

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scienti-  
fique Université Kasdi Merbah Ouargla



Faculté de sciences appliquées Départe-  
ment Génie Mécanique

**MEMOIRE**

**Pour obtenir le Diplôme de Master**

**Option : Maintenance industrielle**

**Présenté par :**

- ❖ Bouasria Mohamed khamissi
- ❖ Aboub Zinelabidine

**Thème:**

**ANALYSE NUMÉRIQUE DE LA PROPAGATION  
DE FISSURES**

Soutenu publiquement le : 12 / 06 /2022  
12h à 13h30 (salle 216)

**Devant le jury composé de :**

Président :Mr.Belakroum Rassim  
Examineur :Mr.Gherfi Abdelhafid  
Encadreur: Dr. Bennouna Mohammed Saleh

Université de Ouargla  
Université de Ouargla  
Université de Ouargla

**Année Universitaire 2021/2022**

## Remerciements:

Avant tout on remercie ALLAH.

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier nos parents, notre famille et tous nos proches pour leur encouragement. Nous tenons à exprimer aussi notre profonde gratitude à notre encadreur:

**Dr. Bennouna Mohammed** Saleh pour son suivi et son énorme soutien tout au long de la période de ce travail.

## Dédicaces

Je dédie ce travail à tous mes proches. En mémoire de mon frère Ibrahim, que Dieu protège son âme dans ses vastes jardins. Et à mes parents qui m'ont encouragé à passer à autre chose. A mes frères et sœurs, ainsi qu'à tous les membres de ma famille et à mes proches (la famille Ababob). A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à faire ce travail

Aboub zinelabidine.

Avant tout on remercie ALLAH.

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier nos parents, notre famille et tous nos proches pour leur encouragement.

Nous tenons à exprimer aussi notre profonde gratitude à notre encadreur pour son suivi et son énorme soutien tout au long de la période de ce travail.

Bouasria Mohamed khamissi

# Liste des tableaux:

## **ChapitreI: Généralités sur la méthode des éléments finis**

Figure (I.8):Enrichissement d'un domaine contenant une fissure [3].	6
Figure(I.9):Enrichissement d'une zone fixée autour de la pointe de fissure	8

## **ChapitreII: Simulation par Abaqus)**

Figure (II. 1): Processus d'analyse utilisant un modèle numérique[1].	11
Figure (II. 2): Organisation générale d'un code de calcul.[2]	12
Figure (II.4): Organisation d'abaqus [6].	18
Figure (II.5): Réalisation de la mise en données d'un problème[6].	19
Figure (II.6 ): Le module « Part ».	19
Figure (II.7 ): Le module « Property ».	20
Figure (II.8): Le module « Assembly ».	20
Figure( II.9 ):Le module «Step ».	21
Figure (II. 10):Le module «Interaction»	21
Figure (II. 11):Le module «LOAD»	22
Figure( II. 12):Le module « MESH »	22
Figure (II. 13):Le module « JOB »	23
Figure(II.14):Le module« VISUALIZATION »	23

## **Chapitre III: Etude de la propagation d'une fissure par la méthode deEF**

Figure.(III 1) Courbe contrainte déformation de l'alliage d'aluminium 2024-T351 D'après WuchaoYang, Xudong Qian[2].	25
Figure.(III 2):Dimensions de la plaque	26
Figure(III 3):Conditions aux limites.	27
Figure(III 4):Maillage utilisé	27
Figure(III. 5):Résultats de la simulation	28
Figure.(III 6):valeur de K1	28
Figure(.III 7):.valeur de K3	28
Figure.(III 8):. valeur de K2	28
Figure.(III 9):.valeur de K4	29
Figure.(III 10):.valeur de K5	29
Figure.(III 11): projection des contraintes	29
Figure.(III 12): Résultats de la simulation	30
Figure(.III 13):.valeur de K1	31
Figure.(III 14):valeur de K2	31
Figure.(III 15).valeur de K3	31
Figure.(III 16).valeur de K4	31
Figure(.III 17):.valeur de K5	31
Figure.(III 18 ):Résultats de la simulation	32
Figure.(III 19): valeur de K1	33
Figure.(III 20.):valeur de K2	33
Figure(.III 21):valeur de K3	33
Figure(.III 22):valeur de K4	33
Figure.(III 23):valeur de K5	33
Figure.(III 24):Résultats de la simulation	34
Figure.(III 25):valeur de K1	35
Figure.(III 26):valeur de K2	35

## Liste des tableaux:

Figure.(III 27):valeur de K3 .....	35
Figure.(III 28):valeur de K4 .....	35
Figure.(III 29): valeur de K5 .....	35
Figure.(III 30):Résultats de la simulation .....	36
Figure.(III 31):valeur de K1 .....	37
Figure.(III 32): valeur de K2 .....	37
Figure.(III 33):valeur de K3 .....	37
Figure.(III. 34): valeur de K4 .....	37
Figure.(III 35):valeur de K5 .....	37
Figure.(III 36): Evolution du FIC en fonction de l'inclinaison de la fissure. ....	39
Figure.(III.37) Conditions aux limites.....	39
Figure(III 38):Maillage utilisé .....	40
Figure.(III 39): Résultats de la simulation .....	40
Figure.(III 40):Evolution de la force en fonction de la longueur de fissure .....	41
Figure.(III 41): Evolution d'énergie en fonction de la longueur de fissure .....	41
Figure. (III 42):Résultats de la simulation .....	41
Figure.(III 43):Evolution de la force en fonction de la longueur de fissure .....	41
Figure.(III 44):Evolution d'énergie en fonction .....	41
Figure.(III .45)Résultats de la simulation .....	42
Figure.(III 46):Evolution de la force en fonction de la longueur de fissure .....	42
Figure.(III 47):Evolution d'énergie en fonction de la longueur de fissure.....	42
Figure.(III 48): Résultats de la simulation .....	42
Figure.(III 49):.Evolution de la force en fonction de la longueur de fissure .....	43
Figure.(III 50):Evolution d'énergie en fonction de la longueur de fissure.....	43
Figure.(III 51): Résultats de la simulatio.....	43
Figure.(III 52):Conditions aux limites.....	45
Figure.(III 53):Maillage utilisé. ....	45
Figure.(III 54):Résultats de la simulation .....	45
Figure.(III 55): valeur de K1 .....	46
Figure.(III 56):valeur de K2 .....	46
Figure.(III 57):valeur de K3 .....	46
Figure.(III 58):valeur de K4 .....	46
Figure.(III 59):valeur de K5 .....	46
Figure.(III 60):Résultats de la simulation .....	47
Figure.(III 61):valeur de K1 .....	48
Figure.(III 62):valeur de K2 .....	48
Figure.(III 63):valeur de K3 .....	48
Figure.(III 64):valeur de K4 .....	48
Figure.(III 65):valeur de K5 .....	48
Figure.(III 66):Conditions aux limites.....	49
Figure.(III 67):Maillage utilisé .....	49
. Figure.(III 68):Résultats de la simulation .....	50
Figure.(III 69):Evolution de la force en fonction de la longueur de fissure .....	50
Figure.(III 70):Evolution d'énergie en fonction de la longueur de fissure.....	50

# Liste des tableaux:

## Chapitre II: Simulation par Abaqus

Tableau (II.1): Principales sources d'erreurs durant le calcul[2]-.....	15
Tableau (II. 2): Système d'unités pour la programmation[7]. .....	17

## Chapitre III:Etude de la propagation d'une fissure par la méthode EF

Tableau(III.1):caractéristiques du matériau étudié [1]. .....	25
Tableau (III .2 ):Différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis.....	29
Tableau (III 3 ):Différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis.....	31
Tableau III 4 Différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis. ....	33
Tableau III 5 Différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis. ....	35
Tableau( III. 6): différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis.....	37
Tableau (III 7) : Récapitulatif des valeur.....	38
Tableau III 8 caractéristiques du matériau étudié[4]. .....	44
Tableau III 9 différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis.....	46
Tableau( III.10)différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis. ....	49

## Liste des abréviations:

### Liste des abréviations:

**a** : Longueur de fissure

**$a_c$**  : Longueur de fissure critique

**E** : Module d'Young

**$E_0$**  : Module d'Young initial

**V** : Coefficient de poisson

**$A^\circ$**  : Section initial

**A** : Section utile

**$\beta$**  : Anglée bifurcation

**d** : Section endommagée

**di** : Section endommagée interne

**F** : Le potentiel des dissipations

**S** : Les modules de souplesse

**$\alpha$**  : Coefficient de sécurité

**G** : L'énergie de Griffith

**GC** : L'énergie de Griffith critique

**u** : Le déplacement cinématique

**$\Psi$**  : Energie libre d'Helmholtz

**$\varepsilon$**  : Déformation plastique

**Y** : Force thermodynamique

**Yi** : Force thermodynamique interne

**$\Phi$**  : Energie de Gibbs

**J** : Contour d'intégral

**T** : Température

## Liste des abréviations:

**$T_I$  :Température initial**

**$\sigma$ :Contrainte appliquée**

**$\sigma_e$  La limite d'élasticité du matériau**

**$\sigma_r$ :Contrainte rupture**

**KI :La ténacité en mode I**

**Kc : La ténacité critique**

**KIc : La ténacité critique en mode I**

**F.I.C : Facteur d'intensité de contrainte**

**CAE : Complete abaqus environment**

**CTOD: Crack tip opening displacement**

**MLR : Mécanique linéaire de la rupture**

**FEM : Méthode des éléments finis**

**X-FEM : Méthode des éléments finis étendue**



## Résumé

### Résumé

Les alliages d'aluminium sont couramment utilisés dans les applications marines en raison de leur bon équilibre entre la légèreté et de bonnes propriétés mécaniques et une meilleure résistance à la corrosion. Dans le travail nous avons essayé de simuler la propagation d'une fissure dans une structure aluminium par deux méthodes des éléments finis celle du contour plot et celle de XFEM .comme résultat nous avons trouvé que les valeurs du FIC (facteur de concentration des contraintes) données par les méthodes FEM sont proches de celles calculées et que les contraintes, les efforts et les énergies sont maximaux à côté des extrémités de la fissure (crack type).

Mots clés : Aluminium, fissure, propagation, FEM, XFEM.

### Abstract

Aluminum alloys are commonly used in marine applications due to their good balance between light weight and good mechanical properties and better corrosion resistance. In the work we tried to simulate the propagation of a crack in an aluminum structure by two finite element methods, that of the contour plot and that of XFEM. As a result, we found that the values of the SCF (stress concentration factor) given by the FEM methods are close to those calculated and that the stresses, the forces and the energies are maximum next to the ends of the crack (crack type).

Keywords: Aluminium,crack, propagation, FEM, XFEM.

### الخلاصة:

تستخدم سبائك الألومنيوم بشكل شائع في التطبيقات البحرية نظرًا لتوازنها الجيد بين الوزن الخفيف والخصائص الميكانيكية الجيدة ومقاومة التآكل الأفضل. حاولنا في العمل محاكاة انتشار صدع في هيكل من الألومنيوم من خلال طريقتين للعناصر المحدودة ، طريقة مخطط الكنتور وطريقة XFEM. نتيجة لذلك ، وجدنا أن قيم SCF (عامل تركيز الإجهاد) المعطاة بواسطة طرق FEM قريبة من تلك المحسوبة وأن الضغوط والقوى والطاقات تكون بحد أقصى بجوار نهايات الكراك (نوع الكراك) . الكلمات المفتاحية: الألومنيوم ، الكراك ، التكاثر ، FEM ، XFEM. ،

# Sommaire

## Sommaire

Remerciements.....	II
Dédicace.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux .....	V
Abréviations .....	IV
Résumé .....	VI
Sommaire .....	VII
Introduction général .....	01
<u>Chapitre I : Généralités sur la méthode des éléments finis</u>	
I.1.Introduction : .....	3
I.2.1.Méthode des éléments finis étendue (X-FEM) : .....	3
I.2.2.Approximation de la X-FEM .....	4
I.2.3.Les fortes discontinuités : .....	5
I.3.Maillage : .....	8
I.4.Détermination du Facteur d'intensité de contrainte : .....	8
CONCLUSION:.....	9
III.2.Matériau utilisé: .....	25
III.3.Dimensions de La plaque:.....	26
III.4. méthode du contour plot: .....	26
III.4.1.Calcul numérique du facteur d'intensité de contrainte:.....	26
III.4.2.Détermination du facteur d'intensité de contrainte (FIC) par la méthode des éléments finis: .....	26
III.4.3.Cas d'une fissure horizontale: .....	27
III.4.3.1.Condition aux limites:.....	27
III.4.3.2.Maillage: .....	27
III.4.3.3.Résultats et discussions:.....	28
avant déformation .....	28
après déformation.....	28
III.4.4.Cas d'une fissure inclinée d'un angle $\alpha$ par rapport à l'horizontal	29
III.4.4.1.Cas d'une fissure inclinée d'un angle $\alpha = 10^\circ$ : .....	29
III.4.4.2.Calcul numérique de la valeur du FIC: .....	29
III.4.4.3.Détermination du FIC par éléments finis:.....	30
III.4.4.4.Résultats et discussions:.....	30
III.4.5..Cas d'une fissure inclinée d'un angle $\alpha = 30^\circ$ :.....	31
III.4.5.1.Calcul numérique de la valeur du FIC: .....	31
III.4.5.2.Détermination du FIC par éléments finis: .....	32
III.4.5.3.Résultats et discussions.....	32
III.4.6. Cas d'une fissure inclinée d'un angle $\alpha = 45^\circ$ :.....	33
III.4.6.1.Calcul numérique de la valeur du FIC: .....	33
III.4.6.2.Détermination du FIC par éléments finis:.....	34
III.4.6.3.Résultats et discussions:.....	34
III.4.7.1.Calcul numérique de la valeur du FIC: .....	35
III.4.7.2.Détermination du FIC par éléments finis:.....	36
III.4.7.3.Résultats et discussions:.....	36
III.5.Méthode étendue XFEM :.....	39
III.5.1.Cas d'une fissure horizontale: .....	39

# Sommaire

III.5.1.1. Condition aux limites:.....	39
III.5.1.2. Maillage: .....	40
III.5.1.3. Résultats et discussions:.....	40
III.5.2. cas d'une fissure inclinée d'un angle de 10 °: .....	41
III.5.2.1. Résultats et discussions:.....	41
III.5.3. cas d'une fissure inclinée d'un angle de 30 °: .....	42
III.5.3.1. Résultats et discussions:.....	42
Avant déformation .....	42
Après déformation.....	42
Figure.(III .45) Résultats de la simulation .....	42
III.5.4. cas d'une fissure inclinée d'un angle de 45 °: .....	42
III.5.4.1. Résultats et discussions:.....	42
III.5.5. cas d'une fissure inclinée d'un angle de 60 °: .....	43
III.5.5.1. Résultats et discussions:.....	43
III.6. Influence les matériau de la plaque:.....	44
III.6.1. Matériau utilise: .....	44
III.6.2. méthode du contour plot: .....	44
III.6.2.1. Cas d'une fissure horizontale:.....	44
III.6.2.2. cas d'une fissure inclinée d'un angle $\alpha$ par rapport à l'horizontale:.....	46
III.6.3. Méthode étendue XFEM : .....	49
III.6.3.1. Cas d'une fissure horizontale:.....	49
Conclusion: 51	
Cnclusion générale:.....	52

# **Introduction général**

Les structures industrielles, les charges, les sollicitations, et les travaux elles sont soumises à l'endommagement que provoque. Leur rupture par création de fissures, qui sont dans la plus part des cas dangereuses, nécessite leur contrôle ainsi que les phénomènes de leur propagation surtout quand s'agit de structures marines. Comme celles de l'aéronautique. Comme celles des avions.

Le travail étudie de ce phénomène de fissuration et de propagation de fissures en simulant des plaques de matériau (un alliage marin) par la méthode des éléments finis. Pour cette raison nous avons commencé ce travail par l'état de l'art de la mécanique de la rupture et de l'endommagement, puis un deuxième chapitre qui traite sur la méthode des éléments finis puis enfin nous finissons par un dernier chapitre qui étudie la simulation d'une fissure sur une plaque en alliage d'aluminium marin par deux méthodes des éléments finis en utilisant l'outil Abaqus. Enfin ce travail est achevé par des conclusions et des perspectives.

Chapitre I:  
Généralités sur la méthode  
des éléments finis

# Chapitre I: Généralités sur la méthode des éléments

## finis

### **I.1.Introduction :**

Les sciences de l'ingénieur (mécanique des solides, fluides, génie civil, aérospatiale, électricité, ...) permettent de décrire le comportement des systèmes physiques à l'aide des équations aux dérivées partielles (EDP) (ou en formulation intégrale équivalente). Les solutions analytiques ne sont disponibles que pour les géométries régulières et les conditions aux limites très simples. La méthode générale pour l'obtention des solutions à partir des EDPs.

### **I.2.1.Méthode des éléments finis étendue (X-FEM) :**

Etant donné que le trajet de fissure est a priori inconnu en mode mixte, les simulations numériques développées ici seront effectuées en utilisant la méthode des éléments finis étendue (X-FEM) où les fissures ne sont pas explicitement décrites par le maillage. [11-12] L'idée de la méthode X-FEM est de n'utiliser la propriété de partition de l'unité que localement, afin de ne pas alourdir l'approximation éléments finis. Les premiers travaux sur cette méthode datent de 1999 avec une première approche de Belytschko et Black (1999) en mécanique linéaire de la rupture : tous les nœuds dont le support est coupé par la fissure sont enrichis par des fonctions provenant du développement asymptotique du déplacement en fond de fissure. Ce type d'enrichissement provient des travaux de Fleming et al. (1997) sur les méthodes sans maillage. Cependant, des problèmes de conditionnement de la matrice éléments finis apparaissent.

La méthode X-FEM apparaît en tant que telle en 1999 (Moës et al, 1999) [13]: c'est à cette occasion qu'est introduite la fonction Heaviside qui permet une généralisation du concept de double nœuds utilisé en éléments finis. Cette méthode a été appliquée par la suite à un grand nombre de domaines :

- Les problèmes de fissuration 2D ;
- Les problèmes de domaines trous ;
- Les problèmes d'inclusions matérielles;
- Les Écoulements à plusieurs phases;
- La modélisation des discontinuités en temps ;
- La simulation de problèmes d'interaction fluide-structure

La X-FEM a été initialement appliquée pour modéliser la fissure et la discontinuité sur le champ du déplacement, ou la forte discontinuité, par-là elle a été introduite pour résoudre plusieurs problèmes [3]. Cependant, le principe essentiel de la X-FEM,

## finis

qui consiste à enrichir l'approximation standard des éléments finis par des fonctions appropriées, doit être conservé.

En effet, la nature des fonctions enrichies utilisées pour la faible discontinuité est différente de celle destinée à la forte discontinuité figure (II.7). Par ailleurs, Les fonctions de niveau ont été a utilisées à la fois et pour construire des fonctions enrichies de la X-FEM, pour modéliser des interface biomatériaux, appelée faible discontinuité (Sukumar et Al) [3].

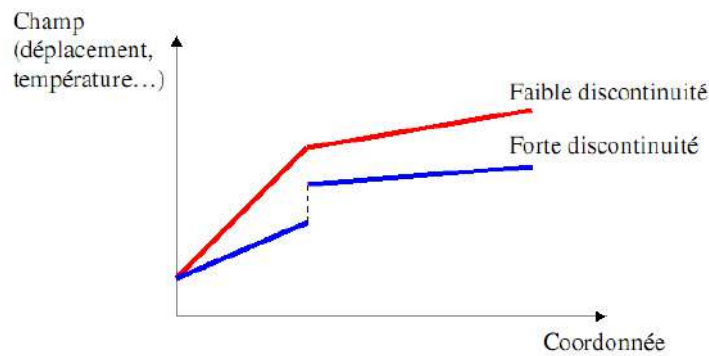


Figure (I.1): Deux catégories de discontinuité[3].

Ainsi, la X-FEM est d'autant plus performante que le choix des fonctions enrichies est pertinent. Or la détermination de ces fonctions ne fait pas l'objet d'une méthode universelle. Il relève plutôt d'un processus de tâtonnement [3].

### **I.2.2.Approximation de la X-FEM**

l'approximation du domaine contenant une fissure, proposée par Berletschko et Al, est considérée comme étant la base de la X-FEM [3]. L'enrichissement est représenté à l'aide de la multiplication des fonctions enrichies par les fonctions de forme nodales. Le champ enrichi du déplacement est donné par la:

$$u^h(x) = \sum_{i=1}^n N_i(x) \left( u_i + \sum_{k=1}^m F_k(r;\theta) \alpha_{ki} \right) \quad (I.1)$$

Où :

-  $(\theta, r)$  est le système de coordonnées polaires dont l'origine se trouve à la pointe de la fissure, [9].

$$\{F_k(r;\theta)\}_{k=1}^4 = \left\{ \sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin \theta, \sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin \theta \right\} \quad (I.2)$$

# Chapitre I: Généralités sur la méthode des éléments

## finis

Pour la généralisation d'un problème contenant une singularité quelconque, l'approximation de la X-FEM est sous la forme :

$$u^h(x) = \sum_{i=1}^n N_i(x) u_i + \sum_{k=1}^m N_i(x) \Psi(x) \alpha_k \quad (\text{I. 3})$$

La fonction enrichie  $\Psi(x)$  peut être choisie ou construite en se basant sur la solution analytique connue à priori

- Pour un nœud dans la zone enrichie, le champ (II.14) devient :

$$u^h(x) = u_j + \Psi(x_j) a_j \quad (\text{I. 4})$$

L'interpolation aux nœuds n'est pas donc assurée par la zone enrichie. Afin de régler ce problème, l'approximation (II.15) est fréquemment remplacée par [3]

$$u^h(x) = \sum_{i=1}^n N_i(x) u_i + \sum_{k=1}^m N_k(x) (\Psi(x) - \Psi(X_k)) a_k \quad (\text{I. 5})$$

Ce qui donne exactement l'interpolation au nœud  $u^h(x_j) = u_j$

- La fonction enrichie  $\psi(x)$  est elle-même globale, mais son influence est absolument locale à cause de sa multiplication par la fonction de forme nodale  $N_i(x)$  et de la définition de la zone enrichie [3-10].
- Le degré de liberté  $a_k$  est ajouté dans le but de faciliter la modélisation de la singularité sans La construction des fonctions enrichies dépend du type du problème et surtout du comportement de la singularité. En effet, il y a les fortes et faibles discontinuités [3]. Dans ce qui suit nous avons traité seulement de la fissure qui est une forte discontinuité.

### **I.2.3. Les fortes discontinuités :**

Les approximations proposées par Belytchko et Al en 2000, Moïa et Al en 1999 et Dolo et Al en 2000 ont construit la formulation relativement complète de la X-FEM pour modéliser la fissure [3]. Considérons un domaine  $\Omega$  qui contient une fissure . Le maillage uniforme en quadrangles est appliqué pour ce domaine. La fissure est indépendante du maillage. La fissure ne va pas obligatoirement passer par les arêtes des éléments.



## finis

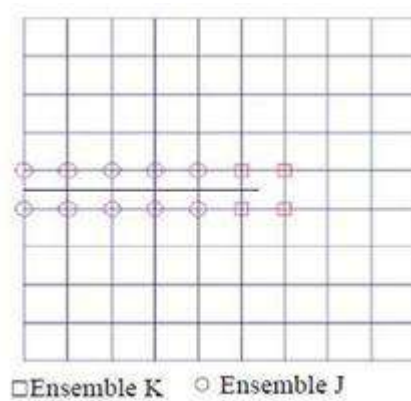


Figure (I.1): Enrichissement d'un domaine contenant une fissure [3].

$$u^h = \sum_{i \in J} u_i N_i + \sum_{j \in J} b_j N_j(x) + \sum_{k \in K} N_k \left( \sum_{l=1}^4 C_k^l F_l(x) \right) \quad (I.6)$$

Afin de conserver l'interpolation aux nœuds, l'approximation (II.17) peut être réécrite sous la Forme [3-4-14]

$$u^h = \sum_{i \in J} u_i N_i + \sum_{j \in J} b_j N_j \left( H(x) - H(x_j) \right) + \sum_{l \in K} N_k \left( \sum_{l=1}^4 C_L^K \left( F_l(x) - F_l(x_k) \right) \right) \quad (I.7)$$

Où sont les déplacements nodaux,  $b_j$  et  $C_1^K$  sont les paramètres d'enrichissement,  $H(x)$  et  $F_1(x)$  sont les fonctions enrichies I, J et K sont respectivement les ensembles des nœuds de tout le domaine, des nœuds enrichis par  $H(x)$  et des nœuds par  $F_1(x)$ .

En effet, la fonction  $H(x)$  est choisie pour « capturer » la discontinuité du déplacement en passant la ligne de la fissure  $\Gamma_d$ . C'est pourquoi, n'importe quelle fonction qui est discontinue à travers de  $\Gamma_d$  peut être utilisée comme fonction enrichie, mais le choix le plus simple pour  $H(x)$  est une fonction constante dont le signe change d'un côté à l'autre de  $\Gamma_d$ . En effet, si nous définissons un système de coordonnées  $x = (x, y)$  avec l'axe de  $x$  qui coïncide avec  $\Gamma_d$ ,  $H(x)$  est déterminée par rapport à  $\Gamma_d$  par [3-

4-9-6]

$$H(x, y) = \begin{cases} +1 & \text{pour } y > 0 \\ -1 & \text{pour } y < 0 \end{cases} \quad (I.8)$$

L'utilisation de  $H(x)$  pour l'enrichissement de la fissure est relativement simple et explicite. Cependant, dans le cas où la fissure ne s'arrête pas sur le bord de l'élément,  $H(x)$  n'est pas capable de modéliser complètement la fissure. Les fonctions enrichies asymptotique  $F_1(x)$  doivent être rajoutées afin de tenir compte de la zone autour de

# Chapitre I: Généralités sur la méthode des éléments

## finis

la pointe de la fissure [3]. Les fonctions sont construites à partir du champ asymptotique exact de déplacement au voisinage de la pointe de fissure.

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[ k_{-1+2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right] \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[ k_{+1+2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right] \end{pmatrix} + \frac{k_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[ k_{+1+2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right] \\ -\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[ k_{-1-2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right] \end{pmatrix} \quad (I.9)$$

Où est le système de coordonnées polaire dont l'origine se situe à la pointe de la fissure,  $k_I$  et  $k_{II}$  sont les facteurs d'intensité de contrainte,  $\mu$  et  $\kappa$  sont les paramètres du matériau. (Flemming et Al, 1997) ont extrait de (II.20) les quatre fonctions indépendantes  $F_1(x)$

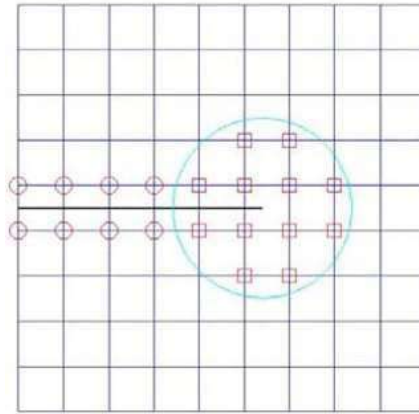
$$\{F_l(r, \theta)\}_{L=1}^4 = \left\{ \sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin \theta, \sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin \theta. \right\} \quad (I.10)$$

Notons que seule la fonction est discontinue à travers la fissure alors que les autres fonctions sont continues [3]. Il est bien évident que les fonctions enrichies asymptotique améliorent nettement l'exactitude de la modélisation de la fissure parce qu'elle contient les informations sur la solution asymptotique exacte au voisinage de la pointe de fissure [3]. Revenons à la définition des ensembles J et K. En notant la coordonnée de la pointe de fissure, l'ensemble K consiste en des nœuds dont le support contient la pointe de fissure. L'ensemble J comporte des nœuds dont le support est intersecté par la fissure est ces nœuds n'appartiennent pas à l'ensemble K.

$$\begin{aligned} k &= \{k \in I : x_p \in \omega_k\} \\ J &= \{j \in I : \omega_j \cap \Gamma_d \neq \emptyset, j \in k\} \end{aligned} \quad (I.11)$$

Dans la figure (II-4), les nœuds enrichis sont marqués en rouge, les cercles désignent les nœuds de J et les carrés sont utilisés pour les nœuds de K. Dans la version originale de la X-FEM, l'ensemble K ne comprend que les nœuds de l'élément contenant la pointe de la fissure. Par conséquent, le support des fonctions enrichies asymptotiques disparaît lorsque le paramètre du maillage  $h$  tend vers zéro, ce qui donne le faible taux de convergence. Une stratégie présentée par Laborde et Al consiste à enrichir une zone fixée autour de la pointe de fissure. La zone enrichie est normalement définie sous forme d'un cercle dont le centre est la coordonnée  $x_p$  de la pointe [3].

## finis



Figure(I.2):Enrichissement d'une zone fixée autour de la pointe de fissure  
te de fissure[13]

### **I.3.Maillage :**

ABAQUS offre la possibilité de choisir entre 04 types d'élément de maillage, tétraèdre, hexaèdre, hexa-dominante et wedge. En revanche N.Sukumar, Moïis, Moran et Belytchko ont adopté l'élément hexaèdre pour la modélisation d'une fissure à 3D [15]. Nous avons donc adopté le même type de maillage pour élaborer notre modèle.

### **I.4.Détermination du Facteur d'intensité de contrainte :**

Après avoir formulé la méthode des éléments finis étendu en déplacement et ayant modélisé la singularité en pointe de fissure, le facteur d'intensité de contraintes peut être calculé à partir des champs de déplacements calculées à partir de la méthode X-FEM Ainsi à trois dimension les valeurs de  $k_I$ ,  $k_{II}$  et  $k_{III}$  sont extraites des expressions données par[16]:

Mode.I:

$$\sigma_{xx} = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

Mode. II:

## finis

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= -\frac{k_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{k_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{k_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)\end{aligned}\tag{I.12}$$

Mode. III:

$$\begin{aligned}\sigma_{13} &= -\frac{k_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \sigma_{23} &= \frac{k_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}\end{aligned}$$

Ou  $u_1, u_2$  et  $u_3$  représentent les valeurs du champ déplacement au voisinage de la poin Les codes éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés lors de la conception et à l'analyse des produits industriels. Les outils d'aide à la modélisation devenant de plus en plus perfectionnés, l'utilisation de la méthode des éléments finis s'est largement développée et peut sembler de moins en moins une affaire de spécialistes. Si l'utilisation de la méthode se démocratise de par la simplicité croissante de mise en œuvre, la fiabilité des algorithmes et la robustesse de la méthode, il reste néanmoins des questions essentielles auxquelles l'ingénieur devra répondre s'il veut effectuer une analyse par éléments finis dans de bonnes conditions

- formaliser les non-dits et les réflexions qui justifient les choix explicites ou implicites de son
- analyse du problème ;
- évaluer la confiance qu'il accorde aux résultats produits ;
- analyser les conséquences de ces résultats par rapport aux objectifs visés.

**CONCLUSION:** Dans ce chapitre nous avons mis le point sur les Principe la méthode des élément finis nous Avons montré qu'elle est très utile pour l'analyse des structure en particulier ceux endommagées (fissurées).

Le methode des élément finis est un outil très benefique que facilité l'analyse et qui présente un élément de base pour plusieurs logiciels informatique assurants la simulation numerique tels que abaqus

## **Chapitre II:**

# **Simulation numérique par Abaqus**

# Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus

## II.1.Introduction:

Pour simuler un problème nous avons besoin d'un outil numérique qui travaille à base d'une méthode telle que celle des éléments finis , celle des volume finis et celle des ...etc.

Ces outils travail selon un processus bien déterminé.

## II.2.Processus d'analyse de problèmes physiques:

De façon générale, les différentes étapes d'analyse d'un problème physique s'organisent suivant le processus schématisé par Figure I.1 Nous partons d'un problème physique. Le cadre précis de l'étude est défini par les hypothèses simplificatrices qui permettent de déterminer le modèle mathématique approprié. La difficulté pour l'ingénieur est de savoir choisir parmi les lois de la physique, celles dont les équations traduiront avec la précision voulue la réalité du problème physique. Un bon choix doit donner une réponse acceptable pour des efforts de mise en œuvre non prohibitifs. [1].

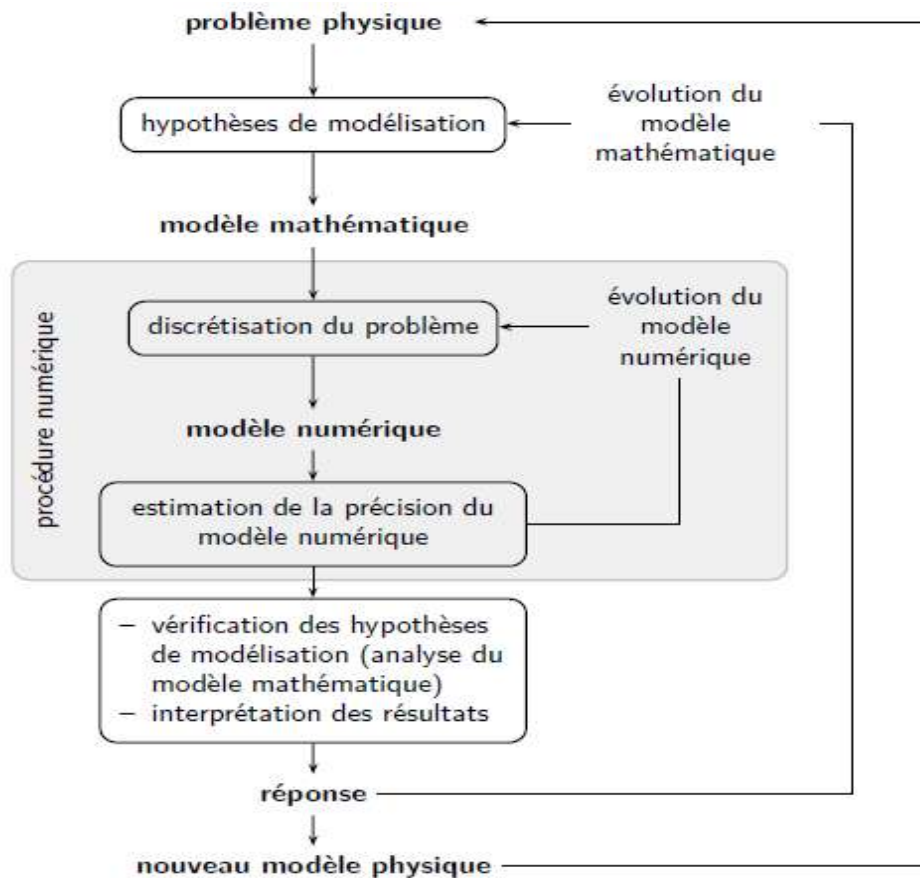


Figure (II. 1): Processus d'analyse utilisant un modèle numérique[1].

# Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus

## **II.3.Codes généraux:**

Généralement les équations de la méthode des éléments finies sont d'une forme assez générale pour qu'il soit en principe possible d'écrire un programme d'ordinateur unique, capable de résoudre tous les problèmes suscités et une gamme presque illimitée d'autres problèmes en mécanique des structures. Les programmes qui visent cet objectif sont appelés codes généraux. Les trois phases groupées en forme d'organigramme dans la figure ci-dessous sont présentes dans quasiment tous les codes généraux d'analyse par éléments finis.

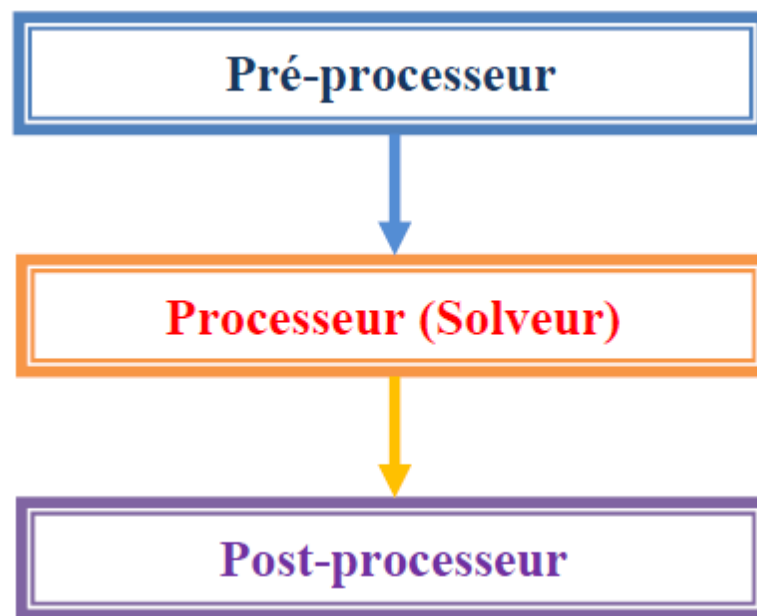


Figure (II. 2): Organisation générale d'un code de calcul.[2]

### **II.3.1.Préprocesseur:**

Dans cette phase on doit :

- Créer le modèle géométrique
- Choisir le type d'éléments
- Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments
- Entrer les propriétés géométriques
- Entrer les paramètres physiques
- Appliquer les sollicitations
- Imposer les conditions aux limites.

# **Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus**

## **II.3.2. Processeur (Solveur):**

Cette phase consiste à :

- Choisir le type d'analyse (statique, dynamique, ...)
- Construire les matrices et les vecteurs élémentaires
- Etablir le système global par assemblage des matrices et vecteurs élémentaires
- Appliquer les conditions aux limites
- Résoudre le système global
- Calculer les paramètres additionnels (contraintes, déformations, ...).

## **II.3.3. Post processeur:**

Cette phase est consacrée à :

- Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique :
  - Sous forme numérique
  - Sous forme graphique
- Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétations, interpolations, animations, ...

Un programme bien construit doit permettre à l'utilisateur d'effectuer des adjonctions ou des mises à jour d'opération en fonction des besoins ou des améliorations possibles. Par exemple d'ajouter des éléments, des algorithmes de résolution d'équations, des types de tracé, etc. **[2]**

## **II.4 Dérroulement d'une étude:**

Pour réaliser une étude par éléments finis, il faut que les objectifs de l'étude soient bien définis 4.

Le cadre de l'étude, c'est-à-dire le temps et les moyens disponibles, doit être compatible avec les objectifs et la précision cherchée. Supposons toutes ces conditions remplies, l'étude proprement dite est organisée de façon logique selon les étapes suivantes : **[1]**

### **II.4.1. Analyse du problème:**

Cette analyse doit fixer les paramètres du calcul et conduire à la réalisation d'un maillage.

Cette phase basée sur l'expérience personnelle acquise dépend de nombreuses considérations. La difficulté essentielle est de trouver un bon compromis entre les paramètres propres au problème et ceux relatifs à l'environnement de travail. L'analyse du problème nous conduit à préciser un certain nombre d'hypothèses, et à effectuer des choix qui conditionnent les résultats.



# **Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus**

## **II.4.2.Choix du modèle:**

En calcul des structures, les plus classiques sont de type : poutre, élasticité plane, axisymétrique, coques mince ou épaisse, tridimensionnel. . . À ces modèles mathématiques correspondent des familles d'éléments finis.

## **II.4.3.Choix du type d'éléments:**

Il est fonction de la précision voulue, de la nature du problème, mais aussi du temps disponible.

On choisira les éléments les mieux adaptés dans les familles disponibles.

## **II.4.4.Choix du maillage:**

Il dépend essentiellement de la géométrie, des sollicitations extérieures, des conditions aux limites à imposer, mais aussi des informations recherchées : locales ou globales. Sans oublier bien entendu le type d'outils dont on dispose pour réaliser ce maillage.

## **II.4.5.Hypothèses de comportement:**

Quel modèle retenir pour représenter le comportement du matériau. Le calcul est-il linéaire ?Doit-on modéliser l'amortissement ?Si le matériau est hétérogène ou composite, peut-on utiliser une méthode d'homogénéisation ? Peut-on traduire l'incompressibilité du milieu ?

Lors d'une étude, on peut être amené à utiliser des éléments finis nouveaux Il est indispensable de vérifier leur comportement sur des problèmes élémentaires si possible proches de l'étude menée. L'ouvrage « Guide de validation des progiciels de calculs des structures, AFNOR Technique 1990 » contient des cas tests pouvant servir pour de nombreux problèmes. Ces cas tests permettent de comparer la solution obtenue avec d'autres solutions numériques ou analytiques. Ce travail préliminaire est utile pour former sa propre expérience et permet de valider l'utilisation du modèle testé.

## **II.4.6.Création et vérification des données:**

Cette étape dépend du logiciel utilisé. La syntaxe utilisée pour définir le jeu de données est définie dans le mode d'emploi du bloc fonctionnel correspondant. En sortie, un fichier est créé, qui contient toutes les informations nécessaires à l'exécution des calculs. Les vérifications relatives au jeu de données se font généralement graphiquement, grâce à un module informatique appelé préprocesseur.

Différents contrôles peuvent être utilisés pour valider le jeu de données :

- vérification de la géométrie de la pièce et du maillage ;
- vérification de la prise en compte des sollicitations et des conditions cinématiques (liaisons) imposées à la structure ;
- vérification des propriétés mécaniques utilisées.

Pour des problèmes spécifiques, d'autres contrôles seront envisagés. L'objectif d'éviter de faire

## Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus

tourner un calcul inutilement. Ceci d'autant plus que la recherche d'une solution acceptable pour un problème donné est rarement le résultat d'un seul calcul.

### **II.4.7.Exécution du calcul:**

Ce bloc, le plus coûteux en temps machine est souvent exécuté en tâche de fond. Un fichier de résultats permet de vérifier que les différentes phases de calculs se sont correctement déroulées :

- interprétation des données, vérification des paramètres manquants ;
- construction des matrices, espace utile pour les gros problèmes ;
- singularité de la matrice raideur, problème de conditions aux limites ou de définition des éléments ;
- convergence, nombre d'itérations, etc.

Ce fichier peut contenir aussi les résultats du calcul (déplacements, résidus, contraintes. . . ) ce

qui lui confère dans ce cas un volume généralement très important. Il peut arriver que le calcul échoue.

Les principales sources d'erreurs généralement observées à ce niveau sont listées dans le tableau 2.1:

Tableau (II.1): Principales sources d'erreurs durant le calcul[2]-.

Erreurs	Causes	remèdes
singularité de K	éléments mal définis, existence de modes rigides, intégration numérique <sup>6</sup>	modifier la topologie du maillage, modifier les liaisons modifier le nombre de points d'intégration
résolution des équations	arrondi numérique, non convergence	travailler en double précision, changer d'algorithme, augmenter le nombre d'itérations

### **II.4.8.Exploitation des résultats:**

Les calculs demandés dans le cahier des charges ont le plus souvent pour objectif de valider ou de vérifier le dimensionnement d'une structure. Les résultats obtenus et les conclusions relatives aux phénomènes à étudier devront être présentés de façon synthétique : tableaux, courbes, visualisation. Cela justifie largement l'utilisation d'un post-processeur, qui propose des outils pour sélectionner les informations que l'on veut étudier.

## Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus

Attention, lors de l'utilisation de ces outils, il faut savoir ce que cache l'information qui vous est proposée graphiquement, sachant que celle-ci est construite à partir de résultats discrets :

- valeur moyenne sur un élément : comment est-elle définie ?
- valeur maximale sur l'élément : comment est-elle calculée ?
- valeurs aux nœuds (écarts entre les éléments) : à quoi correspondent-elles ?
- les courbes d'iso-contraintes ont-elles une signification ? etc.

Différentes vérifications doivent être effectuées pour valider les résultats. Elles poussent, dans la plupart des cas, à remettre en cause le modèle pour en créer un nouveau, dont on espère qu'il améliorera la solution précédente. Pour valider une solution, il faut procéder dans l'ordre, en estimant dans un premier temps la précision du modèle. Puis lorsque celle-ci est jugée suffisante, nous procédons à sa validation. Les indicateurs sur la précision du modèle sont généralement locaux. Ils concernent des informations élémentaires calculées aux nœuds ou aux points d'intégration 7, ces informations sont très souvent fournies en valeur moyenne sur l'élément. Les indicateurs locaux sur la précision d'un modèle mécanique peuvent être :

- discontinuité des contraintes entre des éléments adjacents. Le plus simple, pour un matériau isotrope, est de visualiser la contrainte équivalente de Von Mises, cela permet d'avoir une idée des zones fortement chargées ayant un fort gradient de contrainte. Ces zones seront l'objet de toute notre attention ;
- valeur du tenseur des contraintes sur les bords libres (certaines valeurs doivent être nulles). En pratique, il faudra estimer ces valeurs à partir des valeurs obtenues aux points d'intégration ;
- densité d'énergie interne de déformation sur chaque élément, l'idéal étant d'avoir un écart le plus faible possible.

Ayant les informations sur la qualité de la solution, différents contrôles peuvent être envisagés pour valider votre modèle :

- ordre de grandeur des résultats obtenus ;
- vérification des hypothèses du modèle 8 ;
- justification des choix de départ.

La comparaison des résultats des différents modèles permet d'améliorer puis de valider un modèle final. Une fois la fiabilité du modèle assurée, on peut conclure sur l'adéquation entre la structure et le cahier des charges. La synthèse de ces calculs préliminaires est indispensable car elle vous permet de justifier et de définir les limites du (des) modèle(s) retenu(s). **[1]**

# Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus

## **II.5.4. Les différents fichiers pour la simulation sous Abaqus:**

### **II.5.4.1. Fichier d'entrée (Input file):**

### **II.5.4.2. Extension .inp :**

contient des mots clés décrivant la géométrie, les matériaux, les conditions limites et les chargements de la structure étudiée

### **II.5.4.3. Génération du fichier .inp:**

- Avec un éditeur (fichier texte) ou programme en connaissant les divers mots clés de commande Abaqus
- Avec l'interface graphique Abaqus/CAE
- Avec un logiciel annexe (I-DEAS, NASTRAN, ... )

### **II.5.4.4. Fichier de résultats (output file ):**

Contient les contours et courbes de résultats [6].

## **II.5.5. Système d'unités dans le code de calcul Abaqus :**

Abaqus utilise les unités internationales telles qu'elle sont représentées dans le tableau suivant

Tableau (II. 2): Système d'unités pour la programmation[7].

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

## **II.5.6. Phases de mises en données:**

Les applications courantes, sont réalisées selon 4 phases dans la mise en données:

**Phase 1 :** Génération du maillage (nœuds, éléments)

**Phase 2 :** Propriétés des matériaux (mécanique, physique, thermique)

**Phase 3 :** Conditions aux limites

**Phase 4 :** Etape de calcul (chargement, définition des résultats) [7].

# Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus

## II.6.Utilisation du logiciel Abaqus:

Le travail avec Abaqus s'exécute à partir d'une interface et des fenêtres.

### II.6.1 Organisation de l'interface Abaqus CAE (complète Abaqus environnement):

Il est important de savoir que le module CAE figure III.1 que vous allez utiliser pour créer votre jeu de données est relativement récent (quelques années) et qu'il est plutôt destiné à la mise en données de problèmes

relativement classiques. Donc pas toutes les commandes utilisables dans Abaqus et fait souvent le choix de paramètres par défaut[3].

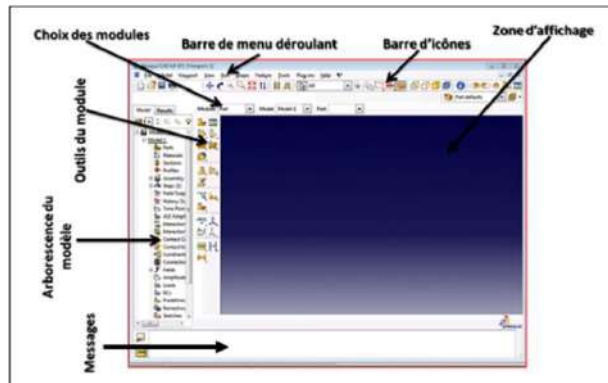


Figure (II.3): Organisation d'abaqus [6].

#### II.6.1.1.Les modules:

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les modules[6], dans la figure (II.5)

# Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus



Figure (II.4): Réalisation de la mise en données d'un problème[6].

## II.6.1.1.1.Le Module «part»:

ART ce module qu'est définie la géométrie des entités du modèle. Figure(II.6).Elles comprennent à la fois les parties déformables et les parties rigides. Pour créer les créer, il faut utiliser l'icône de création en haut à gauche.

- L'espace de modélisation;
- Le type d'entité à générer;
- La former de l'entité. [6].

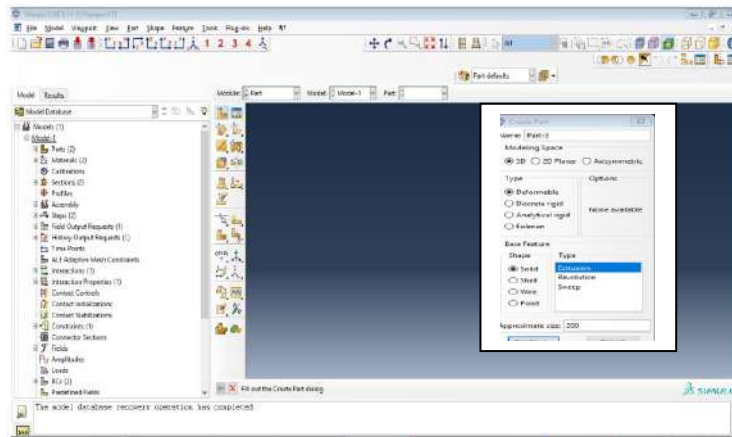


Figure (II.5) : Le module « Part ».

## II.6.1.1.2.Le Module « PROPERTY »:

Grâce à ce module, chaque matériau est défini en introduisant toutes ses propriétés mécaniques nécessaires. Les trois étapes principales suivies pour tout élément sont montrés dans la figure (II.7) [8].

# Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus

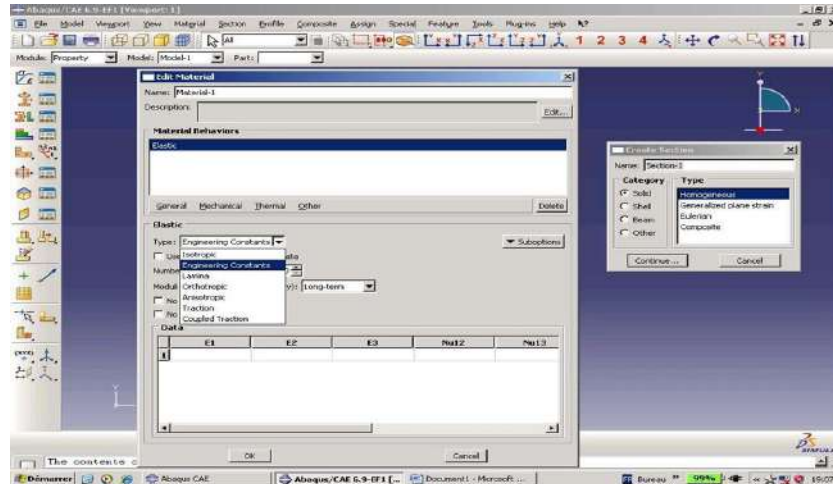


Figure (II.6) : Le module « Property ».

## II.6.1.1.3. Le Module « ASSEMBLY » :

Grâce à ce module et ses outils de déplacement, l'assemblage de tous les éléments déjà créés est possible, tout en leur donnant l'emplacement adéquat suivant le schéma de ferrailage (Figure II.8) [8].

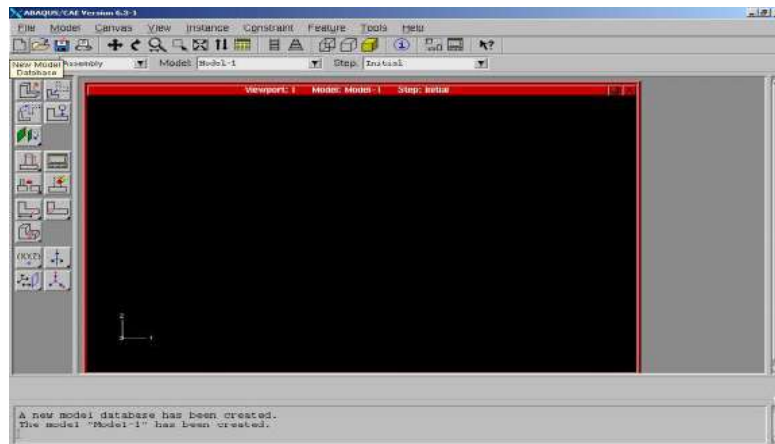
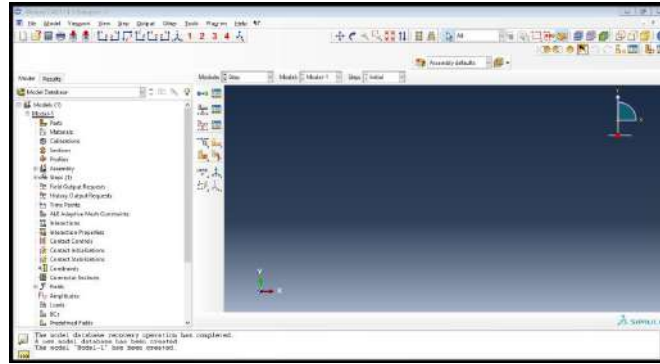


Figure (II.7): Le module « Assembly ».

## II.6.1.1.4. Le Module « Step » :

Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés. La commande de création d'une étape (Step) de calcul est accessible à partir de l'icône en haut à gauche de la barre d'icône présenté ci-dessous. la figure (II.9) [9].

# Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus



Figure( II.8 ):Le module «Step ».

## II.6.1.1.5.Module « Interaction»

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante. dans la figure (II.10) [6].

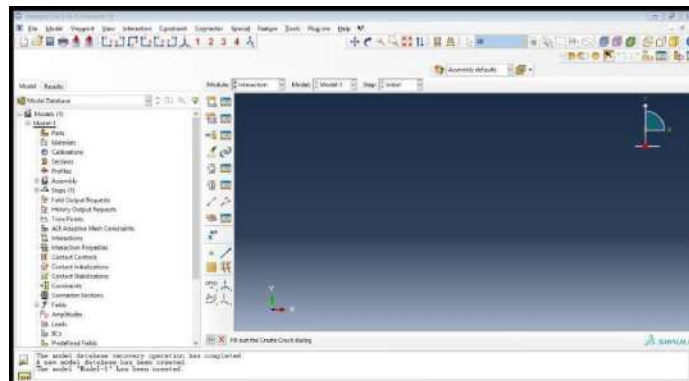


Figure (II. 9):Le module «Interaction»

## II.6.1.1.6.Le Module « LOAD »:

Le module « Load » permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites, et champs de déplacement. Il faut savoir que les chargements et les conditions aux limites sont dépendants des « Steps », par exemple une force est appliquée au « Step 1 » mais inactive au « Step 2 ». dans la figure (II.11) [6].



# Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus

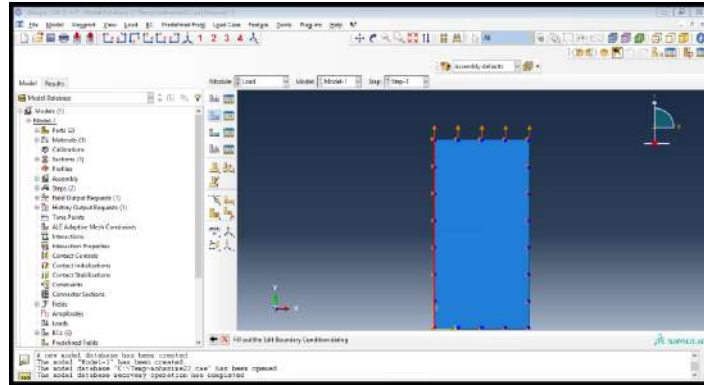
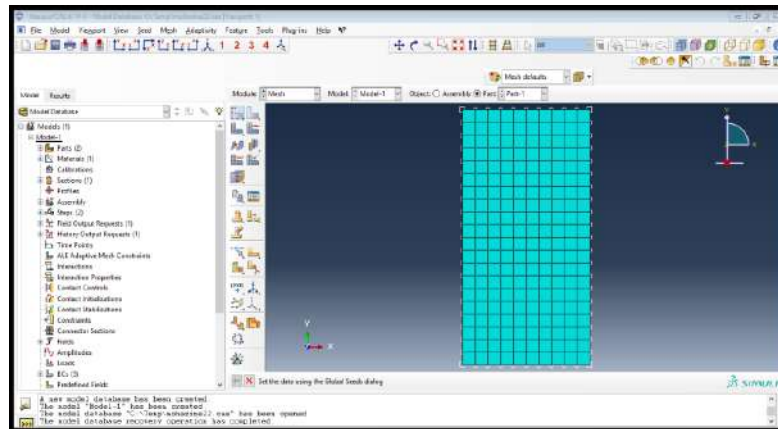


Figure (II. 10):Le module «LOAD»

## **II.6.1.1.7.Le module « MESH » :**

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage éléments finis sur un assemblage. dans la figure (II.12) [6].



Figure( II. 11):Le module « MESH »

## **II.6.1.1.8.Le module « JOB » :**

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module « Job » pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats. Le « lancement » du calcul est classique. Après avoir lancé le calcul, vous pouvez suivre l'évolution du procès en cliquant sur « Monitor » : vous pouvez ainsi avoir en temps réel l'évolution des incréments de chargement et apprécier la convergence des calculs.. dans la figure (II.13) [9].

# Chapitre II: Simulation numérique par Abaqus

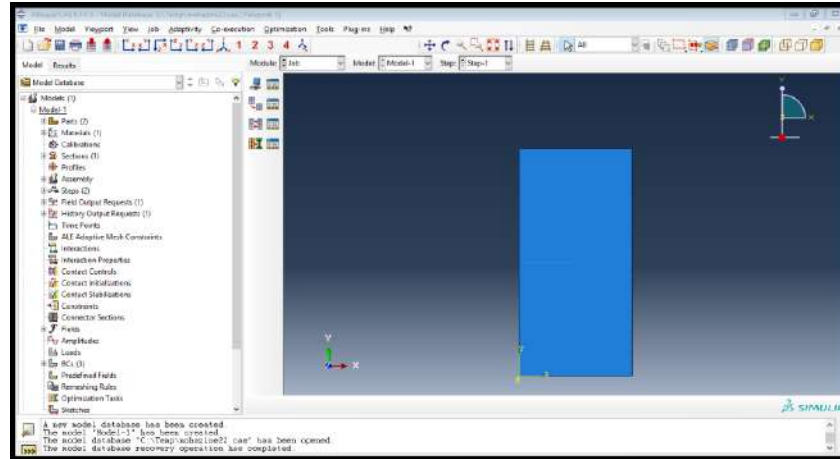
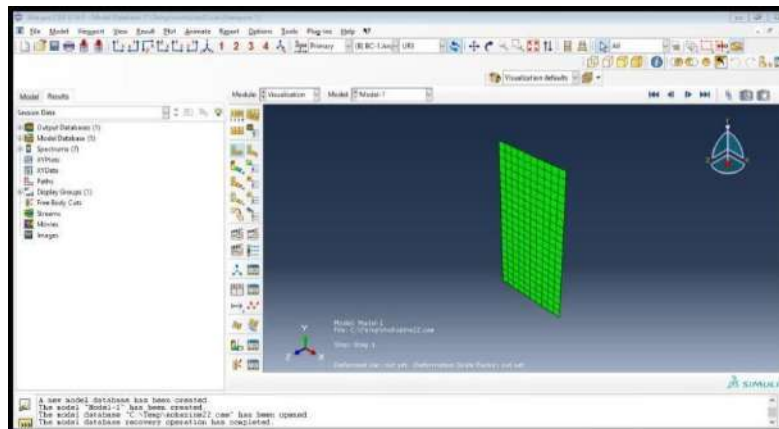


Figure (II. 12):Le module « JOB »

## II.6.1.1.9.Le Module « VISUALIZATION »:

Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations, etc. dans la figure (II.14) [9].



Figure(II.13):Le module« VISUALIZATION »

### Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de s'informer sur la simulation numérique, des outils utilisés notamment Abaqus qui travaille à base d'éléments finis. Nous avons commencé à expliquer la façon dont travaillent les codes numériques et nous avons achevé ce chapitre par une brève explication du logiciel Abaqus ainsi que les composants de son interface.

## **Chapitre. III: la méthode des EF**

# Chapitre. III: la méthode des EF

## III.1.Introduction:

Les structures industrielles telles que les structures marines et aéronautiques sont soumises à des sollicitations qui provoquent dans la plus part des cas des fissures qui entraînent des endommagements des structures. L'étude de la propagation de ces fissures est nécessaire pour décider la possibilité, le temps et la méthode de leur réparation. Le travail proposé dans ce chapitre consiste à un développement suivi d'une implémentation numérique de la méthode des éléments finis étendue X-FEM en vue d'un dimensionnement par la mécanique de la rupture des structures fissurées. A cet effet diverses applications seront traitées pour l'étude de la propagation de plusieurs types de fissures. La méthode du contour plot sera aussi traitée pour le calcul du facteur d'intensité de contrainte FIC pour plusieurs cas de fissures afin de montrer l'efficacité de cette méthode.

## III.2.Matériau utilisé:

Le matériau utilisé est un alliage Aluminium 2024 -T351 dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau suivant :

Tableau(III.1):caractéristiques du matériau étudié [1].

Young	coefficient de Poisson	contrainte limite	Coefficient d'écroutissement, K	l'allongement en %
$E = 71900$ MPA	$\mu = 0,3$	$\sigma_y = 359$ MPa	$\sigma_u = 347$ MPA	$\xi_{el} = 14$ %

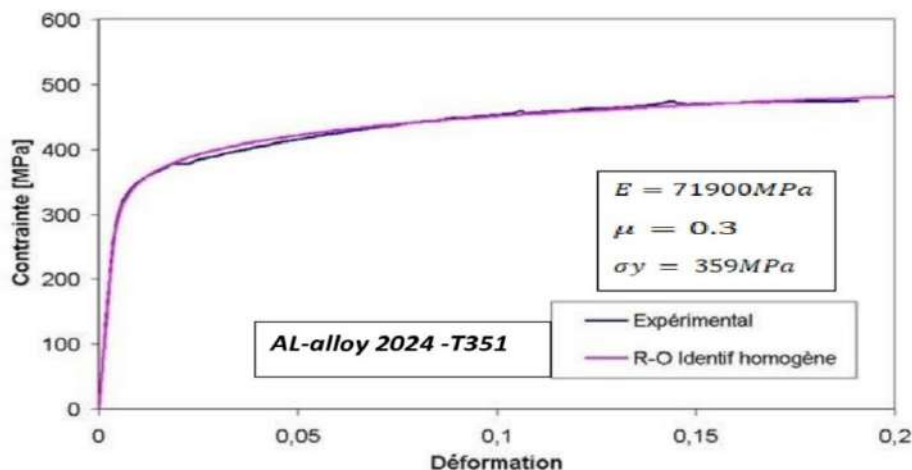


Figure.(III 1) Courbe contrainte déformation de l'alliage d'aluminium 2024-T351 D'après WuchaoYang, Xudong Qian[2].

# Chapitre. III: la méthode des EF

## III.3. Dimensions de La plaque:

La plaque fissurée possède les mêmes dimensions pour tous les cas étudiés, elle a une hauteur  $HP = 100$  mm, une largeur  $WP = 100$  mm et une épaisseur  $ep = 2$  mm comportant une fissure de même longueur (20mm) dans tous les cas d'étude pour pouvoir les comparer.

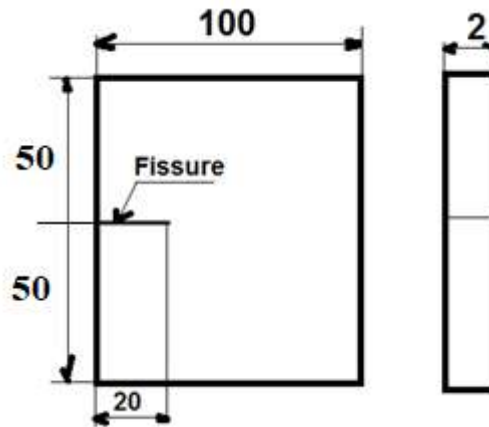


Figure.(III 2):Dimensions de la plaque

## III.4. méthode du contour plot:

### III.4.1. Calcul numérique du facteur d'intensité de contrainte:

$$KI = \sigma_y \cdot \sqrt{\pi A} \cdot f\left(\frac{a}{b}\right) \quad (\text{III.1})$$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{20}{100}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{a}{b}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0.728 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^3 \right] \quad (\text{III.2})$$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{20}{100}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{20}{100}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{20}{100}\right)^2 + 0.728 \cdot \left(\frac{20}{100}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{20}{100}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{20}{100}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{20}{100}\right)^2 + 0.728 \cdot \left(\frac{20}{100}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = 0.980797$$

$$ki = 359 \cdot \sqrt{\pi 20} \cdot f\left(\frac{20}{100}\right)$$

$$ki = 2790.173 \text{ mpa} \sqrt{\text{mm}}$$

### III.4.2. Détermination du facteur d'intensité de contrainte (FIC) par la méthode des éléments finis:

Pour déterminer le FIC numériquement par la méthode des éléments finis nous utilisons l'outil travaillant à base d'E.F. qui Abaqus, dans cette étude nous utilisons la version 9.14.

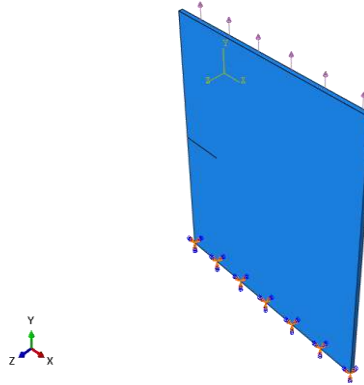
# Chapitre. III: la méthode des EF

Plusieurs cas de fissure seront étudiés pour la détermination du facteur KI.

## **III.4.3.Cas d'une fissure horizontale:**

### **III.4.3.1.Condition aux limites:**

Une contrainte verticale dirigée vers le haut sera appliquée  $\sigma_y=359$ (en MPA) sera appliquée à la plaque, la base de la plaque est encadrée. Ces mêmes conditions seront appliquées dans tous les cas de cette étude.

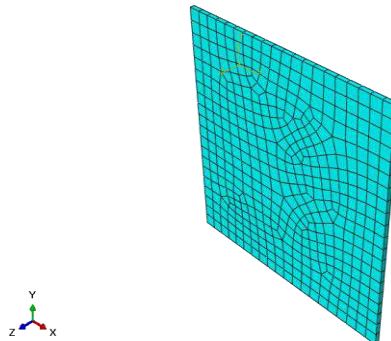


Figure(III 3):Conditions aux limites.

### **III.4.3.2.Maillage:**

La zone présente des gradients importants de contraintes et de déformations. Il est donc crucial de bien choisir le type d'éléments, ainsi que la taille optimale de discrétisation afin d'obtenir des résultats fiables avec un temps de calcul raisonnable.

Nous utilisons dans la simulation un maillage à 448 éléments cubiques linéaires sont utilisés pour une modélisation 3D, le type d'éléments (C3D8R< An 8-nbse liner brick, reduce intégration ,hou glass control ) On maintient aussi les mêmes conditions aux limites pour les simulations suivantes. [3].

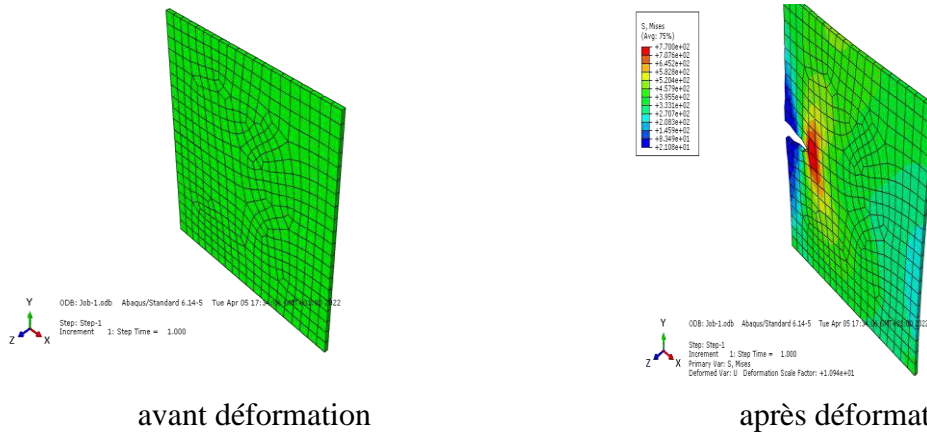


Figure(III 4):Maillage utilisé

# Chapitre. III: la méthode des EF

## III.4.3.3.Résultats et discussions:

La figure.(5). représente la plaque fissurée avant et après déformation



Figure(III. 5):Résultats de la simulation

Les figures de III.6 a III.10 à représentent les différentes valeurs du facteur KI pour le cas étudié

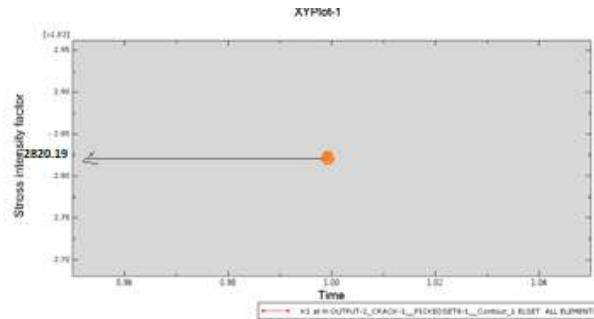


Figure.(III 6):valeur de K1

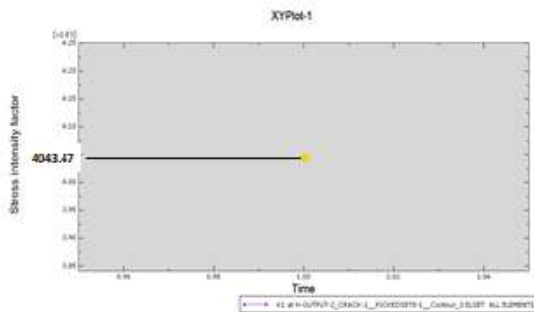


Figure.(III 7):valeur de K3

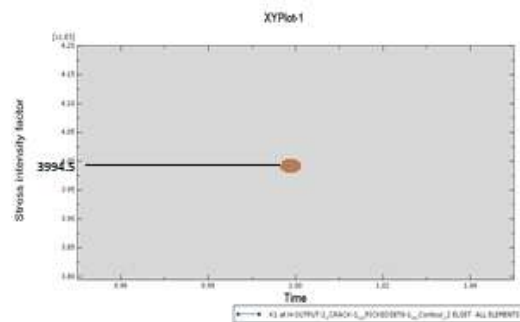


Figure.(III 8):. valeur de K2

# Chapitre. III: la méthode des EF

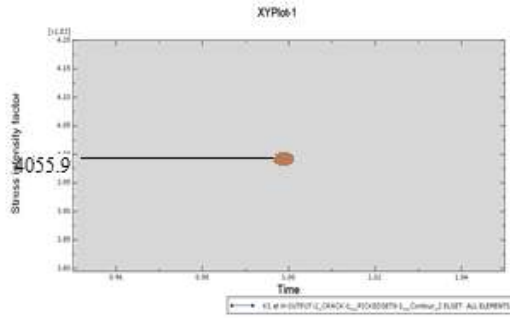


Figure.(III 9):.valeur de K4

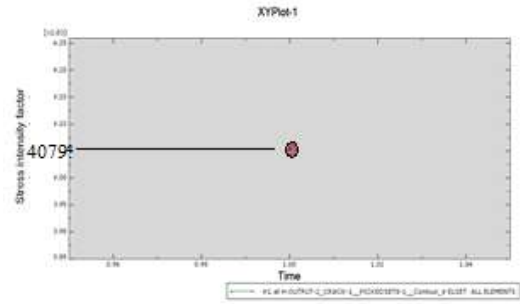


Figure.(III 10):.valeur de K5

Tableau (III .2 ):Différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis

Facteur K1	K1	K2	K3	K4	K5
Valeurs	2820.91	3994.5	4043.47	4055.94	4079.1

**Remarque:** On remarque que la valeur la plus proche de celle calculée

( $k_1 = 2820.91 \text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ ) est celle du facteur K1.

### III.4.4.Cas d'une fissure inclinée d'un angle $\alpha$ par rapport à l'horizontal:

Dans les cas suivant nous allons étudier la propagation de fissure qui sont inclinées d'un angle par rapport à l'horizontal

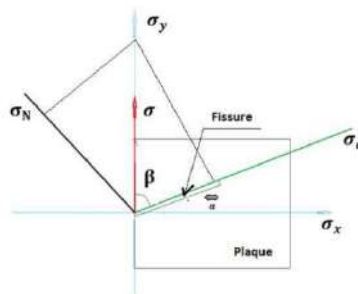


Figure.(III 11): projection des contraintes

$$\sigma_n = \sigma \sin \beta \quad (\text{III.3})$$

$$\sigma_y = \sigma_n \sin \beta \quad (\text{III.4})$$

$$\sigma_y = \sigma \sin^2 \beta \quad (\text{III.5})$$

#### III.4.4.1.Cas d'une fissure inclinée d'un angle $\alpha = 10^\circ$ :

#### III.4.4.2.Calcul numérique de la valeur du FIC:

$$\sigma_a = \sigma \cos \beta \quad (\text{III.6})$$

$$\sigma_x = \sigma_a \sin \beta \quad (\text{III.7})$$

$$\sigma_x = \sigma \cos \beta \sin \beta \quad (\text{III.8})$$

$$k_i = \sigma \sin^2 \beta \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a^*}{b}\right) \quad (\text{III.9})$$



## Chapitre. III: la méthode des EF

$$a^* = a \sin \beta = 20 \sin 10$$

$$a^* = 3.47 \quad b = 100$$

$$\left(\frac{a^*}{b}\right) = \left(\frac{20 \sin 10}{100}\right) = 0.03473$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{a^*}{b}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{a^*}{b}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{a^*}{b}\right)^2 + 0.728 \left(\frac{a^*}{b}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = \sqrt{1 \div (1 - (0.03473))} [1.122(1 - (0.03473)) - 0.06(0.03473)^2 + 0.728(0.03473)^3]$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = 1.12$$

$$k_1 = 359 \sin^2 10 \sqrt{\pi 20} \cdot 1.12$$

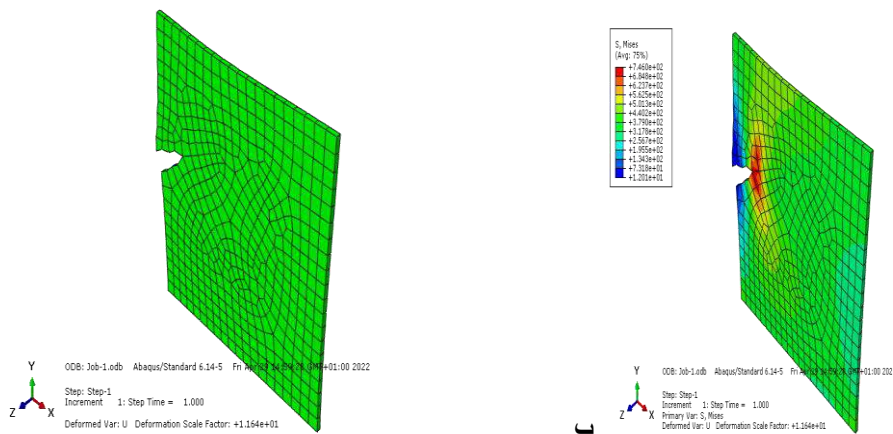
$$k_1 = 93.8232 \text{MPa} \sqrt{\text{mm}}$$

### III.4.4.3. Détermination du FIC par éléments finis:

On préserve les mêmes conditions aux limites. La figure suivante représente la plaque fissurée avant et après déformation.

### III.4.4.4. Résultats et discussions:

La figure.(12). représente la plaque fissurée avant et après déformation



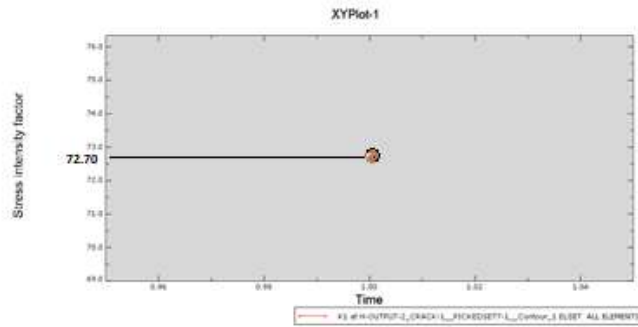
Avant déformation

Après déformation

Figure.(III 12): Résultats de la simulation

Les figures III.13 à III.17 représentent les valeurs du FIC déterminé Par éléments finis

# Chapitre. III: la méthode des EF



Figure(.III 13):.valeur de K1

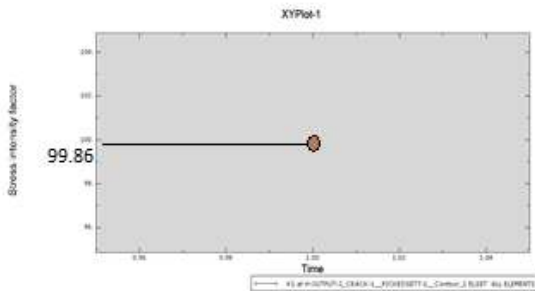


Figure.(III 14):valeur de K2

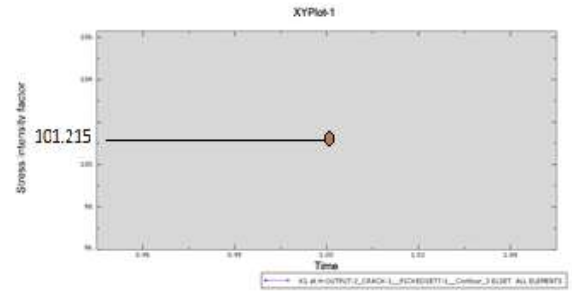


Figure.(III 15).valeur de K3

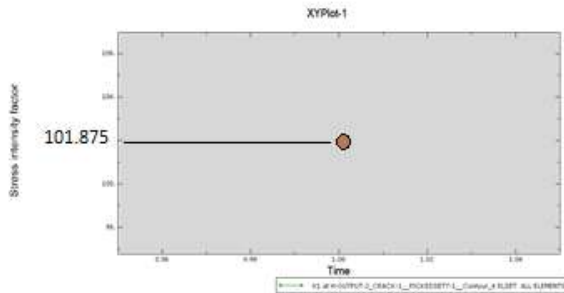
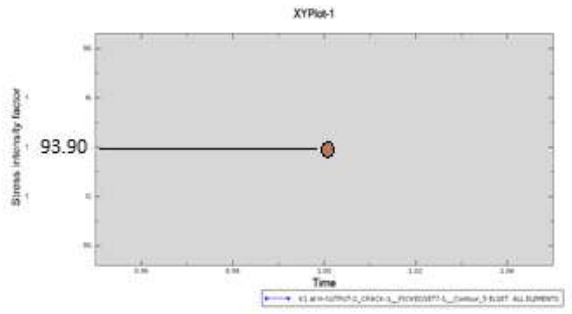


Figure.(III 16).valeur de K4



Figure(.III 17):.valeur de K5

Tableau (III 3 ):Différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis.

Facteur KI	K1	K2	K3	K4	K5
Valeurs	72.70	99.86	101.215	101.875	93.90

**Remarque:** On remarque que la valeur la plus proche de la valeur calculée est celle de K5

## III.4.5..Cas d'une fissure inclinée d'un angle $\alpha = 30^\circ$ :

### III.4.5.1.Calcul numérique de la valeur du FIC:

$$\sigma_a = \sigma \cos \beta$$

$$\sigma_x = \sigma_a \sin \beta$$

$$\sigma_x = \sigma \cos \beta \sin \beta$$

## Chapitre. III: la méthode des EF

$$k_i = \sigma \sin^2 \beta \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a^*}{b}\right)$$

$$a^* = a \sin \beta = 20 \sin 30$$

$$a^* = , \quad b = 100$$

$$\left(\frac{a^*}{b}\right) = \left(\frac{20 \sin 30}{100}\right) = 0.1$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{a^*}{b}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{a^*}{b}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{a^*}{b}\right)^2 + 0.728 \left(\frac{a^*}{b}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{0.1}{100}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{0.1}{100}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{0.1}{100}\right)^2 + 0.728 \left(\frac{0.1}{100}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = 1.06$$

$$k_1 = 359 \sin^2 30 \sqrt{\pi 20} \cdot 1.06$$

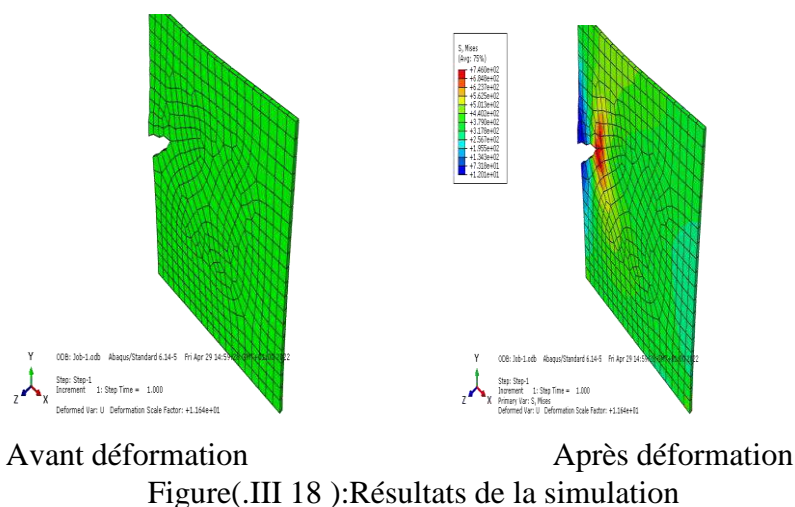
$$k_1 = 753.9111 \text{MPa} \sqrt{\text{mm}}$$

### III.4.5.2. Détermination du FIC par éléments finis:

On préserve les mêmes conditions aux limites. La figure suivante représente la plaque fissurée avant et après déformation.

### III.4.5.3. Résultats et discussions:

La figure.(18). représente la plaque fissurée avant et après déformation



Les figures III.19 à III.23 représentent les valeurs du FIC déterminé par éléments finis

# Chapitre. III: la méthode des EF

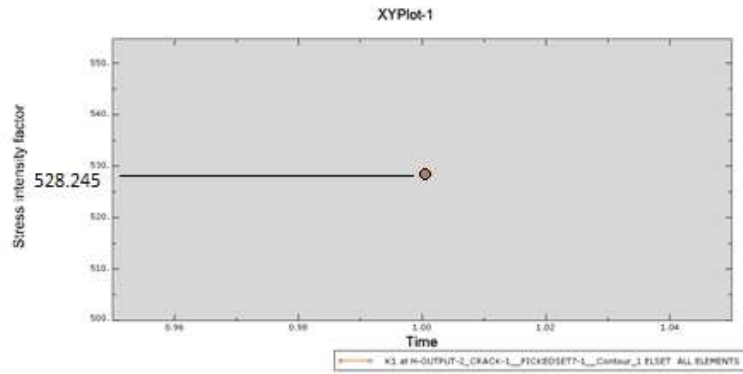


Figure.(III 19): valeur de K1

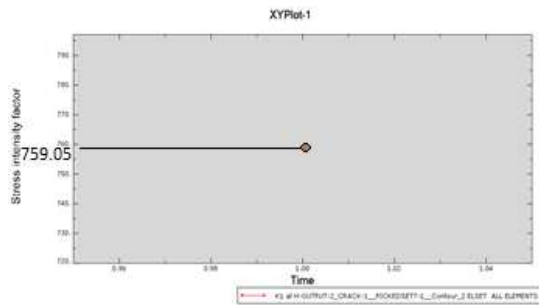


Figure.(III 20):valeur de K2

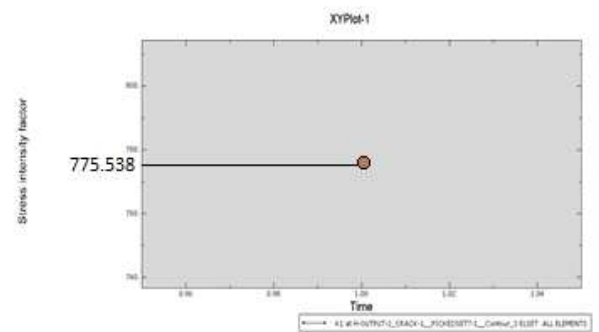


Figure.(III 21):valeur de K3

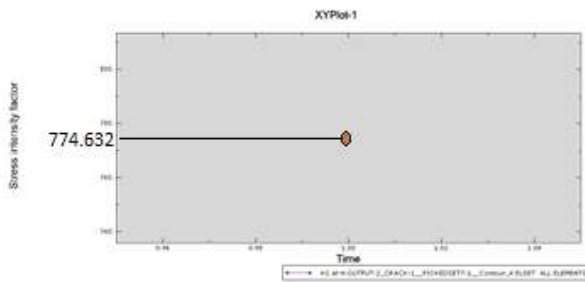


Figure.(III 22):valeur de K4

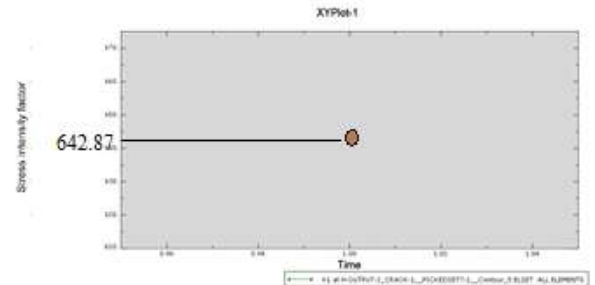


Figure.(III 23):valeur de K5

Tableau III 4 Différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis.

Facteur KI	K1	K2	K3	K4	K5
Valeurs	528.245	759.056	775.538	774.632	642.879

remarque :On remarque que la valeur la plus proche de la valeur calculée est celle de K2.

## III.4.6. Cas d'une fissure inclinée d'un angle $\alpha = 45^\circ$ :

### III.4.6.1.Calcul numérique de la valeur du FIC:

$$\sigma_a = \sigma \cos \beta$$

$$\sigma_x = \sigma_a \sin \beta$$

$$\sigma_x = \sigma \cos \beta \sin \beta$$

$$k_i = \sigma \sin^2 \beta \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a^*}{b}\right)$$

$$a^* = a \sin \beta = 20 \sin 45$$

## Chapitre. III: la méthode des EF

$$a^* = 14.14, \quad b = 100$$

$$\left(\frac{a^*}{b}\right) = \left(\frac{20 \sin 45}{100}\right) = 0.14$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{a^*}{b}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{a^*}{b}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{a^*}{b}\right)^2 + 0.728 \left(\frac{a^*}{b}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{14.14}{100}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{14.14}{100}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{14.14}{100}\right)^2 + 0.728 \left(\frac{14.14}{100}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = 1.04$$

$$k_1 = 359 \sin^2 45 \sqrt{\pi 20} \cdot 1.04$$

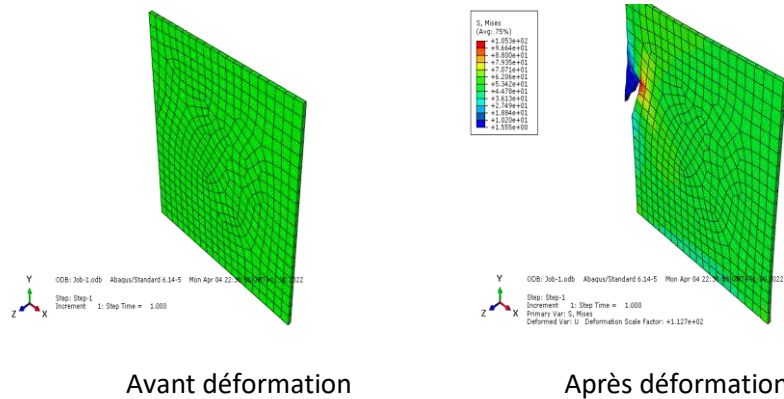
$$k_1 = 1480.206 \text{MPa} \sqrt{\text{mm}}$$

### III.4.6.2. Détermination du FIC par éléments finis:

On préserve les mêmes conditions aux limites. La figure suivante représente la plaque fissurée avant et après déformation

### III.4.6.3. Résultats et discussions:

La figure.(24). représente la plaque fissurée avant et après déformation



Figure(.III 24):Résultats de la simulation

Les figures III.25 à III.29 représentent les valeurs du FIC déterminé par éléments finis

# Chapitre. III: la méthode des EF

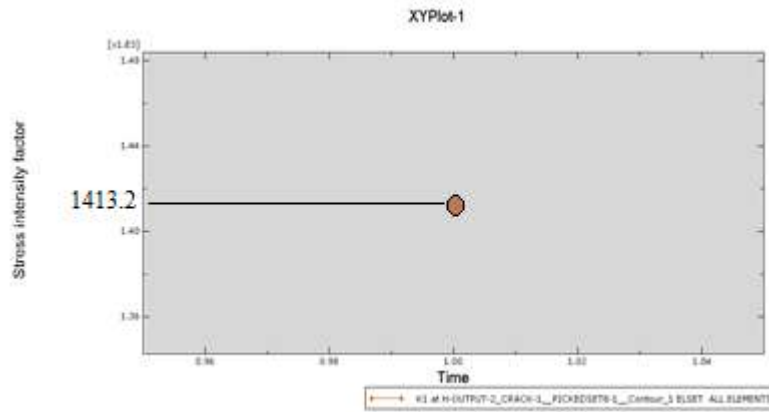


Figure.(III 25):valeur de K1

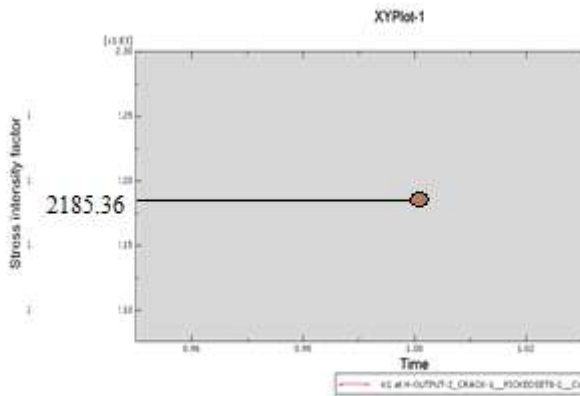


Figure.(III 26):valeur de K2

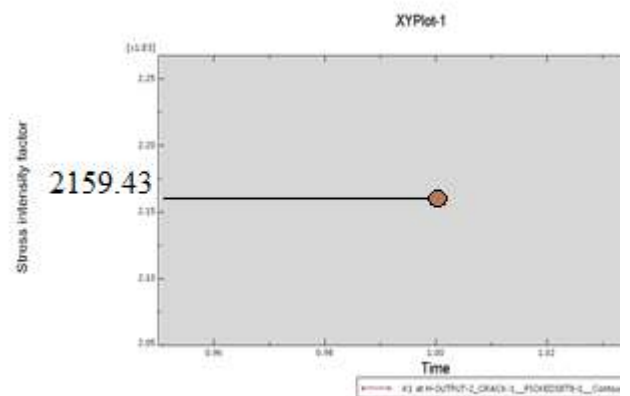


Figure.(III 27):valeur de K3

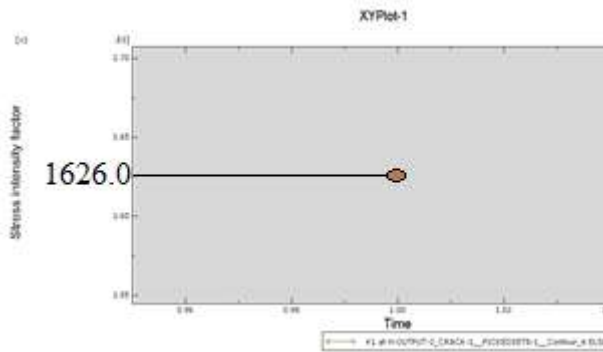


Figure.(III 28):valeur de K4

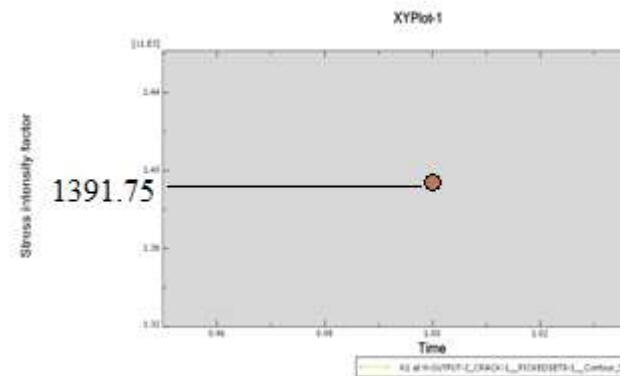


Figure.(III 29): valeur de K5

Tableau III 5 Différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis.

Facteur KI	K1	K2	K3	K4	K5
Valeurs	1413.2	2185.36	21593.43	1626.09	1391.75

**Remarque:** On remarque que la valeur la plus proche de la valeur calculée est celle dekl  
**III.4.7.Cas d'une fissure inclinée d'un angle  $\alpha= 60^\circ$ :**

### III.4.7.1.Calcul numérique de la valeur du FIC:

$$\sigma_\alpha = \sigma \cos \beta$$

## Chapitre. III: la méthode des EF

$$\sigma_x = \sigma_a \sin \beta$$

$$\sigma_x = \sigma \cos \beta \sin \beta$$

$$k_i = \sigma \sin^2 \beta \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a^*}{b}\right)$$

$$a^* = a \sin \beta = 20 \sin 60$$

$$a^* = 17.32, \quad b = 100$$

$$\left(\frac{a^*}{b}\right) = \left(\frac{20 \sin 60}{100}\right) = 0.1732$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = \sqrt{1 - \left(1 - \left(\frac{a^*}{b}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{a^*}{b}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{a^*}{b}\right)^2 + 0.728 \left(\frac{a^*}{b}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = \sqrt{1 - \left(1 - \left(\frac{17.32}{100}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{17.32}{100}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{17.32}{100}\right)^2 + 0.728 \left(\frac{17.32}{100}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = 1.04$$

$$k_1 = 359 \sin^2 60 \sqrt{\pi 20} \cdot 1.02$$

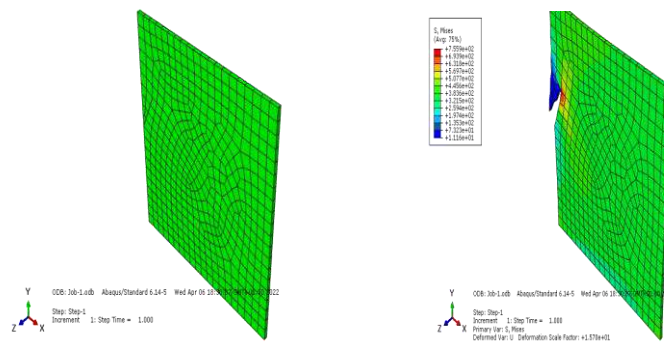
$$k_I = 2182.07044 \text{MPa} \sqrt{\text{mm}}$$

### III.4.7.2. Détermination du FIC par éléments finis:

On préserve les mêmes conditions aux limites. La figure suivante représente la plaque fissurée avant et après déformation.

### III.4.7.3. Résultats et discussions:

La figure.(30). représente la plaque fissurée avant et après déformation



Avant déformation

après déformation

Figure.(III 30):Résultats de la simulation

Les figures III.31 à III.35 représentent les valeurs du FIC déterminé Par éléments finis

# Chapitre. III: la méthode des EF

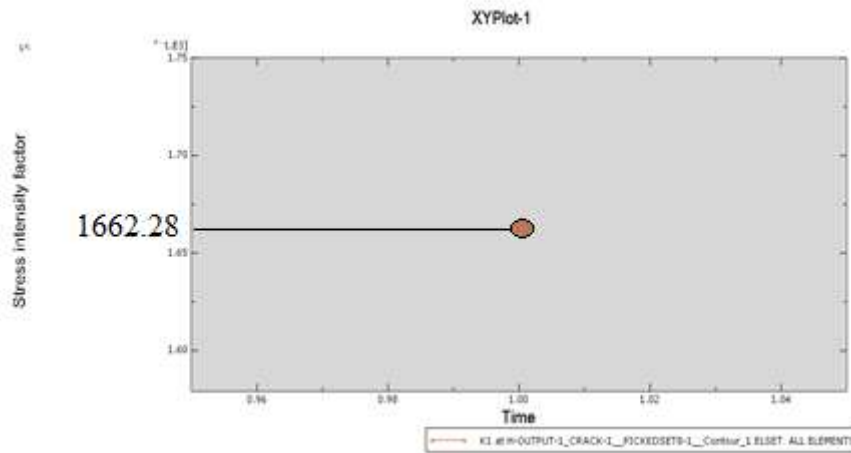


Figure.(III 31):valeur de K1

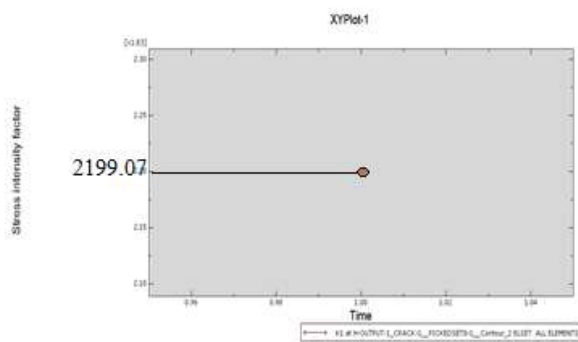


Figure.(III 32): valeur de K2

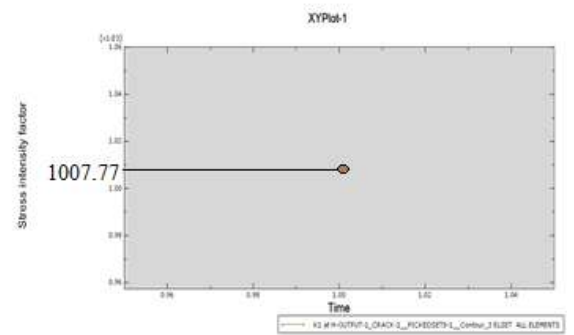


Figure.(III 33):valeur de K3

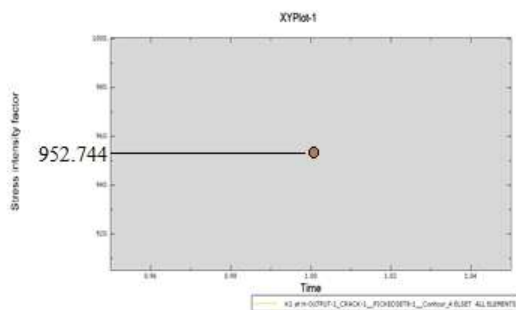


Figure.(III. 34): valeur de K4

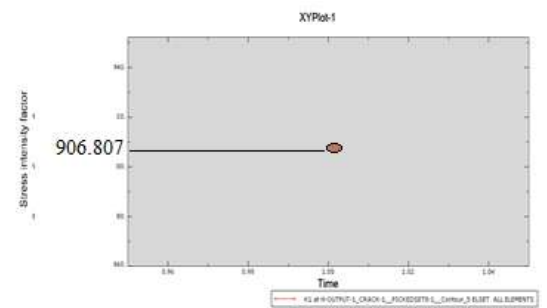


Figure.(III 35):valeur de K5

Tableau( III. 6): différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis.


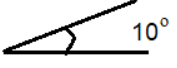
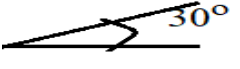
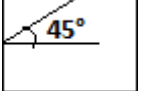
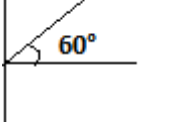
Facteur KI	K1	K2	K3	K4	K5
Valeurs	1662.28	2199.07	1007.77	952.744	906.807

**Remarque:** On remarque que la valeur la plus proche de la valeur calculée est celle de K2.



## Chapitre. III: la méthode des EF

Tableau (III 7) : Récapitulatif des valeur

Type de fissure	Valeur Calculée de $K_I$	KI FEM
	2790.173	$K = 2820.91$
	93.8232	$K=93.90$
	753.9111	$K=759.056$
	1480.206	$K =1413.2$
	2182.07044	$K = 2199.07$

# Chapitre. III: la méthode des EF

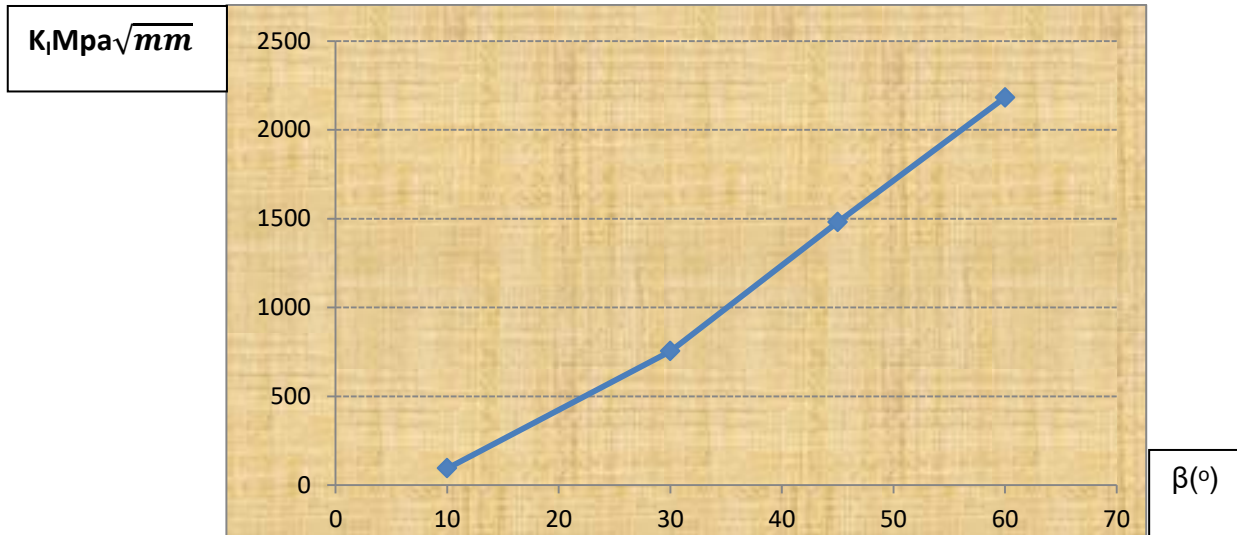


Figure.(III 36): Evolution du FIC en fonction de l'inclinaison de la fissure. D'après le tableau III.7 et la figure III.36 il est évident que le facteur d'intensité des contraintes augmente en force avec la valeur de l'angle d'inclinaison de la fissure.

## III.5.Méthode étendue XFEM :

### III.5.1.Cas d'une fissure horizontale:

#### III.5.1.1.Condition aux limites:

$\sigma_y=359$ (en MPA),la base de la plaque est encadrée. Ces mêmes conditions seront appliquées dans tous les cas de simulation.

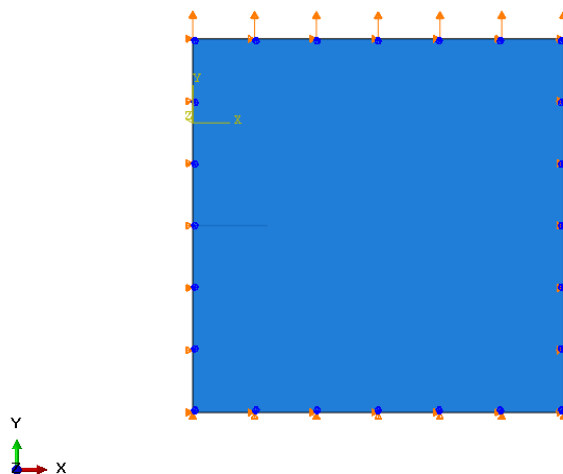
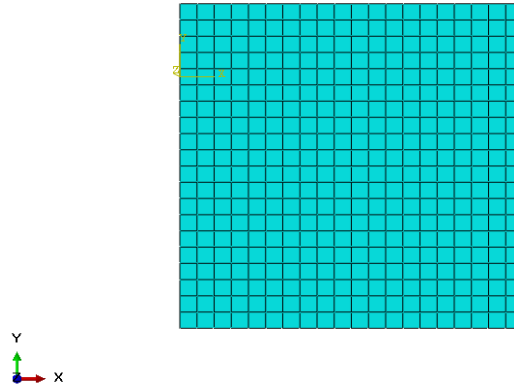


Figure.(III.37) Conditions aux limites

# Chapitre. III: la méthode des EF

## III.5.1.2.Maillage:

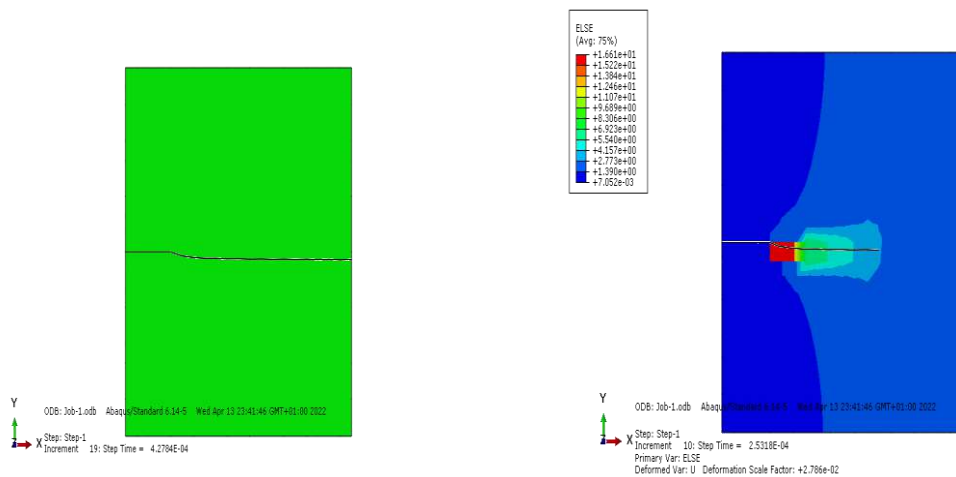
Nous utilisons dans la simulation un maillage à (400 éléments quadratique linéaires de type CPS4R :A4-node bilinéaire plane stress quadrilatéral, redue intégration ,hou glass control) . On maintient aussi les mêmes conditions aux limites pour les simulations suivantes.



Figure(III 38):Maillage utilisé

## III.5.1.3.Résultats et discussions:

La figure(III.39). représente la plaque fissurée avant et après déformation.



Avant déformation

Après déformation

Figure(.III 39): Résultats de la simulation

# Chapitre. III: la méthode des EF

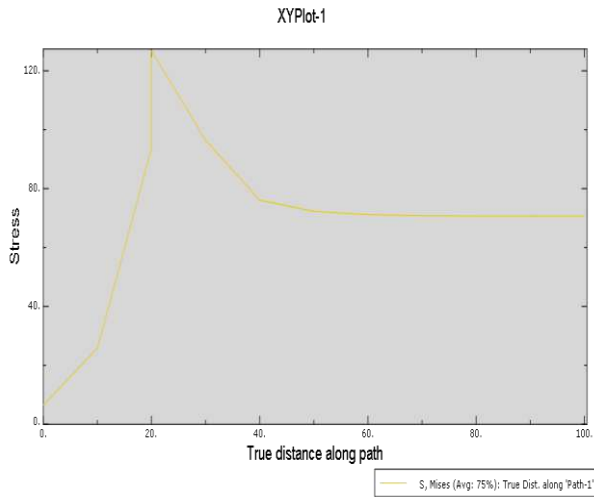


Figure.(III 40):Evolution de la force en fonction de la longueur de fissure

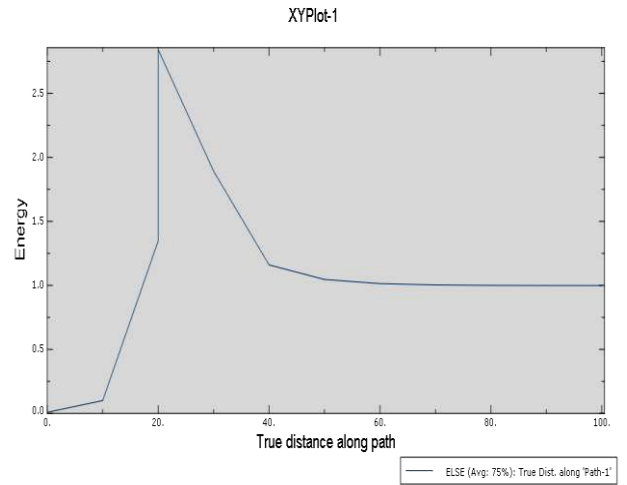
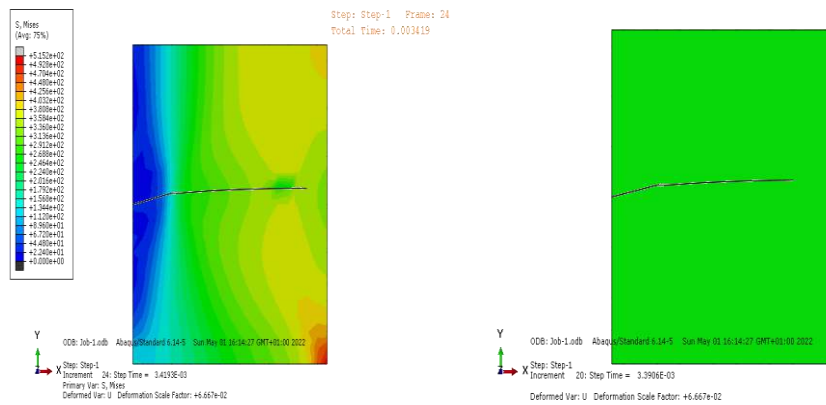


Figure.(III 41): Evolution d'énergie en fonction de la longueur de fissure

## III.5.2.cas d'une fissure inclinée d'un angle de 10 °:

### III.5.2.1.Résultats et discussions:



Avant déformation

Après déformation

Figure. (III 42):Résultats de la simulation

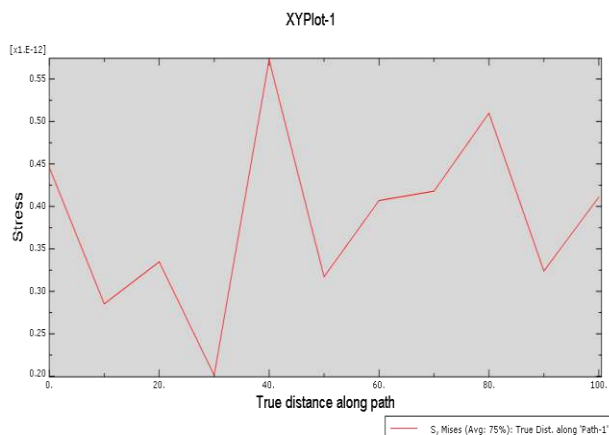


Figure.(III 43):Evolution de la force en fonction de la longueur de fissure

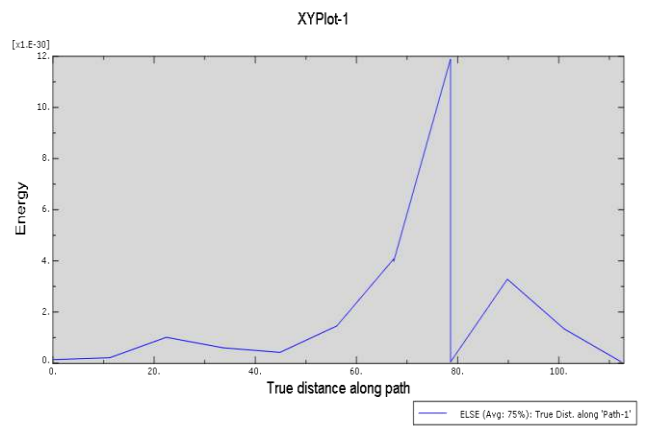


Figure.(III 44):Evolution d'énergie en fonction de la longueur de fissure

# Chapitre. III: la méthode des EF

## III.5.3.cas d'une fissure inclinée d'un angle de 30 °:

### III.5.3.1.Résultats et discussions:



Avant déformation

Après déformation

Figure.(III .45)Résultats de la simulation

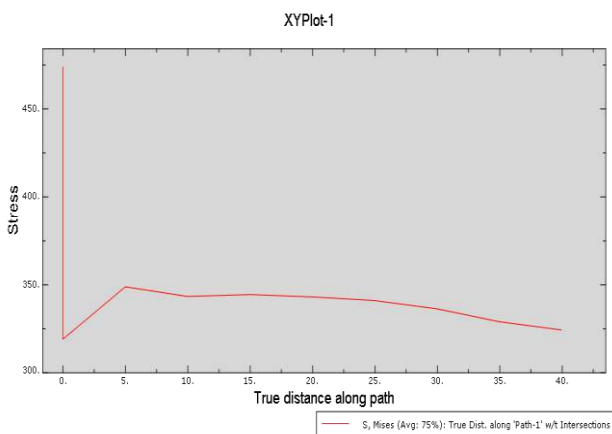


Figure.(III 46):Evolution de la force en fonction de la longueur de fissure

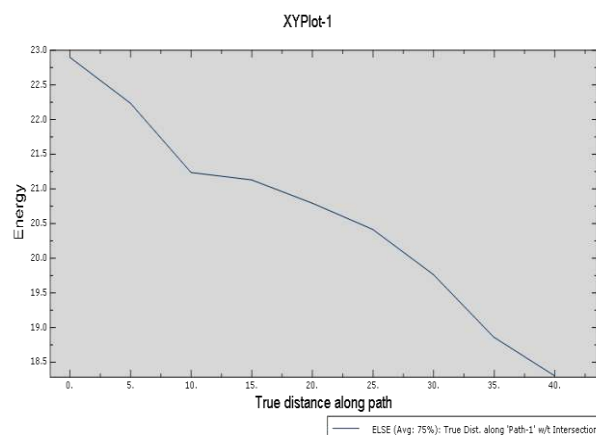
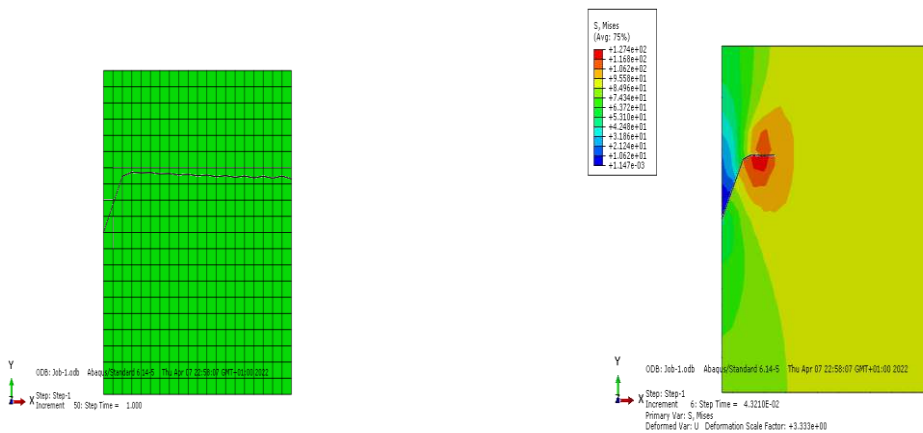


Figure.(III 47):Evolution d'énergie en fonction de la longueur de fissure

## III.5.4.cas d'une fissure inclinée d'un angle de 45 °:

### III.5.4.1.Résultats et discussions:



Avant déformation

Après déformation

Figure.(III 48): Résultats de la simulation

# Chapitre. III: la méthode des EF

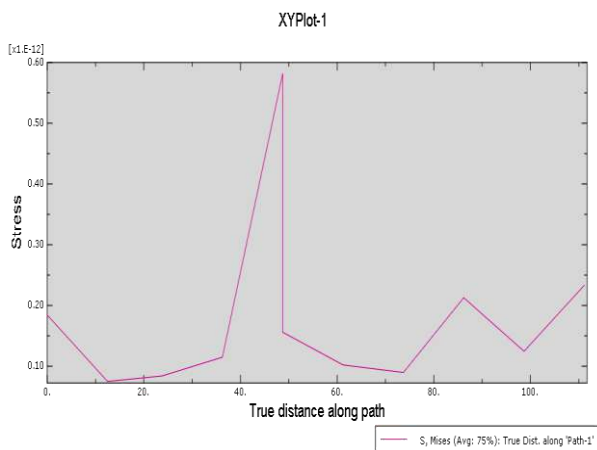


Figure.(III 49): Evolution de la force en fonction de la longueur de fissure

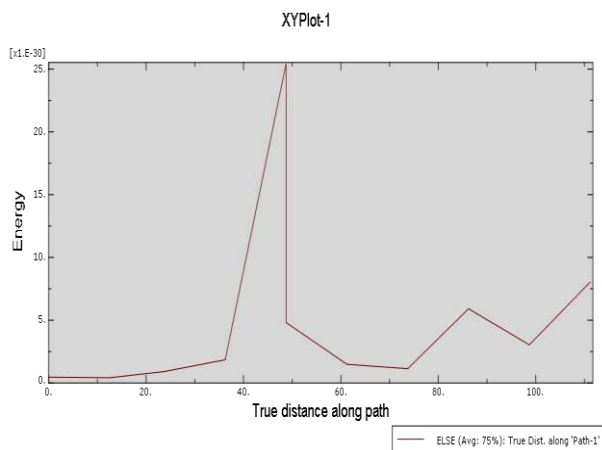
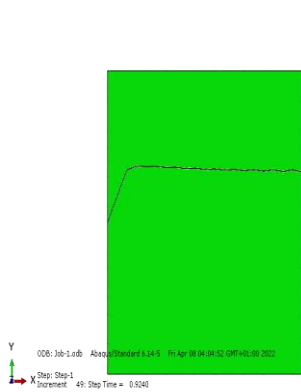


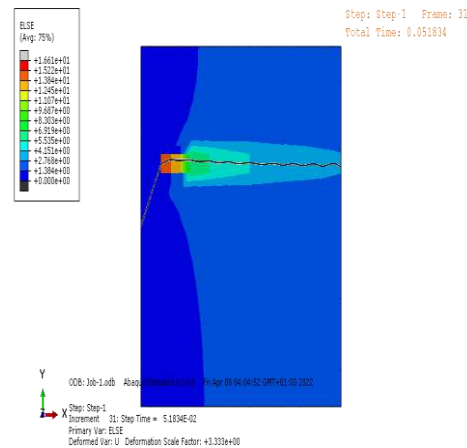
Figure.(III 50): Evolution d'énergie en fonction de la longueur de fissure

## III.5.5.cas d'une fissure inclinée d'un angle de 60 °:

### III.5.5.1.Résultats et discussions:

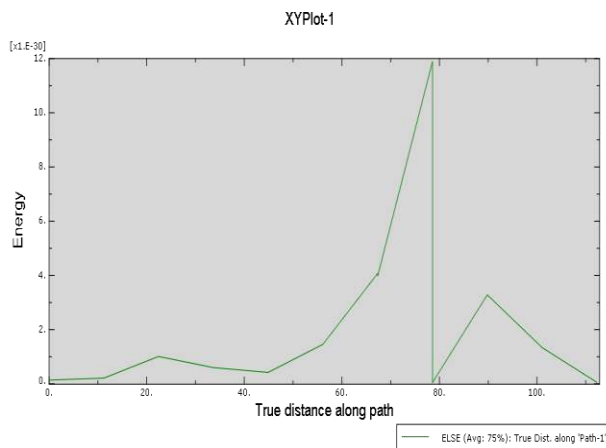
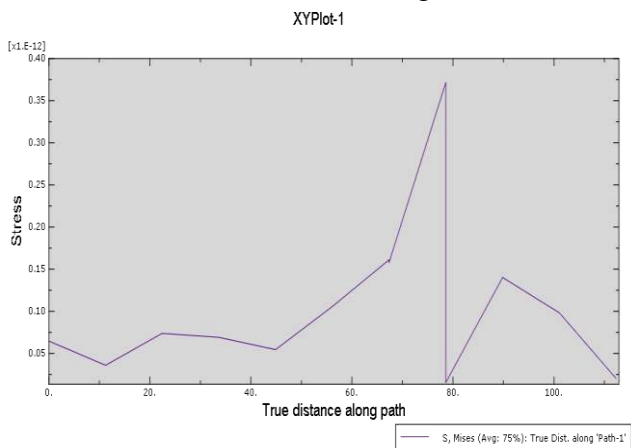


Avant déformation



Après déformation

Figure.(III 51): Résultats de la simulation



**Remarque:** Nous remarquons que dans tous les cas la valeur maximale de l'énergie dissipée et celle de la force sont situées au niveau de l'extrémité de la fissure (tip of the crack)

## Chapitre. III: la méthode des EF

### III.6. Influence les matériau de la plaque:

on garde les mêmes condition ou limites et on change le matériau de la plaque

#### III.6.1. Matériau utilise:

Le matériau utilisé est un acier XES dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau suivant:

Tableau III 8 caractéristiques du matériau étudié[4].

Young	coefficient de Poisson	contrainte limite	Constante du matériau	Exposant de-crouissage,n
210000MPa	0.29	150MPa	448MPa	0.406

#### III.6.2. méthode du contour plot:

##### III.6.2.1. Cas d'une fissure horizontale:

##### III.6.2.1.1. Calcul numérique du facteur d'intensité de contrainte:

$$KI = \sigma Y \cdot \sqrt{\pi q} \cdot f\left(\frac{q}{b}\right)$$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = \sqrt{\left(1 + \left(1 - \left(\frac{20}{100}\right)\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \frac{q}{b}\right) - 0.06 \left(\frac{q}{b}\right)^2 + 0.728 \cdot \left(\frac{q}{b}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = \sqrt{\left(1 + \left(1 - \left(\frac{20}{100}\right)\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{20}{100}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{20}{100}\right)^2 + 0.728 \cdot \left(\frac{20}{100}\right)^3 \right]$$

$$f = \left(\frac{a}{b}\right) = 0.980797$$

$$ki = 150 \cdot \sqrt{\pi 20} \cdot f\left(\frac{20}{100}\right)$$

$$ki = 1165.7 \text{ mpa} \sqrt{\text{mm}}$$

##### III.6.2.1.2. Condition aux limits:

Une contrainte verticale dirigée vers le haut sera appliquée  $\sigma = 359$  (en MPA) sera appliquée à la plaque, la base de la plaque est encadrée

# Chapitre. III: la méthode des EF

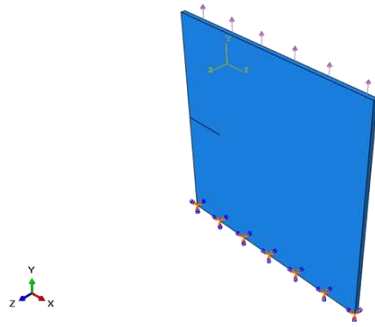


Figure.(III 52):Conditions aux limites.

## III.6.2.1.3.Maillage:

Nous utilisons dans la simulation un maillage à 448 éléments cubiques linéaires sont utilisés pour une modélisation 3D, le type d'éléments C3D8R< An 8-nbse linear brick, reduce intégration ,hourglass control on garde Les mêmes conditions aux limites sont également conservées pour les simulations précédentes

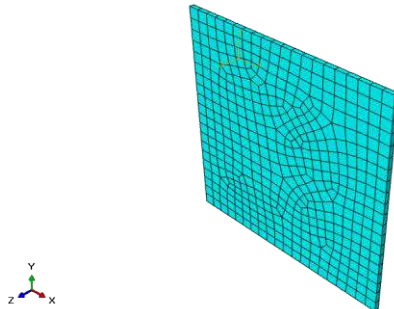


Figure.(III 53):Maillage utilisé.

## III.6.2.1.4.Résultats et discussions

La figure(56). représente la plaque fissurée avant et après déformation.

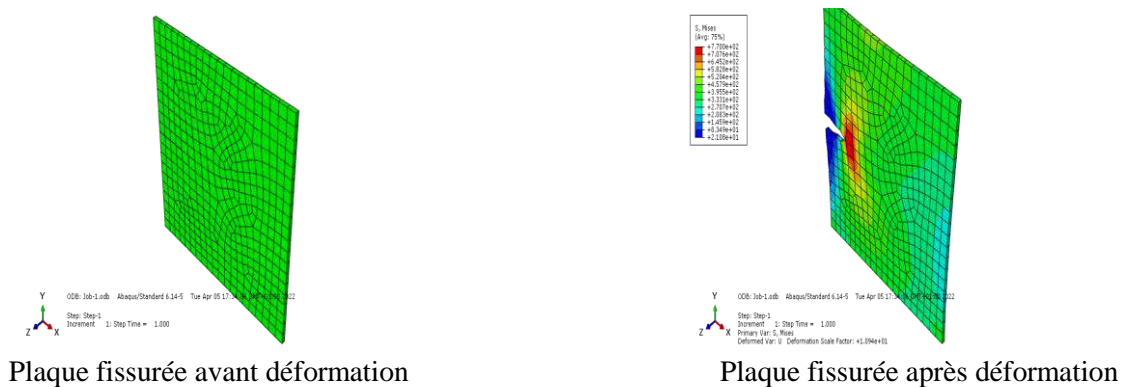


Figure.(III 54):Résultats de la simulation

Les figures de III.57 à III.61 représentent les différentes valeurs du facteur KI pour le cas étudié



# Chapitre. III: la méthode des EF

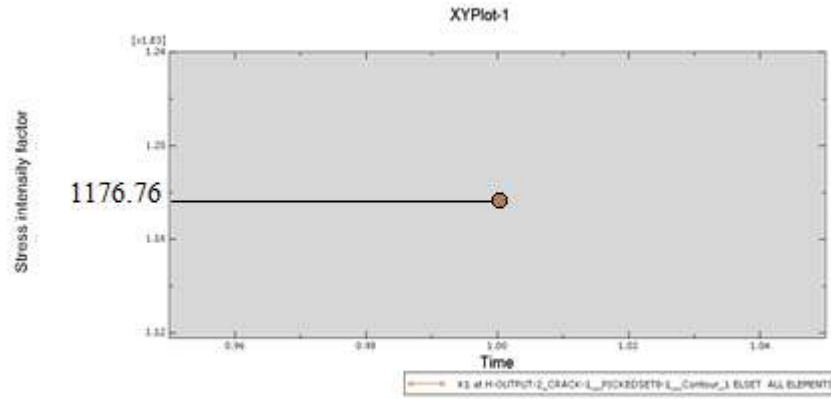


Figure.(III 55): valeur de K1

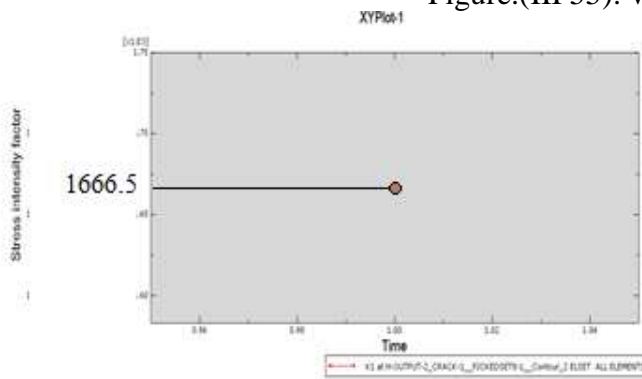


Figure.(III 56):valeur de K2

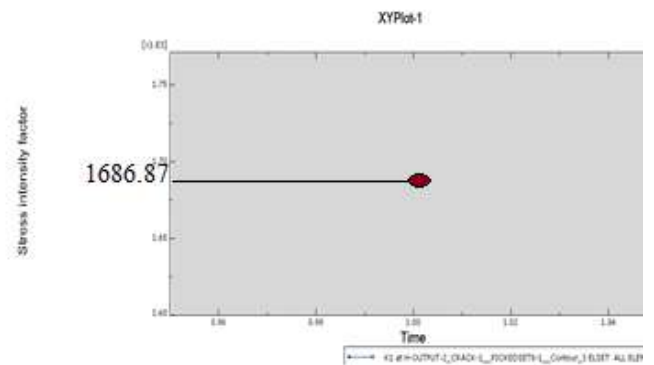


Figure.(III 57):valeur de K3

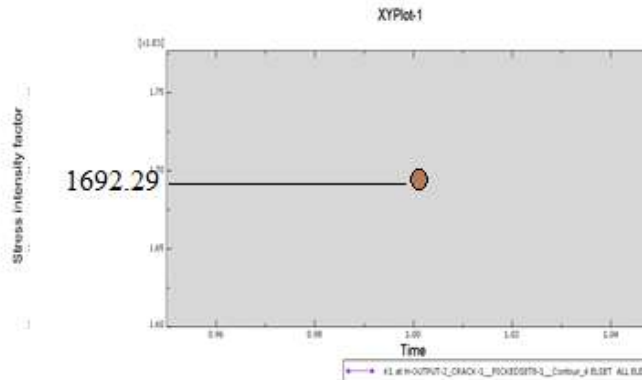


Figure.(III 58):valeur de K4

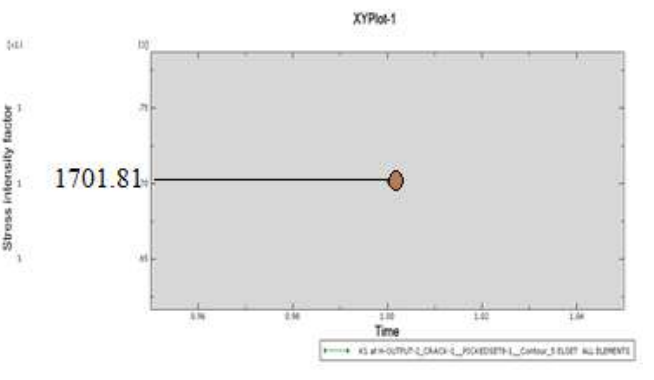


Figure.(III 59):valeur de K5

Tableau III 9 différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis.

Facteur K1	K1	K2	K3	K4	K5
Valeurs	1176.67	1666.5	1686.87	1692.29	1701.81

**Remarque:** On remarque que la valeur la plus proche de la valeur calculée est celle de K1

### III.6.2.2. cas d'une fissure inclinée d'un angle $\alpha$ par rapport à l'horizontale:

#### III.6.2.2.1.Cas d'une fissure inclinée d'un angle $\alpha = 45^\circ$ :

##### III.6.2.2.1.1. Calcul numérique de la valeur du FIC:

$$\sigma_\alpha = \sigma \cos \beta$$

# Chapitre. III: la méthode des EF

$$\sigma_x = \sigma_a \sin \beta$$

$$\sigma_x = \sigma \cos \beta \sin \beta$$

$$k_i = \sigma \sin^2 \beta \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a^*}{b}\right)$$

$$a^* = a \sin \beta = 20 \sin 45$$

$$a^* = 14.14, \quad b = 100$$

$$\left(\frac{a^*}{b}\right) = \left(\frac{20 \sin 45}{100}\right) = 0.14$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{a^*}{b}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{a^*}{b}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{a^*}{b}\right)^2 + 0.728 \left(\frac{a^*}{b}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{14.14}{100}\right)\right)} \left[ 1.122 \left(1 - \left(\frac{14.14}{100}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{14.14}{100}\right)^2 + 0.728 \left(\frac{14.14}{100}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a^*}{b}\right) = 1.04$$

$$k_1 = 150 \sin^2 45 \sqrt{\pi 20} \cdot 1.04$$

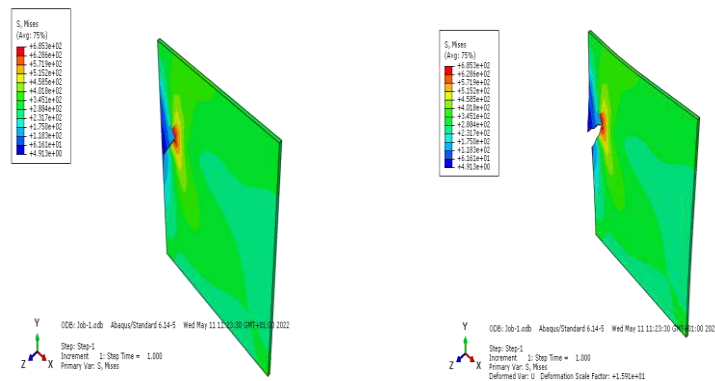
$$k_1 = 618.1223 \text{MPa} \sqrt{\text{mm}}$$

## III.6.2.2.1.2. Détermination du FIC par éléments finis:

On préserve les mêmes conditions aux limites. La figure suivante représente la plaque fissurée avant et après déformation.

## III.6.2.2.1.3. Résultats et discussions:

La figure.62. représente la plaque fissurée avant et après déformation



avant déformation

après déformation

Figure.(III 60):Résultats de la simulation

# Chapitre. III: la méthode des EF

Les figures de III.63 à III.67 représentent les différentes valeurs du facteur KI pour le cas étudié

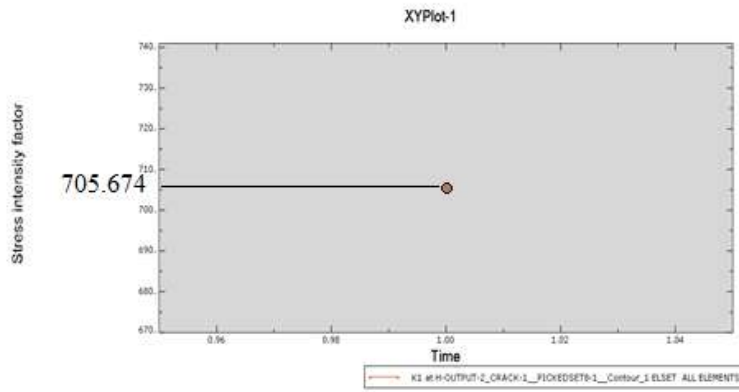


Figure.(III 61):valeur de K1

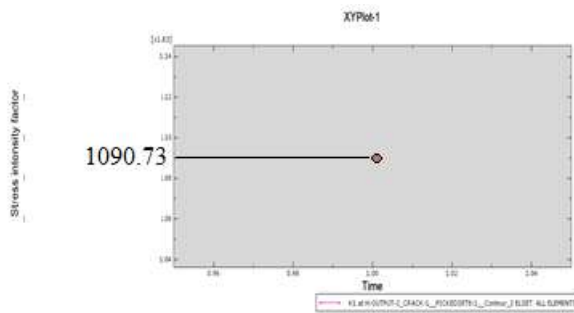


Figure.(III 62):valeur de K2

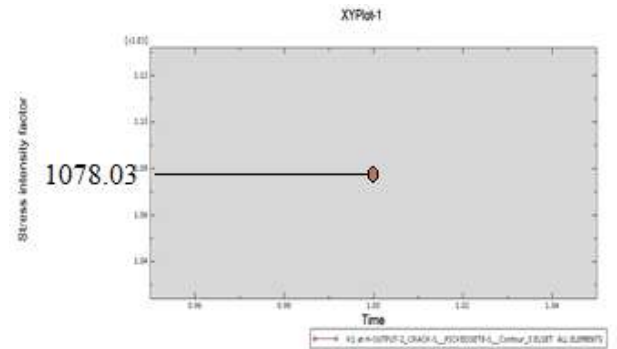


Figure.(III 63):valeur de K3

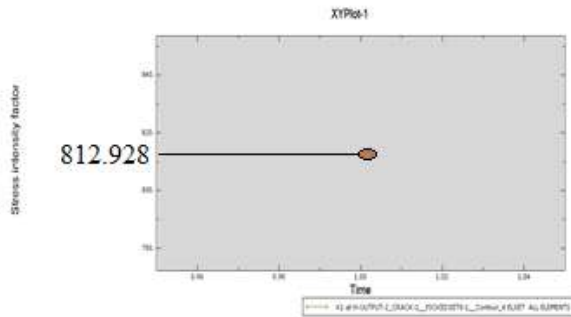


Figure.(III 64):valeur de K4

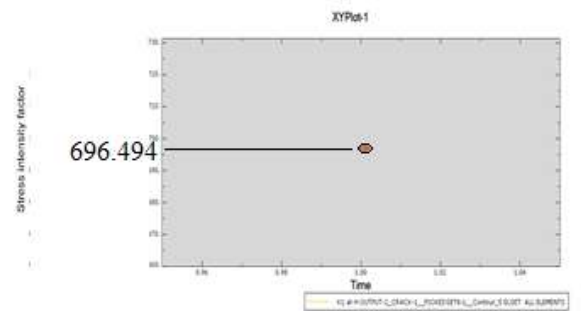


Figure.(III 65):valeur de K5

# Chapitre. III: la méthode des EF

Tableau( III.10)différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis.

Facteur K1	K1	K2	K3	K4	K5
Valeurs	705.674	1090.73	1078.03	812.928	696.494

**Remarque:** On remarque que la valeur la plus proche de la valeur calculée est celle de K5

## III.6.3.Méthode étendue XFEM :

### III.6.3.1.Cas d'une fissure horizontale:

#### III.6.3.1.1.Condition aux limites:

la base de la plaque est encadrée. Ces mêmes conditions seront appliquées dans tous les cas de simulation.

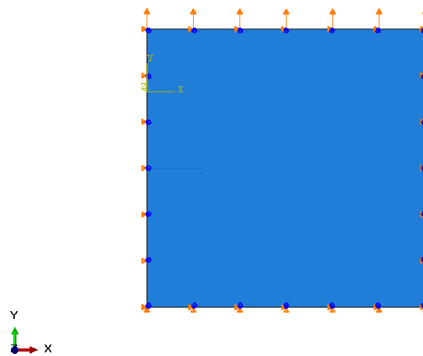


Figure.(III 66):Conditions aux limites.

#### III.6.3.1.2.Maillage:

Nous utilisons dans la simulation un maillage à 400 éléments quadratique linéaires de type ( CPS4R :A4-node bilinéaire plane stress quadrilatéral, reduc integration ,hou glass control ) On maintient aussi les mêmes conditions aux limites pour les simulations suivantes.

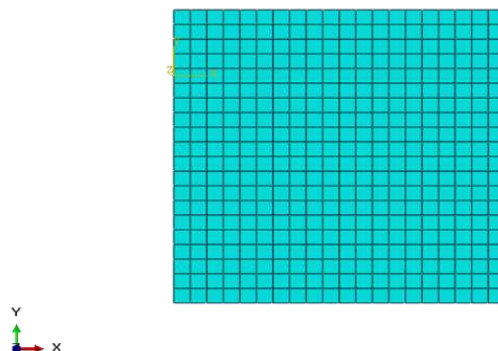


Figure.(III 67):Maillage utilisé



## Chapitre. III: la méthode des EF

### Récapitulatif:

matériau	Kcalculé		K FEM		contrainte	énergie
	horizontale	45°	horizontale	45°		
<b>AL</b>	Ki= 2790.173	Ki= 1480.206	K1= 2820.9	K1= 1413.2	140 MPa	2.85mj
<b>Acier</b>	K= 1165.7	K1 = 1176.67	K1= 618.122	K5= 696.494	240 MPa	6 mj

### **Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons étudié la propagation des fissures par la méthode des éléments finis. La méthode du tracé de contour nous a permis de comparer la valeur du facteur d'intensité de contrainte K déterminée par la méthode des éléments finis avec celle calculée numériquement, et les résultats dans presque tous les cas des fissures étudiées sont proches, et nous avons également remarqué que cette valeur augmente en parallèle à la valeur de l'inclinaison de l'angle de fissure .

# Conclusion générale

## **Conclusion générale:**

Les alliages d'aluminium sont couramment utilisés dans les applications marines en raison de leur bon équilibre entre la légèreté et de bonnes propriétés mécaniques et une meilleure résistance à la corrosion. Dans ce travail nous avons étudié l'ouverture et la propagation d'une fissure dans l'alliage d'aluminium décrit auparavant, par la méthode du contour plot et par celle XFEM, qui nous ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- Les valeurs calculées du FIC et les valeurs obtenues par la méthode du contour plot sont très proches
- Les valeurs du FIC augmentent parallèlement avec la valeur de l'angle d'inclinaison de la fissure.
- La méthode XFEM a clarifié que les valeurs des contraintes, de la force et ceux de l'énergie sont maximaux à côté de l'extrémité de la fissure (tip of the crack).

## **II. Perspectives:**

Dans les perspectives nous projetons les tâches suivantes :

- Une étude détaillée de la propagation de la fissure en fonction de toutes les caractéristiques de la plaque (matériau, dimensions et charges)
- Etude de la réparation de la fissure
- Etude du comportement de la fissure avec la corrosion pour une structure marine et la possibilité de sa réparation.

## Références bibliographiques

- [1]. Aour Benameur, Introduction aux méthodes de calcul des structures, cours ENP Oran
- [2] : R.KHELIF « Analyse de la rupture et évaluation de la durée de vie basée sur la fiabilité des tube en polyéthylène pour le transport du gaz ».Thèse de doctorat ; Université Blaise Pascal-Clermont II, Clermont Ferrand- version 2012
- [3] : Direction de Distribution-Sous-direction des Techniques de Distributions du gaz « Spécifications techniques des postes de détente gaz » Sonelgaz, XDG, 2000.
- [4] : J. Capelle, I. Dmytrakh, J. Gilgert, P. Jodin, G. Pluvinage. « A comparaison of expérimental résulte and computations for cracked tubes subjectif to interna pressures” Matérialisa in Technologie, 40(6), 233-237, 2006.
- [9] : R.Khelif, K.Chaoui et À. Châteauneuf « Evaluation de la durée de vie des tubes en polyéthylène basée sur la fiabilité ». 16-ième congrès de maîtrise de sureté de fonctionnement, Avignon. 6-10, 2008.
- [10] : D. V. Reddy “ Long-terme performance of buried High densité polyéthylène plastic papin ».Florida Atlantic Université, 2002.
- [5] : Batoz J.L. et Dhatt G., Modélisation des structures par éléments finis, vol.1 : solide élastique, Edition Hermès, Paris 1990.
- [6] : Gouri. Dhatt, Gilbert Touzot., Une présentation de la méthode des éléments finis. Presse de l'université de Laval Canada Octobre 1979.
- [7] : J.F. Imbert Analyse des structures par la Méthodes des éléments finis. Deuxième édition 1984
- [8] : Bathe K.J. Finité Elément Procédures. Practice Hall, 1996.
- [11] : S.E.Mousavi; E.Grinspun and N.Sukumar “Harmonica enrichîmes fonction: Unifie trématent of multiple intersection méthode” Int. J. Numéro. Meth. Engng. 00: 1-32.2010
- [14] : S.E.Mousavi; E.Grinspun and N.Sukumar “Harmonic enrichment function: Unified treatment of multiple intersection method” Int. J. Numer. Meth. Engng. 00: 1-32.2010
- [15] : N-Sukumar, N.Moës, B.Morand and T.Belytschko” Extended finite element method for three dimensional crack modeling” Int. Numéro. Meth. Engin ; 48: 1549-1570. 2000.



## Références bibliographiques

[13] : N.Dang Hug « Contribution à la modélisation et à la caractérisation du comportement des assemblages brasés. Couplage des méthodes DAR et X-FEM » Thèse Doctorat. Université de Toulouse ; 2009.

[11] : T. Gerngross and S. Pellegrino “Anisotropie Viscoélasticité and Wrinkling of Super- Pressure Ballons: Simulation and Expérimental Vérification” Université of Cambridge, and Californie Institute of Technologie, Pasadena,- American Institute of Aéronautiques and Astronautics.1-37.

[12] : Hamon “ Modélisation du comportement mécanique en fissuration d'alliages aéronautique” Thèse de Doctorat; Ecole doctorale Science et ingénierie en matériaux, mécanique, énergétique et aéronautique. 2010

[16]:Dr.Rezgui:chapitre5 :(étude de comportement du matériau au voisinage d'une fissure).mécanique de la rupture et fatigue master FMP 2020.2021.

[17]-.Hervé Odin. (Méthode des éléments finis) Subite on 26 Nov. 2008 (v1), last révise 26 May 2011 (v3

[1]-.Hervé Odin. (Méthode des éléments finis) Subite on 26 Nov. 2008 (v1), last révise 26 May 2011 (v3)

[2]-.Aour Benameur, Introduction aux méthodes de calcul des structures, cours ENP Oran [2] : R.KHELIF « Analyse de la rupture et évaluation de la durée de vie basée sur la fiabilité des tube en polyéthylène pour le transport du gaz ».Thèse de doctorat ; Université Blaise Pascale-Clermont II, Clermont Ferrand- version 2012

[3]-.BERDJI MOHAMED EL BACHIR,GHERIBI NOUREDDINE; (Modélisation d'une structure en matériaux isotropes par la méthode des éléments finis) Soutenu publiquement le : 25/06/2019. Année Universitaire 2018/2019

[4]-.MAZOUZI ABDELHAMID(SIMULATION NUMERIQUE PAR ELEMENTS FINIS DE L'AMORÇAGE ET LA PROPAGATION D'UNE FISSURE EN MODE I DANS UNE EPROUVETTE DCB EN COMPOSITE) Soutenu publiquement le : 25/12/2012

[5]-.Getting Started with Abaqus, Interactive Edition, Version 6.8,

[6]-.Proposé et dirigé par: Dr. Meftah Kamel Présenté par: Mr. Boule tour Abderrahmane(Evaluation d'éléments finis volumiques dans Abaqus sur des cas tests non linéaires géométriques) Promotion : Juin 2014

## Références bibliographiques

- [7]. L. PENAZZI,(CALCUL DE STRUCTURES PRESENTATION DE LA-METHODES DES ELEMENTS FINIS) Décembre 1999
- [8]. Réalisé par : ARHAB Mohamed.(Etude numérique du renforcement, en flexion, de poutres en béton). Année Universitaire :2018/2019
- [9]. MAZOUZI ABDELHAMID,(SIMULATION NUMERIQUE PAR ELEMENTS FINIS DE L'AMORÇAGE ET PROPAGATION D'UNE FISSURE EN MODE I DANS UNE EPROUVETTE DCB EN COMPOSITE). Soutenue publiquement le : 25/12/2012
- [1] Thomas El Guedj.( Simulation numérique de la propagation de fissure en fatigue par la méthode des éléments finis étendus : prise en compte de la plasticité et du contact-frottement). Submitted on 30 Nov 2011
- [2].[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FCourbe-contrainte-deformation-experimentale-de-laluminium-2024-T4-et-modele-de\\_fig16\\_45226960&psig=AOvVaw1bm3ljVvBnVT8-oc3I3J-O&ust=1653489687968000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCIiT1J-vPcCFQAAAAAdAAAAABAD](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FCourbe-contrainte-deformation-experimentale-de-laluminium-2024-T4-et-modele-de_fig16_45226960&psig=AOvVaw1bm3ljVvBnVT8-oc3I3J-O&ust=1653489687968000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCIiT1J-vPcCFQAAAAAdAAAAABAD).
- [3] M. Arzaghi, C. Gardin, K. Vor, P. Chea, C. Sarrazin-Baudoux, J. Petit, 20<sup>ème</sup> congrès Français de Mécanique, Besançon, 29 août au 2 septembre 2011.
- [4] Vincent lemiale Abdelhamid Touche.( méthodes numériques de propagation du fissures appliquées au de coupages des métaux )2007.Lavoisier,paris

# Résumé

## **Résumé**

Les alliages d'aluminium sont couramment utilisés dans les applications marines en raison de leur bon équilibre entre la légèreté et de bonnes propriétés mécaniques et une meilleure résistance à la corrosion. Dans le travail nous avons essayé de simuler la propagation d'une fissure dans une structure aluminium par deux méthodes des éléments finis celle du contour plot et celle de XFEM .comme résultat nous avons trouvé que les valeurs du FIC (facteur de concentration des contraintes) données par les méthodes FEM sont proches de celles calculées et que les contraintes, les efforts et les énergies sont maximaux à côté des extrémités de la fissure (crack type).

Mots clés : Aluminium, fissure, propagation, FEM, XFEM.

## **Abstract**

Aluminum alloys are commonly used in marine applications due to their good balance between light weight and good mechanical properties and better corrosion resistance. In the work we tried to simulate the propagation of a crack in an aluminum structure by two finite element methods, that of the contour plot and that of XFEM. As a result, we found that the values of the SCF (stress concentration factor) given by the FEM methods are close to those calculated and that the stresses, the forces and the energies are maximum next to the ends of the crack (crack type).

Keywords: Aluminium,crack, propagation, FEM, XFEM.

## **الخلاصة:**

تستخدم سبائك الألومنيوم بشكل شائع في التطبيقات البحرية نظرًا لتوازنها الجيد بين الوزن الخفيف والخصائص الميكانيكية الجيدة ومقاومة التآكل الأفضل. حاولنا في العمل محاكاة انتشار صدع في هيكل من الألومنيوم من خلال طريقتين للعناصر المحدودة ، طريقة مخطط الكنتور وطريقة XFEM. نتيجة لذلك ، وجدنا أن قيم SCF (عامل تركيز الإجهاد) المعطاة بواسطة طرق FEM قريبة من تلك المحسوبة وأن الضغوط والقوى والطاقات تكون بحد أقصى بجوار نهايات الكراك (نوع الكراك) . الكلمات المفتاحية: الألومنيوم ، الكراك ، التكاثر ، FEM ، XFEM. ،