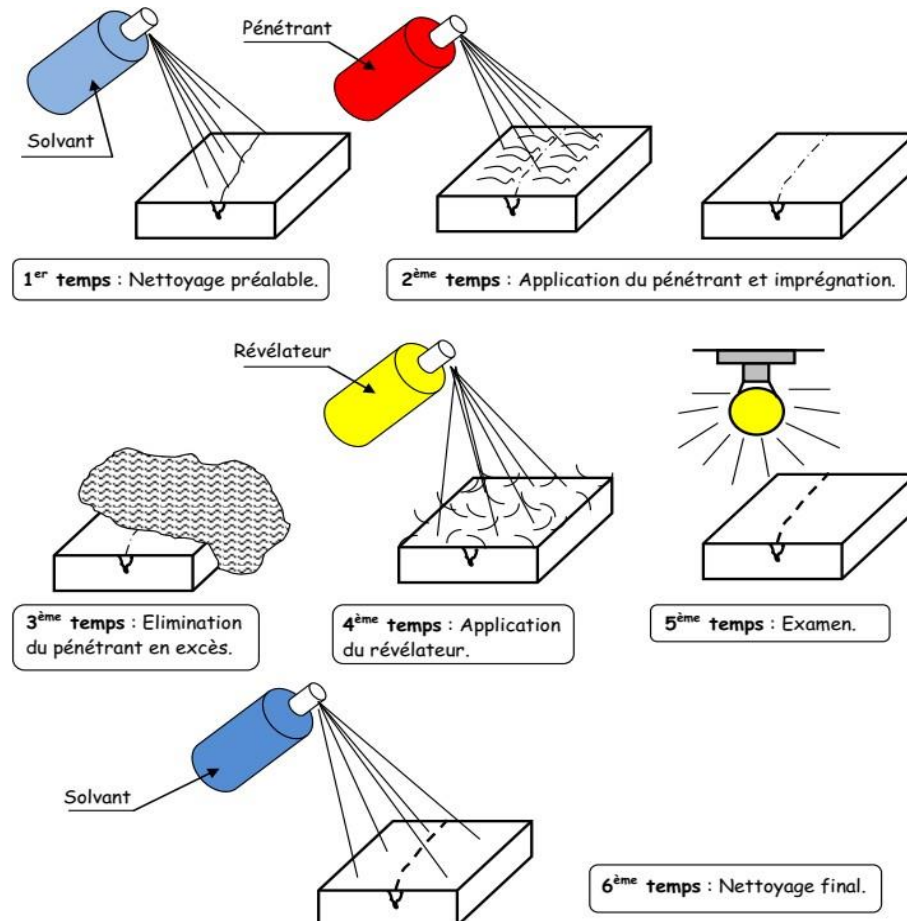


Figure 1.13: Les Etapes de ressuage

1.5.4 Cas d'application de ressuage sur la virole de broyeur

L'ingénieur visiteur a réalisé un contrôle par ressuage sur la virole, qui s'aura lieu chaque les 12 mois, après l'exécution de cette opération une fissure a été apparu d'une longueur presque à 108 mm.

Constat : présence d'une fissure de 108 mm de longueur sur la virole du broyeur au niveau des boulons de fixation blindages (voir les photos ci-dessus).

Risque : Vu que la fissure se situe sur la partie de fixation de blindage se concentrent les contraintes mécaniques, le risque de la propagation rapide de la fissure est fort probable.

Il est à noter que le contrôle de la fissure en marche est difficile et même impossible.



Figure 1.14: Apparition de la fissure sur la virole

Après l'apparition de la fissure l'équipe de maintenance à réaliser une réparation pour stopper la propagation de la fissure.

Actions immédiates

- 1-Nettoyer tout le fond et toit de la virole pour faire un contrôle.
- 2-Faire un ressuage de la fissure pour déterminer les extrémités.
- 3-Perçage de deux trous de diamètre 06 mm sur les deux extrémités pour arrêter la propagation de la fissure.
- 4-Faire un contrôle US sur la virole.

Réparation

Réalisation de 03 clés de soudure pour stopper l'évolution de la fissure : clé 01 (côté nord), clé 02 (au milieu) clé 03 (côté sud). Après la réparation de la fissure nous avons réalisé avec l'ingénieur visiteur pendant la période de stage chaque une semaine 4 contrôles par ressuage pour suivre l'évolution de la fissure.

Principe réparation

- Arc-aïrer en profondeur le maximum pour essayer d'éliminer la fissure.
- Meuler bien la surface.
- Placer des axes en cuivre à la place des boulons pendant le soudage

- Préchauffage jusqu'à 180°C avant le soudage et le maintien de température pendant le soudage jusqu'à 130°C et 120°C (le soudage n'est pas autorisé à moins de 120°C)
- Maintien de température des électrodes à 250°C pendant 02hr dans le four.
- Utiliser les étuveuses sur chantier pour garder les électrodes à une température de 120°C.
- Souder les clés avec maximum de respect de procédure
- Métal d'apport utilisé : Castolin 2222 (ø 3.25mm et ø 4mm)

1.6 Conclusion

Les fissures semi-elliptiques dans les broyeurs à boulets représentent un problème sérieux qui peut compromettre leur fonctionnement et leur durabilité. La détection précoce, la surveillance régulière et les mesures de réparation appropriées sont essentielles pour éviter les défaillances et optimiser la performance. L'amélioration de la conception, l'utilisation de matériaux résistants à la fissuration et une maintenance rigoureuse sont des stratégies préventives efficaces. En gérant efficacement les fissures semi-elliptiques, il est possible de prolonger la durée de vie des broyeurs à boulets et de garantir la sécurité des opérations industrielles.

Chapitre 2 Mécanique de Rupture

2.1 Historique

L'utilisation de l'acier et d'autres alliages métalliques s'est considérablement développée depuis la seconde moitié du XIXe siècle jusqu'à nos jours. Malheureusement, cette évolution s'est accompagnée de nombreux accidents graves voire mortels dus à la mauvaise utilisation de ces matériaux. A noter que ces accidents sont connus pour leur brutalité et leur soudaineté. La catastrophe de Boston (USA) en est un exemple : le 15 janvier 1919, un grand réservoir de 15 mètres de haut et de 27 mètres de diamètre éclate brutalement, laissant 8,7 millions de litres de mélasse (substance sucrée) s'écouler dans les rues de Boston à une vitesse extrêmement rapide. Estimation À une vitesse de 56 kilomètres à l'heure, 21 personnes ont été tuées et 150 blessées. Pont routier soudé de type 50° Vierendeel en Belgique, 1930-1940, permettait de franchir le canal Albert ou le canal Champion, mais a subi une rupture fragile.



Figure 2.1 : Le pont Hasselt après sa rupture en Mars 1938 [11]

Le 16 Janvier 1943, le pétrolier SS Schenectady était à quai à Swan (Island). À 22 h 30, sans avertissement, et dans un bruit audible jusqu'à au moins un kilomètre et demi, la coque s'est fracturée en deux parties.

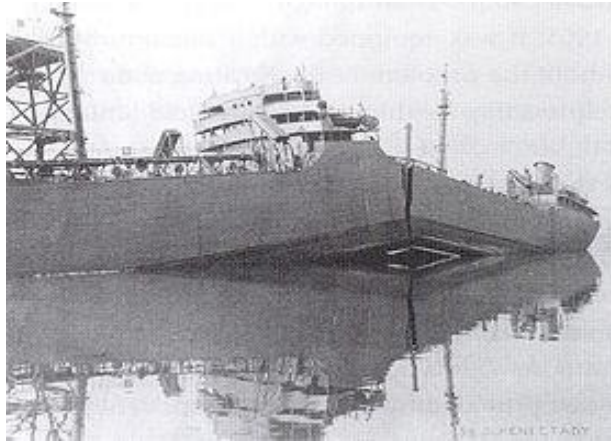


Figure 2.2 : Rupture brutale de Schenectady en deux parties [11]

2.2 Mécanique de rupture

Le macaque de la rupture a pour objet essentiel l'étude des fissures macroscopiques : elle s'applique lorsqu'il y a des discontinuités dans le matériau, telles dans le matériau qu'elles viennent modifier l'état de contrainte, de déformation et de déplacement, de sorte que l'homogénéisation du milieu n'est plus logique. La séparation en deux parties disjointes d'un corps intervient suite à la phase d'amorçage qui a vu le développement de microcavités, de microfissures sous l'action de contraintes mécaniques, thermiques, chimiques. La propagation des fissures macroscopiques peut conduire à la séparation complète de plusieurs pièces ou au contraire les fissures peuvent s'arrêter. Le mode de rupture peut être fragile, la rupture se produisant souvent sans déformation plastique, en présence d'une déformation plastique importante.

2.2.1 Mécanique linéaire, et non-linéaire de la rupture

La mécanique de la rupture vise à décrire les phases de formation et de Propagation des fissures. Selon le comportement du matériau lors de la propagation des fissures, on distingue deux types de fissures :

- **Rupture ductile** en présence de déformations plastiques importantes (mécanique non linéaire de La rupture). En fonction de l'expansion de la zone plastique au point de rupture prédéterminé, on distingue la plasticité limitée.

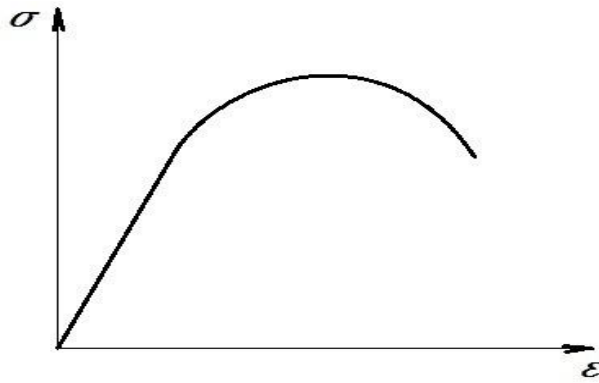


Figure 2.3 : Comportement d'un matériau ductile

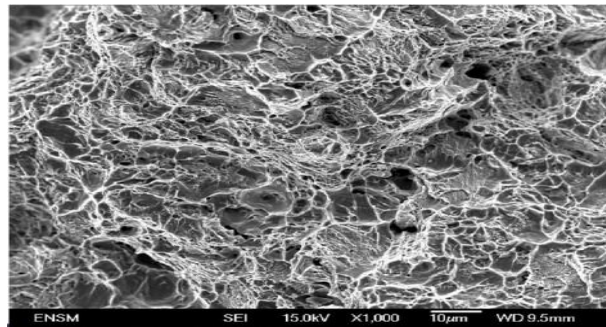


Figure 2.4 : Faciès de rupture ductile [11]

- **Rupture fragile** (mécanique linéaire de la rupture), Ce type de rupture se produit sans déformation plastique et généralement avec moins de 5% de déformation, la rupture est brutale et catastrophique. Le clivage est un exemple de rupture fragile, il se produit par séparation directe selon des plans cristallographiques, cette séparation est due à la simple rupture de liaisons atomiques.

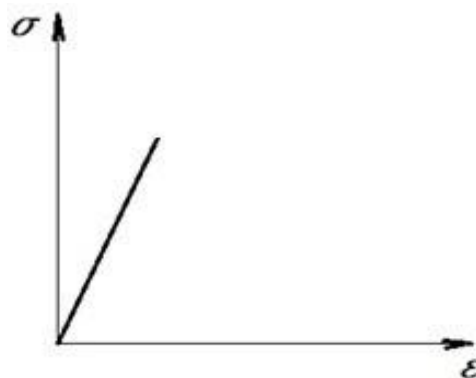


Figure 2.5 : Comportement d'un matériau fragile

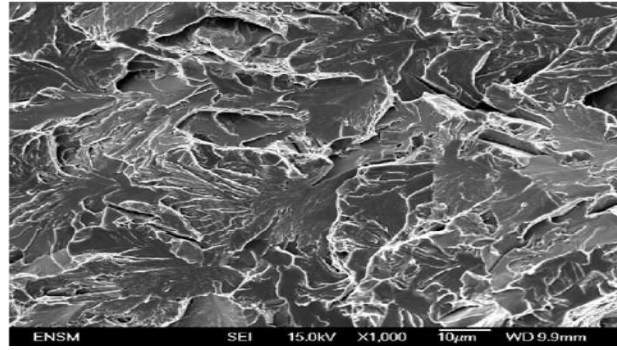


Figure 2.6 : Faciès de rupture fragile [11]

2.2.2 Modes de rupture

Une fissure est définie comme une zone Σ qui divise localement le solide en deux parties. Le champ de déplacement est alors discontinu sur cette surface, et les trois composantes vectorielles de cette discontinuité produisent (trois modes de rupture) :

Le mode I (ou mode d'ouverture) où les lèvres de la fissure se déplacent dans des directions opposées, perpendiculairement au plan de fissuration,

Le mode II (ou mode de cisaillement dans le plan) où les lèvres de la fissure se déplacent dans le même plan, dans une direction perpendiculaire au front de fissure,

Le mode III (ou mode de cisaillement hors plan) où les lèvres de la fissure se déplacent dans le même plan, dans une direction parallèle au front de fissure.

Notons que dans le cas des modes II et III, les lèvres de fissures restent en contact et entraînent donc des frottements qui diminuent l'énergie disponible pour la propagation de fissure. Ces deux modes sont ainsi généralement moins dangereux que le mode I. Le cas réel est une superposition de ces modes, on parle alors de mode mixte [12].

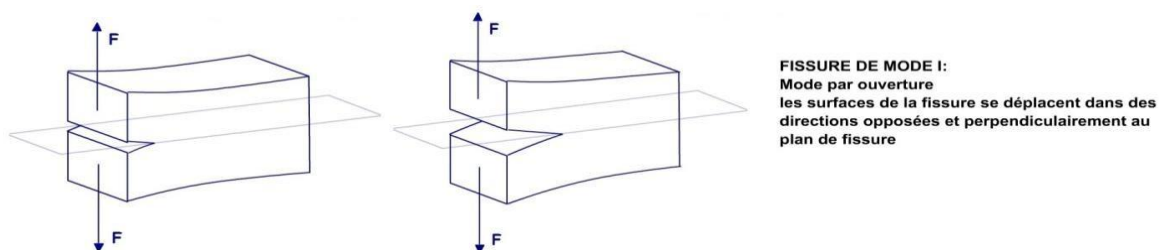


Figure 2.7 : propagation en mode I

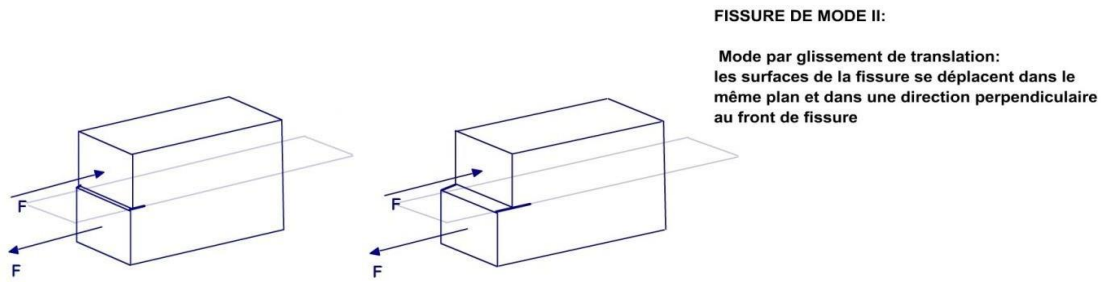


Figure 2.8 : propagation en mode II

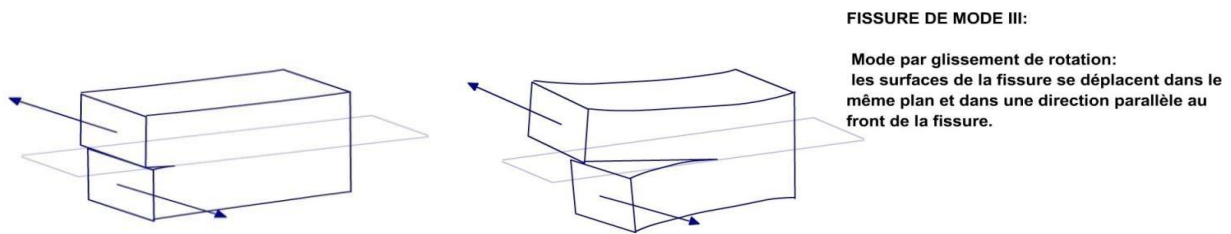


Figure 2.9 : propagation en mode III

L'objet de mécanique de la rupture est l'étude des évolutions de cette surface (propagation de la fissure) en fonction des chargements appliqués et des caractéristiques du matériau constituant le solide au moyen des trois grandeurs suivantes :

K_c : le facteur d'intensité de contrainte critique,

G_c : le taux de restitution d'énergie,

γ : le taux de dissipation par unité d'accroissement de la fissure.

A condition que les hypothèses de la mécanique de la rupture soient respectées, ces grandeurs sont intrinsèques au matériau, au même titre, par exemple, que son module d'élasticité.

2.3 Facteur d'intensité de contraintes

Irwin [13], considère un solide de comportement élastique linéaire et comporte une fissure. Il montre que le champ de contraintes au voisinage de la fissure peut être défini uniquement par un paramètre K appelé facteur d'intensité de contrainte. La rupture peut intervenir lorsque K atteint une valeur critique K_c . En utilisant les fonctions de Westergaard [14], il est possible de décrire le champ de contraintes à une distance r de la pointe de la fissure (Figure 2.10). L'expression générale de ce champ est de la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad 1.1$$

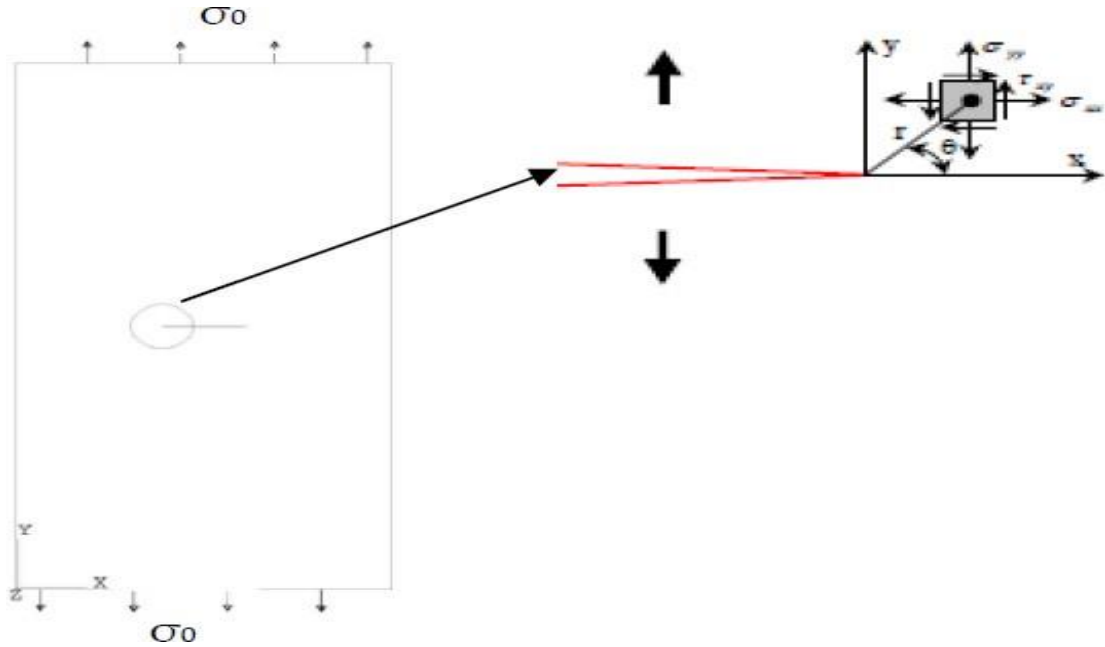


Figure 2.10. Contraintes près de l'extrémité d'une fissure

Où : r, θ sont les coordonnées polaires du point considéré, K est le facteur d'intensité de contraintes, qui vaut ici $\sigma\sqrt{\pi a}$ et contient à la fois l'information sur le niveau de chargement et sur la dimension de la fissure.

Comme le facteur d'intensité de contraintes K définit le champ de contraintes au voisinage de la fissure, Irwin [13] a postulé que la condition $K \geq K_c$ représentait un critère de rupture, K et K_c sont donnés par les relations suivantes :

$$K = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad 1.2$$

$$K_c = Y \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad 1.3$$

σ_c est la valeur atteinte par la contrainte appliquée à la rupture, et Y est un facteur géométrique (Coefficient de correction) prenant en compte les dimensions finies et la géométrie de l'éprouvette. Ce paramètre est donné pour chaque type d'éprouvette sous forme d'une fonction polynomiale de (a/w) , où w est la largeur de l'éprouvette.

En utilisant la méthode de Westerwald [14], Irwin [13] montre que les principales composantes des contraintes au voisinage de la pointe de fissure, correspondant aux trois modes de déplacements, peuvent être exprimées par

En mode I :

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad 1.4$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

En mode II :

$$\sigma_x = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad 1.5$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

En mode III :

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad 1.6$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0$$

Dans le cas général (présence des trois modes) le champ de contrainte prend la forme suivante :

$$\sigma_{ij}(\theta) = (2\pi r)^{-1/2} [K_I f_{ij}^I(\theta) + K_{II} f_{ij}^{II}(\theta) + K_{III} f_{ij}^{III}(\theta)] \quad 1.7$$

Les fonctions $f_{ij}^{I,II,III}$ sont des fonctions dépendant uniquement de l'angle polaire θ . Dans le plan de fissuration ($\theta = 0$) ces fonctions se réduisent à :

$$f_{22}^I(\theta) = f_{12}^{II}(\theta) = f_{23}^{III}(\theta) = 1$$

KI, KII et KIII sont les facteurs d'intensité des contraintes en mode I et II et III.

Il est donc clair que le champ de contrainte possède une singularité ($r^{-1/2}$) en pointe de fissure ($r \rightarrow 0$).

2.4 Mécanismes et modèles de fissuration

Afin de prévoir la rupture des pièces mécaniques sollicitées en fatigue, beaucoup de laboratoire ont tenté, au moins pour des raisons pratiques, d'établir des lois empiriques de fissuration, utilisées au bureau d'étude.

Si les mécanismes propres à la fatigue commencent à peine d'être connus, l'influence de

certaines paramètres sur la vitesse de fissuration est généralement mieux définie. Nous pouvons les classer en deux catégories [15] :

- Les paramètres intrinsèques qui dépendent du matériau lui-même. Module de Young, limite d'élasticité, propriétés cycliques et état métallurgique du matériau.
- Les paramètres extrinsèques qui dépend des conditions de l'essai, quel que soit le matériau étudié, température, environnement, dimension de l'éprouvette, rapport de charge R , etc.

2.5 Conclusion

La mécanique de la rupture a pour but d'élaborer des critères, c'est-à-dire de définir les conditions dans lesquelles un défaut identifié (ou non) peut se propager sous une contrainte donnée. Nous avons ensuite recherché une relation quantitative entre la taille du défaut, la contrainte appliquée et un paramètre caractéristique du matériau appelé ténacité KIC. Dans ce chapitre nous essayons de donner une idée générale sur la mécanique de la rupture, son histoire, ses auteurs, ses buts... De plus, nous citons quelques essais mécaniques et donnons de brèves définitions. Enfin, différents paramètres de rupture, facteurs d'intensité de contrainte, taux de restitution d'énergie.

Chapitre 3 Simulation par logiciel ANSYS

3.1 Introduction

Ce chapitre illustre la modélisation et la simulation du modèle étudié, on va utiliser le code ANSYS pour calculer le facteur d'intensité de contrainte dans une fissure semi elliptique de virole.

Pour mener notre étude par simulation numérique, on a utilisé le code numérique « ANSYS », qui est l'un des codes de calcul, basé sur la méthode d'éléments finis, parmi les plus utilisés dans le monde, Le code « ANSYS » comprend plusieurs composantes telles que : ANSYS/Professionnel, ANSYS/Multiphasiques, ANSYS/Structural...etc. Chaque Composante est destinée à l'un des domaines d'ingénierie, et son choix met automatiquement à la disposition de l'utilisateur les processus adéquats (type d'élément, conditions aux limites, tracées, etc.).

Dans cette analyse, on a utilisé « ANSYS.19.2 », qui permet de traiter la majorité des problèmes de mécanique de la rupture et fissuration des structures. Il offre des outils puissants pour l'analyse en deux et trois dimensions.

3.2 Conception et la géométrie de la virole

La virole est une pièce cylindrique, dans le processus de conception de cette pièce on a utilisé logiciel SOLIDWORKS-20 pour les détails de dessin.

SolidWorks : SolidWorks est un logiciel propriétaire de conception assistée par ordinateur 3D Fonctionnant sous Windows.

SolidWorks est un modeleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers Sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les Fichiers concernés.

Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SolidWorks. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle.

3.2.1 conception et introduction de propriété de virole

Utilisant les outils de conception et modélisation de logiciel « SolidWorks » on avoir le model numérique corresponde au virole de notre broyeur.

Longueur de la virole : 13597 mm

Diamètre intérieur de la virole : 4600 mm

Épaisseur de la virole : 45mm

Diamètre extérieur de la virole : 4690 mm

Nombre de compartiment : 2

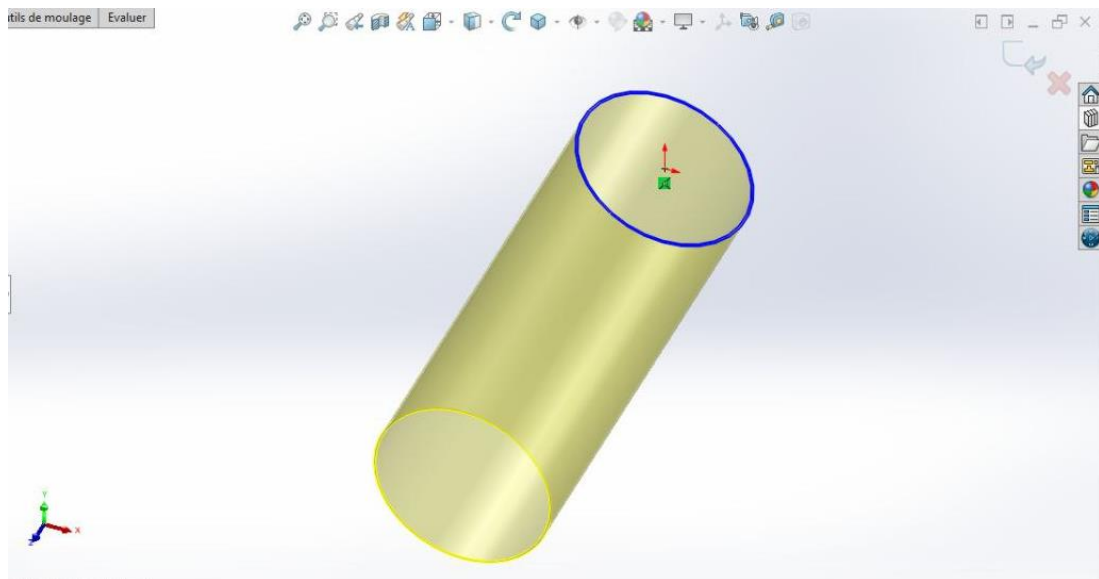


Figure 3.1: Crée le volume

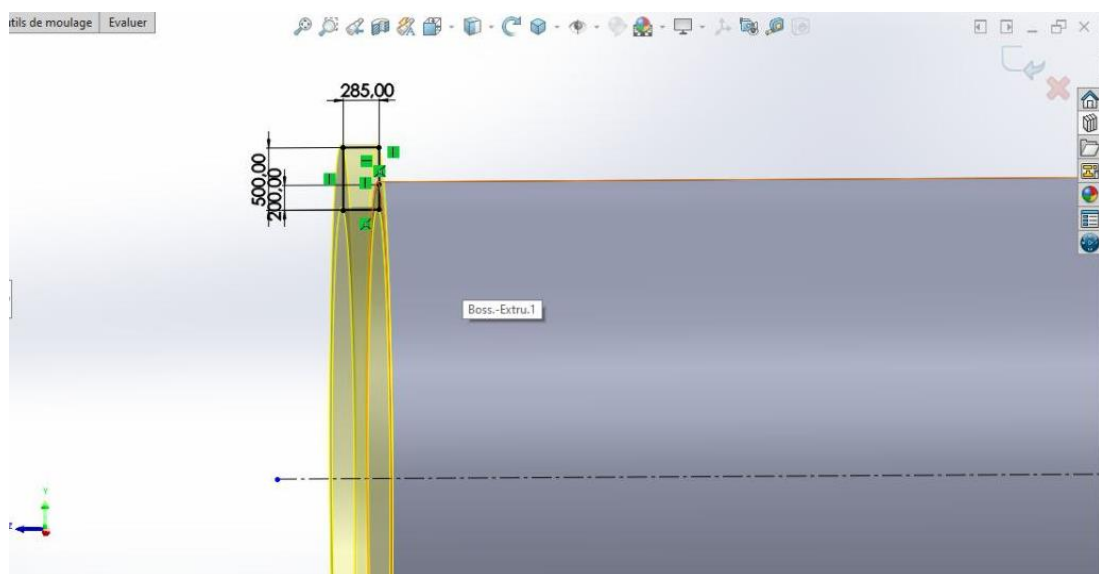


Figure 3.2: Révolution

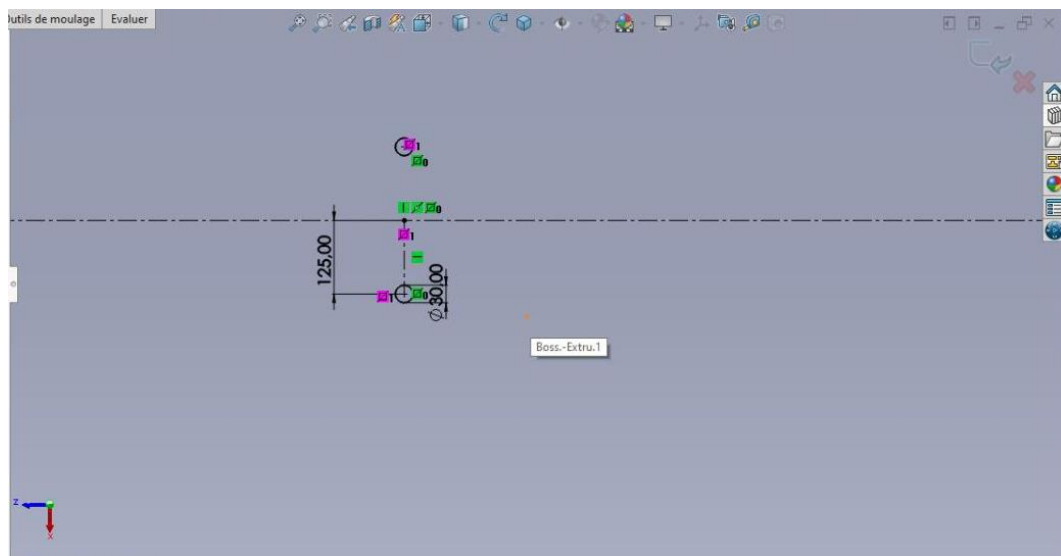


Figure 3.3: Enlevé la matière (Crée les trous)

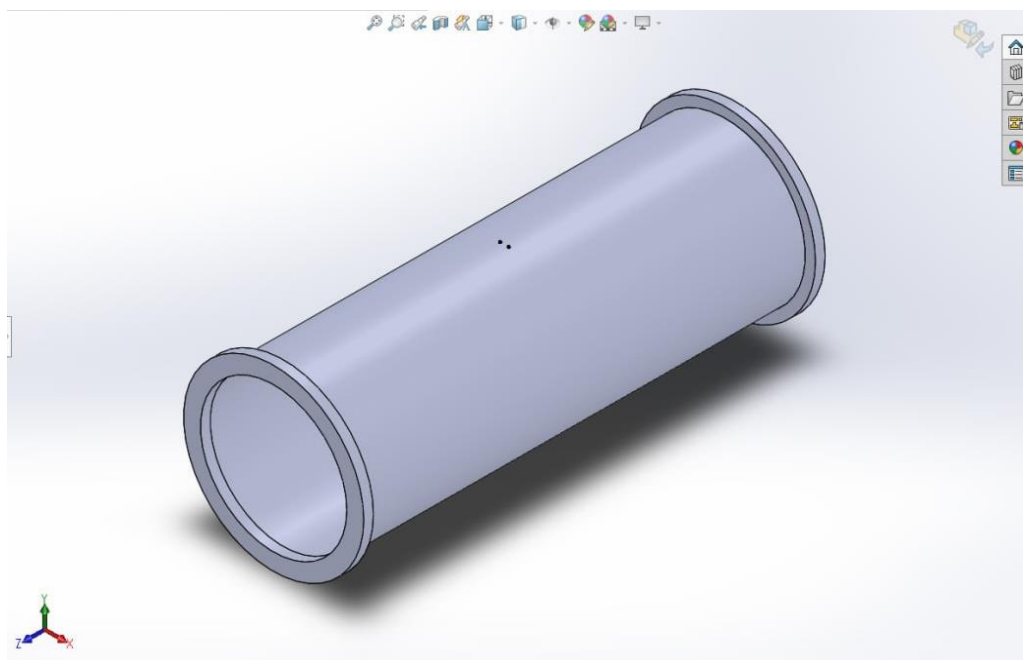


Figure 3.4: Conception et la géométrie de virole

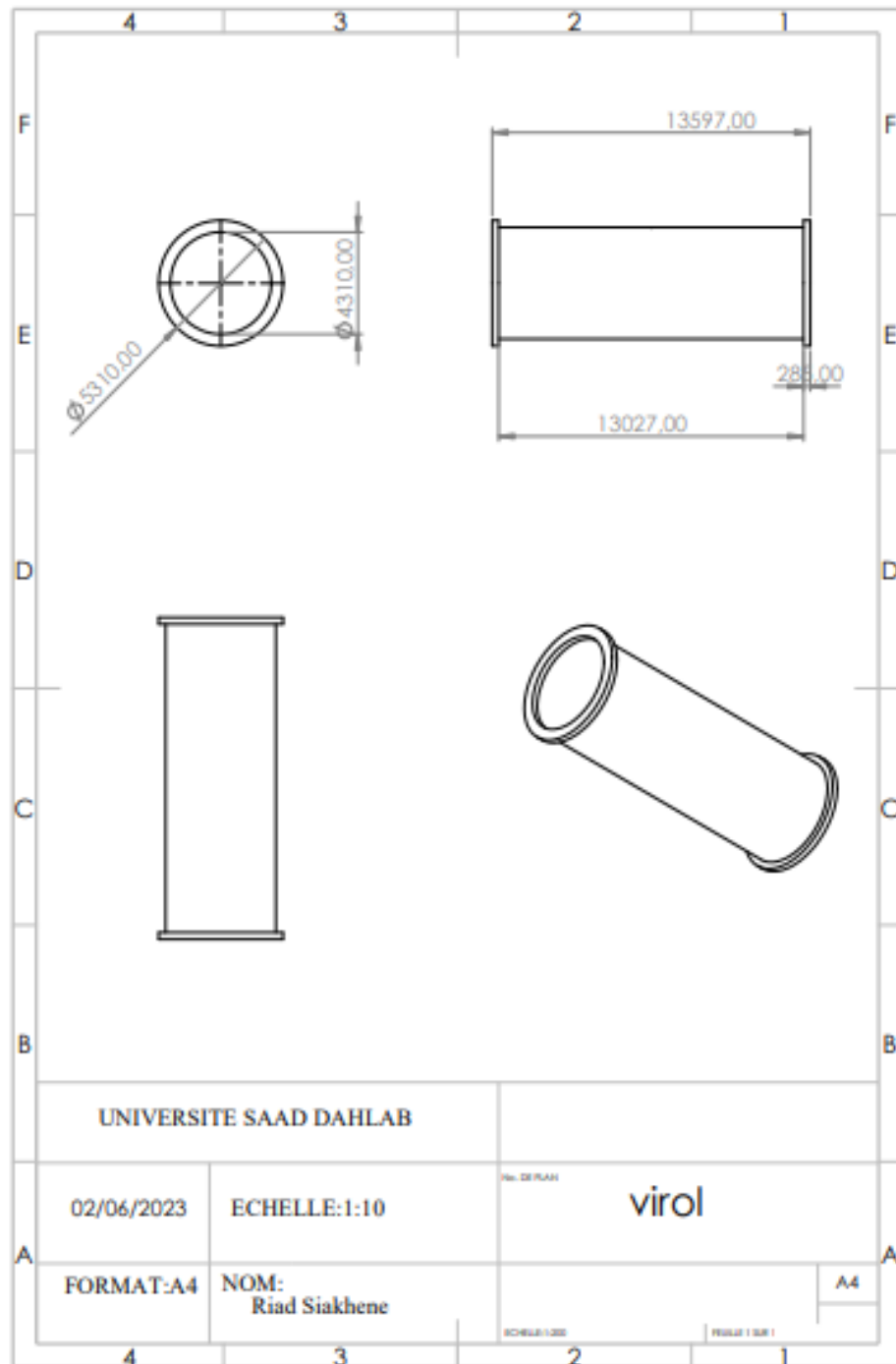


Figure 3.5 : Dessin de défintion

3.3 Simulation ANSYS

3.3.1 Présentation du logiciel ANSYS

ANSYS, Inc. est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. Deux logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

ANSYS Classic : est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie plus ou moins simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language). ANSYS Classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique ANSYS

Workbench : Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle élément finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

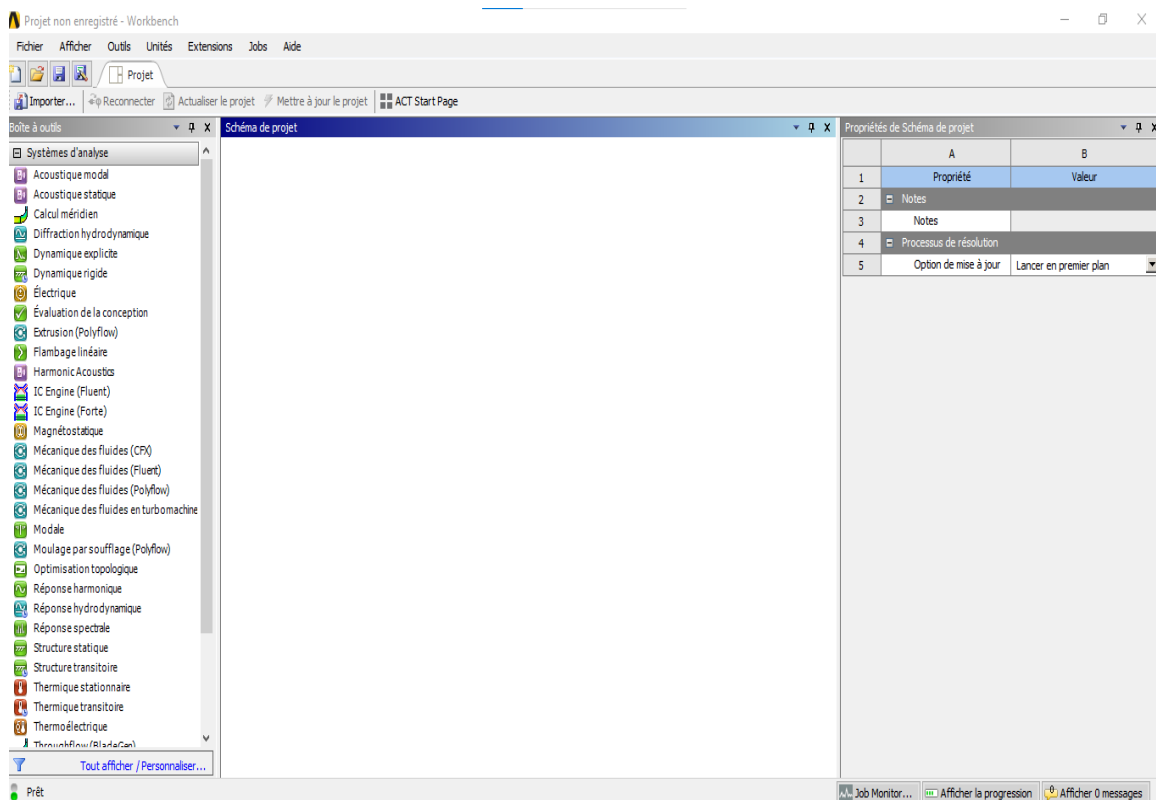


Figure 3.6 : la fenêtre du code ANSYS 19.2 - Workbench

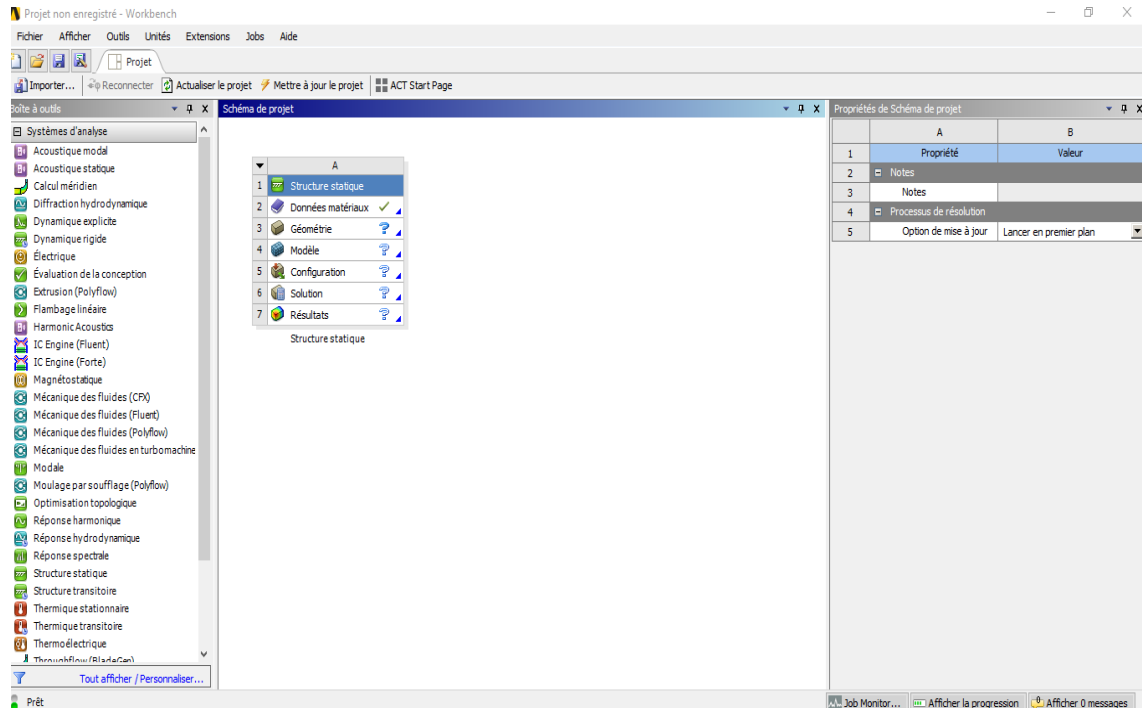


Figure 3.7 : la fenêtre de la structure statique

3.3.2 Les étapes de simulation ANSYS

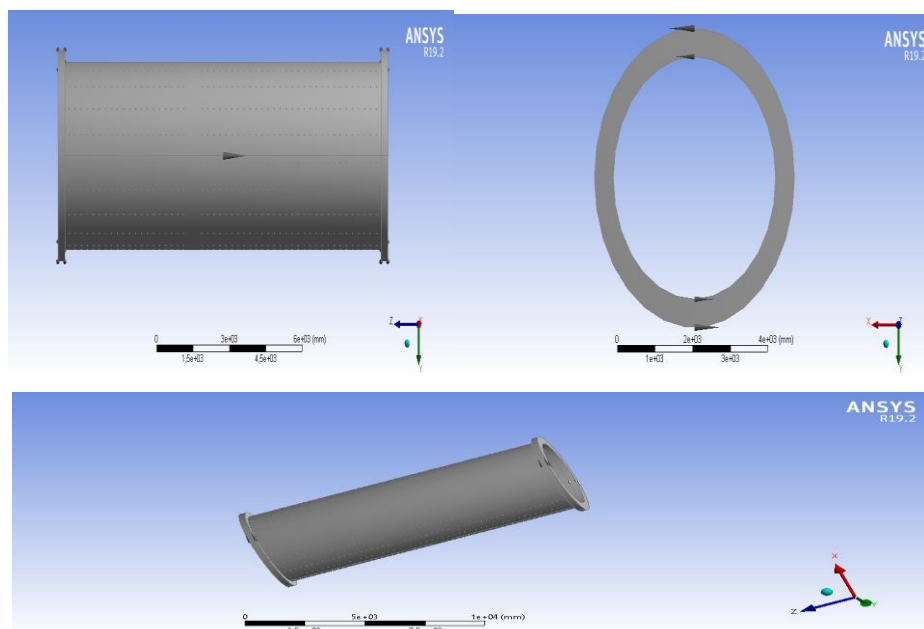


Figure 3.8 : les principales vues géométriques de la partie étudiée

3.3.2.1 Propriétés de matériau utilisé

Module de Yong : $2E+05$ MPA

Rm : 1300 MPA

Re : 900 MPA

Coefficient de Poisson : 0.3

Masse volumique : 7850 kg. M⁻³

Coefficient de dilatation thermique : 1,2E-05 C⁻¹

3.3.2.2 Système de coordonnées

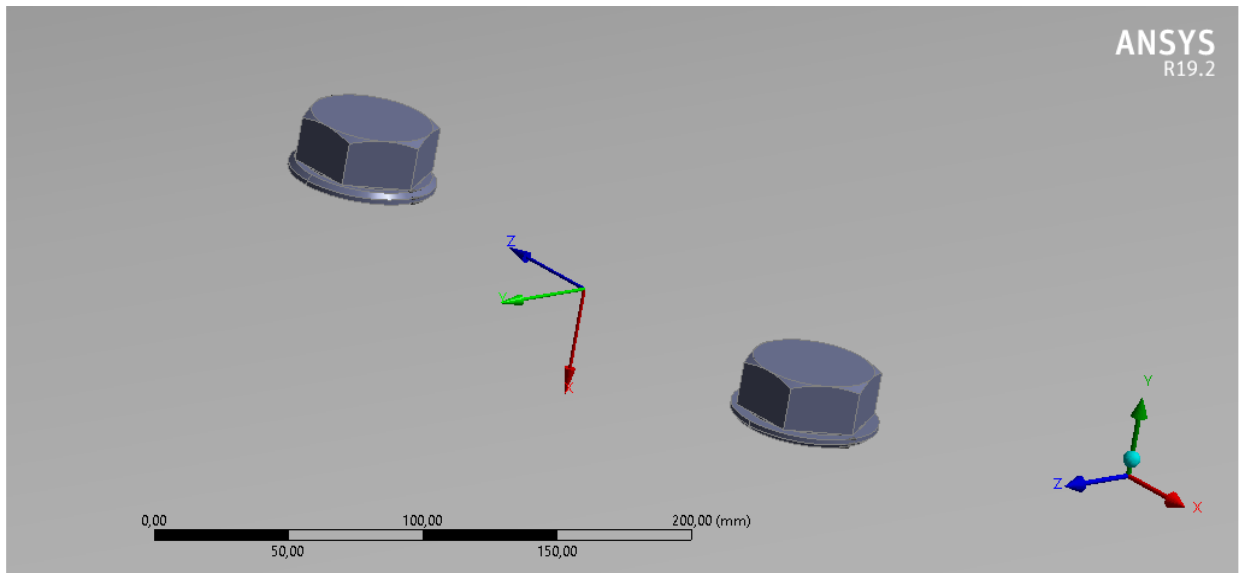
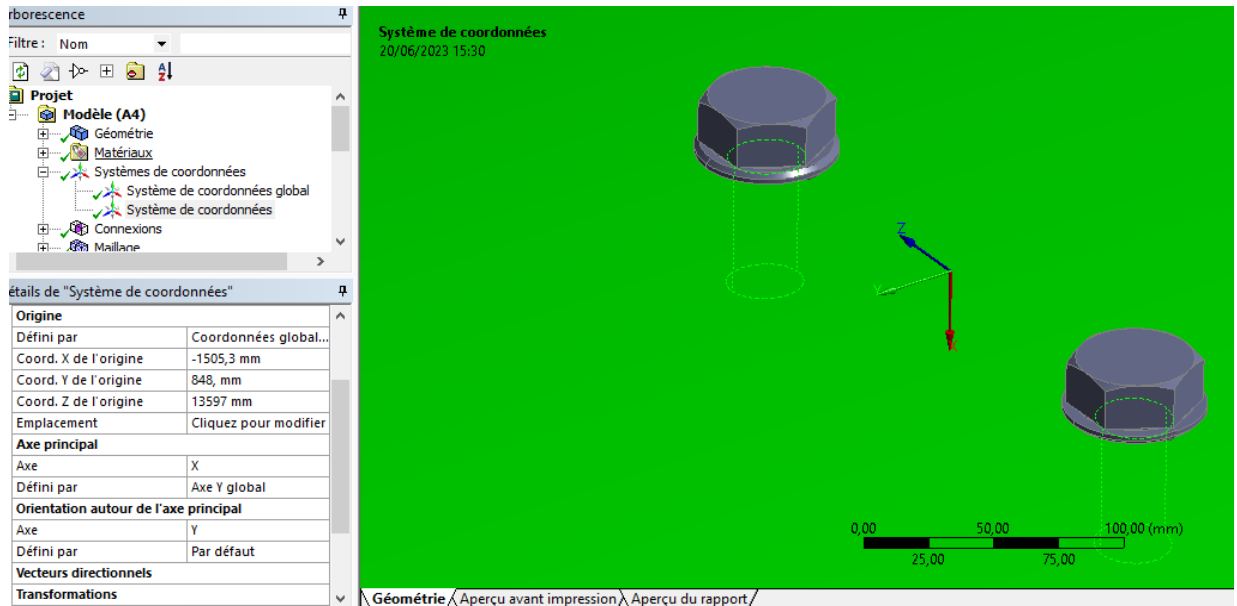


Figure 3.9 : système de coordonnées

3.3.2.3 Le Maillage

Le maillage tétraédrique est une méthode de discrétisation utilisée dans la modélisation géométrique et numérique des objets tridimensionnels. Il divise l'espace tridimensionnel en une

collection de petits polyèdres appelés tétraèdres. Chaque tétraèdre est un polyèdre à quatre faces, constitué de quatre triangles. Les sommets des tétraèdres définissent un ensemble de points dans l'espace, qui sont utilisés pour représenter la géométrie d'un objet ou d'une structure tridimensionnelle. Il est couramment utilisé dans divers domaines, tels que la simulation numérique, la modélisation de structures, la visualisation scientifique et l'analyse des éléments finis. Il offre une flexibilité dans la représentation de formes complexes, car les tétraèdres peuvent s'adapter à des géométries arbitraires, contrairement à d'autres types de maillages plus réguliers, tels que les maillages cartésiens ou hexaédriques.

Les maillages tétraédriques sont souvent générés à partir de données de surface ou de volumétriques, en utilisant des techniques telles que la triangulation de Delaunay ou la subdivision de tétraèdres. Une fois le maillage tétraédrique créé, il peut être utilisé pour résoudre des équations mathématiques, effectuer des simulations physiques, analyser des champs de données, ou encore réaliser des rendus et des visualisations graphiques.

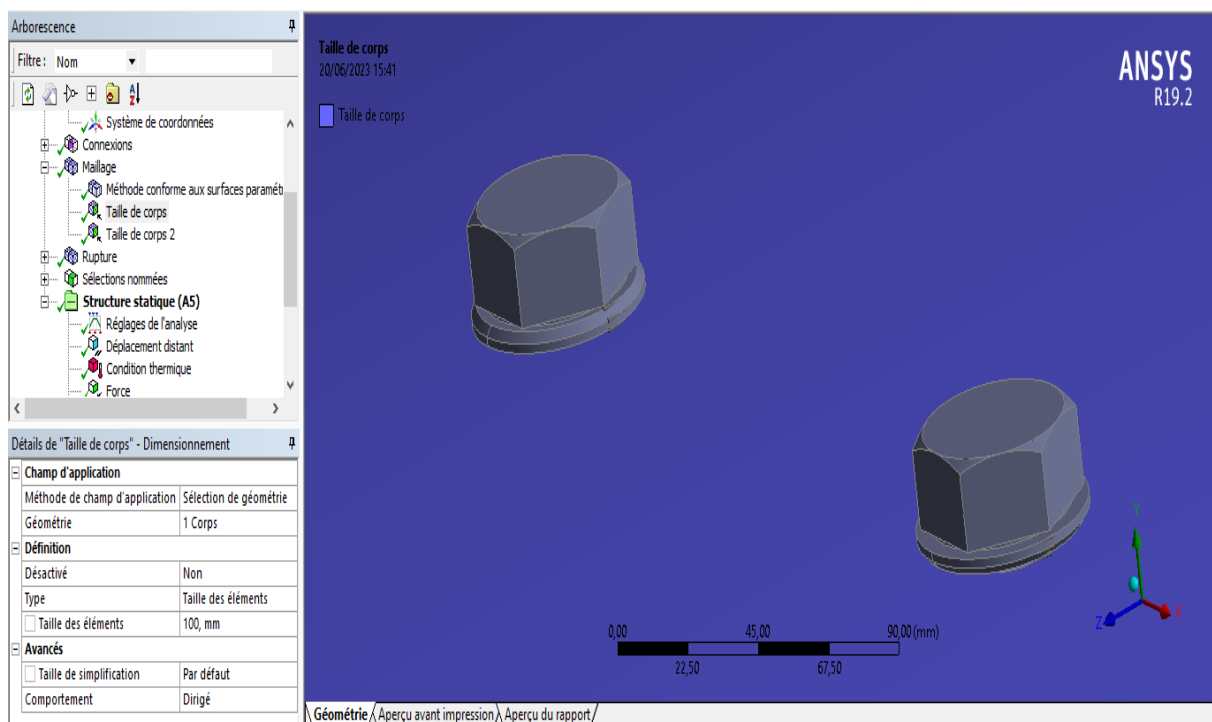


Figure 3.10 : dimensions du maillage - taille des éléments 100 mm

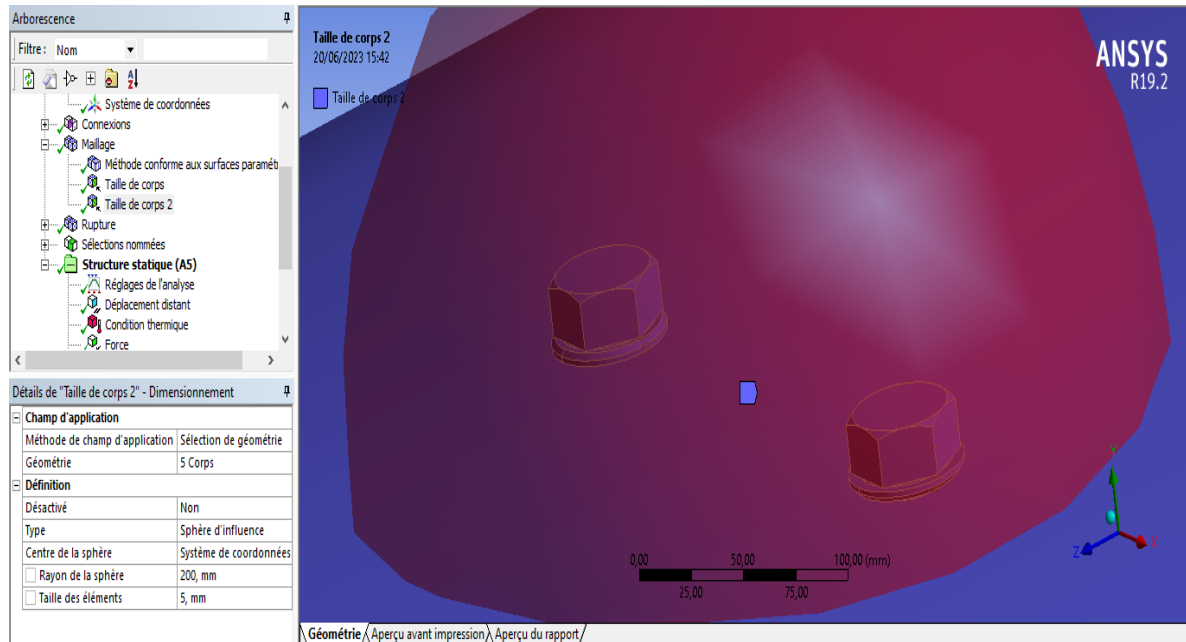


Figure 3.11 : dimensions du maillage (sphère d'influence) - rayon de la sphère 200 mm et taille des éléments 5 mm

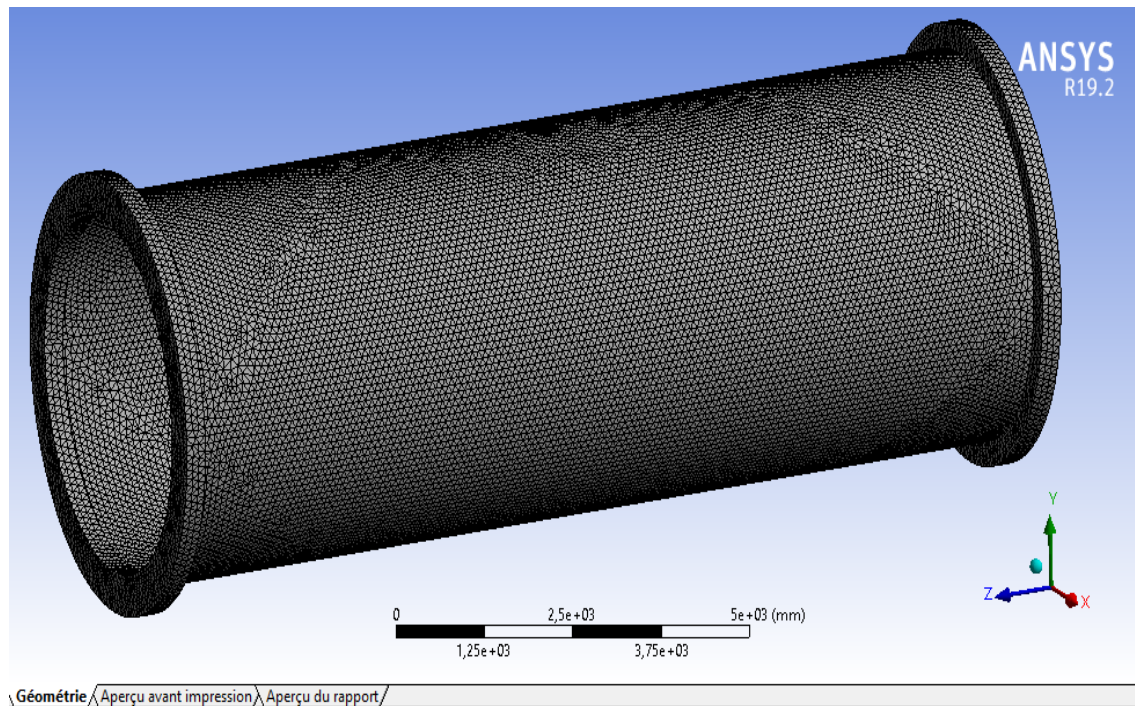


Figure 3.12 : le maillage de modèle par le code ANSYS

3.3.2.4 Rupture (fissure semi-elliptique)

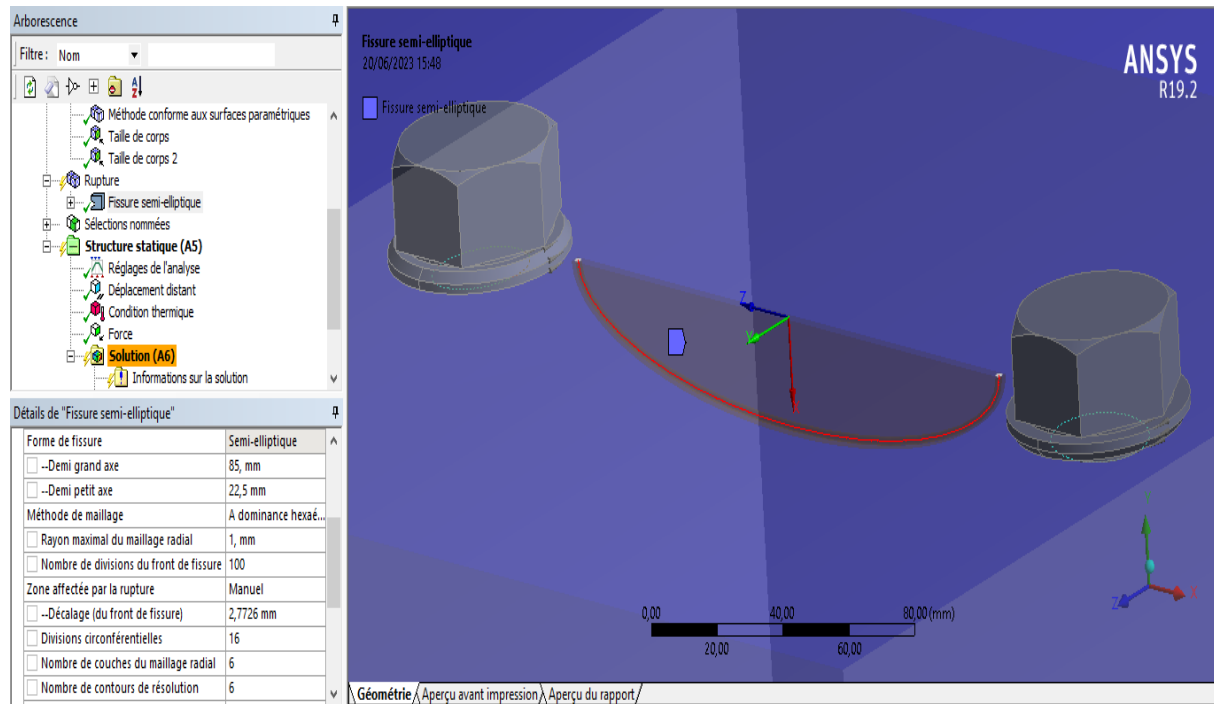


Figure 3.13 : les détails de fissure semi-elliptique

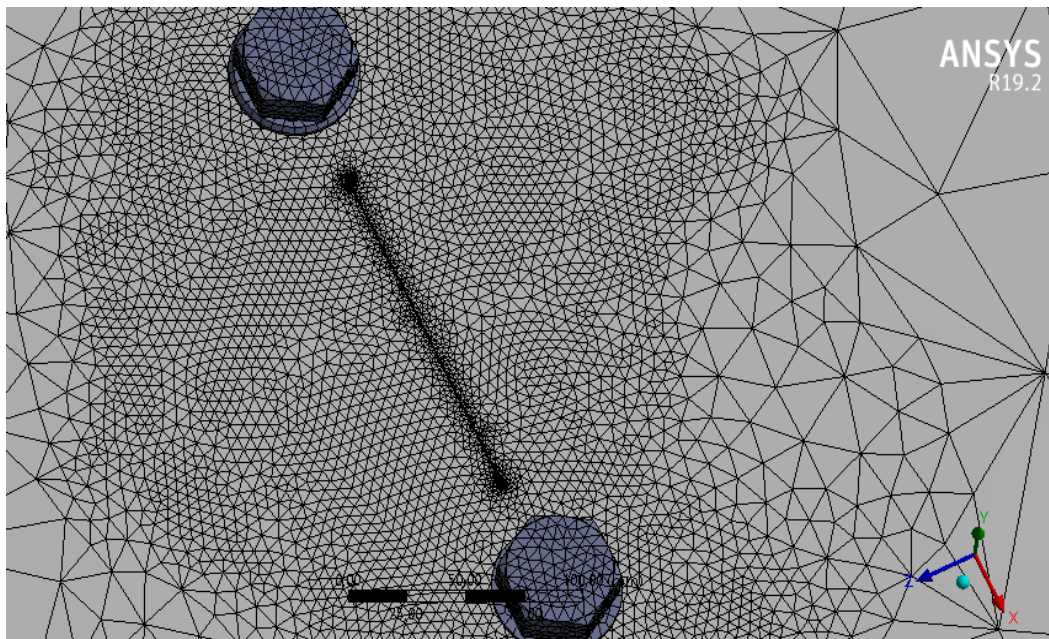


Figure 3.14 : Maillage de raffinement autour de la fissure

3.3.2.5 Les conditions aux limites

Déplacement Distant

Composante X : 0 mm

Composante Y : 0 mm

Composante Z : 0 mm

Rotation X : 0 °

Rotation Y : 0 °

Rotation Z : libre

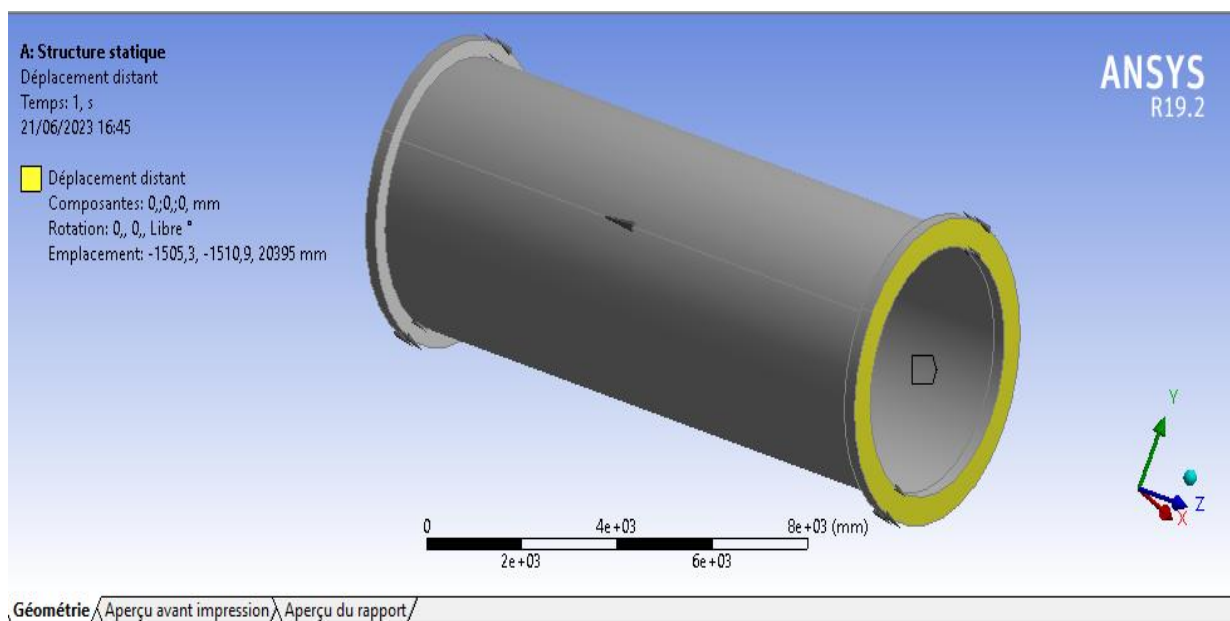


Figure 3.15 : fixation de la virole

La Force

Nous avons appliqué la Force gravitationnelle du broyeur à la surface de virole, qui est estimée à 6877791 N .

La masse : 701 100 Kg

La gravité : 9.81 ms.⁻²

$$F = m \cdot g = 701\,100 \cdot 9.81 = 6877791 \text{ N}$$

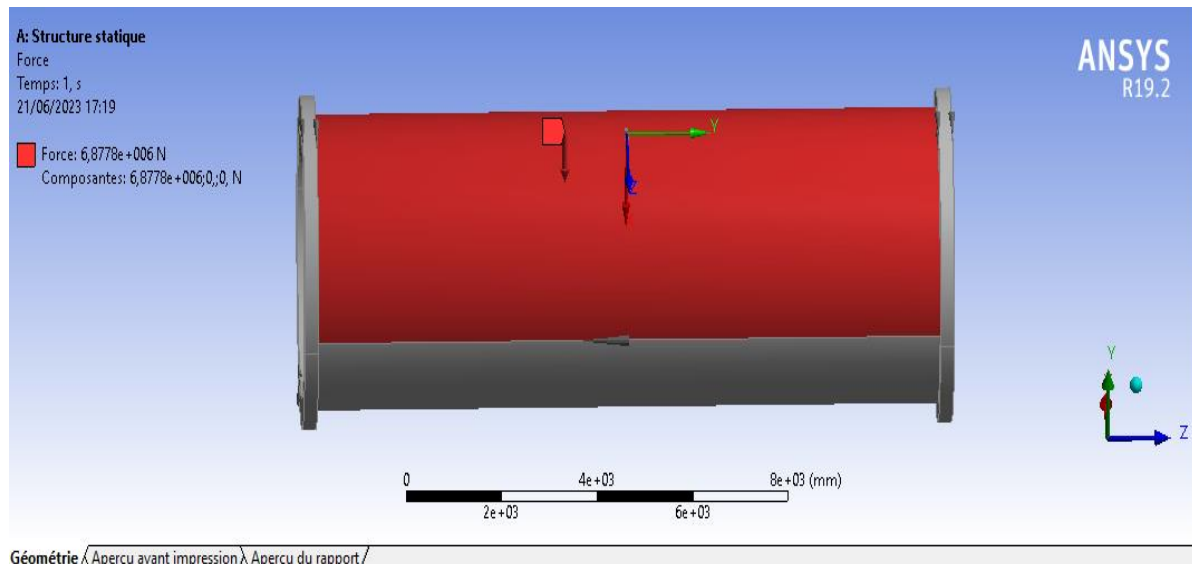


Figure 3.16 : la force appliquée sur la virole

3.4 Conclusion

Les étapes pour dessiner une fissure sur ANSYS Workbench comprennent la création d'un projet, l'ouverture de l'environnement de modélisation Design Modeler, la création de la géométrie de base du modèle, et enfin l'ajout de la fissure à l'aide des outils de modélisation appropriés. Ces étapes vous permettent de définir et de représenter correctement la fissure dans votre modèle, ce qui est essentiel pour effectuer des analyses de simulation précises. Anses Workbench offre une interface conviviale et des fonctionnalités avancées pour faciliter ce processus de modélisation et vous permettre de visualiser et d'évaluer les effets de la fissure sur le comportement du modèle.

Chapitre 4 :

Analyse d'une fissure longitudinale se développant dans la paroi d'une cuve sous pression et validation by ASME standard

4.1 Introduction

Il est évident que tout modèle numérique produit doit être validé par une autre méthode déjà testée : expérimentale, analytique, etc. La validation de la méthodologie proposée à l'aide du logiciel ANSYS a été réalisée par une analyse analytique selon les exigences de l'ASME. La section XI, article A-3000, du code ASME des chaudières et des appareils sous pression fournit une méthode de calcul des facteurs d'intensité de contrainte (SIF) K_I en utilisant des contraintes de membrane et de flexion, et elle est valide pour le calcul des SIF dus aux gradients thermiques et aux contraintes résiduelles. Elle peut être utilisée pour calculer les SIF au point le plus profond de la fissure et à un point proche de la surface libre.

Nous proposons dans cette partie du travail de comparer les valeurs des SIF calculées à partir du code ANSYS avec celles de la méthode analytique ASME. Toutes les valeurs calculées sont pour le cas du point le plus profond. Tant que la différence entre les deux ensembles de valeurs des deux méthodologies est minimale, nous pouvons juger que notre modèle numérique est correct.

4.2 Problématique

Irwin a introduit en 1948 le concept du facteur d'intensité de contrainte K , très utile en mécanique de la rupture [16, 17]. Le K décrit le champ de contrainte singulier à proximité de la fissure. Ainsi, ce facteur régit la défaillance des structures lorsqu'un seuil critique d'intensité de contrainte est atteint. Autour de l'extrémité de la fissure, il y a une région où une déformation plastique se produit ; une déformation finie qui conduit à des dommages. Par conséquent, les

contraintes ne suivent pas uniquement le terme de contrainte singulier à l'intérieur de cette région et sont généralement nivelées en raison des dommages du matériau.

Cette approche exige que la contrainte dans l'éprouvette d'essai approxime celle de la structure afin de fournir une résistance "effective" pour une évaluation de l'intégrité structurale. La contrainte appropriée est obtenue en faisant correspondre l'épaisseur et la profondeur de la fissure entre l'éprouvette et la structure. Des études expérimentales [17, 18] démontrent la validité de cette approche. Ces études montrent que l'utilisation de valeurs de ténacité à la rupture dépendantes de la géométrie permet de prédire de manière plus précise les performances en matière de rupture des structures que ne le permet la mécanique de rupture conventionnelle.

La mécanique de rupture linéaire élastique fournit les relations entre la contrainte appliquée, la ténacité à la rupture du matériau et la taille critique de la fissure.

L'appendice D de l'ASME VIII Div 3 fournit des méthodes d'ingénierie pour calculer le facteur d'intensité de contrainte KI pour diverses géométries de fissures présumées dans les récipients à paroi épaisse.

Dans ce travail, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'étude de l'effet du rapport entre la profondeur de la fissure et l'épaisseur du récipient (a/t) et de l'effet du rapport entre la géométrie de la fissure et le SIF (a/c) (Fig. 1). L'analyse du SIF est réalisée en supposant que la propagation se fait radialement (selon l'épaisseur de l'enveloppe) et en utilisant également l'hypothèse de la plaque infinie avec un champ de contrainte uni axial, alors qu'en réalité il s'agit d'un champ triaxial.

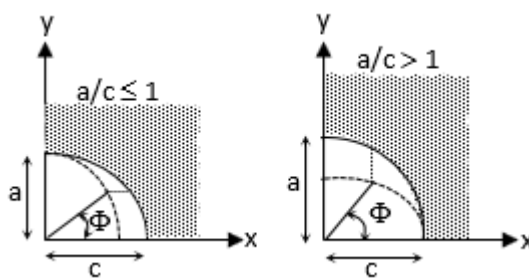


Figure 4.7: Fissure superficielle dans une plaque finie

4.3 Méthodes de vérification de l'approche numérique

Il existe plusieurs méthodes pour développer des solutions de facteurs d'intensité de contrainte (SIF) pour les problèmes de structures fissurées [19, 20]. Les solutions de base pour les géométries simples peuvent être dérivées à l'aide de méthodes classiques d'élasticité qui utilisent des fonctions de contrainte complexes [19, 21]. Il existe également plusieurs méthodes expérimentales qui ont été utilisées pour obtenir (ou vérifier) les SIF pour les éléments structuraux fissurés, telles que la méthode de la compliance et la méthode photoélastique. Bien qu'une connaissance générale de chaque méthode de solution des SIF puisse être utile pour aborder des problèmes spécifiques, une connaissance détaillée est nécessaire avant qu'une méthode puisse être appliquée pour résoudre un problème donné.

Cette méthode peut être utilisée pour calculer les facteurs d'intensité de contrainte pour les fissures de type A (Fig. 2). La même méthode est également valable pour le calcul des facteurs d'intensité de contrainte dus aux gradients thermiques et aux contraintes résiduelles [22]. Elle peut être utilisée pour calculer les facteurs d'intensité de contrainte au point le plus profond de la fissure et à un point proche de la surface libre. Pour une fissure en surface, les contraintes normales au plan de la fissure au niveau de la fissure sont représentées par un ajustement polynomial sur la profondeur de la fissure selon la relation suivante :

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \quad 2.1$$

Où :

A_0, A_1, A_2, A_3 sont des constants ;

a , profondeur de la fissure ;

x , distance à travers le mur mesurée à partir de la surface défectueuse

Les coefficients A_0 à A_3 fourniront une représentation précise de la contrainte sur le plan de la faille pour toutes les situations (Fig. 2.3).

Les valeurs de profondeur de la fissure, $0 \leq x/a \leq 1$, sont prises en compte dans l'analyse. Les contraintes provenant de toutes les sources doivent être considérées.

Les facteurs d'intensité de contrainte pour les fissures en surface sont calculés en utilisant la relation de contrainte polynomiale cubique donnée par l'équation (2.2) :

$$K_I = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3]\sqrt{\pi a/Q} \quad 2.2$$

Où : A_0 à A_3 sont les coefficients de l'équation (2.1) qui représentent la distribution de contrainte sur la profondeur de la fissure, $0 \leq x/a \leq 1$. Lors du calcul de K_I en fonction de la profondeur de la faille, un nouvel ensemble de coefficients A_0 à A_3 doit être déterminé pour chaque nouvelle valeur de profondeur de la fissure.

A_p représente la pression interne du récipient, si la pression agit sur les surfaces de la fissure ($A_p=0$ pour les autres types de défauts).

G_0, G_1, G_2, G_3 sont les facteurs de correction de surface libre provenant des Tables 2.1. Les valeurs des coefficients pour le cas de la surface libre sont données en annexe A.

Q est le paramètre de forme de la fissure utilisant l'équation (2.3).

$$Q = 1 + 4.593(a/2c)^{1.65} - q_y \quad 2.3$$

Où

$l = 2c$, l'axe majeur de la fissure ;

a/l , le rapport d'aspect de la fissure ; $0 \leq a/l \leq 0.5$;

q_y , le facteur de correction de la zone plastique, qui dans notre cas est négligé ;

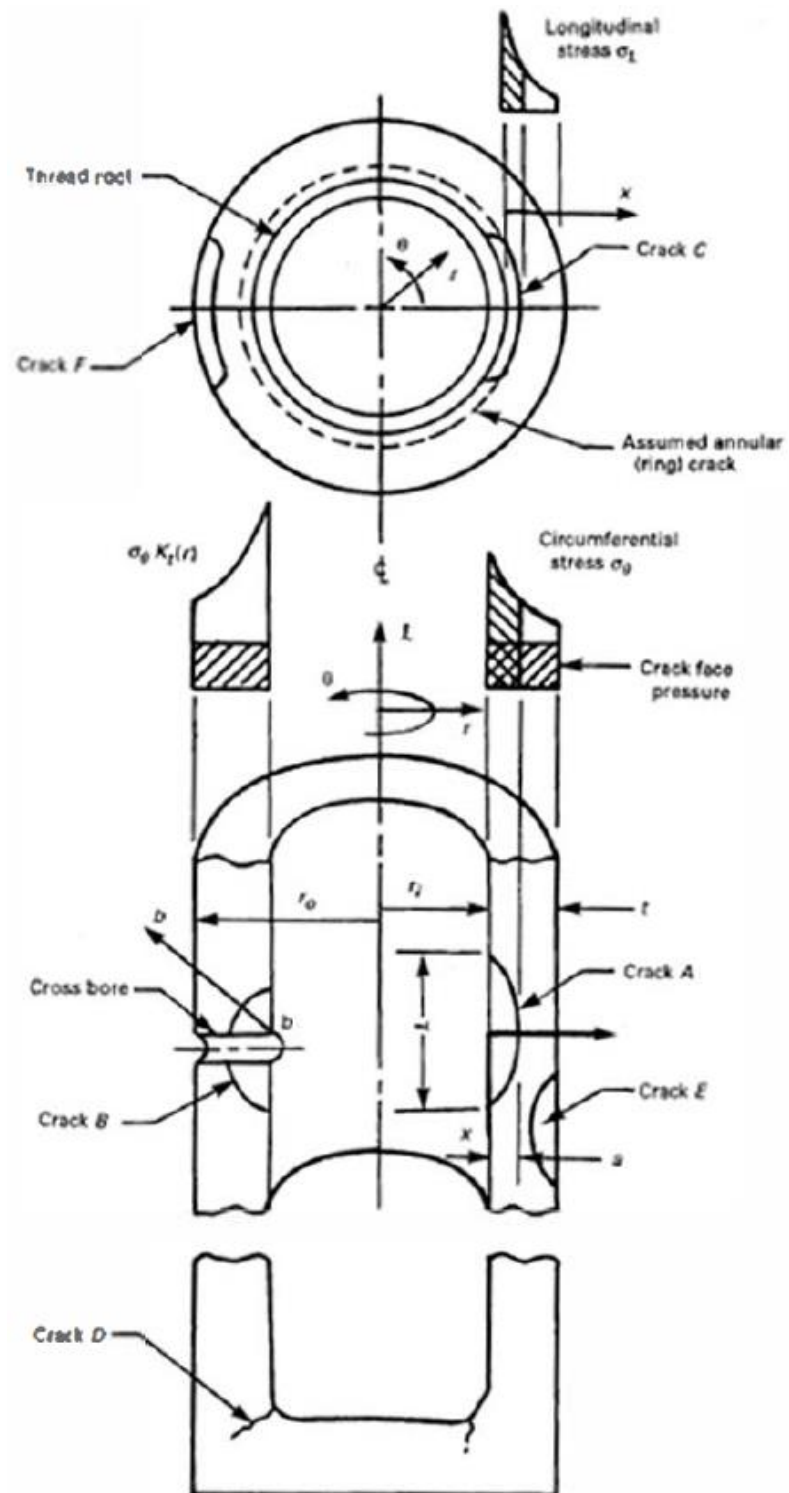


Figure 4.8: Types de fissures [17]

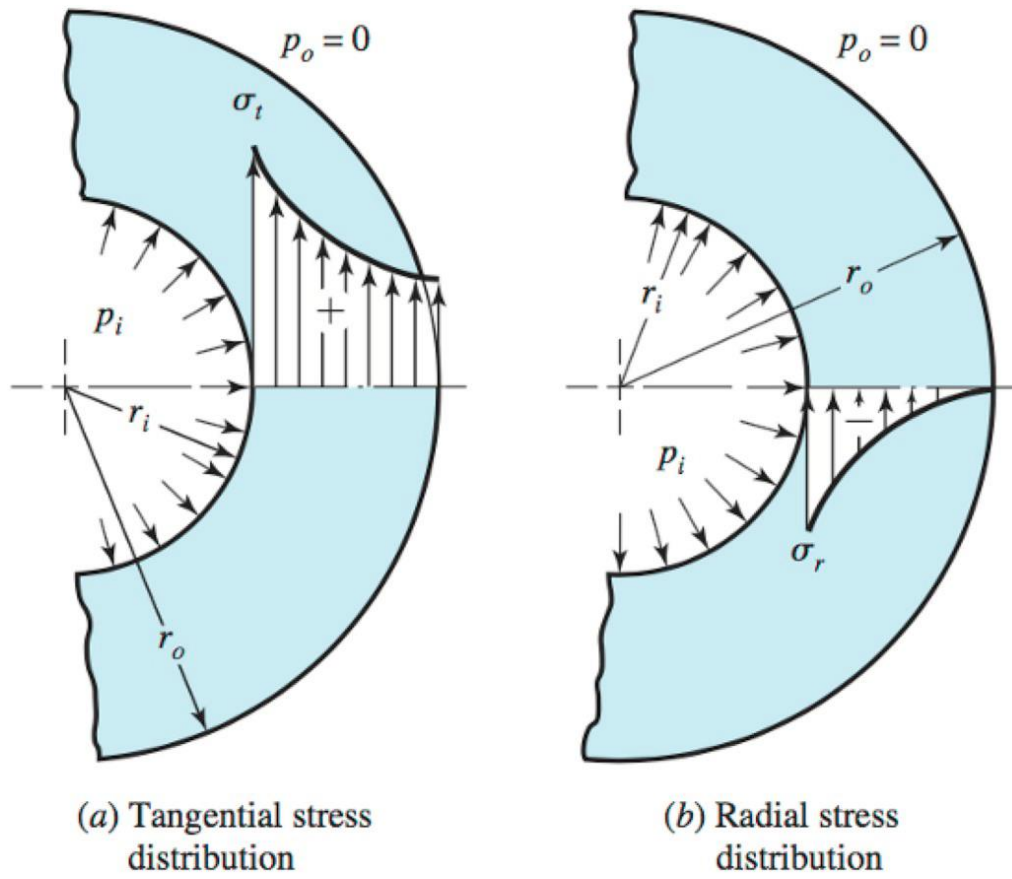


Figure 4.9: Répartition des contraintes radiales dans un réservoir sous pression

Table 4.4: Les coefficients G0 à G3 pour une fissure en surface au point le plus profond sont présentés dans la référence [22].

Coefficients	a/t	Flaw Aspect Ratio					
		a/2c					
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Uniform	0.00	1.1208	1.0969	1.0856	1.0727	1.0564	1.0366
G0	0.05	1.1461	1.1000	1.0879	1.0740	1.0575	1.0373
	0.10	1.1945	1.1152	1.0947	1.0779	1.0609	1.0396
	0.15	1.2670	1.1402	1.1058	1.0842	1.0664	1.0432
	0.20	1.3654	1.1744	1.1210	1.0928	1.0739	1.0482
	0.25	1.4929	1.2170	1.1399	1.1035	1.0832	1.0543
	0.30	1.6539	1.2670	1.1621	1.1160	1.0960	1.0614
	0.40	2.1068	1.3840	1.2135	1.1448	1.1190	1.0772
	0.50	2.8254	1.5128	1.2693	1.1757	1.1457	1.0931
	0.60	4.0420	1.6372	1.3216	1.2039	1.1699	1.1058
	0.70	6.3743	1.7373	1.3610	1.2237	1.1868	1.1112
	0.80	11.9910	1.7899	1.3761	1.2285	1.1902	1.1045
Linear	0.00	0.7622	0.6635	0.6826	0.7019	0.7214	0.7411
G1	0.05	0.7624	0.6651	0.6833	0.7022	0.7216	0.7413
	0.10	0.7732	0.6700	0.6855	0.7031	0.7221	0.7418
	0.15	0.7945	0.6780	0.6890	0.7046	0.7230	0.7426
	0.20	0.8267	0.6891	0.6939	0.7067	0.7243	0.7420
	0.25	0.8706	0.7029	0.7000	0.7094	0.7260	0.7451
	0.30	0.9276	0.7193	0.7073	0.7126	0.7282	0.7468
	0.40	1.0907	0.7584	0.7249	0.7209	0.7338	0.7511
	0.50	1.3501	0.8029	0.7454	0.7314	0.7417	0.7566
	0.60	1.7863	0.8488	0.7671	0.7441	0.7520	0.7631
	0.70	2.6125	0.8908	0.7882	0.7588	0.7653	0.7707

	0.80	4.5727	0.9288	0.8063	0.7753	0.7822	0.7792
Quadratic	0.00	0.6009	0.5078	0.5310	0.5556	0.5815	0.6084
G2	0.05	0.5969	0.5086	0.5313	0.5557	0.5815	0.6084
	0.10	0.5996	0.5109	0.5323	0.5560	0.5815	0.6085
	0.15	0.6088	0.5148	0.5340	0.5564	0.5815	0.6087
	0.20	0.6247	0.5202	0.5364	0.5571	0.5815	0.6089
	0.25	0.6475	0.5269	0.5394	0.5580	0.5817	0.6093
	0.30	0.6775	0.5350	0.5430	0.5592	0.5820	0.6099
	0.40	0.7651	0.5545	0.5520	0.5627	0.5835	0.6115
	0.50	0.9048	0.5776	0.5632	0.5680	0.5869	0.6144
	0.60	1.1382	0.6027	0.5762	0.5760	0.5931	0.6188
	0.70	1.5757	0.6281	0.5907	0.5874	0.6037	0.6255
	0.80	2.5997	0.6513	0.6063	0.6031	0.6200	0.6351
Cubic	0.00	0.5060	0.4246	0.4480	0.4735	0.5006	0.5290
G3	0.05	0.5012	0.4250	0.4482	0.4736	0.5006	0.5290
	0.10	0.5012	0.4264	0.4488	0.4736	0.5004	0.5290
	0.15	0.5059	0.4286	0.4498	0.4737	0.5001	0.5289
	0.20	0.5152	0.4317	0.4511	0.4738	0.4998	0.5289
	0.25	0.5292	0.4357	0.4528	0.4741	0.4994	0.5289
	0.30	0.5483	0.4404	0.4550	0.4746	0.4992	0.5291
	0.40	0.6045	0.4522	0.4605	0.4763	0.4993	0.5298
	0.50	0.6943	0.4665	0.4678	0.4795	0.5010	0.5316
	0.60	0.8435	0.4829	0.4769	0.4853	0.5054	0.5349
	0.70	1.1207	0.5007	0.4880	0.4945	0.5141	0.5407
	0.80	1.7614	0.5190	0.5013	0.5085	0.5286	0.5487

4.4 Résultats et discussions

Les valeurs SIF calculées à partir de la méthode d'analyse de l'étalon ASME et celles obtenues par la méthode des éléments finis (ANSYS) sont présentées dans les tableaux 2.2-4. Les résultats SIF sont donnés pour différentes formes de fissures ($a/c = 0.2$ à 1) et pour différentes tailles de fissures ($a/t = 0.25$ à 0.8).

Tableau 4.2 : Valeurs de KI (MPa m) calculées par ASME et ANSYS au point le plus profond ($a/t = 0.25$)

a/c	ASME	ANSYS	Deviation
0.2	55.62	54.50	2.01
0.4	47.56	46.62	1.97
0.6	41.46	40.60	2.07
0.8	36.62	36.52	0.26
1	32.20	36.19	12.37

Tableau 4.5: KI values (MPa√m) calculated by ASME and ANSYS at deepest point ($a/t = 0.4$)

a/c	ASME	ANSYS	Deviation
0.2	79.80	77.90	2.38
0.4	63.85	62.74	1.73
0.6	54.23	53.16	1.99
0.8	47.69	48.47	1.65
1	41.48	47.46	14.43

Tableau 4.6: KI values (MPa√m) calculated by ASME and ANSYS at deepest point ($a/t=0.8$)

a/c	ASME	ANSYS	Deviation
0.2	144.97	149.19	2.91
0.4	101.58	102.48	0.88
0.6	81.59	88.71	8.73
0.8	71.08	82.86	16.57
1	59.54	77.61	30.34

Figures (4.4-6) represent the evolution of SIF as a function of crack shape (a/c) for the three crack sizes $a/t=0.25$, 0.4 and 0.8 respectively. It is noted that the SIF values resulting from the two methods are almost identical except for the value of $a/c=1$ (circular crack). The ASME standard stipulates that the procedure is not valid for the case of the circular crack ($a/c=1$)[23]. The results found show the accuracy of our elaborate numerical model. This gives us confidence to calculate the rest of the SIF values for the different parametric angles ($\Phi=0$ to 180°).

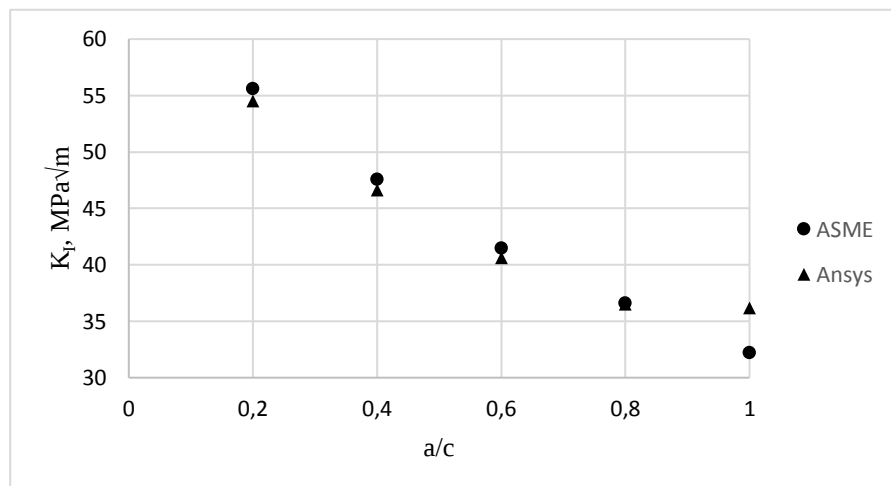


Figure 4.10: Valeurs SIF pour le point le plus profond ($a/t = 0.25$)

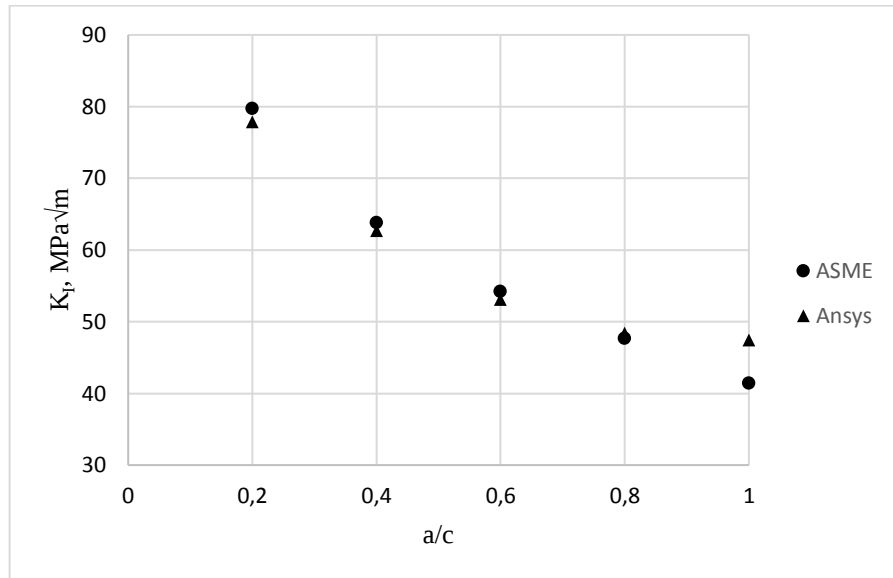


Figure 4.11: Valeurs SIF pour le point le plus profond ($a/t = 0.4$)

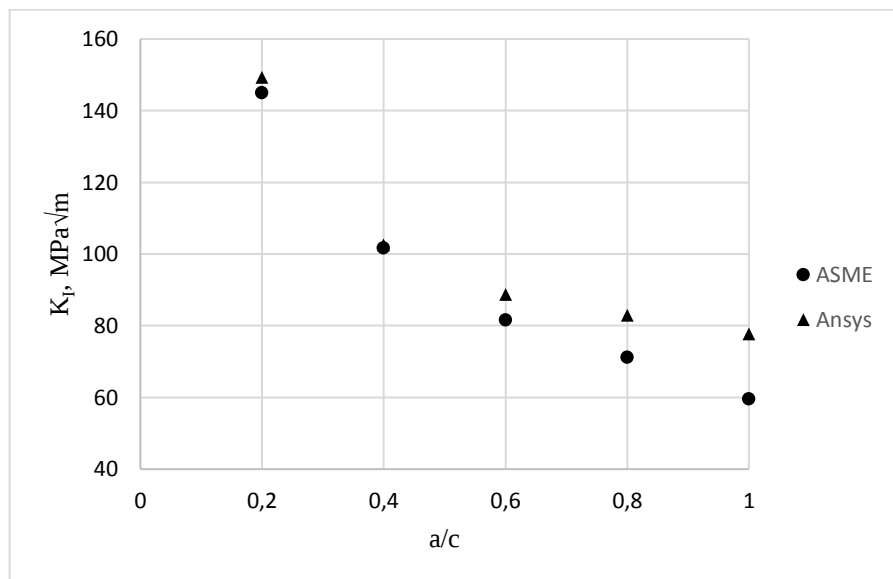


Figure 4.12: Valeurs SIF pour le point le plus profond ($a/t = 0.8$)

4.5 Conclusions

Un modèle numérique a été proposé pour le calcul du FIS des fissures longitudinales semi elliptiques situées dans la paroi d'un réservoir sous pression. Le modèle a été validé par la norme ASME.

Les résultats obtenus montrent un bon accord avec ceux rapportés dans la littérature. Ils montrent que le SIF dépend du rapport a/c et a/t , comme il dépend de l'angle paramétrique Φ . Ces résultats montrent également que les calculs du SIF basés sur l'hypothèse de plaque infinie simpliste donnent des valeurs inférieures à la réalité, parce qu'ils déforment la répartition du stress par rapport à l'étendue de la fissure.

Comme il a déjà été dit précédemment, la procédure ASME n'est valable que pour deux angles paramétriques $\Phi=0$ et $\Phi=90$. Au chapitre 3, nous calculerons le FIS pour un angle variant entre 0° et 180° et ceci pour les différentes formes de la fissure (a/c) et pour les différentes tailles de la fissure (a/t).

Chapitre 5 : Résultats et interprétations

5.1 Introduction

Dans la conception d'une cuve sous pression, l'utilisation de la théorie de la mécanique de la rupture et des tests non destructifs sont les outils les plus efficaces pour les ingénieurs concepteurs. La mécanique de la rupture est généralement utilisée pour prédire la défaillance des composants causée par la préexistence de petites fissures. Elle nous permet également de prendre des précautions pour arrêter toute propagation future de la fissure ou pour déterminer la durée de vie de la structure dans le cas où la propagation est inévitable.

Dans le cas d'un matériau élastique (rupture fragile), l'un des critères de fissuration les plus utilisés est le facteur d'intensité de contrainte (FIC). Cependant, étant donné qu'il est difficile de déterminer avec précision le SIF pour des fissures dans des structures complexes par des solutions analytiques, l'utilisation de méthodes numériques telles que les éléments finis deviennent le seul outil approprié [24, 25].

Dans ce travail, nous procéderons au calcul du FIC dans la paroi de la virole avec une force gravitationnelle du broyeur à la surface de la Virole, qui est estimée à 6877791 N.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'effet du rapport de la profondeur de la fissure sur l'épaisseur de la cuve ($t=45\text{mm}$) et à l'effet du rapport de la géométrie de la fissure (a/c) sur le SIF. L'analyse du SIF est effectuée en supposant que la propagation se fait radialement (selon l'épaisseur de la cuve) soumise à un champ de contrainte triaxial.

5.2 Description du modèle numérique

L'analyse par éléments finis (FE) est réalisée à l'aide du logiciel ANSYS 19.2. Le modèle Workbench 19.2 développé est présenté à la figure 5.1. Un modèle d'éléments finis 3D de la cuve sous pression avec fissure a été préparé pour la modélisation du SIF. Comme la cuve sous pression est symétrique, seule 1/12 de la pièce a été modélisée (figure 5.2). Le modèle d'EF préparé avec les conditions aux limites et la pression appliquée est présenté à la figure 5.3. Le code ANSYS adopte deux approches pour l'évaluation des FIC :

- Méthode intégrale de contour : le calcul du SIF est effectué pendant la phase de résolution et les résultats sont stockés pour le post-traitement.
- Méthode d'extrapolation de déplacement : le calcul du SIF est effectué pendant le post-traitement. Cette méthode est limitée aux problèmes d'élasticité linéaire avec des matériaux isotropes homogènes près de la région de fissure.

La méthode intégrale de contour convient à un large éventail d'applications. Dans l'analyse par éléments finis, cette méthode est suffisamment précise pour l'évaluation du SIF en mode mixte et c'est également un outil robuste pour les modèles hétérogènes avec des propriétés matérielles continues, discontinues ou non linéaires. Cette méthode donne des résultats plus précis car l'intégrale de contour est évaluée en des points éloignés de la fissure. Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode intégrale de contour.

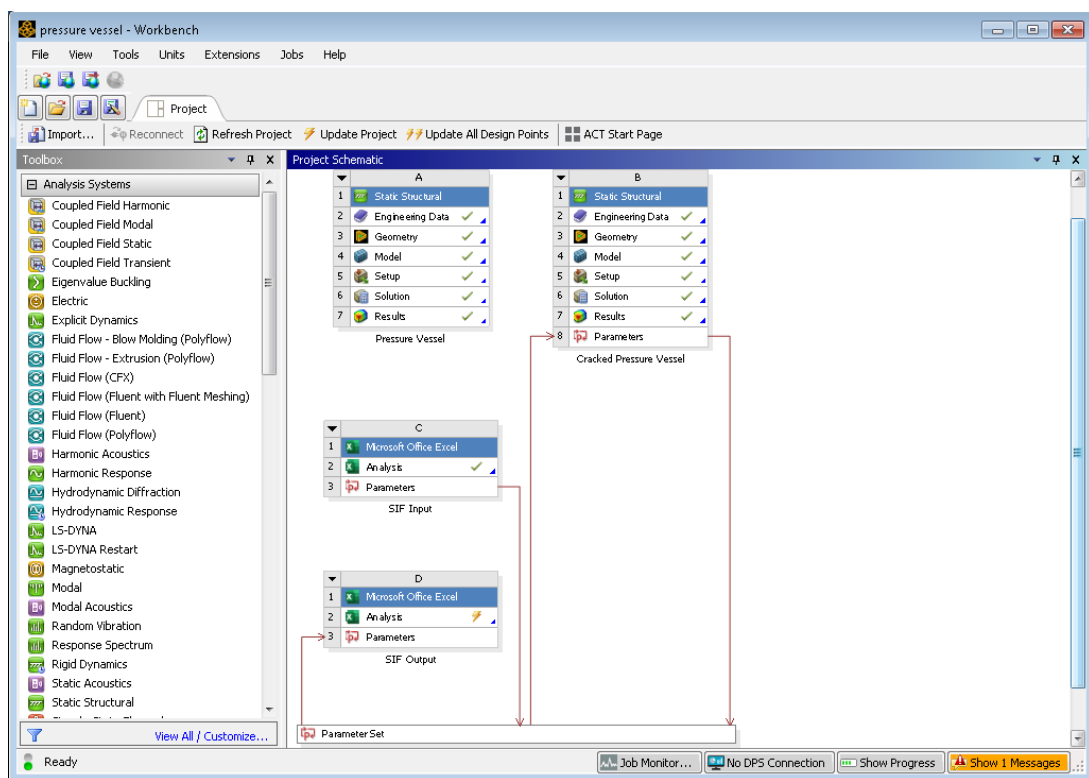


Figure 5.1 : Modèle Workbench 19.2

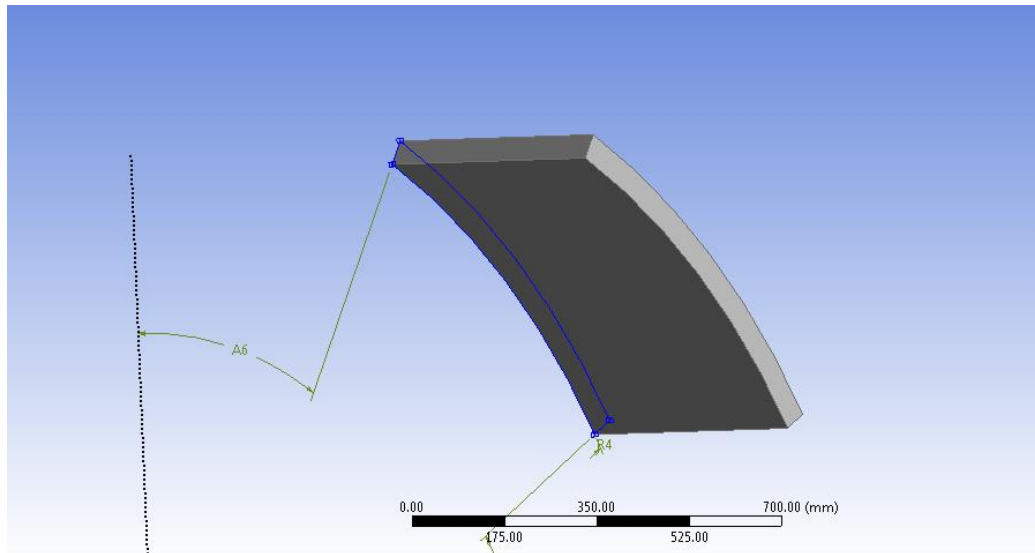


Figure 5.2 : Modèle EF d'une virole chargée préparé avec ANSYS.

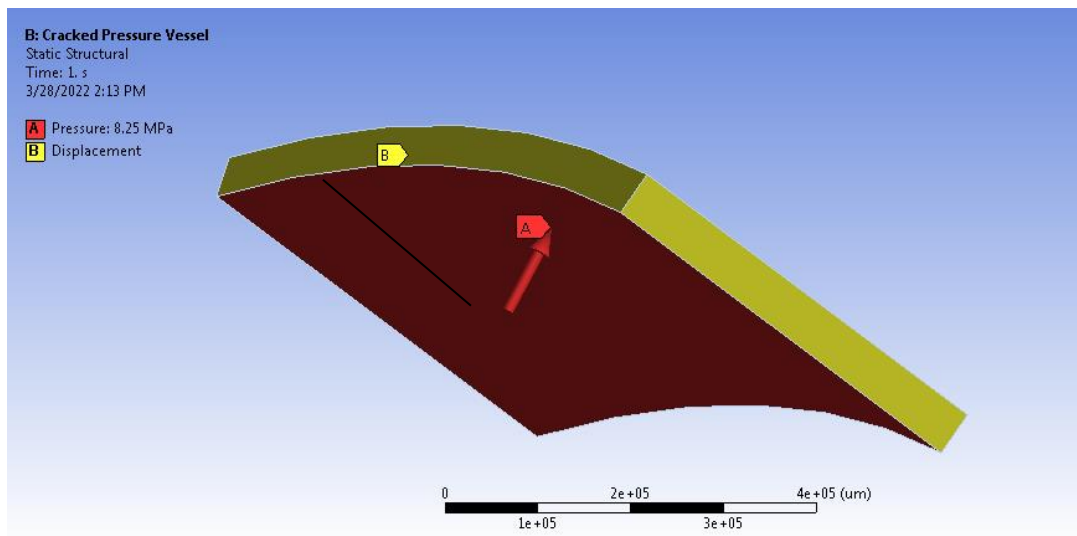


Figure 5.3 : Charge appliquée et conditions aux limites

Les principales configurations utilisées par ANSYS dans le module de rupture sont les suivantes :

- a. Rayon majeur (Major Radius) :** Spécifie le rayon majeur, qui définit la taille de la forme de la fissure le long de l'axe Z (c'est-à-dire, la largeur de la fissure "c").
- b. Rayon mineur (Minor Radius) :** Spécifie le rayon mineur, qui définit la taille de la forme de la fissure le long de l'axe X (c'est-à-dire, la profondeur de la fissure "a").

c. Méthode de maillage (MeSH Method) : Cette propriété permet de sélectionner la méthode de maillage à utiliser pour le maillage de la fissure semi-elliptique. Les options incluent Hex Dominant (par défaut) et Tetrahedrons.

d. Rayon du plus grand contour (Largest Contour Radius) : Spécifie le rayon du plus grand contour pour la forme de la fissure.

e. Divisions de la face de fissure (Crack Front Divisions) : Spécifie le nombre de divisions pour la face de fissure.

f. Zone affectée par la rupture (Fracture Affected Zone) : La zone affectée par la rupture est la région qui contient une fissure. Le contrôle Zone affectée par la rupture détermine comment la hauteur de la zone affectée par la rupture est définie :

- Program Controlled (Contrôlé par le programme) : Le logiciel calcule la hauteur, et la hauteur de la zone affectée par la rupture est en lecture seule. C'est la valeur par défaut.
- Manual (Manuel) : Vous entrez la hauteur dans le champ Hauteur de la zone affectée par la rupture.

g. Hauteur de la zone affectée par la rupture (Fracture Affected Zone Height) : Cette valeur spécifie deux choses : 1) la hauteur de la zone affectée par la rupture, qui est dans la direction Y du système de coordonnées de la fissure ; et 2) la distance totale de laquelle la zone affectée par la rupture s'étend dans la direction positive et négative de l'axe Z du système de coordonnées de la fissure à partir des extrémités de la face de fissure.

h. Divisions circonférentielles (Circumferential Divisions) : Spécifie le nombre de divisions circonférentielles pour la forme de la fissure.

i. Contours de maillage (Mesh Contours) : Spécifie le nombre de contours de maillage pour la forme de la fissure.

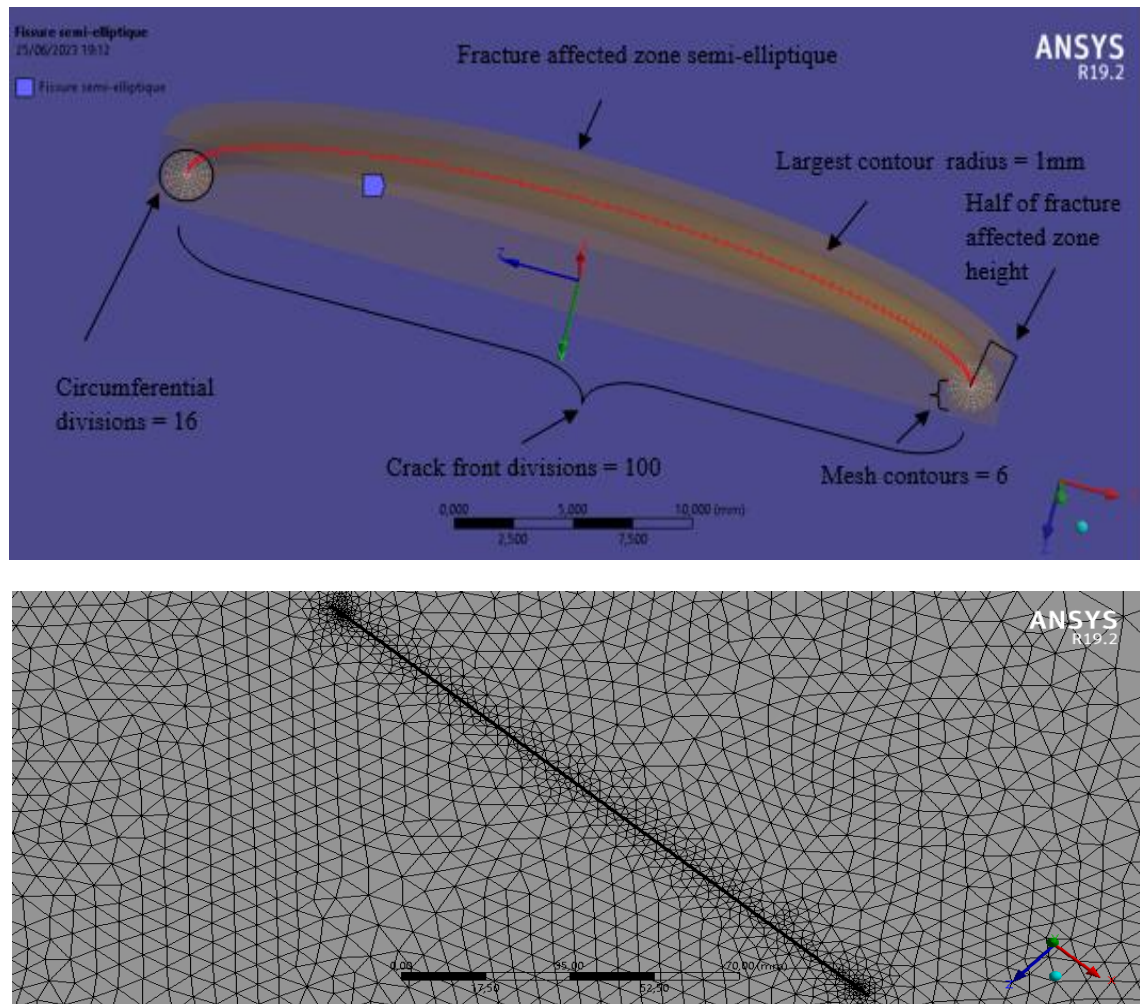


Figure 5.4 : Les différents paramètres de configuration de la fissure semi-elliptique [26]

5.3 Résultats et interprétations

Les figures montrent l'évolution du Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ pour des tailles de fissure (a/t) égales à 0.25, 0.4 et 0.8 respectivement. La première observation est que la valeur du SIF augmente avec la taille de la fissure (a/t). On observe également que le facteur d'intensité de contrainte maximal se produit au point de profondeur maximale pour de petits rapports de profondeur de fissure sur la longueur de fissure (a/c), et à l'intersection de la fissure avec la surface avant pour de grands rapports. À mesure que la forme devient de plus en plus circulaire ($a/c=1$), le maximum du FIC se déplace vers la surface libre (intersection de la fissure avec la paroi). Ce résultat est cohérent avec plusieurs études antérieures, y compris celle de J. C. Newman [18]. À partir de ces figures, on peut voir que la fissure se propage le long de la trajectoire semi-elliptique.

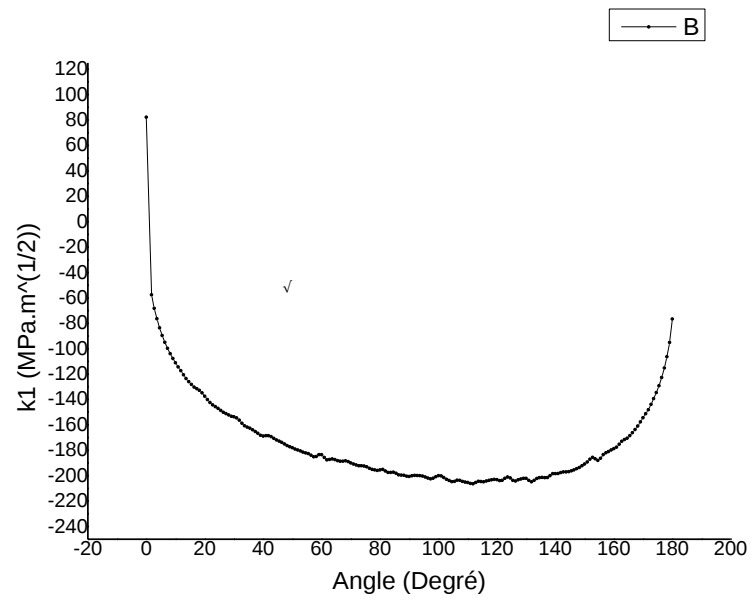


Figure 5.5 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.09$)

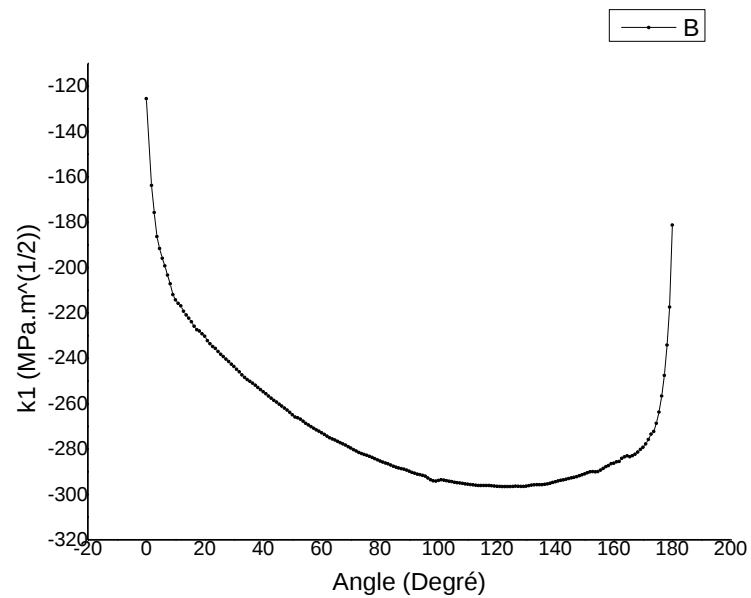


Figure 5.6 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.15$)

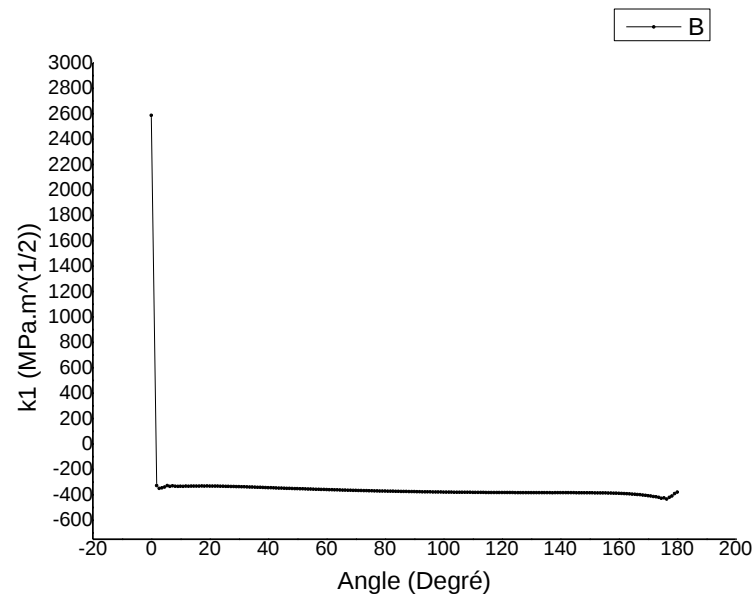


Figure 5.7 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.2$)

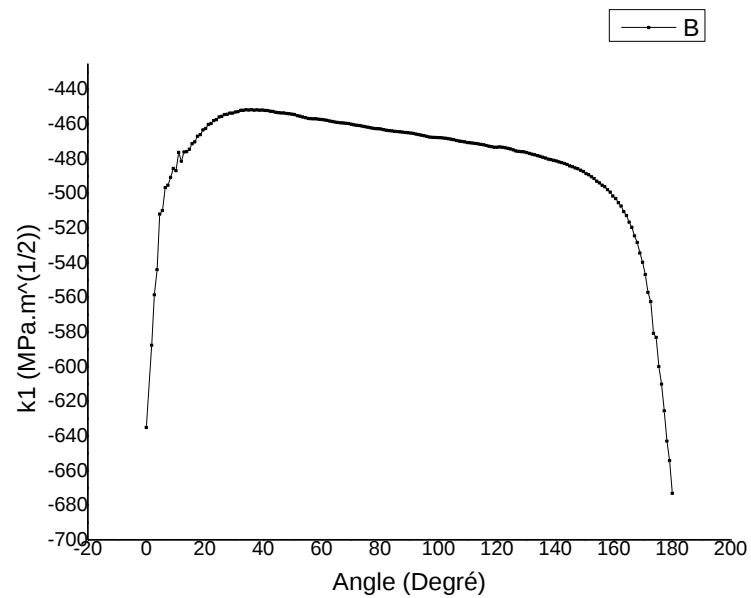


Figure 5.8 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.29$)

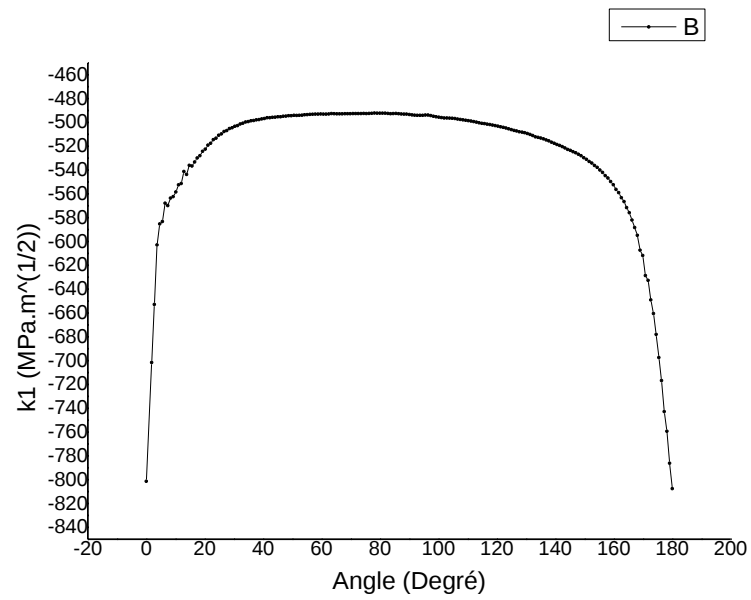


Figure 5.9 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.33$)

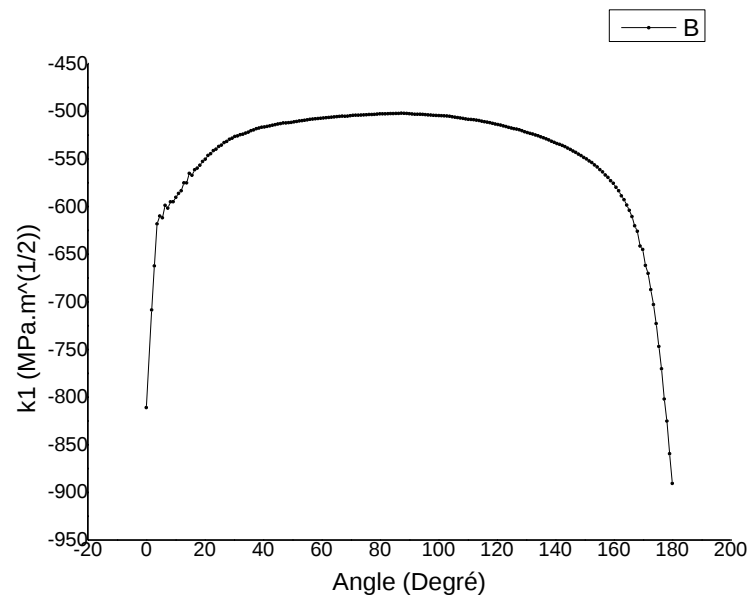


Figure 5.10 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.35$)

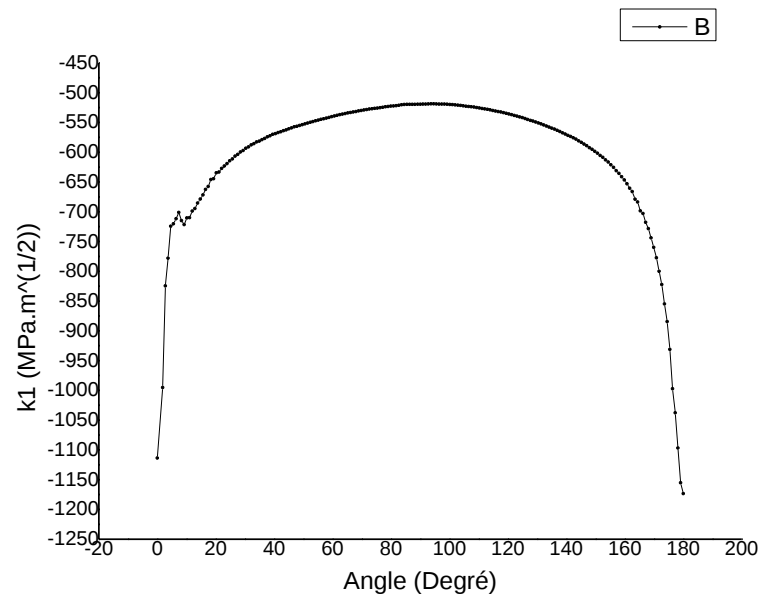


Figure 5.11 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.38$)

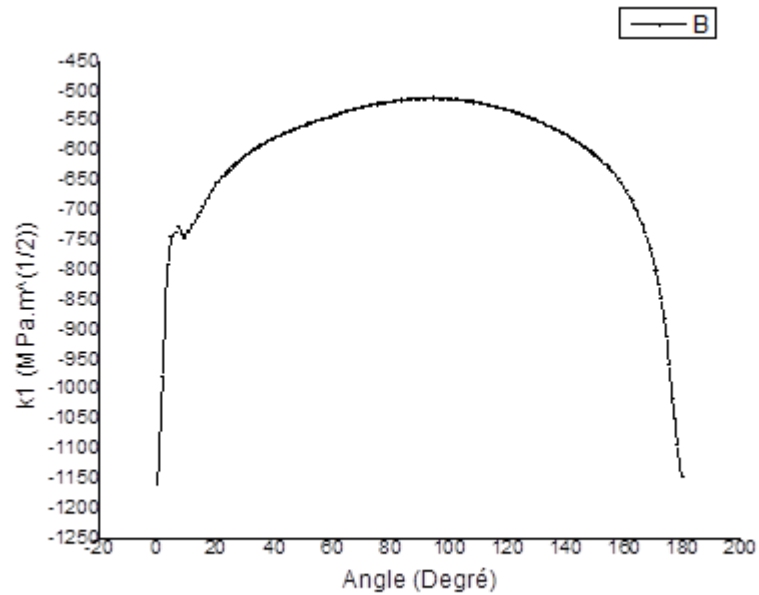


Figure 5.12 : variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.4$)

Effet de rigidité des vis

Selon l'image, on peut observer la relation entre la rigidité du boulon et la variation du facteur d'intensité de contrainte. On constate que lorsque la rigidité du boulon augmente, le coefficient d'intensité de contrainte diminue.

Ces résultats peuvent être considérés comme une solution au problème spécifique. Si l'objectif est de réduire le facteur d'intensité de contrainte, des boulons plus rigides peuvent être utilisés. Ainsi, il est possible de conclure que l'amélioration de la rigidité des boulons réduira le facteur d'intensité de contrainte résultant.

Cependant, il est important de prendre en compte d'autres facteurs liés à l'application spécifique. Il peut y avoir d'autres facteurs qui influencent le choix des boulons en dehors de leur dureté, tels que la durabilité, le coût, la compatibilité technique et d'autres besoins spécifiques. Par conséquent, ces facteurs supplémentaires doivent être pris en compte lors de la décision d'utiliser des boulons avec une dureté améliorée.

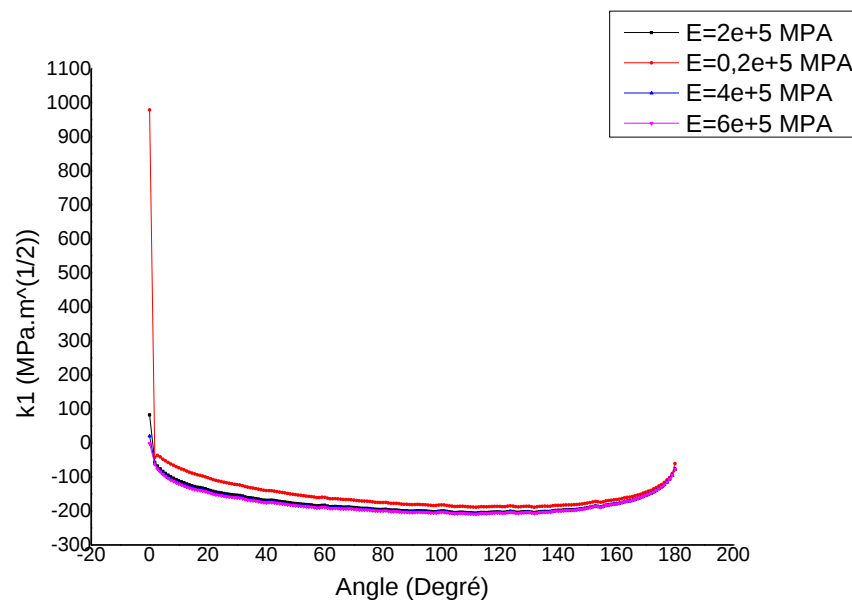


Figure 5.13 : les graphes de variation de Facteur d'Intensité de Contrainte (FIC) en fonction de l'angle paramétrique Φ ($a/c=0.09$) , pour différentes valeurs de Module de Young

5.4 Conclusion

Une analyse de contrainte tridimensionnelle par éléments finis a été utilisée pour calculer les variations du facteur d'intensité de contrainte de mode I le long de la face de la fissure pour une large gamme de fissures semi-elliptiques de surface dans un réservoir sous pression soumis à une pression interne. Le facteur d'intensité de contrainte maximal se produit au point de profondeur maximale pour de petits rapports de profondeur de fissure sur la longueur de fissure, et à l'intersection de la fissure avec la surface avant pour de grands rapports.

Conclusion générale

En conclusion générale, l'étude de la propagation de la fissure de la virole au broyeur à boulets par simulation numérique ANSYS offre une approche précise et fiable pour évaluer l'intégrité structurale de l'équipement. En utilisant ANSYS, il est possible de modéliser la virole du broyeur à boulets avec une fissure semi-elliptique et de simuler les conditions de fonctionnement réelles.

Au cours de cette étude, nous avons abordé les problèmes courants rencontrés dans les broyeurs à boulets, en mettant en évidence le problème spécifique de la fissure semi-elliptique sur la virole. Nous avons également exploré les principes de base de la mécanique de rupture, en soulignant l'importance de comprendre les mécanismes de propagation des fissures et les paramètres influents.

En appliquant une simulation numérique par le logiciel ANSYS sur la virole du broyeur à boulets, nous avons pu analyser les contraintes, les déformations et les modes de propagation de la fissure. Les résultats obtenus nous ont permis d'évaluer la durée de vie résiduelle de la virole et de formuler des recommandations pour la maintenance et la réparation de l'équipement. Cela contribue à assurer la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des opérations industrielles.

Cependant, il est important de noter que la simulation numérique est basée sur des modèles et des hypothèses, et qu'elle comporte des limites. Il est donc essentiel de valider les résultats de la simulation par des essais expérimentaux et d'intégrer une surveillance régulière de l'équipement pour détecter les fissures éventuelles.

En résumé, dans le contexte de votre étude, le facteur d'intensité de contrainte sera utilisé comme un indicateur clé pour évaluer le risque de propagation de la fissure dans la virole du broyeur à boulets. Il vous permettra de prendre des décisions éclairées concernant la maintenance, la réparation et la durée de vie de la structure.

Il est important de noter que le calcul du FIC dépendra des paramètres spécifiques de notre modèle de simulation, tels que la taille et la forme de la fissure, les matériaux utilisés, les conditions de chargement appliquées, etc. Assurez-vous de prendre en compte toutes ces variables et de les décrire clairement dans votre rapport pour une analyse précise de la propagation de la fissure.

L'étude de la propagation de la fissure de la virole au broyeur à boulets par simulation numérique ANSYS offre une approche avancée pour évaluer la durée de vie résiduelle de la structure. Cette étude permet de mieux comprendre le comportement des fissures, d'optimiser la maintenance et la réparation des équipements, et de prévenir les défaillances catastrophiques. Elle contribue ainsi à assurer la sécurité des personnes, à réduire les coûts de maintenance et à garantir la continuité des opérations industrielles.

Pour corriger une fissure transversale dans une virole sous une charge gravitationnelle, plusieurs mesures peuvent être prises, notamment :

1. Réparation de la fissure : La première étape consiste à réparer la fissure elle-même. Cela peut être réalisé par des méthodes telles que le soudage, le boulonnage ou l'utilisation de matériaux de réparation spécifiques. L'objectif est de restaurer l'intégrité structurale de la virole et d'empêcher la propagation ultérieure de la fissure.
2. Renforcement de la structure : Il peut être nécessaire de renforcer la structure de la virole pour augmenter sa capacité à supporter la charge gravitationnelle. Cela peut être fait en ajoutant des renforts structurels tels que des plaques ou des entretoises pour redistribuer les contraintes et renforcer les zones affaiblies par la fissure.
3. Inspection et maintenance régulières : Il est important de mettre en place un programme d'inspection et de maintenance régulières pour détecter toute nouvelle fissure ou détérioration potentielle. Cela permettra de prendre des mesures préventives avant que les problèmes ne s'aggravent.
4. Gestion de la corrosion : Étant donné que vous mentionnez la corrosion, il est essentiel de mettre en œuvre des mesures efficaces de gestion de la corrosion. Cela peut inclure l'application de revêtements protecteurs, la surveillance de la corrosion, la mise en place de programmes de nettoyage et de protection cathodique, ainsi que des méthodes de contrôle de l'environnement pour réduire l'exposition à des conditions corrosives.

Bibliographie

- [1] documentation LAFARGE HOLCIME centre de vivier.
- [2] Elodie Romilliat, Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker, Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, pp 8-37 (2006).
- [3] Pierre Blazy, El-aïd Jdid, Jacques Yvon, Fragmentation-Technologie, Techniques de L'ingénieur, j3051, pp 10-13 (2006).
- [4] le procédé de fabrication de ciment de la SCMI03/2011 (documentation de l'usine).
- [5] Documentation du réducteur FLSmidth MAAG Gear AG.
- [6] A. BENHAMOUDA, Etude du comportement des fissures dans les tubes sous pression interne, Master, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [7] CHAFI Meriem Asmaa (Simulation numérique de la propagation de fissures dans les matériaux à gradient fonctionnel), Thèse Doctorat, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès , 2022
- [8] M. Shixiang, Propagation de fissure en mode mixte dans un milieu élasto-plastique avec prise en compte des contraintes résiduelles, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, 2005.
- [9] MANSOURI Mohamed, MAAMRI Bilel (Contribution à la simulation numérique de la réparation des pipes et des canalisations par patch en composite), Université Saad Dahleb - Blida 1, 2020
- [10] Manuel d'entretien de la société algérienne des ciments.
- [11] Meddour Belkacem,(Fatigue des matériaux & Mécanique de la rupture), Université de ABBAS Laghrour KHENCHELA,2019
- [12]anderson, t. l., fracture mechanics : fundamentals and applications, crc press, florida, 1995.
- [13] Rose LRF. A cracked plate repaired by bonded reinforcements. Int J Fract 1982; Vol 18, pages 135-144.
- [14] Rose LRF. Crack reinforcement by distributed springs. J Mech Phys Solids 1987; Vol 35, pages 383-400.

- [15] Mr Ahmed BENHAMOUDA , (ETUDE DU COMPORTEMENT DES FISSURES DANS LES TUBES SOUS PRESSION INTERNE) , UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE,2010.
- [16] Irwin, G., *Fracture dynamics, Fracturing of Metals*. American Society of Metals. Cleveland, Ohio, 1948: p. 296.
- [17] Irwin, G., *Handbuch der Physik*, vol. 6. Springer Verlag (Berlin), 1958.
- [18] Williams, M.L., *On the stress distribution at the base of a stationary crack*. 1957.
- [19] Sneddon, I.N. and M. Lowengrub, *Crack problems in the classical theory of elasticity*. 1969, 221 P, 1969.
- [20] Labarrere, C.A., et al., *Early prediction of cardiac allograft vasculopathy and heart transplant failure*. American Journal of Transplantation, 2011. **11**(3): p. 528-535.
- [21] Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. 1968.
- [22] Cipolla, R.C., *Technical basis for the revised stress intensity factor equation for surface flaws in ASME Section XI Appendix A*. 1995, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY (United States).
- [23] Newman Jr, J. and I. Raju, *Analyses of Surface Cracks in Finite Plates under Tension or Bending Loads (NASA TP-1578)*. NASA: Hampton VA, USA, 1979.
- [24] Saad, D., G. Dundulis, and R. Janulionis, *Numerical simulation of SIF in Es-Salam research reactor vessel*. Engineering Failure Analysis, 2019. **96**: p. 394-408.
- [25] Saad, D., G. Dundulis, and R. Janulionis, *Calculation of SIFs for semi-elliptical surface cracks in U-shaped bellows expansion joints of Es-Salam research reactor vessel*. Engineering Failure Analysis, 2020. **111**: p. 104481.
- [26]. Oplt, T., et al. *Numerical simulations of semi-elliptical fatigue crack propagation*. in *AIP Conference Proceedings*. 2020. AIP Publishing LLC