

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة بادجي مختار – عنابة

Faculté : Science de l'ingénierie

Département : Génie mécanique

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Évolution des paramètres de rupture en fonction de la charge et la taille de fissure en flexion 3 et 4 points

Présenté par : *BOUMENKAR Manèl*

Encadrant : *YOUNES Ramdane* MCA Université Badji Mokhtar ANNABA

Jury de Soutenance :

KHELIF Rabia	Pr.	Université Badji Mokhtar ANNABA	Président
YOUNES Ramdane	MCA	Université Badji Mokhtar ANNABA	Encadrant
GOUASMI SACI	MAA	Université Badji Mokhtar ANNABA	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

La connaissance s'acquiert par
l'expérience, tout le reste n'est que de
l'information

Albert Einstein

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire :

A mes chers et respectueux parents Vraiment aucune dédicace ne saurait exprimer mon attachement, mon amour et mon affection, je vous offre ce modeste travail en témoignage de tous les sacrifices et l'immense tendresse dont vous m'avez toujours su me combler. Puisse dieu tout puissant vous garder et vous procurer santé et bonheur.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

Mes sœurs et mes frères ;

Toute ma famille ;

Mes chers amis

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier mon Seigneur Miséricordieux par essence et par excellence de m'avoir permis d'accomplir cette mémoire avec succès car Il est digne de louange et de glorification.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon directeur de mémoire, **Dr. YOUNES Ramdane**. Je tiens à souligner à quel point j'ai apprécié de travailler avec eux tant d'un point de vue professionnel qu'humain.

Je souhaite aussi remercier **Dr DIB Amar** précieux conseils dans toutes mes études en département génie mécanique.

Je présente aussi mes remerciements a les examinateurs de mémoire **Pr. KHELIF Rabia** et **M. GOUASMI SACI**, d'avoir apporté leur caution scientifique en acceptant de juger ce travail, et je les en remercie, de même que pour leur participation au Jury. Ils ont également contribué par leurs nombreuses remarques et suggestions à améliorer la qualité de ce mémoire, et je leur en suis très reconnaissant.

Je voudrais également exprimer mes grands remerciements à professeur **ZEGHIB Nasser Eddine**, que Dieu lui fasse miséricorde

Par ailleurs, je souhaite également remercier tous mes amis et collègues qui m'ont fourni un support exceptionnel.

Enfin, je remercie les techniciens du département de Génie Mécanique de l'université d'Annaba.

Résumé

La branche de la mécanique qui permet de modéliser la fissuration s'appelle la mécanique de la rupture. La prévision des phénomènes de fissuration est donc un enjeu essentiel pour le dimensionnement des pièces mécaniques. L'objectif de cette étude, est de visualiser le comportement d'une poutre simple isotrope (en acier), soumise à une flexion pure 3 et 4 points, au voisinage de la fissure (analyse des champs de déplacements, déformations, de contraintes et la ténacité), en utilisant le code de calcul numérique Abaqus. Deux cas différents ont été considérés : la position et la valeur de chargement et le dimensionnement de la fissure. En première partie, l'étude porte sur le comportement de la poutre en termes de facteur d'intensité de contrainte, de déplacement maximal et de contrainte, en fonction de la position la valeur de la charge appliquée, dans les deux cas de flexion 3 et 4 points. Alors que, dans la seconde partie le FIC, la distribution des contraintes et des déformations de la poutre au niveau de la fissure, ont été déterminés en fonction de la taille de cette dernière. Les résultats montrent que la poutre présente un bon comportement, en flexion quatre points qu'en flexion trois points, et ce en termes, de ténacité, de déplacement maximale et de contrainte. Par conséquent, les résultats de simulation montrent que, la poutre résiste plus en flexion 4 points qu'en flexion 3 points.

Mots clés : poutre, flexion 3 et 4 points, rupture, simulation numérique, facteur d'intensité de contrainte, déplacement, charge, contrainte, Abaqus.

Abstract

The branch of mechanics that allows to model cracking is called fracture mechanics. The prediction of cracking phenomena is therefore an essential issue for the design of mechanical parts. The objective of this study is to visualize the behavior of a simple isotropic beam (steel), subjected to a pure bending 3 and 4 points, in the vicinity of the crack (analysis of the fields of displacements, strains, stresses and the tenacity), using the numerical calculation code Abaqus. Two different cases have been considered: the position and the value of loading and the dimensioning of the crack. In the first part, the study focuses on the behavior of the beam in terms of stress intensity factor, maximum displacement and stress, as a function of the position and value of the applied load, in the two cases of 3 and 4 point bending. While, in the second part the FIC, the distribution of stresses and strains of the beam at the crack, were determined as a function of the size of the latter. The results show that the beam presents a good behavior, in four-point bending as in three-point bending, in terms of toughness, maximum displacement and stress. Therefore, the simulation results show that, the beam resists more in 4-point bending than in 3-point bending.

Keywords: beam, 3 and 4 point bending, failure, numerical simulation, stress intensity factor, displacement, load, stress, Abaqus.

ملخص

فرع الميكانيكا الذي يجعل من الممكن نموذج التكسير يسمى ميكانيكا الكسر. ولذلك فإن التنبؤ بظواهر التكسير مسألة أساسية لاستيعاب الأجزاء الميكانيكية. الهدف من هذه الدراسة، هو تصور سلوك عارضة بسيطة متساوية الخواص (الصلب)، تتعرض لثني 3 و 4 نقاط، في محيط الكراك (تحليل مجالات التشريد، والتشوهات، والضغط والصلابة)، وذلك باستخدام رمز الحساب العددي أباكوس. تم النظر في حالتين مختلفتين: موضع وقيمة التحميل وأبعاد الكراك. في الجزء الأول، تركز الدراسة على سلوك الشعاع من حيث عامل شدة الإجهاد، والحد الأقصى للإزاحة والإجهاد، اعتماداً على موضع قيمة الحمل التطبيقي، في كلتا الحالتين من الانحناء 3 و 4 نقاط. في حين أنه في الجزء الثاني من FIC ، تم تحديد توزيع الضغوط والتشوهات في الحزمة على مستوى الكراك ، وفقاً لحجم الأخير. تظهر النتائج أن الشعاع لديه سلوك جيد ، في الانحناء أربع نقاط مما كان عليه في الانحناء ثلاث نقاط ، وهذا من حيث الصلابة ، والحد الأقصى من التشريد والإجهاد. لذلك ، تظهر نتائج المحاكاة أن الحزمة تقاوم الانحناء من 4 نقاط أكثر من الانحناء من 3 نقاط.

الكلمات المفتاحية :

شعاع، الانحناء 3 و 4 نقاط ، كسر، المحاكاة العددية، عامل شدة الإجهاد، التشريد، الحمل، الإجهاد

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : (a) Rupture fragile d'un liberty-ship (seconde guerre mondiale) au cours d'un hiver rigoureux, (b) Rupture d'un autopont lors d'un tremblement de terre.....	5
Figure I.2 : Comparaison de l'approche classique (a) et de l'approche utilisant la MLR (b).....	6
Figure I.3 : Les trois modes de rupture.....	7
Figure I.4 : Fissure traversante de longueur $2a$ dans une plaque infinie.....	8
Figure I.5 : Comparaison entre l'approche classique et celle de la MLR.....	9
Figure I.6 : Contraintes près de l'extrémité d'une fissure.....	11
Figure I.7 : Concept de tolérance au dommage.....	12
Figure I.8 : Comportement en fonction de la ténacité.....	14
Figure I.9 : Différents cas d'éprouvettes avec fissure de bord.....	15
Figure. I .10 : Corrosion sous fatigue.....	17

Chapitre II

Figure II.1 : Quelques éléments parmi les plus utilisés	23
Figure II.2 : Étapes à suivre pour la programmation.....	24
Figure II.3 : Organisation d'abaques.....	25
Figure II.4 : Réalisation de la mise en données d'un problème.....	26
Figure II.5 : Module part.....	27
Figure II.6 : création de la géométrie.....	27
Figure II.7 : base extrusion.....	28
Figure II.8 : poutre.....	28
Figure II.9 : poutre fissurée.....	29
Figure II.10 : propriété Matériaux et section.....	30
Figure II.11 : poutre en Matériaux S-235.....	30
Figure II.12 : Create instance et assemblage.....	31
Figure II.13 : instance et assemblage.....	31
Figure II.14 : création de step.....	31
Figure II.15 : création interaction.....	31
Figure II.16 : création d'encastrement.....	33
Figure II.17 : poutre encastrement.....	33
Figure II.18 : création de charge.....	34
Figure II.19 : poutre chargée.....	34
Figure II.20 : module Mesh.....	35
Figure II.21 : Mesh Controls de fissure.....	35
Figure II.22 : Global Seeds.....	36
Figure II.23 : noed.....	36
Figure II.24 : Mesh Controls de la poutre.....	37
Figure II.25 : création le mayage.....	37
Figure II.26: module Job.....	38
Figure II.27 : visualization.....	38
Figure II.28 : Quelque élément dans Abaqus.....	39

Chapitre III

Figure III.1 : Modélisation d'une poutre de flexion trois points.....	43
Figure III.2 : la poutre avec la condition ou limite	43
Figure III.3 : Facteur d'intensité en mode I (KI).....	45
Figure III.4 : Facteur d'intensité en mode II (KII).....	45
Figure III.5. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d'application de charge D_3 par abaqes.....	46
Figure III.5. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d'application. de charge D_3 par Excel.....	47
Figure III.6. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d'application de charge D_4 par abaqes.....	47
Figure III.6. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d'application de charge D_4 par Excel.....	47
Figure III.7. A : Déformation de la poutre Influence de la charge applique.....	48
Figure III.7. B : Ouverture de la fissure.....	48
Figure III.8 : Contrainte suivant l'axe OY.....	49
Figure III.9 : facteur d'intensité en mode I (KI).....	50
Figure III.10 : facteur d'intensité en mode II (KII)	51
Figure III.11 : le déplacement maximale.....	52
Figure III.12. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge applique P_1 Par abaqes.....	52
Figure III.12. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge appliqué P_1 Par EXCEL	52
Figure III.13. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge appliqué P_8 Par abaqes.....	53
Figure III.13. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge applique P_8 Par EXCEL.....	53
Figure III.14. A : Déformation de la poutre Influence de la charge applique	54
Figure III.14. B : l'ouverture de la fissure	54
Figure III.15 : Contrainte suivant l'axe OY	55
Figure III.16 : facteur d'intensité en mode I (KI).....	56
Figure III.17 : facteur d'intensité en mode II (KII).....	57
Figure III.18 : le déplacement maximal	58
Figure III.19. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_1 Par abaqes.....	58
Figure III.19. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_1 Par EXCEL.....	58
Figure III.20. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_8 Par abaqes.....	59
Figure III.20. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_8 Par EXCEL.....	59
Figure III.21. A : Déformation de la poutre Influence de la taille de la fissure.....	59
Figure III.21. B : l'ouverture de la taille de la fissure	60
Figure III.22 : Contrainte suivant l'axe OY	60

Chapitre IV

Figure IV.1 : Poutre avec les conditions aux limites	63
Figure IV.2 : Modélisation d'une poutre de flexion quatre points.....	63
Figure IV.3 : Facteur d'intensité en mode I (KI).....	65
Figure IV.4 : facteur d'intensité en mode II (KII).....	65
Figure IV.5 : Déplacement maximale.....	66
Figure IV.6. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d'application de charge D_2 par abaqes.....	67
Figure IV.6. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d'application de charge D_2 par Excel.....	67
Figure IV.7.A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d'application de charge D_3 par abaqes.....	68
Figure IV.7.B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d'application de charge D_3 par Excel.....	68
Figure IV.8. A : Déformation de la poutre Influence de la position d'application de charge	69
Figure IV.8. B : L'ouverture de la fissure.....	69
Figure IV.9 : La contrainte suivant l'axe OY.....	70
Figure IV.10 : Facteur d'intensité en mode I (KI).....	71
Figure IV.11 : Facteur d'intensité en mode II (KII).....	72
Figure IV.12 : Déplacement maximale.....	73
Figure IV.13. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge appliqué P_2 Par abaqes	73
Figure IV.13. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge appliqué P_2 Par EXCEL.....	73
Figure IV.14. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge appliqué P_8 Par abaqes.....	74
Figure IV.14. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge appliqué P_8 Par EXCEL.....	74
Figure IV.15. A : Déformation de la poutre Influence de la position d'application de charge	75
Figure IV.15. B : L'ouverture de la fissure.....	75
Figure IV.16 : la contrainte suivant l'axe OY.....	76
Figure IV.17 : facteur d'intensité en mode I (KI).....	77
Figure IV.18 : facteur d'intensité en mode II (KII).....	78
Figure IV.19 : le déplacement maximal	79
Figure IV. 20. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_1 Par abaqes.....	79
Figure IV.20. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_1 Par EXCEL.....	79
Figure IV.21. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_8 Par abaqes.....	80
Figure IV.21. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_8 Par EXCEL.....	80
Figure IV.22. A : Déformation de la poutre Influence de la taille de la fissure	81
Figure IV.22. B : L'ouverture de la fissure.....	81
Figure IV.23 : la contrainte de la poutre Influence de la taille de la fissure a_1	82

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 :Les unités dans ABAQUS.....	3
--	---

Chapitre III

Tableaux III.1 : Position de la force.....	44
Tableaux III.2 : Facteur d'intensité de contrainte en fonction de la position de la force	44
Tableaux III.3 : Déplacement maximale en fonction de la position de la force.....	46
Tableaux III.4 : Diffèrent valeur de la force.....	49
Tableaux III.5 : Facteur d'intensité de contrainte en fonction de la charge.....	50
Tableaux III.6 : Déplacement maximale en fonction de la position de la charge applique.....	51
Tableaux III.7 : Différent valeur de la taille de la fissure	55
Tableaux III.8 : Facteur d'intensité de contrainte en fonction de la position de la force	56
TABLEAU III.9 : Déplacement maximale en fonction de la position de la force.....	57

Chapitre IV

Tableaux IV.1 : Les déférentes distances.....	64
Tableaux IV.2 : Facteur d'intensité de contrainte en fonction des positions de la force..	64
Tableaux IV.3 : Déplacement maximal en fonction des positions de la force.....	66
Tableaux IV.5 : les déférentes charges.....	70
Tableaux IV.6 facteurs d'intensité de contrainte en fonction de la charge.....	71
Tableaux IV.7 : Déplacements maximums en fonction des tailles de fissure.....	72
Tableaux IV.9 : Déférentes tailles de fissure.....	76
Tableaux IV.10 : Facteur d'intensité de contrainte en fonction des tailles de fissure.....	77
Tableaux IV.11 : Déplacements maximums en fonction des tailles de fissure.....	78

Table des matières

Dédicace.....	iii
Remerciements.....	iv
Résumé.....	v
Abstract.....	vii
ملخص.....	viii
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xvi
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur la mécanique de la rupture

I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique.....	4
I.3. Mécanismes et modèles de fissuration.....	5
I.4. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception.....	6
I.5. Modes de rupture.....	6
I.6. Critères de rupture.....	7
I.6.1. Critère énergétique.....	7
I.6.2. Critère mécanique (Irwin).....	9
I.7. Concept du facteur d'intensité des contraintes FIC.....	10
I.8. Propagation des fissures et concept de tolérance au dommage.....	12
I.9. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture.....	13
I.10. Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture.....	14
I.11. Relation entre le facteur d'intensité de contrainte et l'énergie de Griffith.....	16
I.12. Rupture et environnement.....	17
I.12.1. Fatigue corrosion.....	17
I.12.2. Corrosion sous contrainte.....	18
I.12.2.2 Effet du temps.....	18
I.12.2.3 Facteurs métallurgiques.....	18
I.12.3. Fatigue thermique.....	18
I.12.4. Corrosion de contact.....	19
I.13. Conclusion.....	19
Références Bibliographiques.....	<u>20</u>

Chapitre II :	
Simulation et Méthodes Numériques	
II.1. Introduction.....	21
II.2. Les Logiciels sur le marché.....	22
II.3. Définition du logiciel ABAQUS.....	22
II.4. Caractéristiques de logiciel ABAQUS.....	22
II.4.1 Type d'analyse.....	23
II.4.2 Problèmes.....	23
II.4.3 Les éléments utilisés par ABAQUS.....	23
II.5. Réalisation d'une simulation numérique.....	24
II.6. Les fichiers créés par Abaqus lors de la simulation.....	24
II.7. Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS.....	25
II.8. Organisation de l'interface Abaqus CAE.....	25
II.8.1. Les modules.....	26
II.8.2. Module part.....	26
II.8.3. Propriété du module.....	29
II.8.4. Module Assembly.....	31
II.8.5. Module Step.....	32
II.8.6. Module Interaction.....	32
II.8.7. Module Load.....	33
II.8.8. Module Mesh.....	35
II.8.9. Module Jo.....	38
II.8.10. Module visualization.....	38
II.9. Esquisse du module.....	39
II.10. L'arbre du modèle.....	39
II.11. Les éléments dans ABAQUS.....	39
II.12. Conclusion.....	40
Références Bibliographiques.....	41

Chapitre III :	
Simulation et Méthodes Numériques : Flexion 3 Points	
II.1. Introduction.....	42
II.2. Dimensionnement et caractéristiques de la poutre.....	42
II.3. Conditions aux limites.....	43
III.4. Résultats de la simulation.....	44
a. Cas 01 : Influence de la position d'application de charge.....	44
a.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte.....	44
a.2. Evolution de la flèche (déplacement maximal).....	46
a.3. Evolution de la contrainte suivant l'axe OY.....	48
b. Cas 02 : Influence de la charge appliquée.....	49
b.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte.....	49
b.2. Evolution de la flèche (déplacement maximal).....	51
b.3. Evolution de la contrainte suivant l'axe OY.....	54
c. Cas 03 : Influence de la taille de la fissure.....	55
c.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte.....	56
c.2. Evolution de la flèche (déplacement maximal).....	57
c.3. Evolution de la contrainte suivant l'axe OY.....	60
III.4. Conclusion.....	61

**Chapitre IV :
Simulation et Méthodes Numériques : Flexion 4 Points**

IV.1. Introduction.....	62
IV.2. Dimensionnement et caractéristiques de la poutre.....	62
IV.3. Conditions aux limites.....	62
IV.4. Résultats de la simulation.....	64
a. Cas 01: Influence de la position d'application de charge par rapport à la fissure.....	64
a.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte.....	64
a.2. Evolution de la flèche (déplacement maximal).....	66
a.3. Evolution de la contrainte suivant l'axe OY.....	69
b. Cas 02 : Influence de la charge applique.....	70
b.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte.....	71
b.2. Evolution de la flèche (déplacement maximal)	72
b.3. Evolution de la contrainte suivant l'axe OY.....	75
c. Cas 03 : Influence de la taille de la fissure.....	76
c.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte.....	77
c.2. Evolution de la flèche (déplacement maximal)	78
c.3. Evolution de la contrainte suivant l'axe OY.....	81
IV 4. Conclusion.....	82

Introduction générale

La rupture de matériaux est importante dans la science des matériaux et en ingénierie. Lorsque l'homme devra faire face aussi longtemps qu'il construira des édifices ou fabriquera des structures. Le développement technologique et la connaissance de la mécanique de la rupture permettent aujourd'hui de trouver des solutions de mieux prévenir le risque de rupture. Avec la capacité portante d'une structure et sa durée de vie y est fortement ce liées.

La mécanique de la rupture et l'étude du phénomène de fatigue sont des sciences assez récentes qui ont vu la majeure partie de leurs développements au *XX -ème* siècle. La problématique de ces deux domaines de la mécanique est identique : il s'agit pour l'ingénieur de prévoir le comportement des structures jusqu'à leur ruine. L'objectif de la mécanique de la rupture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide de paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'analyse par simulation (code de calcul numérique *ABAQUS 19*), des champs de déplacements, de déformations, de contraintes et de la ténacité, d'une poutre simple, isotrope, près-fissurée (*ACIER S235*) dimensionnée comme suite :

- La poutre est en section rectangulaire de :
- Longueur : 0.35 m
- Largeur : 0.03 m
- Hauteur : 0.015 mm

Pour réaliser cet objectif, nous avons mis le plan de travail suivant :

Le premier chapitre a pour objectif de présenter les notions essentielles de la rupture et les critères de propagation de fissures adaptés aux matériaux.

Dans le chapitre deuxième on a présenté le logiciel de simulations Abaqes 19 et les étapes détaillés à suivre pour la réalisation d'une simulation et calcul numérique d'une poutre près-fissurée.

Le troisième chapitre concerne la présentation de simulations et calcul numérique d'une poutre près-fissurée, chargée en flexion 3 Points, en termes des champs de déplacements, déformations contraintes, et ténacité (figures ; résultats sur tableaux ; courbes).

En fin quatrième chapitre présente le comportement d'une poutre près fissurée, chargé en flexion quatre points. Les évolutions des facteurs d'intensité de contrainte (en mode I et II), de déplacement maximal (flèche) et de la contrainte suivant l'axe OY, ont été traités en fonction de la position d'application de la charge et en fonction de la taille de fissure.

Chapitre I

Généralités sur la mécanique de la rupture

I.1. Introduction

Depuis le début de l'ère industrielle et jusqu'à la fin de la première moitié du XXe siècle, les ingénieurs ont été confrontés à des phénomènes de rupture inexplicables directement la sécurité des personnes. Explosions de chaudières, appareils à gaz, ruptures brutales de part en part de liberty-ship durant la Seconde Guerre mondiale, explosions en vol des premiers avions commerciaux Comet équipé de turboréacteurs dans les années 1950. Sur la présence de fissures, a été élaboré dans la première moitié du XXe siècle et les premières applications dans l'industrie à partir des années 1960. Depuis, la mécanique de la rupture essor et l'évolution de l'informatique, ouvrant la voie à des méthodes numériques permettant de modéliser au plus près les fissures de formes complexes avec des temps de simulations industriels avec les cycles de conception industriels, n'a fait que renforcer son application.

Ce chapitre est dédié à une étude bibliographique sur la mécanique de la rupture, nous rappellerons les principes importants à connaître dès lors que l'on traite de mécanique de la rupture, et nous présenterons les concepts de la mécanique linéaire de la rupture qui permet à l'ingénieur de traiter la propagation des défauts via le concept de facteur d'intensité des contraintes et les lois décrivant les cinétiques de fissuration.

I.2. Historique

Les civilisations anciennes ont construit des bâtiments qui existent encore à ce jour comme les pyramides dans la civilisation pharaonique et structures de l'empire et les ponts romains ce qui prouve bien qu'ils avaient le souci d'éviter la ruine des structures malgré que les matériaux utilisés avant les révolutions industrielles étaient cependant limités pour l'essentiel étaient cependant limités pour l'essentiel au bois de construction à la pierre ou brique et au mortier. La brique et le mortier sont relativement fragiles lorsque on les utilise en traction les structures anciennes qui ont résisté aux temps

Le premier essai de rupture faite par Léonard de Vinci avant la révolution industrielle, le résultat de son essai suggérait que les défauts contenus dans le matériau contrôlaient sa résistance de fissure si le fil de fer long [1]

La rupture est un problème auquel l'homme devra faire face aussi longtemps qu'il construira des édifices ou fabriquera des structures. Ce problème est de plus en plus crucial avec le développement, lié aux progrès technologiques, de structures complexes. Les avancées dans la connaissance de la mécanique de la rupture permettent aujourd'hui et plus précisément depuis le milieu du 20^e siècle, de mieux prévenir le risque de rupture. [2]

La Mécanique de la Rupture a pour objet d'étudier et de prédire l'amorçage et la propagation des fissures dans les solides. C'est une discipline récente. Les débuts de l'étude de la rupture des matériaux fragiles remontent aux années 1920, avec les travaux précurseurs de Griffith ; mais ces travaux sont tombés dans un oubli relatif avant d'être exhumés dans les années 1950-1960, lorsque la discipline a réellement pris son essor (travaux d'Irwin et de Rice). Quant à l'étude de la rupture des matériaux ductiles (qui se déforment beaucoup avant de se rompre), elle n'a débuté qu'à la fin des années 1960 et au cours des années 1970, avec travaux fondamentaux de Rice et Tracey et Gurson. [3]

L'objectif de la Mécanique de la rupture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide de paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau. [4]

L'utilisation de l'acier dont les propriétés mécaniques permettaient de concevoir des structures pouvant résister à des charges de traction. La comparaison des anciens ponts romains avec les ponts modernes de structure métallique montre bien que les premiers étaient chargés en compression alors que les seconds le sont plutôt en traction. [1]



Figure I.1 : (a) Rupture fragile d'un liberty-ship (seconde guerre mondiale) au cours d'un hiver rigoureux, (b) Rupture d'un autopont lors d'un tremblement de terre.

I.3. Mécanismes et modèles de fissuration

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

Si les mécanismes propres à la fatigue commencent à peine d'être connus, l'influence de certains paramètres sur la vitesse de fissuration est généralement mieux définie. Nous pouvons les classer en deux catégories :

- Les paramètres intrinsèques qui dépendent du matériau lui-même.
 - Module de Young
 - Limite d'élasticité
 - Propriétés cycliques et état métallurgique du matériau.

Les paramètres extrinsèques qui dépendent des conditions de l'essai, quel que soit le matériau étudié,

- Température, environnement,
- Dimension de l'éprouvette,
- Rapport de charge R. [1]

I.4. Utilisation de la mécanique de la rupture en conception

La comparaison de l'approche classique pour le dimensionnement des structures basée sur la limite d'élasticité du matériau σ_E à l'approche utilisant le concept de ténacité K_C issu de la mécanique linéaire de la rupture (MLR) qui est représenté par la figure I.2.

Dans le premier cas, on dimensionne les structures pour que les contraintes appliquées σ restent inférieures à la limite d'élasticité ($\sigma < \sigma_E$). On utilise en général un coefficient de sécurité pour prévenir tout risque de rupture fragile ($\sigma < \alpha \sigma_E$ avec $\alpha < 1$). Cette approche est à deux variables σ et σ_E ; elle fait abstraction de l'existence d'éventuels défauts sous forme de microfissures par exemple.

L'approche basée sur la mécanique linéaire de la rupture est à trois variables : la contrainte appliquée, la ténacité K_C qui remplace la limite d'élasticité et une variable additionnelle qui est la taille du défaut. Il y a cependant deux approches alternatives de la mécanique de la rupture : l'une utilisant le concept d'intensité des contraintes critique (ténacité du matériau) et l'autre un critère d'énergie. Ces deux approches sont équivalentes dans certaines conditions.

On va les présenter brièvement avant de préciser les hypothèses qui les sous-tendent et de rentrer dans les détails des calculs qu'elles mettent en œuvre. [1]

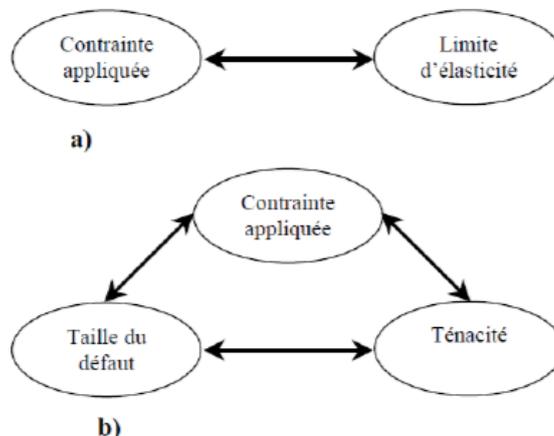


Figure I.2 : Comparaison de l'approche classique (a) et de l'approche utilisant la MLR (b)

I.5. Modes de rupture

Une fissure est définie comme la surface Σ séparant localement un solide en deux parties. Le champ des déplacements est alors discontinu à travers cette surface et les trois composantes vectorielles de cette discontinuité forment les trois modes de rupture (Figure. I.2) :

Le mode I pour une ouverture

Le mode II pour un glissement plan (dans un cas tridimensionnel,

Le mode III pour un glissement anti-plan).

Le cas réel est une superposition de ces modes, on parle alors de mode mixte [5]

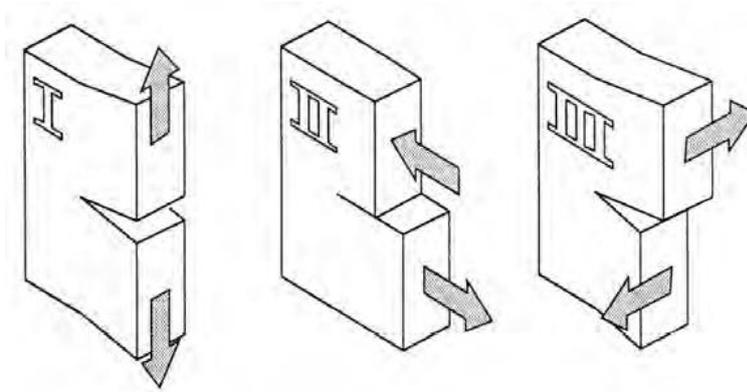


Figure I.3 : Les trois modes de rupture.

I.6. Critères de rupture

Le critère de rupture est une expression mathématique reliant les contraintes effectives régnant dans le matériau aux contraintes ultimes pouvant être supportées par ce dernier. Lorsque ce critère est « violé » ou dépassé, la propriété d'intégrité du matériau n'existe plus et il y a ruine locale du milieu [8]

Il Ya 2 critère :

- Critère énergétique
- Critère mécanique (Irwin)

I.6.1. Critère énergétique

Griffith fut le premier à proposer un critère d'énergie pour la rupture des matériaux fragiles, critère ensuite étendu aux matériaux ductiles par d'autres auteurs dont Irwin et Orowan.

L'énergie de Griffith notée G (qu'on appelle aussi taux de restitution d'énergie), est définie en liaison avec la variation d'énergie par unité de surface fissurée, associée à la propagation d'une fissure dans un matériau linéaire élastique. La rupture se produit lorsque G atteint une valeur critique G_C . Cette valeur est en fait une mesure de la ténacité du matériau.

Pour une fissure de longueur $2a$ (figure I.4) dans une plaque de dimensions infinies (c'est à dire lorsque la longueur de fissure est très petite par rapport aux dimensions de la plaque dans le plan de chargement) constituée d'un matériau de module d'Young E et soumise à une contrainte nominale de traction, l'énergie de Griffith G par unité de surface fissurée est donnée par :

$$G = \frac{\pi(\sigma^\infty)^2 a}{E} \quad \text{I.1}$$



Figure I.4 : Fissure traversante de longueur $2a$ dans une plaque infinie

La rupture se produit lorsque la contrainte appliquée s , devenue trop grande, atteint une certaine valeur R . Par conséquent, si G_C désigne la valeur critique de l'énergie obtenue pour la contrainte appliquée R , la relation précédente donne la formule :

$$G_C = \frac{\pi \sigma_R^2 a}{E} \quad \text{I.2}$$

Notons que pour une valeur fixée de G_C , la contrainte à rupture σ_R varie avec $1/\sqrt{a}$; de même, si les valeurs G_C et σ^∞ sont fixées, la longueur de défaut critique a_c à laquelle la rupture se produit, est donnée par :

$$a_c = \frac{E G_C}{\pi (\sigma^\infty)^2} \quad \text{I.3}$$

La figure I.5 illustre bien la différence entre l'approche classique qui fait abstraction de l'existence d'une fissure (le critère de rupture est $\sigma^\infty = \sigma_E$) et l'approche par la MLR qui prend en compte la présence de la fissure (σ^∞ proportionnelle à $1/\sqrt{a}$). La zone de non rupture située sous les deux courbes représentant les approches précédentes qui montre chacune des deux zones limitées par la longueur de défaut a_0 , correspond à une approche particulière.

L'énergie de Griffith G est la force motrice dans un matériau dont la résistance à la rupture est donnée par G_C . Ce qui peut être mis en analogie avec l'approche basée sur la Limite d'élasticité où la contrainte joue le rôle de force motrice dans un matériau dont la Résistance à la déformation plastique est donnée par la limite d'élasticité σ_E .

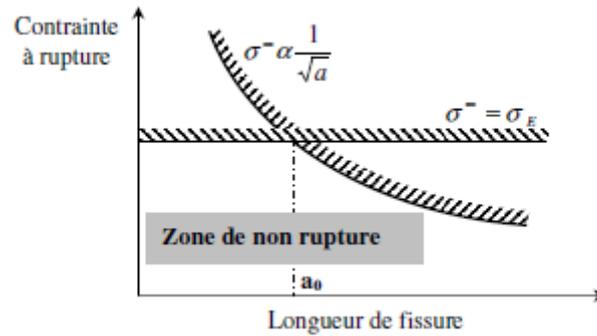


Figure I.5 : Comparaison entre l'approche classique et celle de la MLR.

Cette analogie illustre aussi le concept de similitude. La limite d'élasticité d'un matériau, mesurée à partir d'essais sur des éprouvettes de laboratoire, est indépendante de la taille des éprouvettes et peut donc être utilisée pour des structures de tailles différentes dès lors que le matériau est raisonnablement homogène. Ce principe de similitude est l'une des hypothèses fondamentales de la mécanique de la rupture : la ténacité d'un matériau (mesurée par G_c) est indépendante de la taille et de la géométrie de la structure fissurée. Cette hypothèse de similitude reste valable tant que le Comportement du matériau demeure linéaire élastique.[2]

I.6.2. Critère mécanique (Irwin)

L'œuvre de Griffith a été élargie ignorée par la communauté des débuts des années 1950. Les raisons semblent être que, pour les matériaux employés dans la réalisation des structures, le niveau réel est d'énergie nécessaire de plusieurs ordres de grandeur supérieur à l'énergie de surface correspondante et que, dans les matériaux de construction il y a toujours des déformations plastiques en fond de fissure, ce qui rend l'hypothèse du milieu élastique linéaire avec contre pointes infinies tout à fait irréaliste F. Erdogan (2000) 2.

La théorie de Griffith concorde parfaitement avec les données expérimentales sur des matériaux très fragiles tels que le verre. Pour des matériaux ductiles tels que l'acier, bien que la relation $\sigma_y \sqrt{a} = C$

Soit toujours valable, l'énergie de surface (γ) prédite par la théorie de Griffith est souvent irréaliste. Un groupe de travail dirigé par G. R. Irwin à l'US Naval Research Laboratory (LNR), constitué durant la Seconde Guerre mondiale, a réalisé que la plasticité doit jouer un rôle important dans la rupture des matériaux ductiles.

Dans les matériaux ductiles (et même dans des matériaux qui semblent être fragiles⁴), une zone plastique se développe en front de fissure. L'augmentation de la dimension de la zone plastique est

fonction de l'augmentation de la charge jusqu'à ce que la fissure se propage libérant les contraintes en arrière du fond de fissure. Le cycle de chargement / libération de chargement plastique aux abords du front de fissure conduit à la dissipation d'énergie comme le ferait un traitement thermique de relaxation de contrainte. Par conséquent, un terme dissipatif doit être ajouté à la relation d'équilibre énergétique tel qu'élaboré par Griffith pour les matériaux cassants. En termes physiques, de l'énergie supplémentaire est nécessaire pour que la propagation des fissures se produise dans les matériaux ductiles si on les compare aux matériaux fragiles.

La stratégie d'Irwin était de partitionner l'énergie :

L'énergie stockée en déformation élastique (effet ressort) qui se libère lors de la propagation d'une fissure. Telle est la force motrice thermodynamique de rupture.

L'énergie dissipée qui comprend la dissipation plastique et l'énergie de création de surface (et toutes les autres forces dissipatives qui peuvent être au travail). L'énergie thermodynamique dissipée fournit une résistance à la rupture. L'énergie totale dissipée est donnée par :

$$G = 2\gamma + G_p$$

Où γ est l'énergie de surface et G_p est la dissipation plastique (ainsi que la dissipation provenant d'autres sources) par unité de surface de la fissure.

La version modifiée du critère énergétique de Griffith peut alors être écrite comme :

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{EG}{\pi a}}$$

Pour un matériau fragile comme le verre par exemple, le terme d'énergie de surface domine et $G \approx 2\gamma = 2 \text{ J/m}^2$

Pour un matériau ductile comme l'acier par exemple, le terme de dissipation plastique domine et $G \approx G_p = 1000 \text{ J/m}^2$

Pour les plastiques polymères proches de la température de transition de phase de vitrification, nous avons une valeur intermédiaire de

$$G \approx 2 - 1000 \text{ J/m}^2.[9]$$

I.7. Concept du facteur d'intensité des contraintes FIC

La figure I.6 schématise l'ensemble des contraintes appliquées sur un élément centré en un point M de coordonnées polaires (r, θ) par rapport à l'extrémité d'une fissure sollicitée en mode d'ouverture ou mode I.

Ces contraintes, pour le mode d'ouverture ou mode I indiqué sur la figure I.2, sont décrites par les relations suivantes

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} & \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\
 \sigma_{yy} & \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\
 \tau_{xy} & \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}
 \end{aligned}
 \tag{I.4}$$

Ces relations peuvent s'écrire sous la forme condensée suivante :

$$\sigma_{ij} \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)
 \tag{I.5}$$

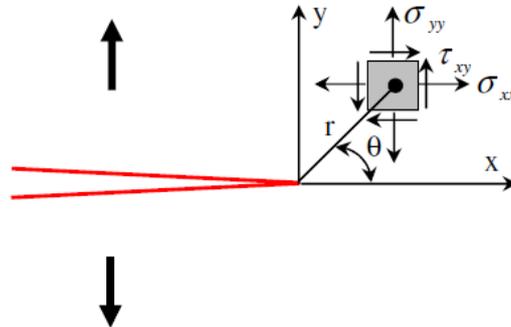


Figure I.6 : Contraintes près de l'extrémité d'une fissure

Les formules de calcul du FIC K_I , que l'on peut trouver dans les manuels spécialisés, sont établies pour différentes configurations de chargement, Dans le cas décrit par la figure I.2, le facteur K_I est donné par :

$$K_I = \sigma^\infty \sqrt{\pi a}
 \tag{I.6}$$

En comparant les formules **I.1** et **I.6**, il apparaît que :

$$G_I = \frac{K_I^2}{E} \quad \text{et} \quad G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E}
 \tag{I.7}$$

Dans l'approche basée sur le concept de FIC de la MLR, la rupture se produit lorsque le FIC K_I atteint la valeur critique K_{IC} - cette valeur correspond en fait à la ténacité du matériau. Dans cette approche, le coefficient K_I est la force motrice dans un matériau dont la résistance à la rupture est caractérisée par la ténacité K_{IC} . Le principe de similitude est supposé vérifié comme dans le cas de l'approche énergétique.

Les deux démarches sont équivalentes, via les relations **I.7**, pour un matériau dont le comportement est linéaire élastique.[2]

I.8. Propagation des fissures et concept de tolérance au dommage

La MLR permet le calcul de la durée de vie d'une structure soumise à des sollicitations cycliques (phénomène de fatigue) ou sujette à des effets de corrosion sous tension, puisque dans ce cas :

- la vitesse de propagation des fissures est caractérisée par un paramètre tel que le FIC,
- et la taille critique de défaut à ne pas dépasser est directement liée à la ténacité du matériau.

Par exemple, pour la fissuration par fatigue des alliages métalliques, la propagation de fissure da/dN est généralement représentée par la relation empirique de Paris :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \text{I.8}$$

Où C et m sont des constantes du matériau, et ΔK l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes.

Parce que les structures contiennent inévitablement des défauts de type fissure, défauts en général inhérents aux procédés même de fabrication des composants, leurs dimensions sont choisies de sorte que ces défauts ne puissent atteindre la taille critique conduisant à la rupture brutale : il s'agit du concept de tolérance au dommage. La MLR fournit les outils nécessaires pour déterminer cette taille critique (relation **I.3**) et suivre la propagation de la fissure (relation **I.8**).

L'évolution au cours du temps (cf. figure I.7) de la taille d'un défaut (de type fissure de fatigue ou de corrosion sous tension) illustre bien le concept de tolérance au dommage.

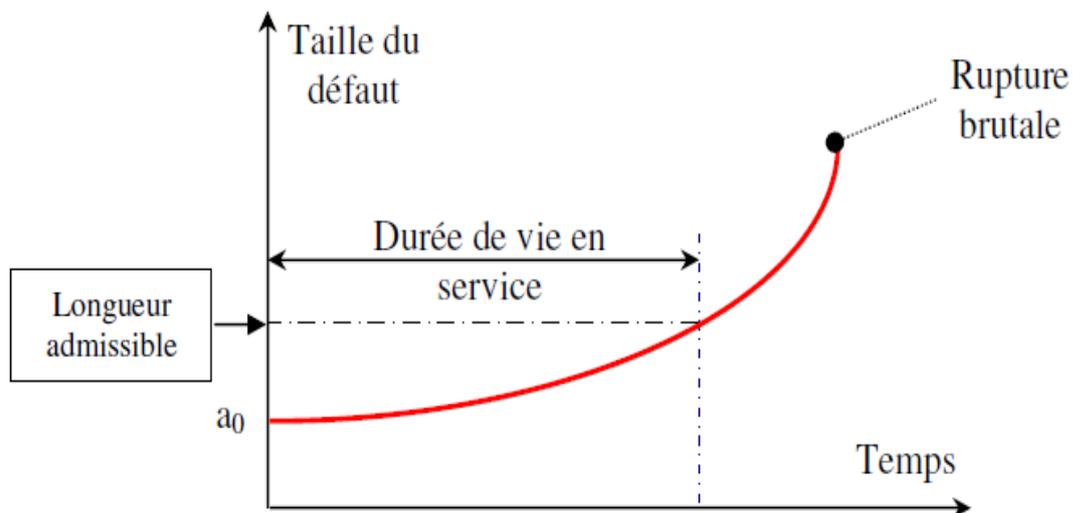


Figure I.7 Concept de tolérance au dommage

En pratique, la longueur de fissure initiale 0 correspond à la limite de détection des moyens de contrôle non destructif, et la longueur critique est déterminée à partir du chargement appliqué et de la ténacité du matériau. Quant au coefficient de sécurité, il est choisi de sorte que la longueur admissible du défaut reste inférieure à la longueur

Critique. La durée de vie de la structure est alors déterminée en calculant le temps nécessaire pour que la longueur de défaut passe de 0 à la longueur admissible.[2]

I.9. Influence des propriétés des matériaux sur la rupture

En mécanique de la rupture, le choix du concept varie selon le comportement physique du matériau.

La classification usuelle de ces concepts est la suivante :

-La mécanique linéaire de la rupture (MLR) pour les matériaux dont le Comportement est essentiellement linéaire élastique, tels les alliages d'aluminium à précipitation durcissant, les aciers à haute limite élastique, les céramiques...

-La mécanique élastoplastique de la rupture (MEPR), pour les matériaux ductiles tels les aciers à faible ou moyenne résistance, les inox ou aciers austénitiques, les alliages de cuivre...

-La mécanique dynamique de la rupture (MDR), linéaire ou non linéaire, pour les métaux sollicités à grandes vitesses de déformation – dans ces conditions, le Comportement peut aussi être viscoplastique.

- La mécanique viscoélastique de la rupture (MVER), essentiellement pour les Polymères sollicités à des températures au-dessous de la température de transition vitreuse.

- La mécanique viscoplastique de la rupture (MVPR) pour les polymères au-dessus de la température de transition ou encore les métaux et les céramiques sollicités à Haute température.

Remarques

- 1) Si le temps n'agit pas en MLR et en MEPR, il intervient explicitement en MDR, MVER et MVPR.
- 2) La MEPR, la MDR, la MVER et la MVPR sont souvent regroupées dans le domaine élargi de la mécanique non linéaire de la rupture (MNLR).

Considérons à présent, une plaque fissurée chargée jusqu'à rupture. La figure **I.8**

Schématise la variation de la contrainte à rupture en fonction de la ténacité du matériau.

- Pour les matériaux à faible ténacité où la contrainte à rupture varie linéairement avec le K_{Ic} (relation **I.6**), la rupture fragile est le principal mécanisme qui gouverne la ruine de la structure. C'est la MLR qui décrit donc le mieux ce genre de Comportement.

- Pour les matériaux à très haute ténacité, la MLR n'est plus valable puisque les Propriétés d'écoulement du matériau gouvernent le mécanisme de rupture. Une Simple analyse de chargement limite permet alors de dimensionner les structures.
- Pour les matériaux à ténacité intermédiaire, la MNLR est souvent appliquée. [2]

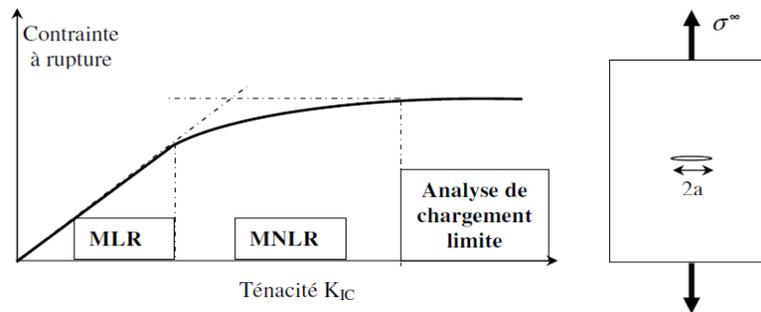


Figure I.8 : Comportement en fonction de la ténacité

I.10. Analyse dimensionnelle en mécanique de la rupture

L'analyse dimensionnelle est un outil important pour l'étude de la mécanique de la rupture. Pour décrire cette approche, nous considérons les configurations de chargement représentées sur la figure I.9, où les différentes géométries de structures fissurées sont soumises à la même contrainte σ^∞ loin de la fissure. Comme il s'agit de problèmes plans, l'épaisseur des structures n'intervient pas.

La figure I.9a représente une fissure de bord de très petite dimension par rapport à celles de la plaque : le problème est donc traité comme un problème en milieu Infini. La plaque est conçue dans un matériau dont le comportement est linéaire Élastique, de module d'Young E et de coefficient de Poisson ν .

La taille a de la fissure de la figure I.9b n'est plus négligeable : la largeur L de l'éprouvette devient une variable additionnelle.

Le cas de la figure I.9c se présente sous la même configuration de chargement que le cas I.7b mais cette fois-ci, avec un matériau élastoplastique (élastique Plastique parfait). Deux autres variables doivent être considérées : la limite d'élasticité E_s du matériau et la taille r_p de la zone plastifiée qui se forme à l'extrémité de la fissure.

Dans le cas le plus général, les contraintes σ_{ij} en un point de coordonnées polaires (r, θ) par rapport à l'extrémité de la fissure, seront représentées par une fonction de type

$$\sigma_{ij} = f(\sigma^\infty, \sigma_E, E, \nu, a, r, L, r_p, \theta) \quad \text{I.9}$$

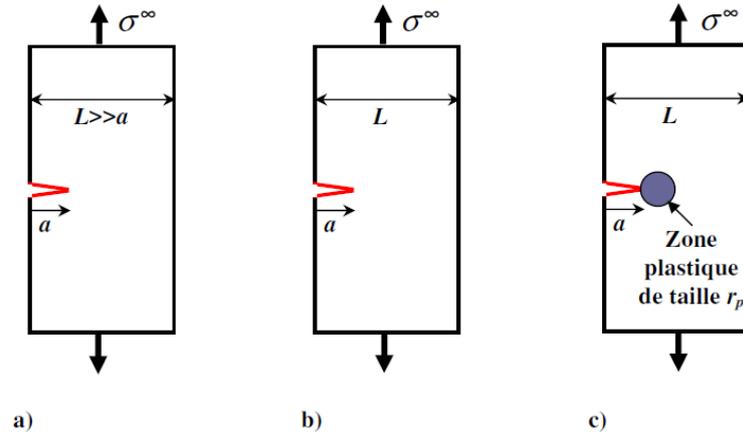


Figure I.9 : Différents cas d'éprouvettes avec fissure de bord

Dans le cas de la figure 1.7a par exemple, cette fonction se réduit à :

$$\sigma_{ij} = f_1(\sigma^\infty, E, \nu, a, r, \theta) \quad \text{I.10}$$

L'analyse dimensionnelle (théorème de Buckingham) permet alors d'écrire :

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma^\infty} = F_1\left(\frac{E}{\sigma^\infty}, \frac{r}{a}, \nu, \theta\right) \quad \text{I.11}$$

Pour le cas de la figure I.7 b, l'analyse dimensionnelle donne la formule :

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma^\infty} = F_2\left(\frac{E}{\sigma^\infty}, \frac{r}{a}, \frac{L}{a}, \nu, \theta\right) \quad \text{I.12}$$

Où la largeur L de la plaque est la variable additionnelle.

Dans le cas de la figure I.7c, il vient la relation :

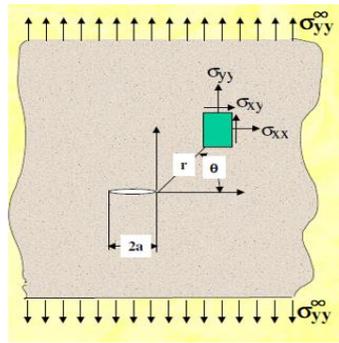
$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma^\infty} = F_3\left(\frac{E}{\sigma^\infty}, \frac{\sigma_E}{\sigma^\infty}, \frac{r}{a}, \frac{L}{a}, \frac{r_p}{a}, \nu, \theta\right) \quad \text{I.13}$$

Où σ_E et r_p sont les deux autres variables additionnelles.

La relation **I.12** correspond à un comportement élastique linéaire du matériau pour lequel la MLR s'applique. Si $L \gg a$, autrement dit si la taille de la fissure est faible par rapport à la largeur L de l'éprouvette, il n'y a plus d'effet de bord et L n'est plus considérée comme une dimension caractéristique : on retrouve alors la relation **I.11**.

La relation **I.13** correspond à un comportement élastique plastique parfait décrit par la MLNR. Lorsque la taille de la zone plastifiée est négligeable par rapport à la longueur de la fissure ($r_p \ll a$) et que la contrainte appliquée est faible par rapport à la limite d'élasticité du matériau $\sigma_E \gg \sigma^\infty$, on retrouve la relation **I.12**. Ce qui était prévisible puisque c'est précisément dans ces conditions ($r_p \ll a, \sigma_E \gg \sigma^\infty$) que la MLR s'applique. [2]

I.11. Relation entre le facteur d'intensité de contrainte et l'énergie de Griffith



$$\sigma_{xx} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left\{ 1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(3\frac{\theta}{2}\right) \right\}$$

$$U_{\text{elast}} * \frac{S \sigma^2}{2E}$$

$$G = \frac{dU_{\text{elast}}}{da}$$

$$G = \frac{K_1^2}{E}$$

$$G = 2\gamma$$

Ténacité K_{1c}

$$K_{1c} = \sqrt{2E\gamma}$$

E : module de Young : GPa

γ : l'énergie de la surface : J/m²

$$\sigma^\infty \sqrt{\pi a} \leq \sqrt{2E\gamma}$$

$\sigma^\infty \sqrt{\pi a}$: chargement géométrie : K_1

$\sqrt{2E\gamma}$: matériau : K_{1c}

I.12. Rupture et environnement

C'est l'attaque destructive d'un métal par réaction chimique ou électrochimique ou mécanique avec son environnement (variation de température, le vent, la corrosion ... etc).

Les propriétés mécaniques des matériaux sont altérées.

Pour étudier la rupture et l'environnement doit être examiné les phénomènes suivants :

- Corrosion par fatigue
- Corrosion sous contraintes
- Fatigue thermique
- Corrosion de contact. [7]

I.12.1. Fatigue corrosion

La fatigue représente la tendance du métal à se fracturer sous l'action d'un cycle de contraintes. La fissuration apparaît normalement au-dessous de la limite élastique.

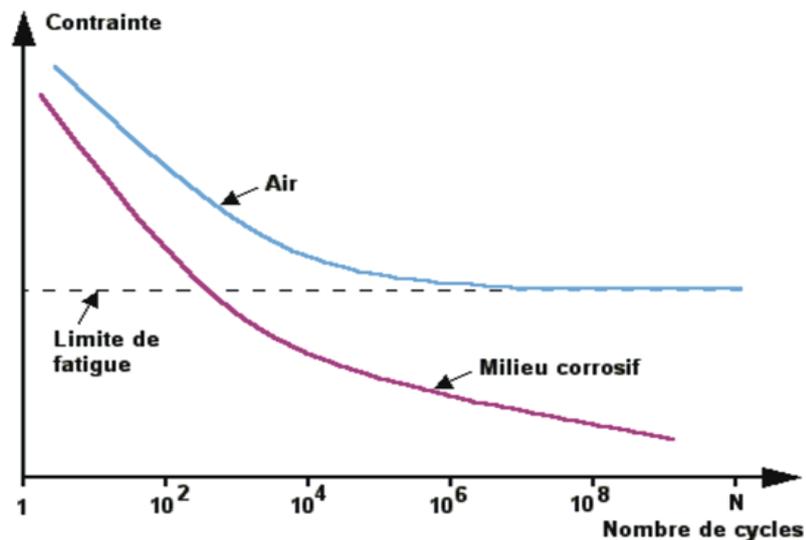


Figure. I .10 : Corrosion sous fatigue

La "corrosion sous fatigue" est une réduction de la résistance à la fatigue due à la présence d'un milieu corrosif.

En eau de mer, les inox austénitiques ne conservent que 75% de résistance à la fatigue.

Les fissures sont généralement Trans granulaires : elles prennent naissance grâce aux piqûres.

Prévention :

On retrouve les mêmes remèdes que pour la corrosion sous contrainte. On peut également utiliser un revêtement Zn, Cr, Ni, Cu, par électrodéposition. [7]

I.12.2. Corrosion sous contrainte

Les actions simultanées de contraintes et d'un milieu corrosif produisent des fissurations dans un métal. Les fissures sont intergranulaires ou Trans granulaires et se présentent souvent sous forme ramifiée.

I.12.2.1 Effets de contraintes

Les contraintes ont diverses origines : thermique, écrouissage résiduel soudage, charge appliquée, produits de corrosion (action de coin). Le minimum de contrainte nécessaire dépend de la température de la composition de l'alliage et de l'environnement. Dans certains cas il ne faut pas dépasser 10% de la limite élastique,

Ce sont les contraintes de tension qui sont les plus dangereuses.

I.12.2.2 Effet du temps

La vitesse de fissuration est constante au démarrage du phénomène, mais elle s'accélère très rapidement par suite de la diminution de la section.

I.12.2.3 Facteurs métallurgiques

La susceptibilité à la corrosion sous contrainte est affectée par la composition chimique de l'alliage, l'orientation des grains, la composition et la distribution des précipités.

L'observation faite sur les aciers au nickel est valable pour d'autres alliages. mais il ne faut pas extrapoler abusivement et croire qu'un métal pur est exempt de corrosion sous contrainte.

L'augmentation du pourcentage de ferrite dans les aciers inox moulés améliore la résistance à la corrosion sous contrainte. Des lots de ferrite dans la matrice austénitique bloquant la progression des fissures. [7]

I.12.3. Fatigue thermique

La fatigue thermique des métaux fait référence à des ruptures générées par des cycles de chargements thermiques avec des échauffements et des refroidissements non homogènes. L'échauffement ou le refroidissement rapide d'une pièce métallique induit de forts gradients thermiques dans la section de la pièce, entraînant des dilatations et des contractions irrégulières. Les contraintes générées peuvent aller jusqu'à plastifier le métal lorsqu'une zone chauffée tend à se dilater alors qu'elle est bridée par une autre section plus épaisse et plus froide de la pièce.

La fatigue thermique se différencie de la fatigue à température par son mode de chargement. Les chargements cycliques en fatigue thermique sont dus aux gradients de dilatation alors que dans le cas de la fatigue à température,

Les contraintes sont dues à des charges appliquées. Les deux modes de sollicitations peuvent être superposés en cas de charges appliquées sous chocs thermiques. [7]

I.12.4. Corrosion de contact

La corrosion par contact survient quand des métaux de préciosité différents sont en contact étroit. Par exemple quand une vis en acier inoxydable est vissée sur une tôle d'acier zingué. Le métal le plus précieux stimule ensuite la corrosion (la rouille). Un phénomène dit de corrosion par contact survient. La condition pour ce processus est un milieu corrosif entre les deux métaux, par ex de l'eau ou simplement ambiante normale.[7]

I.13. Conclusion

Ce premier chapitre permet de fixer le cadre dans lequel s'inscrit notre sujet de recherche. D'un point de vue théorique, l'analyse asymptotique en mécanique linéaire de la rupture a défini les paramètres décrivant la rupture.

Nous constatons que pour un défaut type entaille, la distribution des contraintes peut être approximativement formulée par des caractéristiques telles que la distance effective, l'acuité d'entaille et le facteur d'intensité de contraintes.

Ces auteurs montrent que l'approche volumétrique est la plus appropriée pour décrire l'amorçage et la propagation.

- Le KI en fonction de la longueur de la fissure a est linéaire, pour les matériaux isotropes et orthotropes
- Le KI ne dépend pas de la nature du matériau mais seulement de sa géométrie dans le cas des isotrope.
- La propagation de la fissure en supposant que cette dernière se propage d'une manière linéaire, ce qui n'est pas toujours vrai dans la réalité.
- Chaque matériau avait un point faible connu par la fatigue (corrosion, fluage,).
- La rupture environnement rupture aléatoire, donc la prévention à partir de cette rupture ce n'est pas facile, il faut mettez beaucoup précautions pour éviter tous les problèmes de rupture environnement.

Références bibliographiques

- [1] Ahmed BENHAMOUDA « ETUDE DU COMPORTEMENT DES FISSURES DANS LES TUBES SOUS PRESSION INTERNE »
- [2] Abderrahim Zeghloul « concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture »
- [3] Jean-Baptiste Leblond « mécanique de la rupture fragile et ductile » univ Pierre et Marie Curie. Paris. Laboratoire de modalisation en mécanique.2003
- [4] Tahar Nateche « Réhabilitation et Renforcement des Canalisations sous Pression en présence des défauts de surfaces » l'Université Des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf (Oran)
- [5] Zoumana SOUMAHORO, « ETUDE DU COUPLAGE THERMOMECHANIQUE DANS LA PROPAGATION DYNAMIQUE DE FISSURE », Thèse de Doctorat. L'Ecole Polytechnique, 2005.
- [6] Madjid Merabtine « cour MECANIQUE de la RUPTURE et FATIGUE » univ Badji Mokhtar-Annaba-,2021
- [7] Soufiane MERABTI « RUPTURE ET ENVIRONNEMENT », univ de Bechar, ministère de l'enseignement supérieure de la recherche scientifique,
- [8] <https://cluster-meca.fr/criteres.de.rupture-364000-5-37-40.php>
- [9] https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9canique_de_la_rupture

Chapitre II

Abaqus : Simulation et Méthodes Numériques

II.1. Introduction

L'avenir est à l'outil numérique et à la réalité virtuelle ; la simulation et l'analyse numérique se sont développées ces dernières années dans la recherche industrielle privée ou publique (constructeurs automobile, aéronautique, spatial...) améliorant ainsi la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs [1]

La solution d'analyse par éléments finis optimise le prototypage virtuel et la simulation numérique pour l'entreprise en utilisant les hypothèses de la mécanique de la rupture en élasticité et de la dynamique. Ainsi elle simule et améliore les performances.

La simulation et l'analyse numérique ont un impact direct sur la qualité des composants, des matériaux et des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles (sécurité, endommagement...) et le temps de mise sur le marché des produits ; de plus, elles accroissent les performances des solutions de gestion du cycle de vie du produit. Elles sont apparues, dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés. La difficulté est de créer un modèle C.A.O. se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, conditions aux limites...). L'étude ne sera validée qu'à partir d'essais physiques entraînant des mesures pour la comparaison entre la réalité et la simulation (crash test...).

D'un point de vue technique, les résultats obtenus grâce à ABAQUS sont le bilan des énergies, des forces nodales, des déformations, des déplacements, des contraintes, des vitesses, des accélérations et de toutes les grandeurs physiques nécessaires à la conception d'un modèle.

ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il est avant tout un logiciel de simulation de problèmes très variés en mécanique. Simuler la réponse physique des structures soumises à des chargements, des températures, des impacts ou autres conditions extérieures, Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. [2]

II.2. Les Logiciels sur le marché

Il faut savoir que les logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur sont très nombreux sur le marché. Les plus utilisées sont NASTRAN, CATIA, ABAQUS et Œuvres solides. Tous ces logiciels effectuent les mêmes tâches, c'est à dire qu'ils génèrent les caractéristiques et de faire des calculs d'une structure (déformations, ruptures, plastification...) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables.

La plupart des entreprises utilisent un assortiment de ces logiciels qui sont plus ou moins performants dans l'une ou l'autre de ces tâches, par exemple, dessiner avec CATIA, calculer avec ABAQUS et faire du post traitement avec NASTRAN. Il vous sera donc certainement demandé dans le monde de l'entreprise une maîtrise de plusieurs de ces outils, d'où l'intérêt de commencer avec ABAQUS.[3]

II.3. Définition du logiciel ABAQUS

ABAQUS est un programme de calcul des éléments finis (MEF) développés par ABAQUS, Inc (Dassault Systèmes). Il se compose de trois produits :

- ABAQUS / Résolution standard : par un algorithme statique implicite.
- ABAQUS / Explicit : résolution par un algorithme dynamique explicite.
- ABAQUS / CAE : constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et / ou optionnels, spécifiques à certaines applications.[4]



II.4. Caractéristiques de logiciel ABAQUS

Description succincte des possibilités d'ABAQUS.

- Analyses.
- Éléments.
- Linéarités.

II.4.1 Type d'analyse

Domaines physiques :

- Mécanique.
- Thermique.
- Electrique (Pièze et thermique)
- Problèmes couplés.
- Une bibliothèque de matériaux de pointe, y compris l'habituel élastique et solides plastique, élastique ; modèles pour les mousses, le béton, les sols, les géosynthétiques.

II.4.2 Problèmes

- Statique et dynamique.
- Linéaires et non linéaires.
- Dynamique des corps rigides.

II.4.3 Les éléments utilisés par ABAQUS

Sur les différentes grandes classes d'éléments :

- **Les éléments unidimensionnels (1D)** : barre ; poutre, rectiligne ou courbe
- **Les éléments bidimensionnels (2D)** : plan d'élasticité (contrainte ou déformation plan), plaques en flexion, coques courbes de forme triangulaire ou rectangulaire.
- **les éléments tridimensionnels (3D)** : de forme tétraédrique, hexaédrique... etc.
- **Les éléments axisymétriques** : (pour les pièces présentant une symétrie de révolution au niveau de la géométrie et du chargement).
- **Les autres éléments** : ressorts, amortisseurs, rigides.[5]

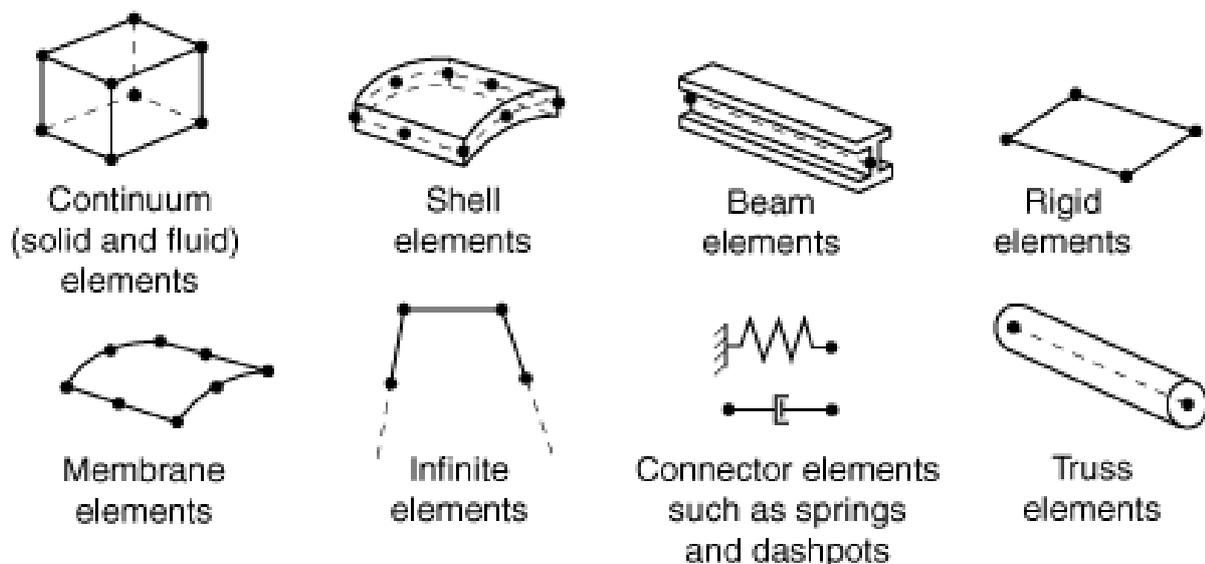


Figure II.1 : Quelques éléments parmi les plus utilisés

II.5. Réalisation d'une simulation numérique

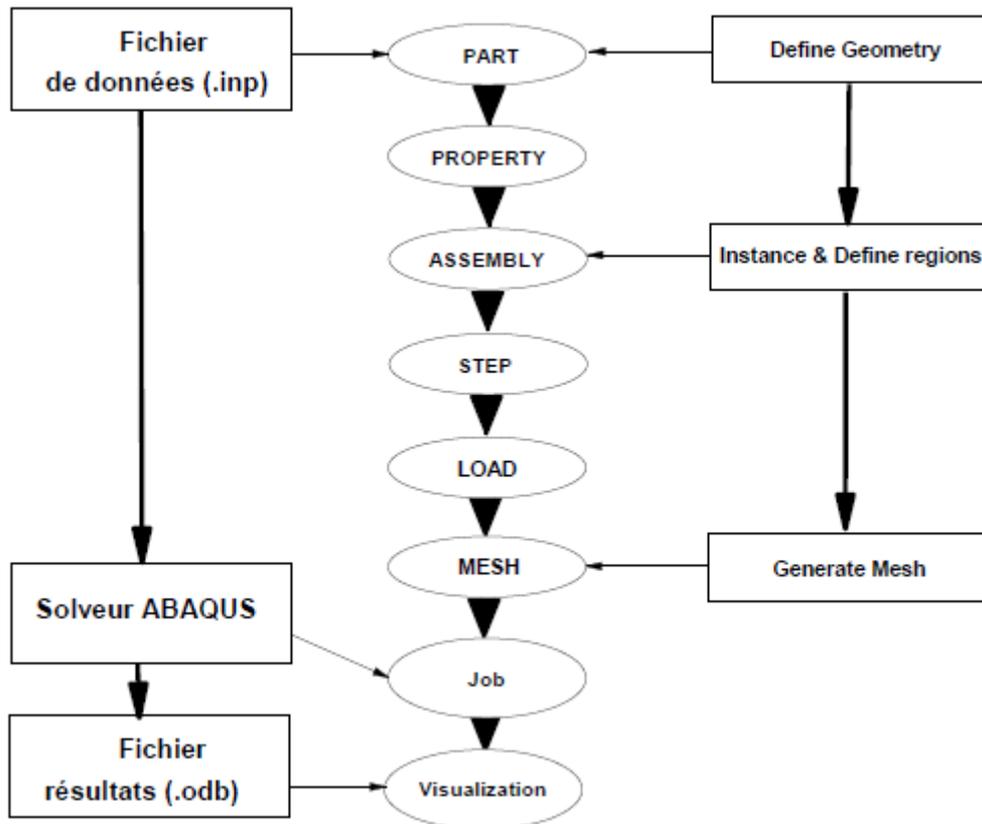


Figure II.2 : Étapes à suivre pour la programmation

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

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

II.6. Les fichiers créés par Abaqus lors de la simulation

Dans le code de calcul Abaqus le fichier de données décrit les géométries, les matériaux, les conditions aux limites avec une extension (.inp) et le fichier de résultats décrits les contours et Les courbes résultats avec l'extension (.odb).[6]

Autres fichiers

Fichier .com : exécutable de vos calculs

Fichier .res : fichier binaire de reprise

Fichier. Données : liste des résultats, résumé de votre modélisation

Fichier .msg : résumé du déroulement du calcul en cours, message d'erreur

Fichier. fil : fichier binaire des résultats

Fichier .log : fichier de procédure

Fichier. sta : Fichier statistique... ets.[2]

II.7. Les systèmes d’unités dans le logiciel ABAQUS

Avant de commencer à définir un modèle, vous devez choisir le système d’unités que vous utiliserez. ABAQUS n'a pas de système intégré d'unités. Toutes les données d'entrée doivent être spécifiées dans des unités cohérentes dans les résultats qui suivent le système d’unité et base sur SI (mm).[3]

Quantité	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Longueur	m	mm	ft	In
Force	N	N	lbf	Lbf
Masse	Kg	tonne (10 ³ kg)	slug	Lbf s ² / in
Temps	s	s	s	S
Contrainte	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	Lbf / ft ²	Psi (lbf / in ²)
Energie	J	mJ (10 ⁻³)	ft lbf	in lbf
Masse volumique	Kg/m ³	tonne / mm ³	slug / ft ³	Lbf s ² / in ⁴

Tableau II.1 : les unités dans ABAQUS

II.8. Organisation de l’interface Abaqus CAE (complète Abaqus environnement)

Il est important de savoir que le module CAE figure II.3 que vous allez utiliser pour créer votre jeu de données est relativement récent (quelques années) et 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.[2]

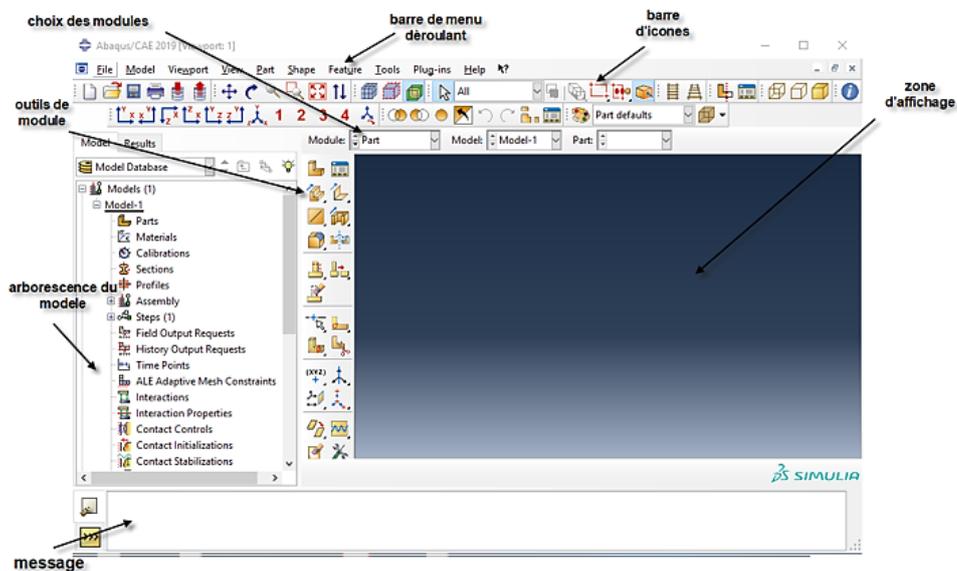


Figure II.3 : Organisation d’abaques

II.8.1. Les modules

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les modules, figure II.4

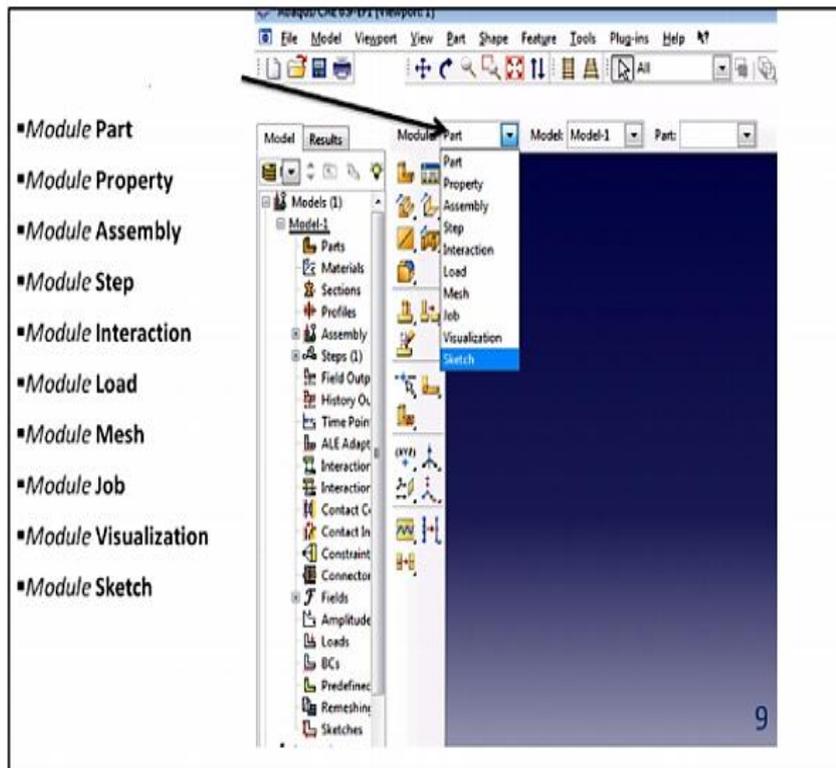


Figure II.4 : Réalisation de la mise en données d'un problème

II.8.2. Module part

PART ce module qu'est définie la géométrie des entités du modèle. Figure II.5 et figure II.5. 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.

Il ne vous reste plus qu'à sélectionner convenablement :

L'espace de modélisation : 3D par exemple

Le type d'entité à générer : déformable

La forme de l'entité.

Dans tous les cas vous passez dans un autre environnement de type CAO où vous dessinez vos pièces.

Dans le cas d'un solide rigide, il est nécessaire de définir un point de référence. C'est en fait en ce point que sont définis les degrés de liberté du solide sur lesquels vous imposerez des conditions aux limites par la suite. Ceci se fait dans le menu Tools, grâce à la commande Référence point.

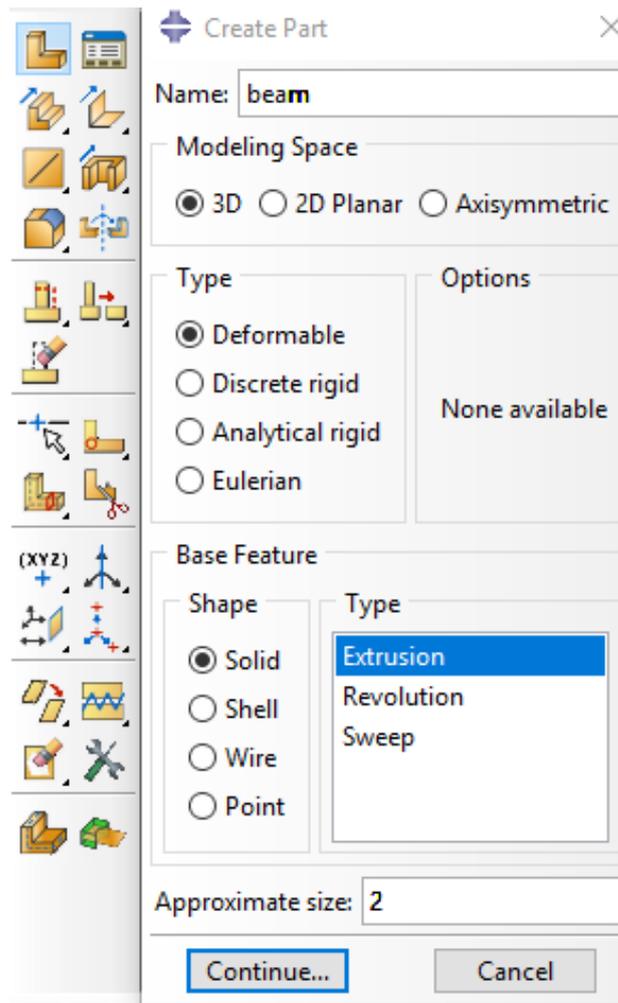


Figure II.5 : Module part

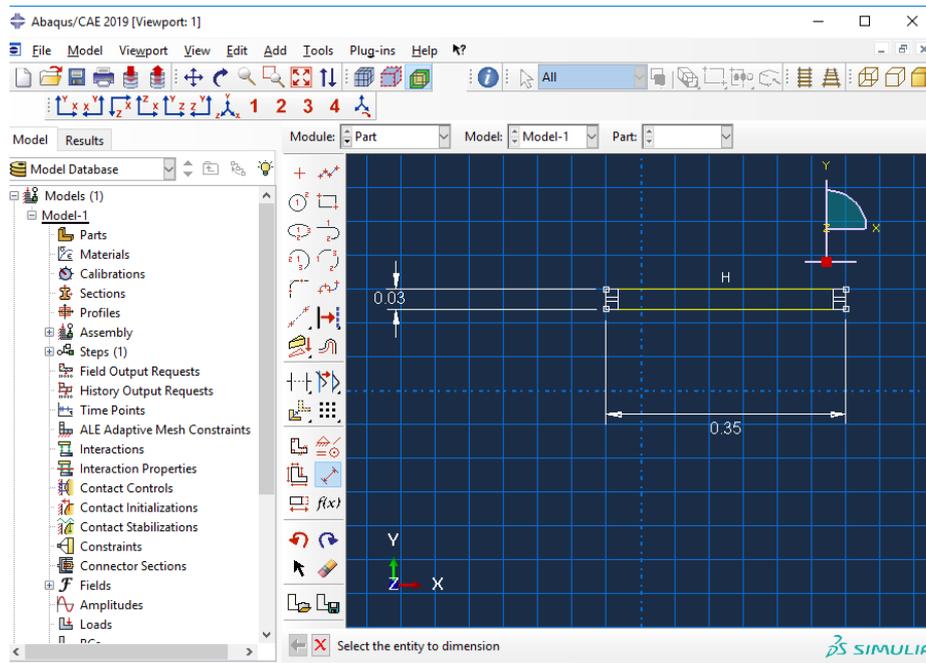


Figure II.6 : création de la géométrie

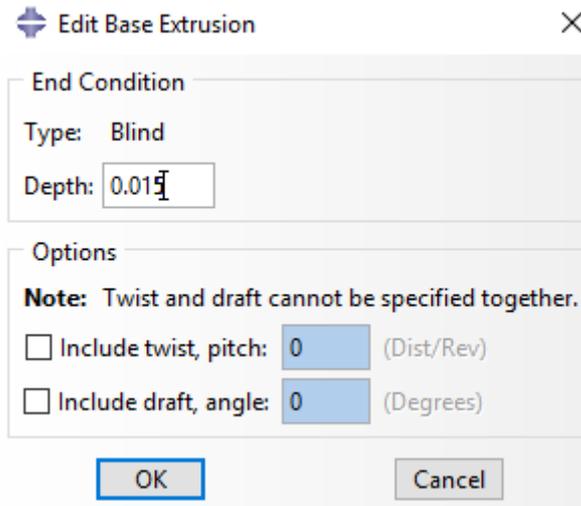


Figure II.7 : base extrusion

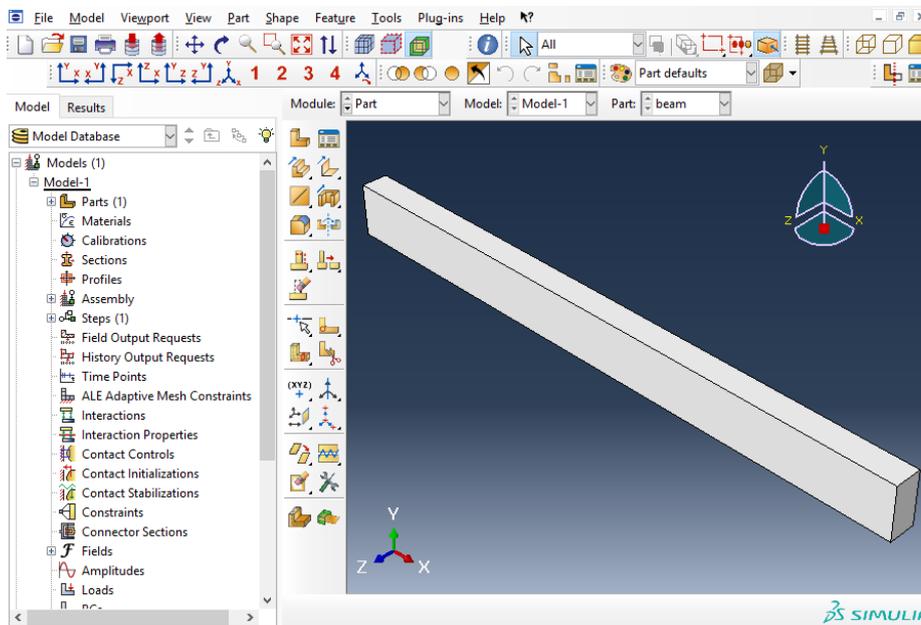
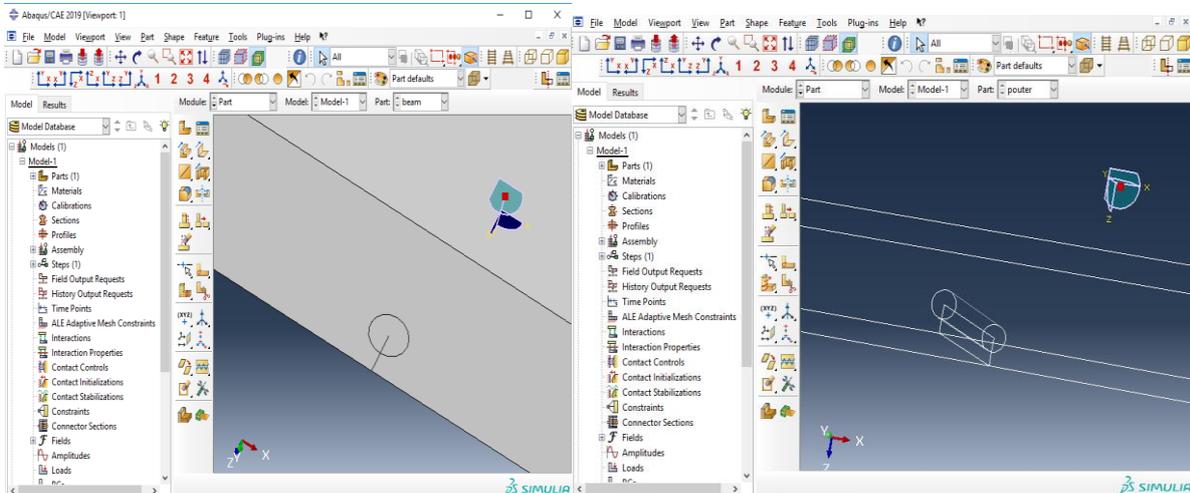


Figure II.8 : poutre



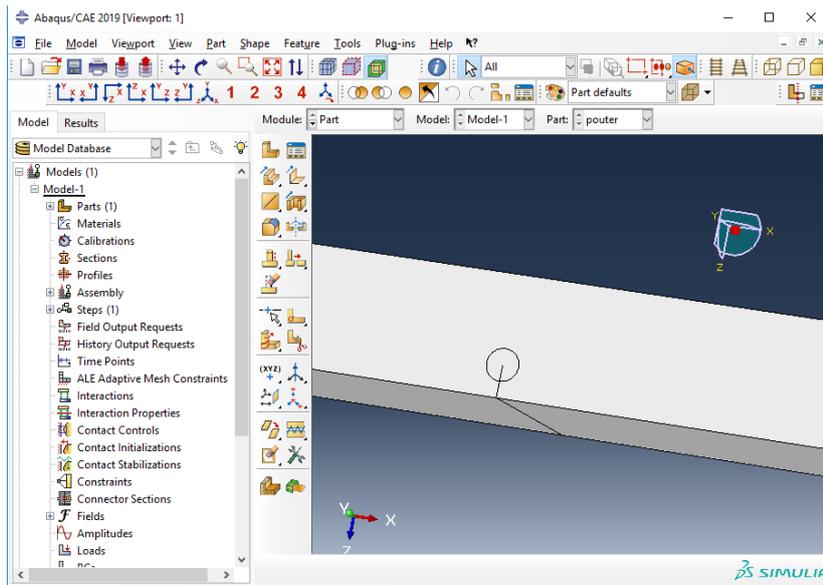


Figure II.9 : poutre fissurée

II.8.3. Propriété du module

On y définit les propriétés du ou des matériaux figure II.10 (des parties déformables du modèle) et la masse des corps rigides si nécessaire. Dans le cas présent, vous avez à définir des propriétés élastiques et / ou plastiques. Pour créer un matériau, il suffit de cliquer sur l'icône en haut à gauche. Il vaut mieux ensuite donner un nom spécifique à chacun de vos matériaux ce qui permet la création d'une base de données, il vous reste à définir :

- Les propriétés élastiques via Mécanique, Élasticité, Élastique (module d'Young et le coefficient de Poisson pour un matériau isotrope).
- Les propriétés plastiques via Mécanique, Plasticité, Plastique. (Sous l'hypothèse d'un isotrope d'écrouissage, la courbe d'écrouissage est entrée sous la forme : limite d'élasticité déformation plastique. Dans cette courbe, la contrainte est de type Cauchy (F divisée par la surface actuelle) et la déformation est logarithmique ($\ln(L/L_0)$).

Il faut ensuite affecter les propriétés matériau à une entité du maillage : pour cela il est nécessaire de créer tout d'abord une section avec l'icône en forme de poutre. Vous aurez à faire référence à un matériau et il ne vous restera plus qu'à Donner une valeur à l'épaisseur.

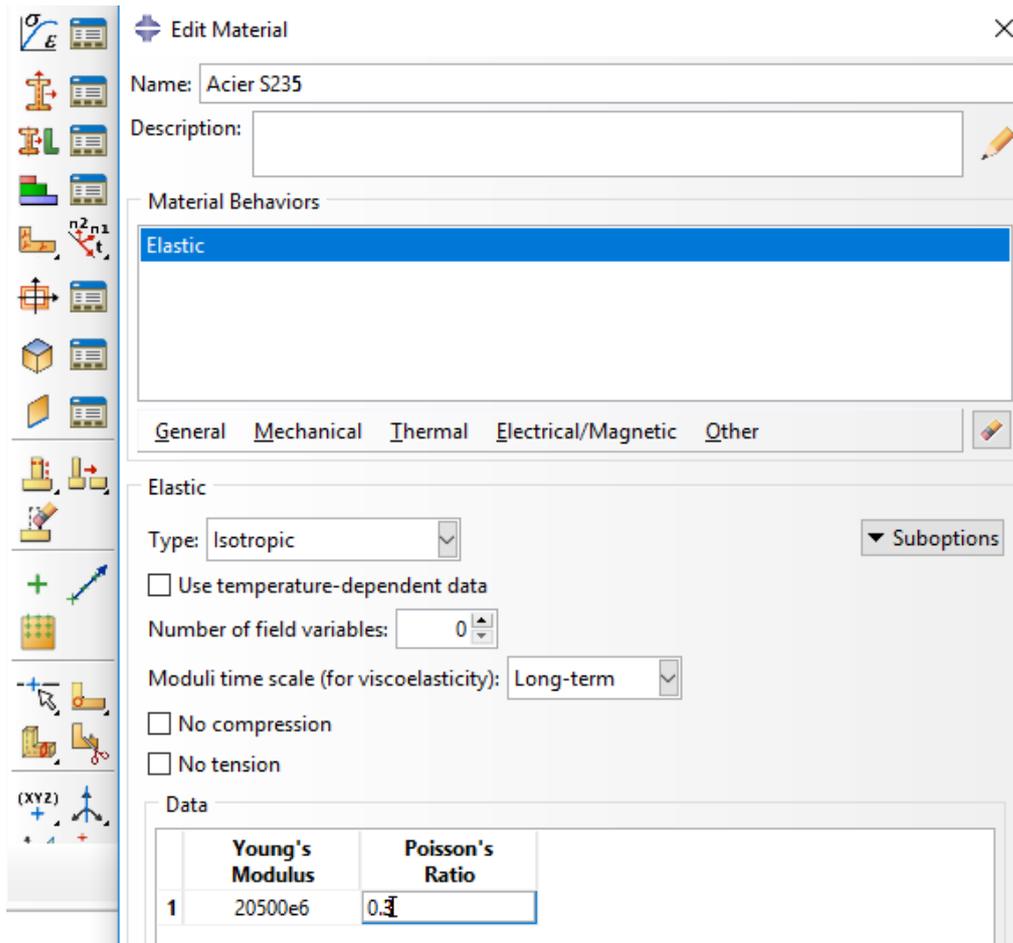


Figure II.10 : propreté Matériaux et section

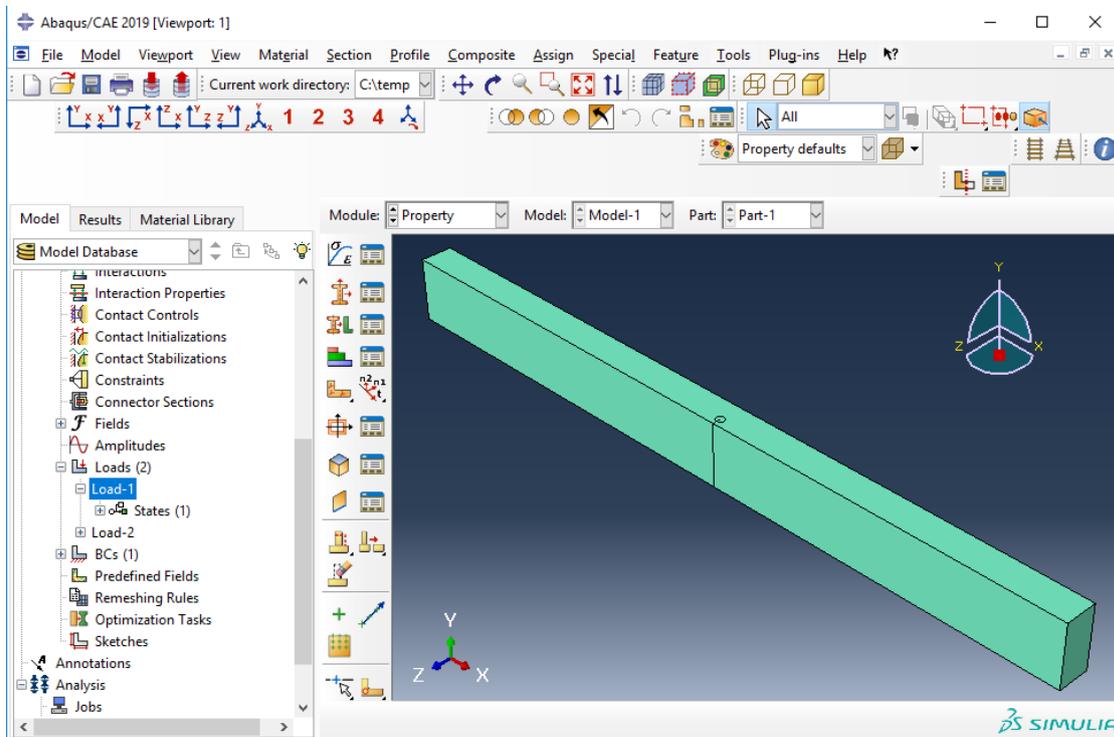


Figure II.11 : poutre en Matériaux S-235

II.8.4. Module Assembly

Assembly ce module, il s'agit de créer une instance figure II.12 à partir des entités que vous avez définies dans le module Part. Ces instances seront celles que vous manipulerez par la suite dans le modèle. Dans le cas général, à partir de l'icône en haut à gauche, pour créer une instance vous sélectionnez tous les éléments créés dans Part. Vous pouvez le cas échéant faire subir des mouvements d'ensemble à ces instances pour les repositionner dans l'espace.[2]

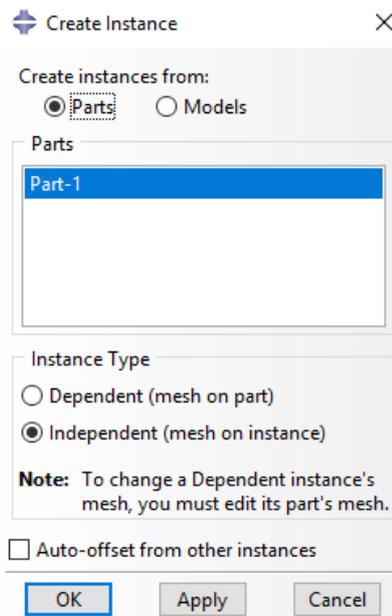


Figure II.12 : Create instance et assemblage

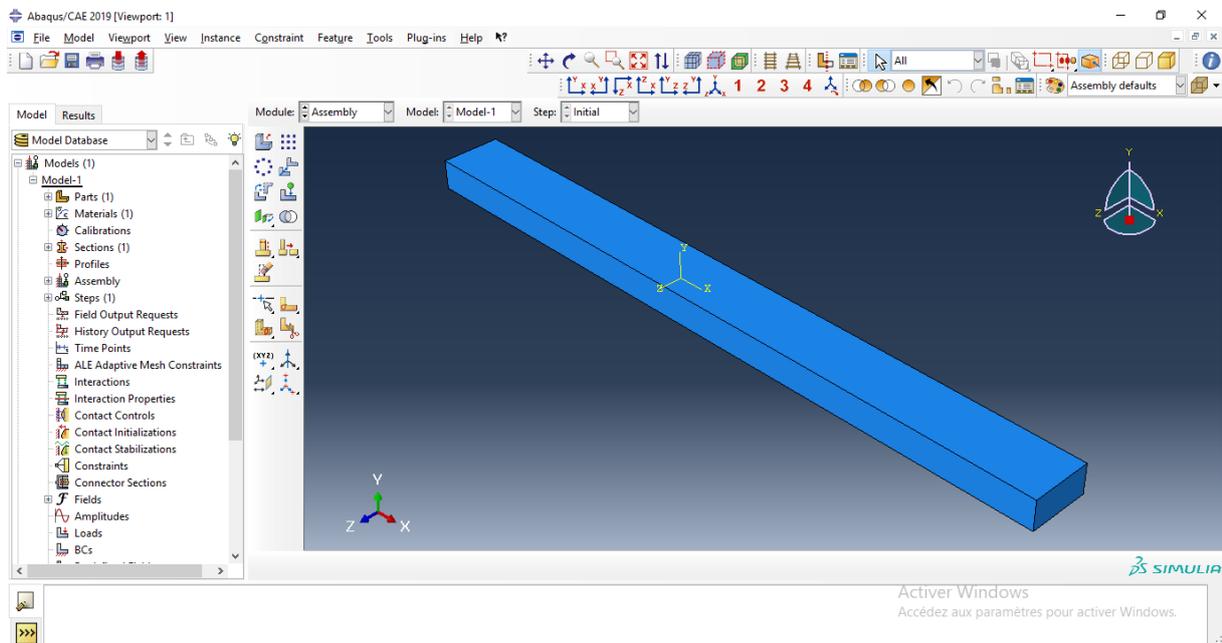


Figure II.13 : instance et assemblage

II.8.5. Module Step

C'est ici que vous choisirez, figure II.14 dans le cas d'études de crash ou d'impact, le module « Dynamic explicit ». Vous remarquerez au passage les nombreuses autres possibilités qui sont offertes par ce code de calcul.[2]

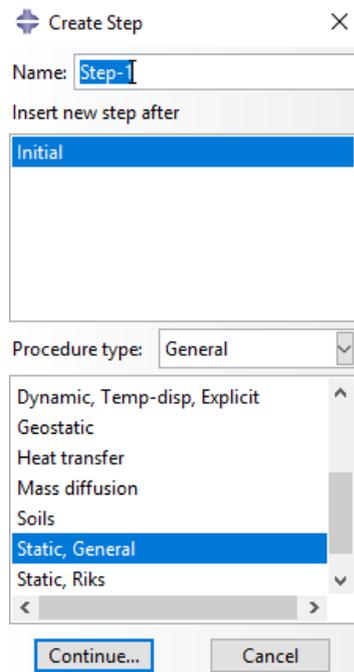


Figure II.14 : création de step

II.8.6. 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 Figure II.15.[2]

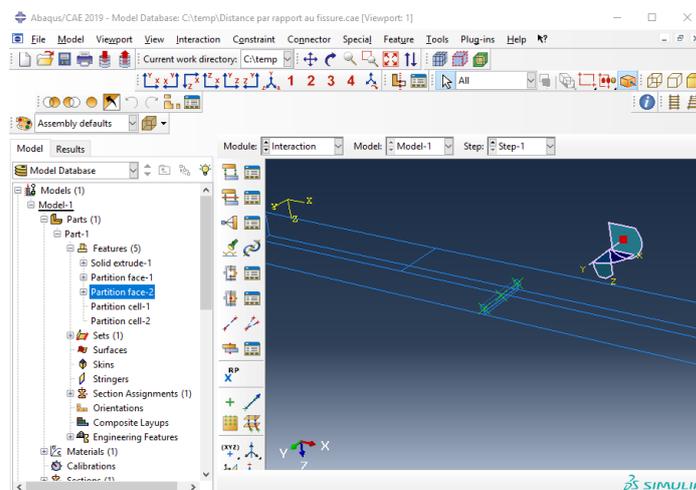


Figure II.15 : création interaction

II.8.7. Module Load

Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Figure II.16 ET 18. Il faut savoir que les chargements et le conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.[2]

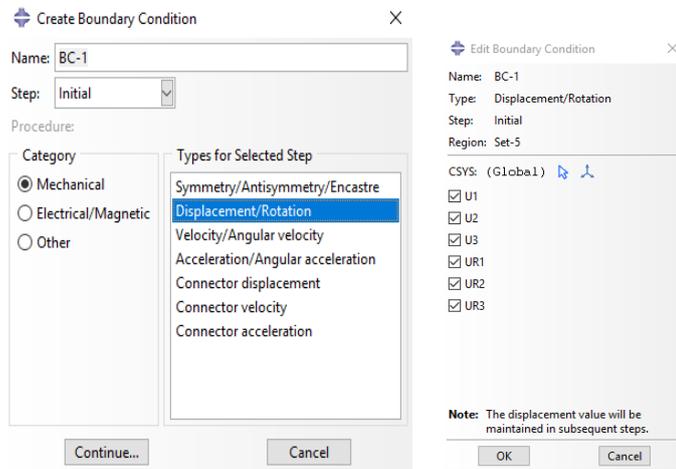


Figure II.16 : création d'encastrement

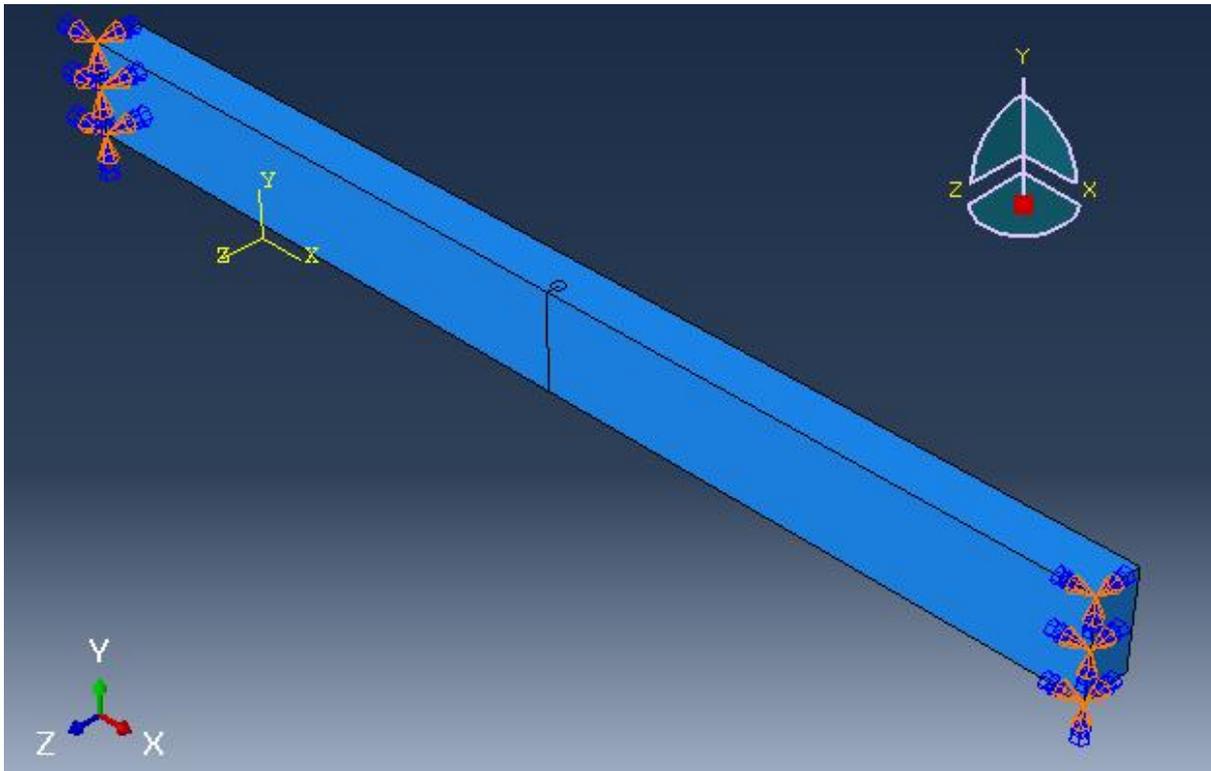


Figure II.17 : poutre encastrement

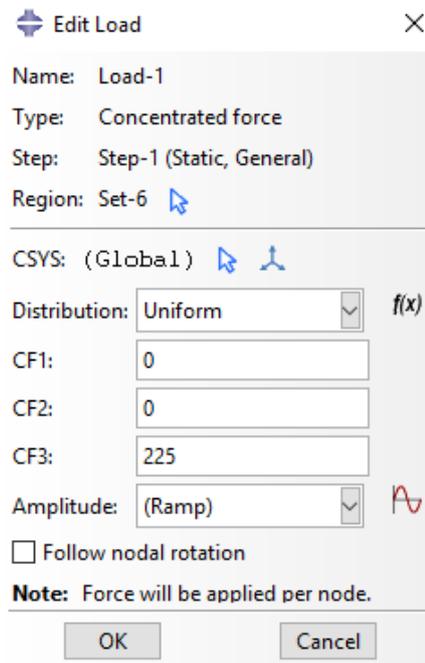


Figure II.18 : création de charge

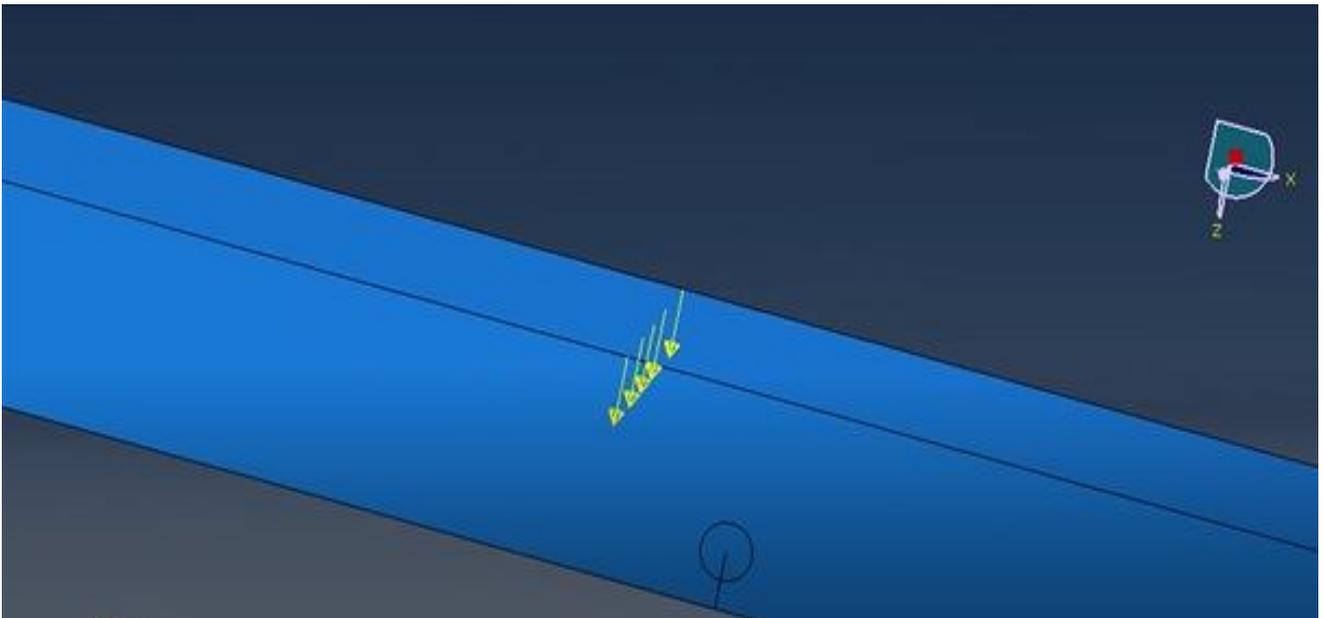


Figure II.19 : poutre chargée

II.8.8. Module Mesh

Mesh contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage, figure II.25.[2]

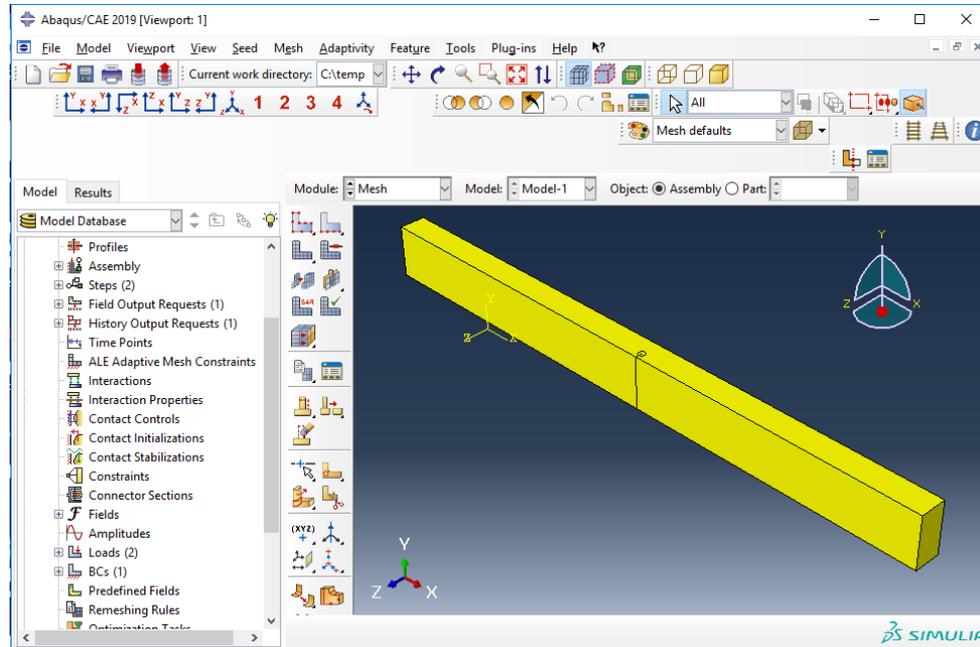


Figure II.20 : module Mesh

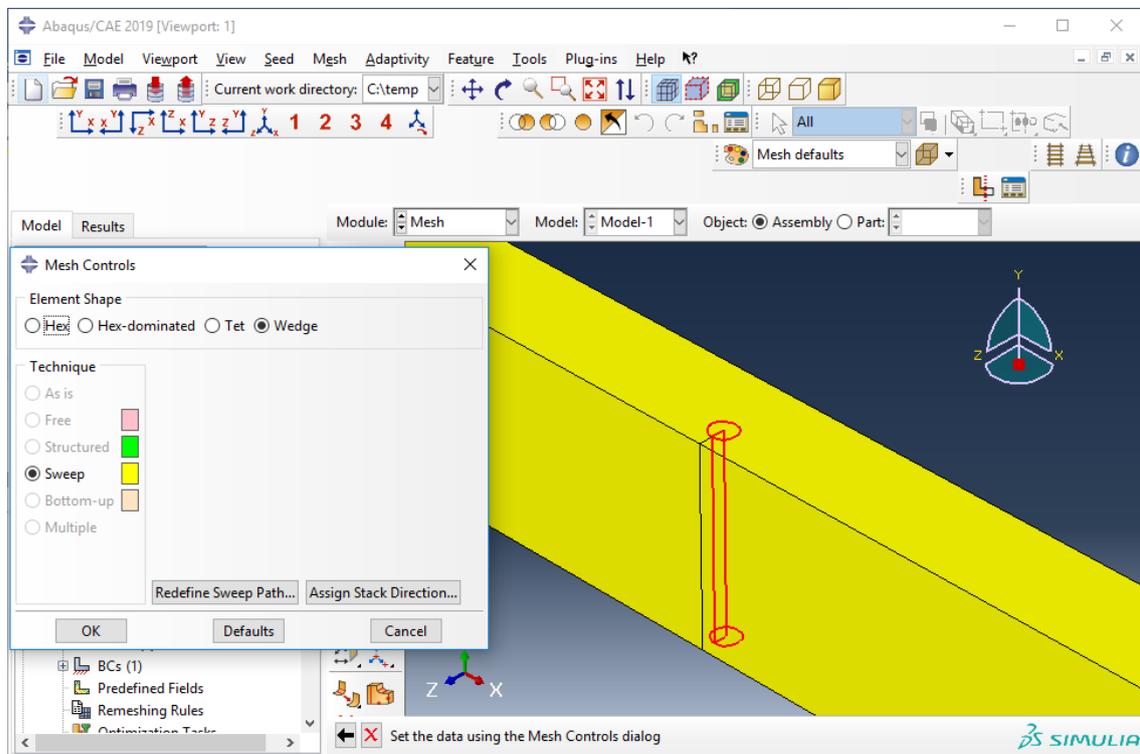


Figure II.21 : Mesh Controls de fissure

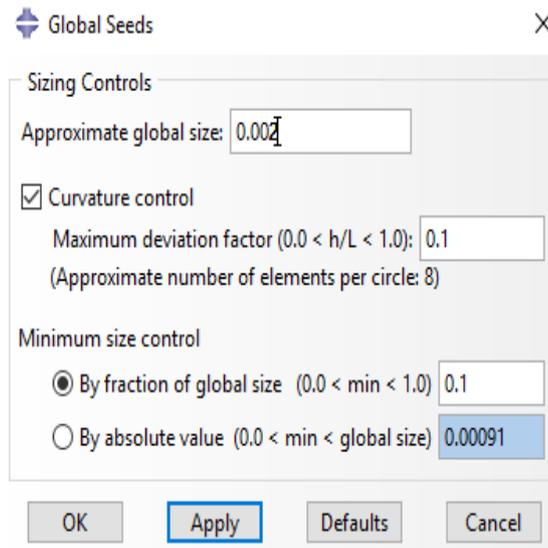


Figure II.22 : Global Seeds

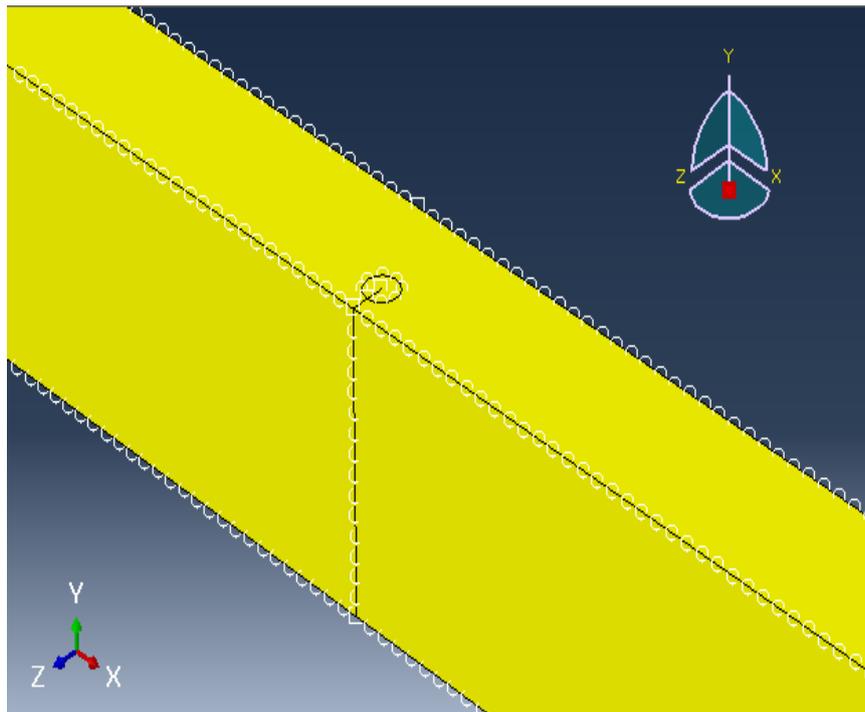


Figure II.23 : noed

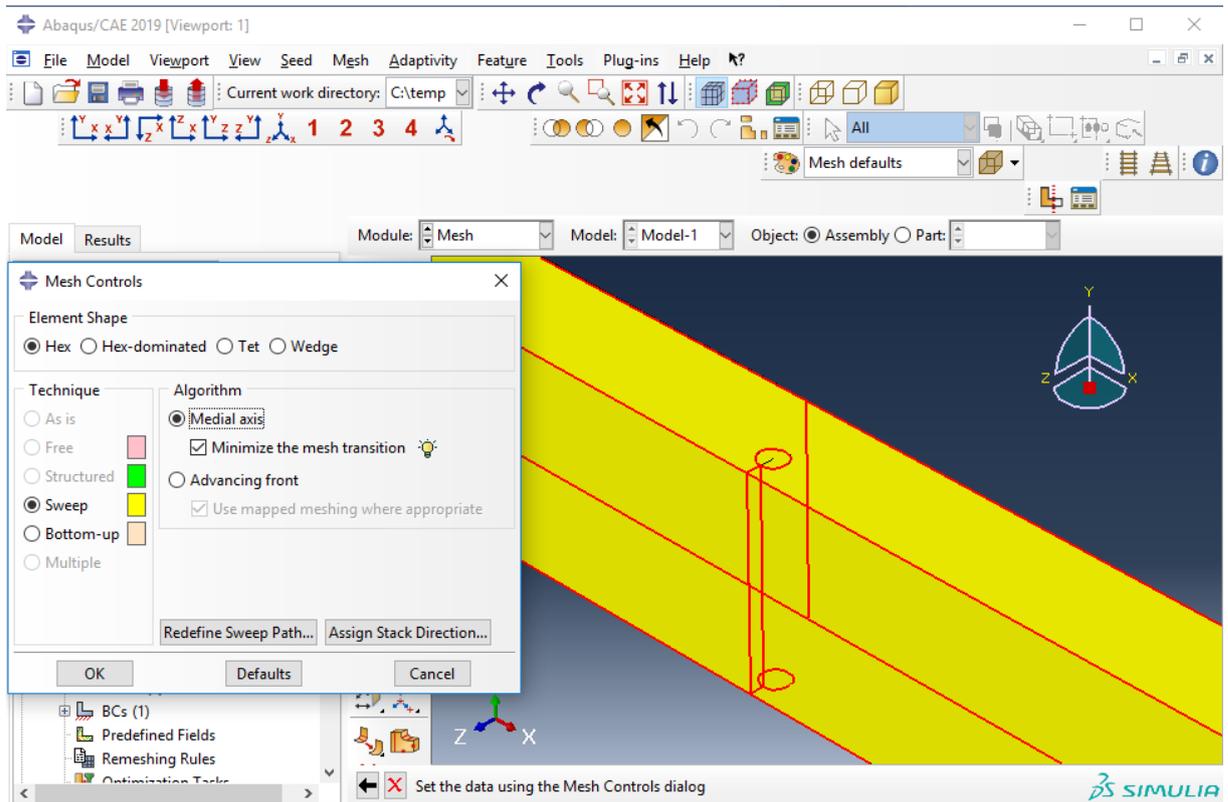


Figure II.24 : Mesh Controls de la poutre

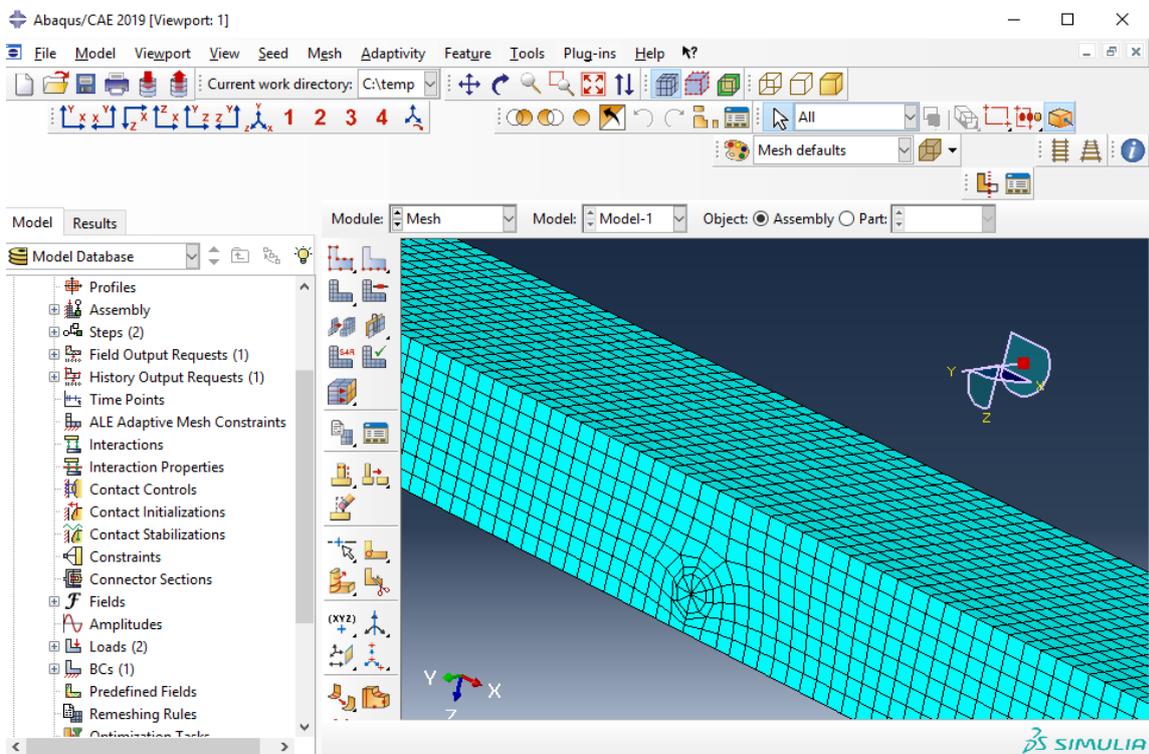


Figure II.25 : création le mayage

II.8.9. Module Job

Le « lancement » du calcul est classique. Figure II.26, 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.[2]

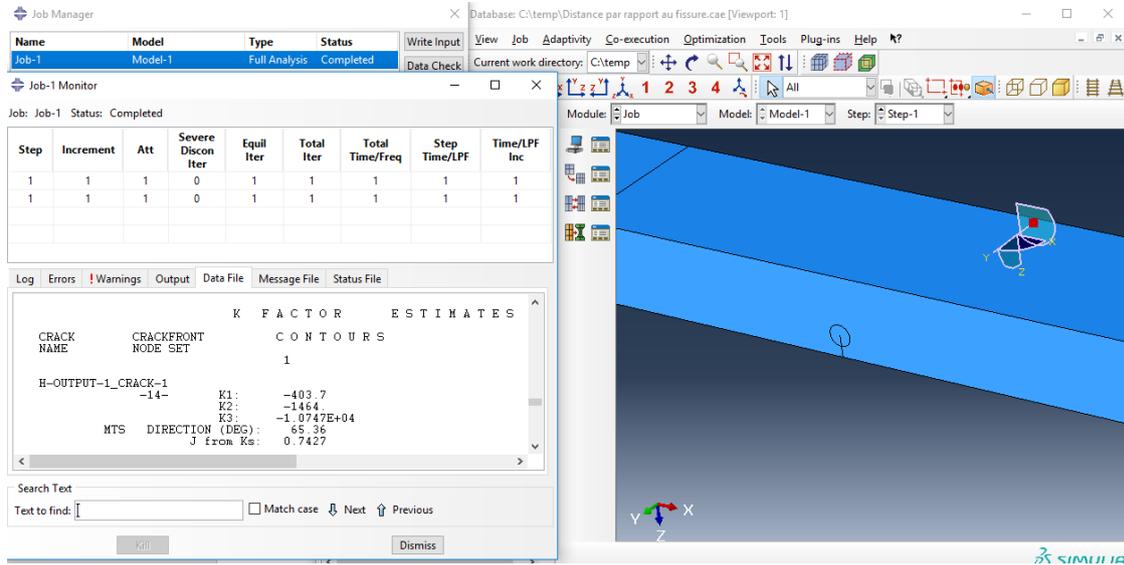


Figure II.26: module Job

II.8.10. Module visualization

Visualization Est un module qui affiche tous les résultats de la pièce soit contrainte ou déformation, figure II.27.[2]

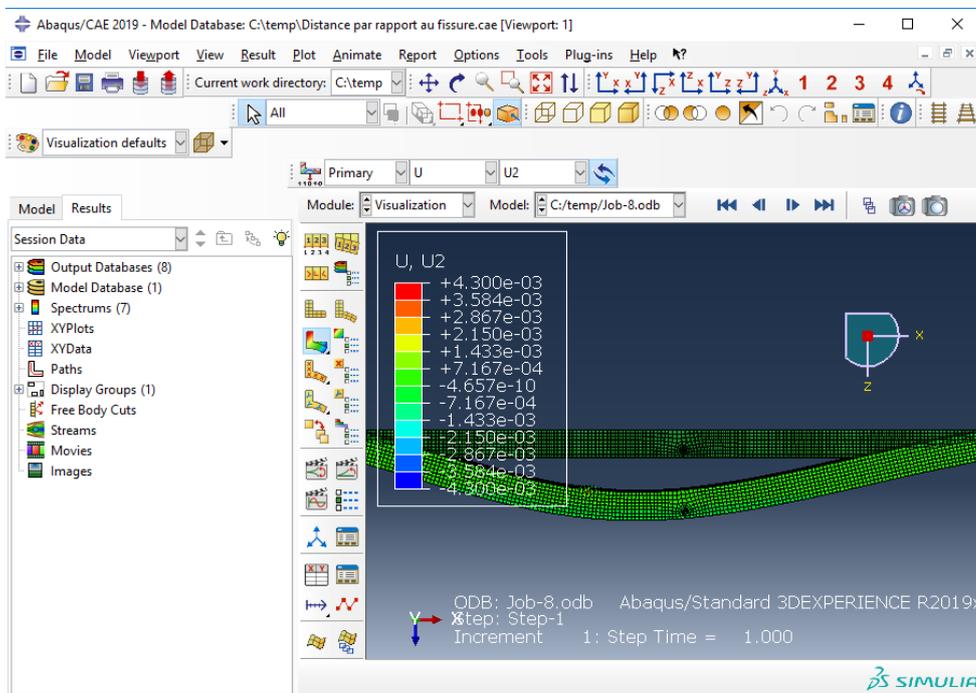


Figure II.27 : visualization

II.9. Esquisse du module

Sketch permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associées à un objet.

Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.[2]

II.10. L'arbre du modèle

L'arbre donne une description visuelle de la hiérarchie des objets du modèle. Tous les objets sont indiqués par de petites icônes avec en parenthèses le nombre de ces objets. L'ordre de l'arbre l'ordre classique d'élaboration du modèle.

A partir de cet arbre il est possible de retrouver la plupart des fonctionnalités de la barre de menu principal. Par exemple, double cliquer sur Part permet de créer une nouvelle Part comme sélectionner **Part** -> **Créer** dans la barre de menu.[2]

II.11. Les éléments dans ABAQUS

- Un très large choix d'éléments (plus de 100), figure II.28.
- Chaque élément est caractérisé par : famille, ddl, nombre de nœuds, intégration.
- Possibilités de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard).[2]

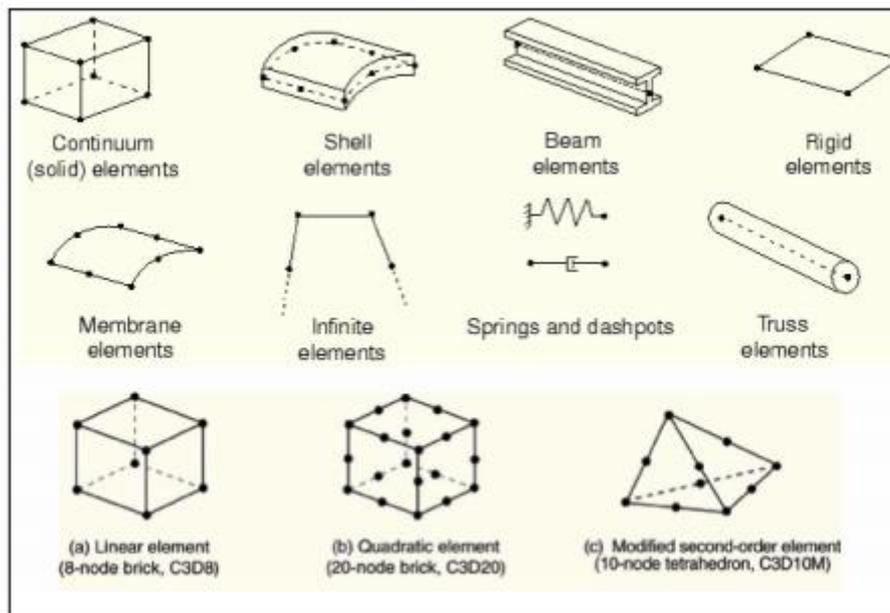


Figure II.28 : Quelques éléments dans Abaqus

II.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'outil nécessaire à la modélisation de la rupture.

La programmation efficace de la méthode des éléments finis requiert une bonne expérience tant dans le domaine des éléments finis que dans le domaine de l'informatique. Dans le présent chapitre, un logiciel majeur ont été bien détaillés "ABAQUS" avec les pas de fonctionnement.

Références bibliographiques

- [1] DENIS ABRY. « Présentation général d’Abaqus ». Formation des masters ; école centrale de paris. 2008
- [2] Bouleftour Abderrahmane, « Evaluation d’éléments finis volumiques dans Abaqus sur des cas tests non linéaires géométriques »
- [3] M.AIT TALEB Aissa « Modélisation du comportement de structures tubulaires utilisés et non traités »
- [4] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Abaqus#:~:text=ABAQUS%20fut%20d'abord%20con%C3%A7u,Syst%C3%A8mes%20et%20est%20devenue%20SIMULIA.>
- [5] BERDJI MOHAMED EL BACHIR « Modélisation d'une structure en matériaux isotropes par la méthode des éléments finis », Université de Ouargla ,2019
- [6] Tahar Nateche « Réhabilitation et Renforcement des Canalisations sous Pression en présence des défauts de surfaces » l’Université Des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf (Oran)

Chapitre III

Simulation et calcul numérique : Flexion 3 Points

III.1. Introduction

L'objectif de notre étude est le calcul numérique des facteurs d'intensité de contrainte «KI et KII », les valeurs de déformations et de contraintes suivant les axes (OX, OY et OZ), tous ces paramètres sont étudiés en fond de fissure, d'une poutre chargée en flexion 3 points, par une méthode numérique (MEF) appliquée à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif (Poutre près fissurée en acier S235), en utilisant le code de calcul numérique *Abaqus 19*.

III.2. Dimensionnement et caractéristiques de la poutre :

Pour notre simulation, on utilise une poutre simple isotrope près-fissurée dimensionnée comme indiqué ci-dessous (**Figure III.1**) :

❖ La poutre est en section rectangulaire de :

- Longueur : 0.35 m
- Largeur : 0.03 m
- Hauteur : 0.015 m

❖ Caractéristiques de la poutre :

- La poutre est en acier S235
- De densité : 7800 kg/m^3
- Module d'élasticité : $E = 20500 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0.3$

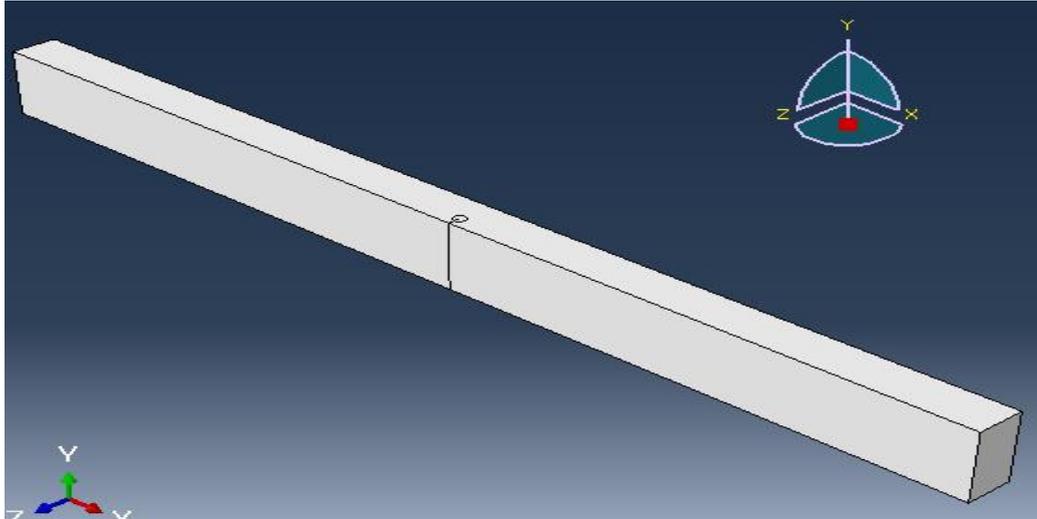


Figure III.1 : Modélisation d'une poutre de flexion trois points

III.3. Conditions aux limites :

Dans notre étude, on fixe la structure (poutre) en trois directions « OX , OY , OZ » ; par l'élimination des mouvements de translation et de rotation dans les deux extrémités de la poutre (position des appuis) et on applique une charge (force), suivant le cas étudié.

Trois cas ont été étudiés dans ce travail :

- **Cas 01 :** Influence de la position d'application de charge (Force constante) par rapport à la fissure (taille de fissure constante).
- **Cas 02 :** Influence de la charge appliquée (taille de la fissure constante et la position d'application de charge constante)
- **Cas 03 :** Influence de la taille de la fissure (Force constante, position d'application constante)

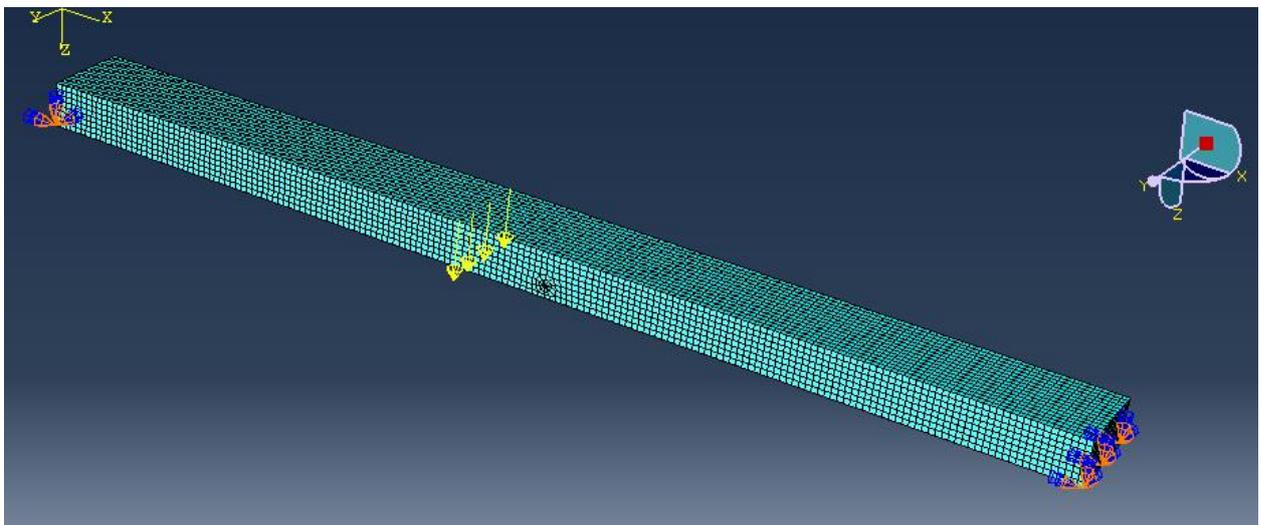


Figure III.2 : La poutre avec les conditions aux limites

III.3. Résultats de la simulation

a. Cas 01 : Influence de la position d'application de charge

Pour visualiser l'influence de la position d'application de charge (Force constante) par rapport au fissure (taille de fissure constante), en termes : du facteur d'intensité de contrainte (KI et KII), des valeurs de contraintes et de dépassements, huit configurations ont été étudiées.

Le tableau suivant représente les huit configurations utilisées :

Distance par rapport au fissure	Charge constante en (N)
$D_1 = 0.175m$	225 N
$D_2 = 0.1575m$	
$D_3 = 0.140m$	
$D_4 = 0.1225m$	
$D_5 = 0.105m$	
$D_6 = 0.0875m$	
$D_7 = 0.070m$	
$D_8 = 0.0525m$	

Tableaux III.1 : Position de la charge appliquée par rapport au fissure

a.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte :

Le tableau III.2 représente l'évolution du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la distance du point d'application de la charge ($F = 250$ N).

Distance	$k_I(P \cdot m^{1/2})$	$k_{II}(P \cdot m^{1/2})$
$D_1 = 0.175m$	403.7	1464.
$D_2 = 0.1575m$	1.6698E+04	1.7945E+04
$D_3 = 0.140m$	3.2913E+04	3.5479E+04
$D_4 = 0.1225m$	6.4591E+04	6.9261E+04
$D_5 = 0.105m$	9.7474E+04	1.6048E+05
$D_6 = 0.0875m$	1.6848E+05	1.5295E+05
$D_7 = 0.070m$	2.3769E+05	2.1594E+05
$D_8 = 0.0525m$	3.2710E+05	3.6287E+05

Tableaux III.2 : Facteurs d'intensité de contrainte en fonction de la position de la force

Les figures III.3 et III.4 représentent les courbes de l'évolution du facteur d'intensité de contrainte en mode I et mode II, en fonction de la position de la charge appliquée pour chaque configuration étudiée. L'analyse de ces résultats montre que l'évolution de FIC en mode I et II est inversement proportionnel par rapport à la position de la charge. Cette diminution peut être expliquée par la diminution du contraint au fond de la fissure (charge appliquée loin du fond la fissure).

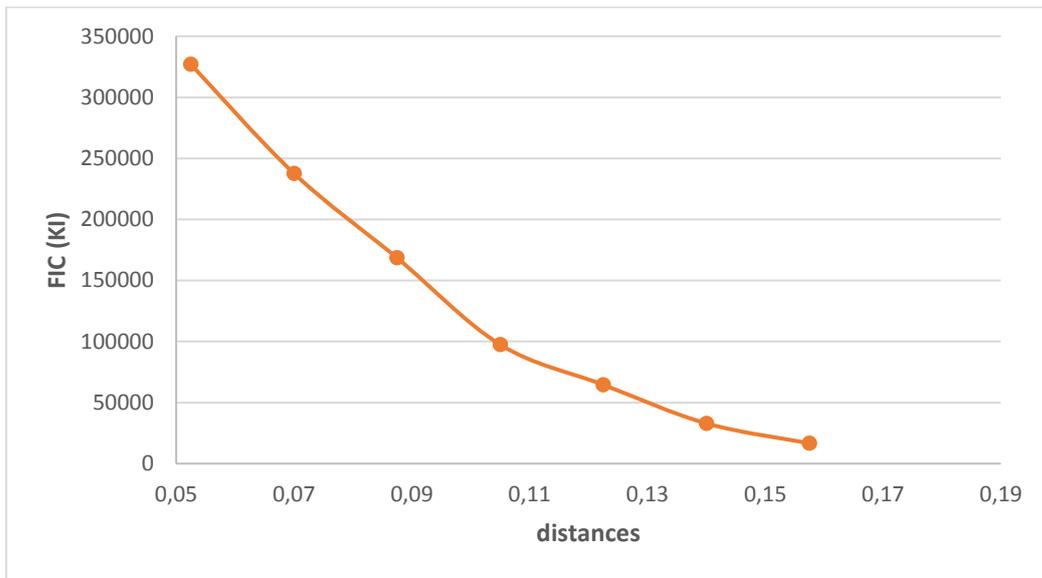


Figure III.3 : Facteur d'intensité en mode I (KI)

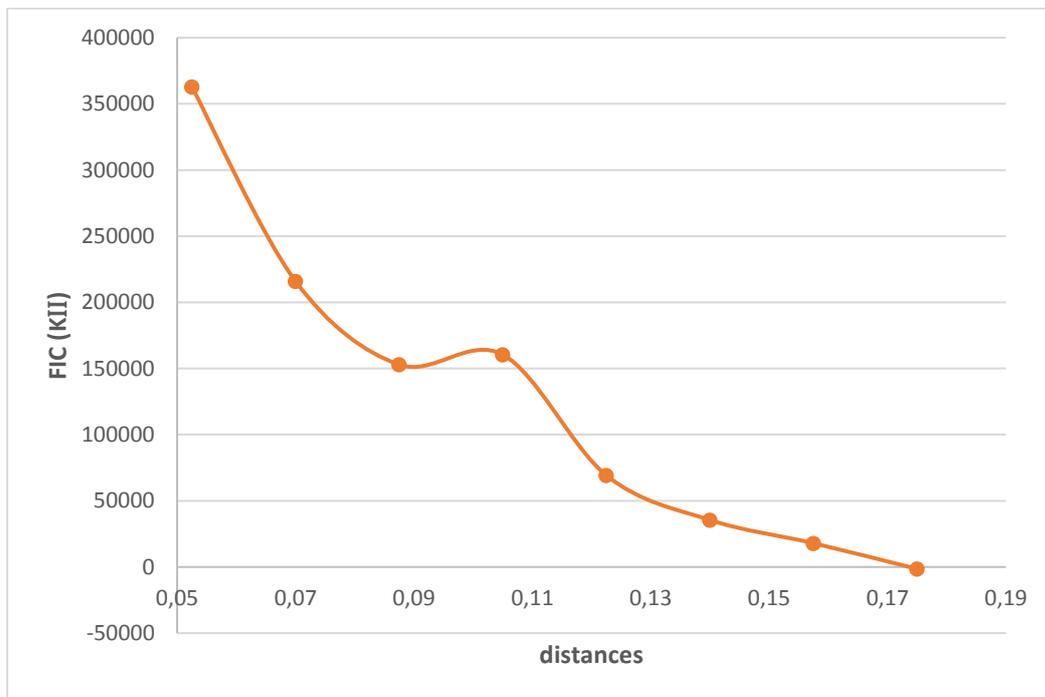


Figure III.4 : Facteur d'intensité en mode II (KII)

a.2. Evolution de la flèche (déplacement maximal) :

Les résultats de la simulation par ABAQUS de l'évolution de la flèche (déplacement maximal) en fonction de la distance d'application de la charge sont représentés dans le tableau suivant :

Distance	D max (m)
D_1	1.12E-1
D_2	1.12E-1
D_3	1.12E-1
D_4	1.11E-1
D_5	1.12 E-1
D_6	1.12E-1
D_7	1.12E-1
D_8	1.12E-1

Tableaux III.3 : Déplacement maximale en fonction de la position de la force

Les figures suivantes représentent le déplacement maximal de la poutre en plusieurs positions différentes. Chaque fois on applique la charge loin de la fissure l'ouverture de la fissure agrandis mais le déplacement maximal ne change pas dans ce cas, il reste constant.

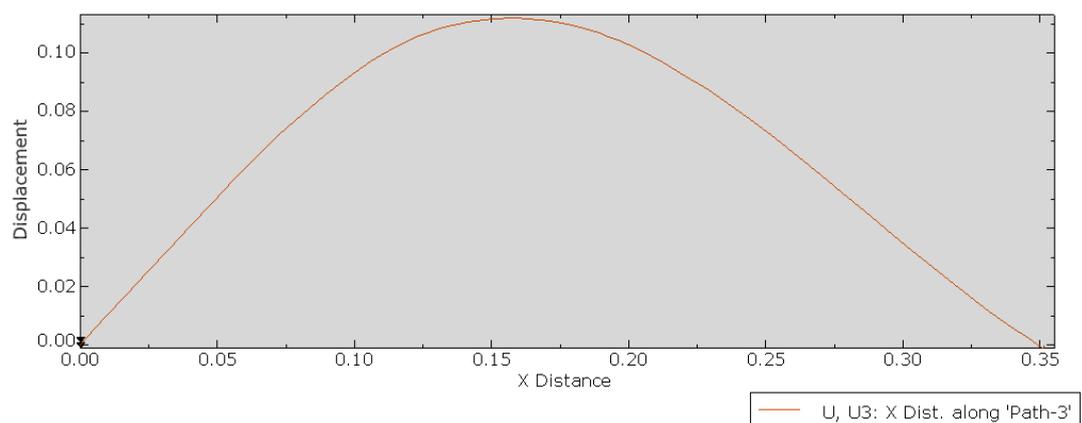


Figure III.5. A : Déplacement maximale de la poutre en fonction de la position d'application de charge D_3 par abaques

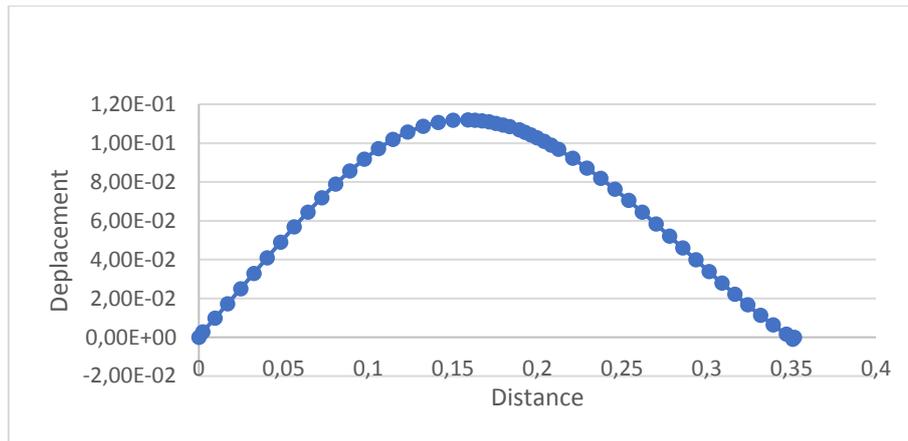


Figure III.5. B : Déplacement maximale de la poutre en fonction de la position d’application de charge D_3 par Excel

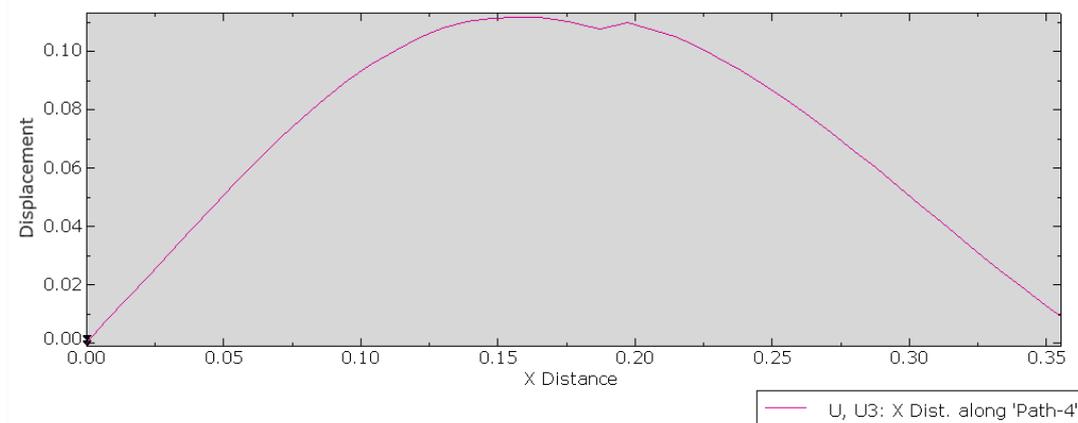


Figure III.6. A : Déplacement maximale de la poutre en fonction de la position d’application de charge D_4 par abaqes

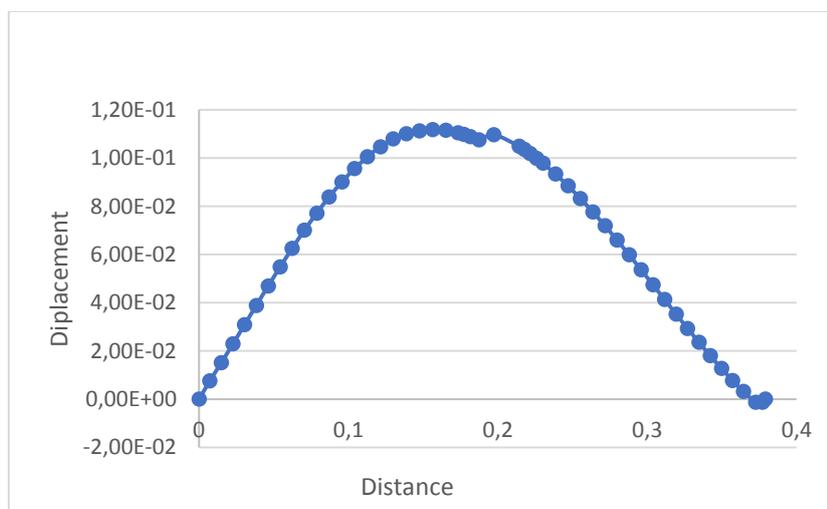


Figure III.6. B : Déplacement maximale de la poutre en fonction de la position d’application de charge D_4 par Excel

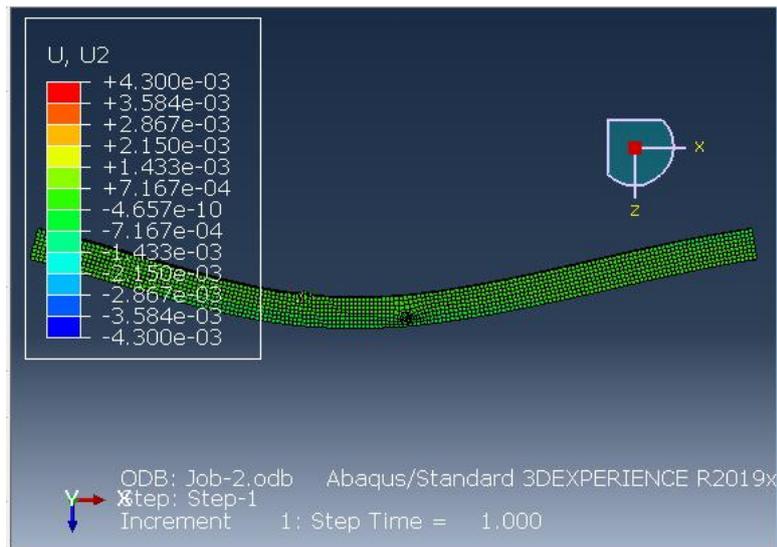


Figure III.7. A : Déformation de la poutre en fonction de la position d'application de charge

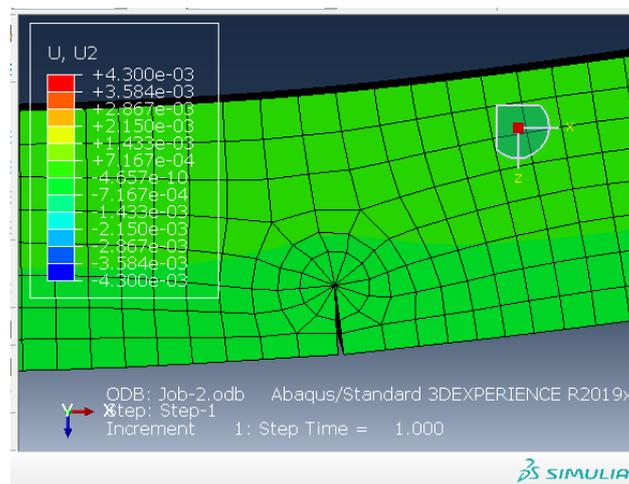


Figure III.7. B : Ouverture de la fissure

a.3. Evolution de la contrainte suivant l'axe OY :

La Figure III.8 permet de visualiser l'évolution de la contrainte suivant l'axe OY. En premier temps, et comme la charge est appliquée à une distance près de la fissure, la contrainte suivant l'axe OY trouve son valeur maximale $3.2E6 Pa$ à la distance **D1** (concentration de contrainte au fond de la fissure). Ensuite, la contrainte commence à diminuer, jusqu'à la valeur $2.2E4 Pa$. L'ouverture de la fissure présente aussi le même comportement. On remarque que la valeur de la première contrainte (à D1) est très importante au niveau du fond de la fissure par rapport aux autres. On constate que la position de la charge a joué un rôle important, sur le comportement de la fissure et par conséquent la résistance de la poutre.

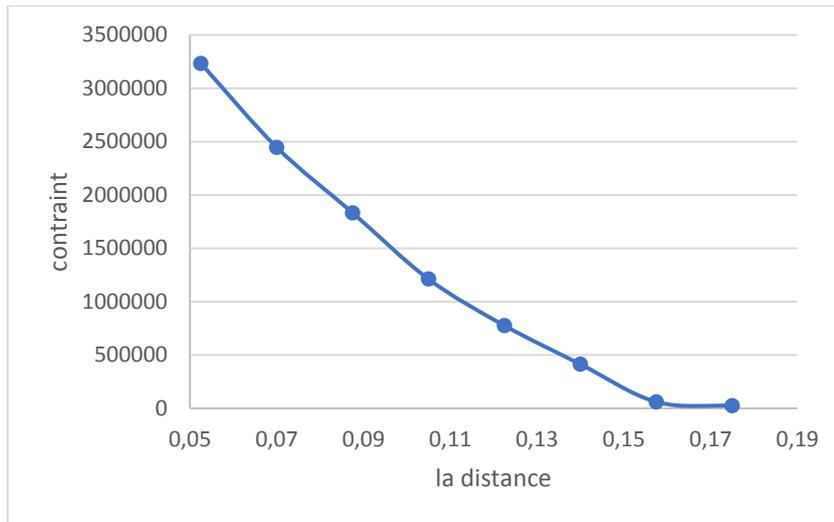


Figure III.8 : Contrainte suivant l’axe OY

b. Cas 02 : Influence de la charge appliquée

Pour visualiser l’influence de la charge appliquée, en termes : du facteur d’intensité de contrainte (KI et KII), des valeurs de contraintes et de dépassements, huit configurations ont été étudiées. Le tableau suivant représente les huit configurations utilisées :

La charge (N)	Distance au fissure
$P_1 = 225N$	0.181 m
$P_2 = 230N$	
$P_3 = 235N$	
$P_4 = 240N$	
$P_5 = 245N$	
$P_6 = 250N$	
$P_7 = 255N$	
$P_8 = 260N$	

Tableaux III.4 : Différentes valeur de la charge appliquée

b.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte :

Le Tableau III.5 représente la variation de KI et de KII en fonction de la charge.

La charge (N)	$k_I(Pa. m^{1/2})$	$k_{II}(Pa. m^{1/2})$
P_1	6.3516E+05	6.3516E+05
P_2	6.3516E+05	9.2861E+05
P_3	6.6339E+05	9.4880E+05
P_4	6.7750E+05	9.6899E+05
P_5	6.9162E+05	9.8917E+05
P_6	7.0573E+05	1.0094E+06
P_7	7.1985E+05	1.0295E+06
P_8	7.3396E+05	1.0497E+06

Tableaux II.5 : facteur d'intensité de contrainte en fonction de la charge

Les Figures III.9 et 10 présentent l'évolution des FIC en mode I et II en fonction de la charge, pour une distance de au fissure constante $D = 0.181$ m, où nous remarquons les valeurs de KI et KII augmente avec l'augmentation de la charge.

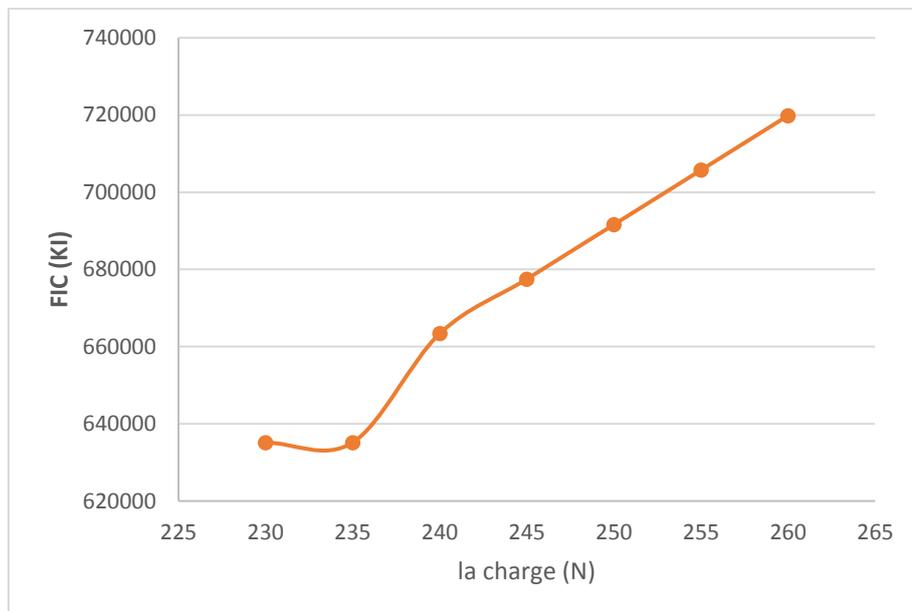


Figure III.9 : facteur d'intensité en mode I (KI)

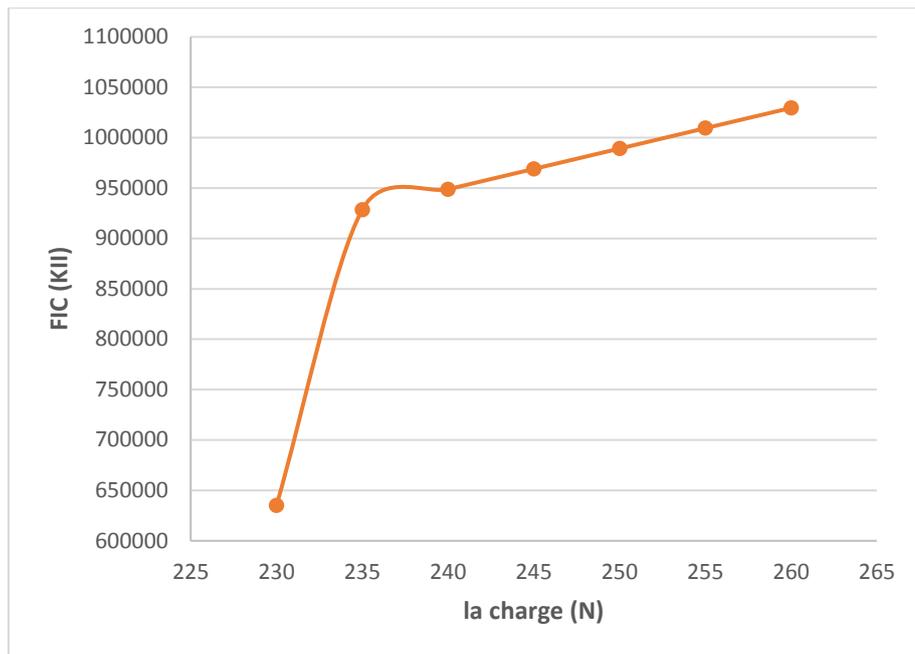


Figure III.10 : facteur d'intensité en mode I (K_I)

b.2. Evolution de la flèche (déplacement maximal) :

Les résultats de la variation du déplacement maximal en fonction de la charge sont représentés dans le Tableau III.6.

La charge (N)	D max (m)
P_1	1.20 E-1
P_2	1.20E-1
P_3	1.23 E-1
P_4	1.25 E-1
P_5	1.28 E-1
P_6	1.33 E-1
P_7	1.36 E-1
P_8	1.38 E-1

Tableaux III.6 : Déplacement maximale en fonction de la position de la charge appliquée

Les figures suivantes représentent le déplacement maximal de la poutre en fonction de la charge appliquée. Les résultats montrent que le déplacement maximal dépend de la valeur de la charge appliquée avec une relation proportionnelle, plus la valeur de la charge appliquée est grande, plus la déformation et le déplacement maximal de la poutre sont grand.

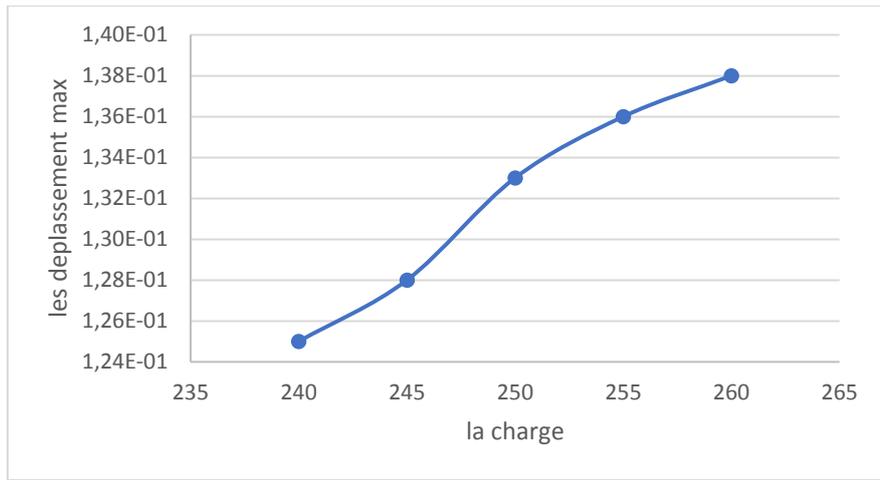


Figure III.11 : le déplacement maximal

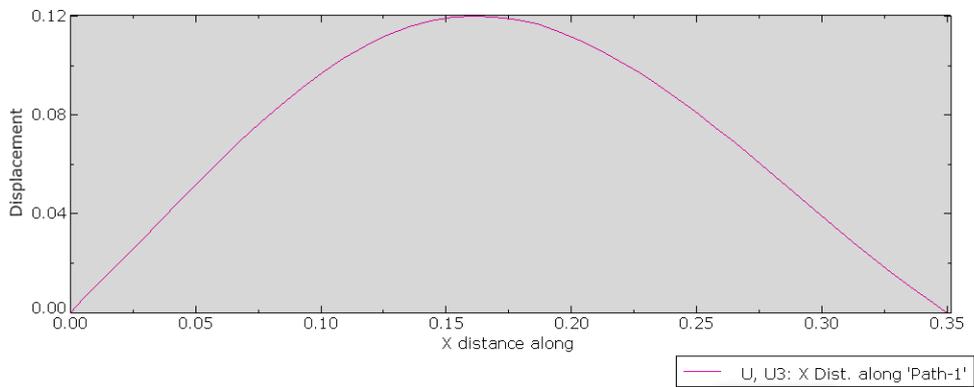


Figure III.12. A : Déplacement maximale de la poutre, Influence de la charge applique P_1 Par abaques

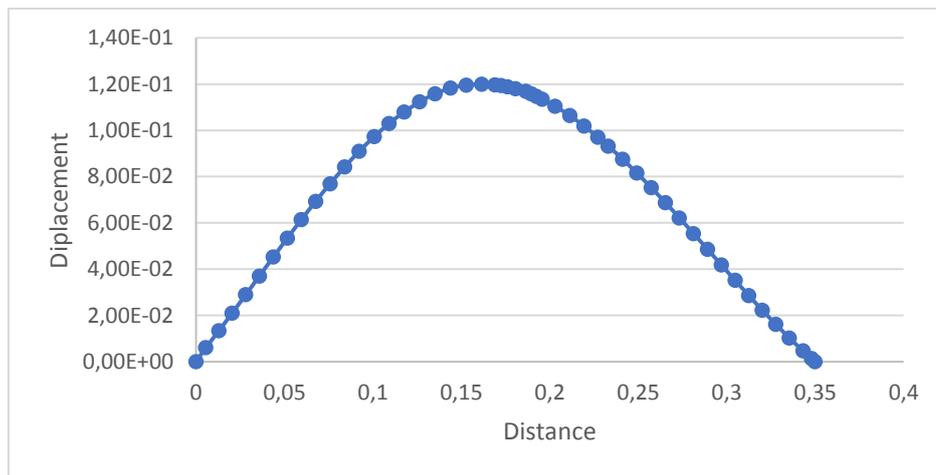


Figure III.12. B : Déplacement maximale de la poutre, Influence de la charge applique P_1 Par EXCEL

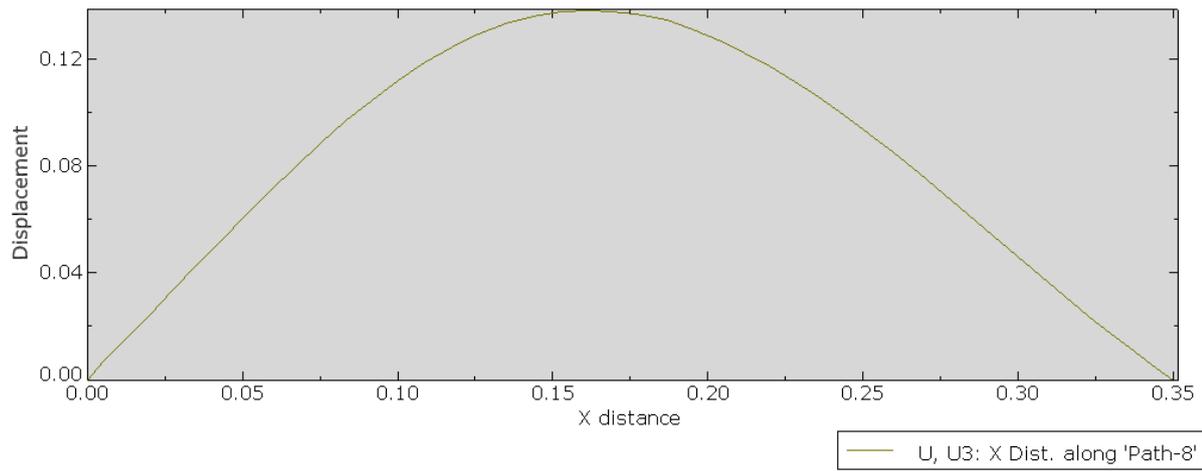


Figure III.13. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge applique P_8 Par abaques

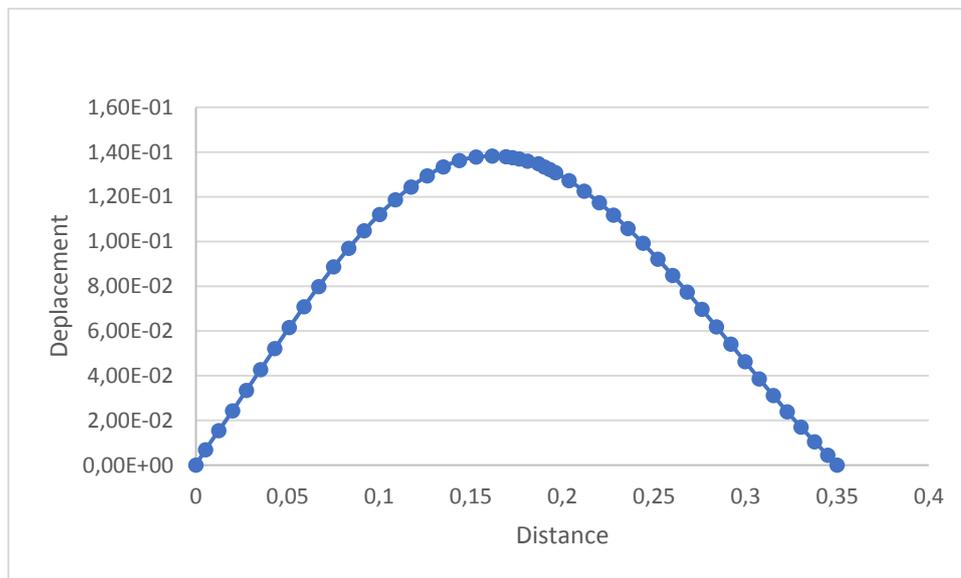


Figure III.13. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge applique P_8 Par EXCEL

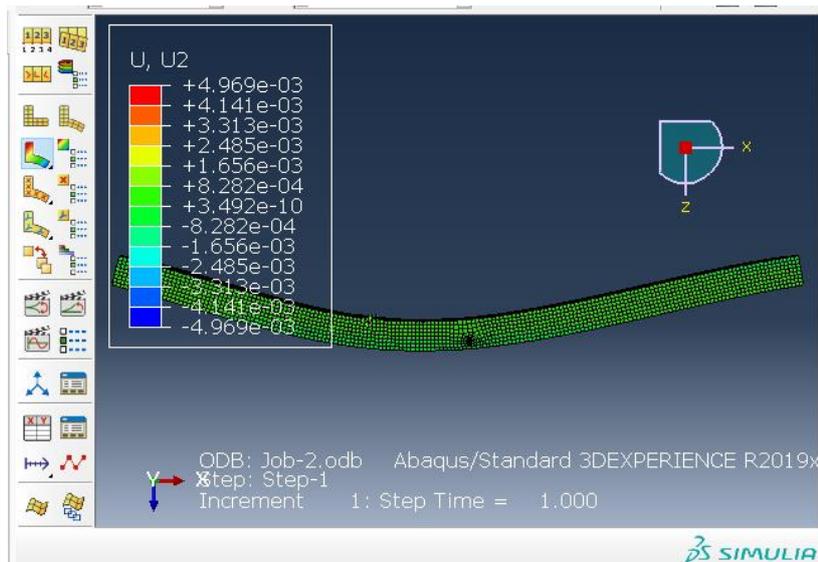


Figure III.14. A : Déformation de la poutre Influence de la charge applique

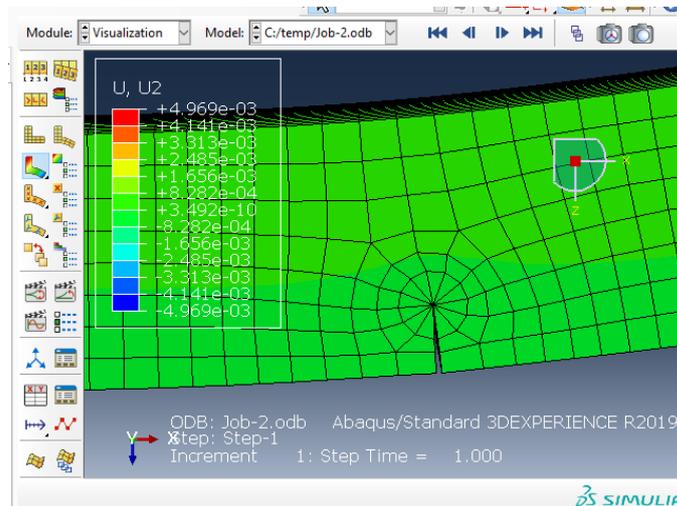


Figure III.14. B : Ouverture de la fissure

b.3. Evolution de la contrainte suivant l'axe OY :

La figure suivante permet de visualiser l'évolution de la contrainte suivant l'axe OY, en fonction de la charge appliquée. On remarque que la contrainte augmente proportionnellement avec l'augmentation de la charge appliquée.

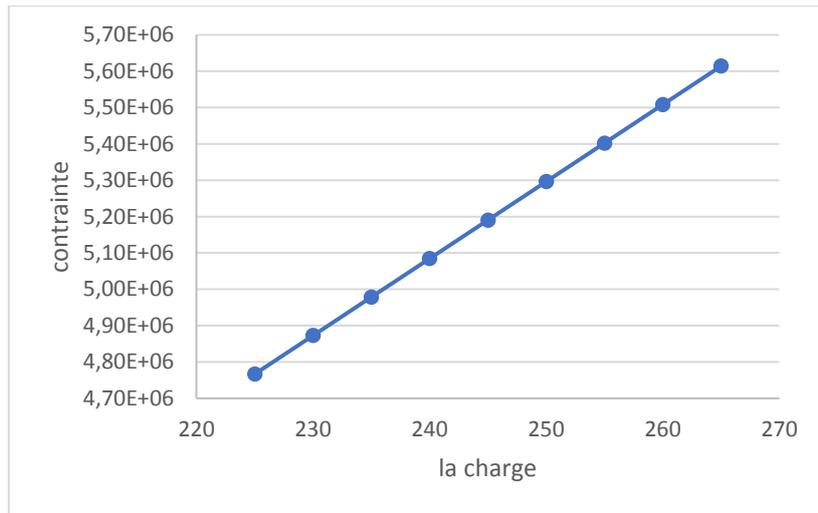


Figure III.15 : la contrainte suivant l’axe OY

c. Cas 03 : Influence de la taille de la fissure

Pour visualiser l’influence de la taille de la fissure (charge constante appliquée au milieu de la poutre), en termes : du facteur d’intensité de contrainte (KI et KII), des valeurs de contraintes et de dépassements, huit configurations ont été étudiées. Le tableau suivant représente les huit configurations utilisées :

La taille de la fissure (m)	Charge constante en (N)
$a_1 = 0.004 \text{ m}$	225 N
$a_2 = 0.0045 \text{ m}$	
$a_3 = 0.005 \text{ m}$	
$a_4 = 0.0055 \text{ m}$	
$a_5 = 0.006 \text{ m}$	
$a_6 = 0.0065 \text{ m}$	
$a_7 = 0.007 \text{ m}$	
$a_8 = 0.0075 \text{ m}$	

Tableaux III.7 : Différent valeur de la taille de la fissure

c.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte :

Le Tableau III.8 représente la variation de KI et de KII en fonction de la taille de fissure.

Distance	$k_I(Pa. m^{1/2})$	$k_{II}(Pa. m^{1/2})$
a_1	6.3516E+05	6.3516E+05
a_2	6.3147E+05	7.0910E+05
a_3	8.0336E+05	7.8147E+05
a_4	8.0016E+05	7.8420E+05
a_5	8.9153E+05	8.3362E+05
a_6	8.8811E+05	8.3678E+05
a_7	9.3183E+05	8.9043E+05
a_8	9.2824E+05	8.9404E+05

Tableaux III.8 : Facteur d'intensité de contrainte en fonction de la taille de la fissure

La Figure III.16 trace l'évolution du FIC en mode I en fonction de la taille de fissure, pour une charge constante appliquée au milieu de la poutre de valeur $F = 225 N$, où nous remarquons la valeur du KI augmente, à cause de l'ouverture de fissure (augmentation de la taille de fissure).

La Figure III.17 représente la variation de KII en fonction de la taille de fissure. On remarque que, quand la taille de fissure augmente la valeur de KII diminue, cette diminution est due en raison de la diminution de glissement entre les surfaces de fissure dans la partie inférieure de la poutre.

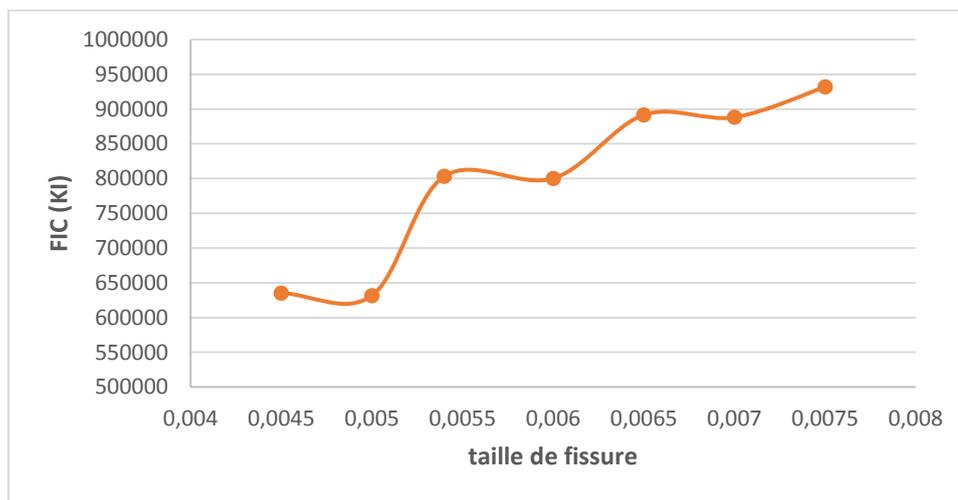


Figure III.16 : facteur d'intensité de contrainte en mode I (KI)

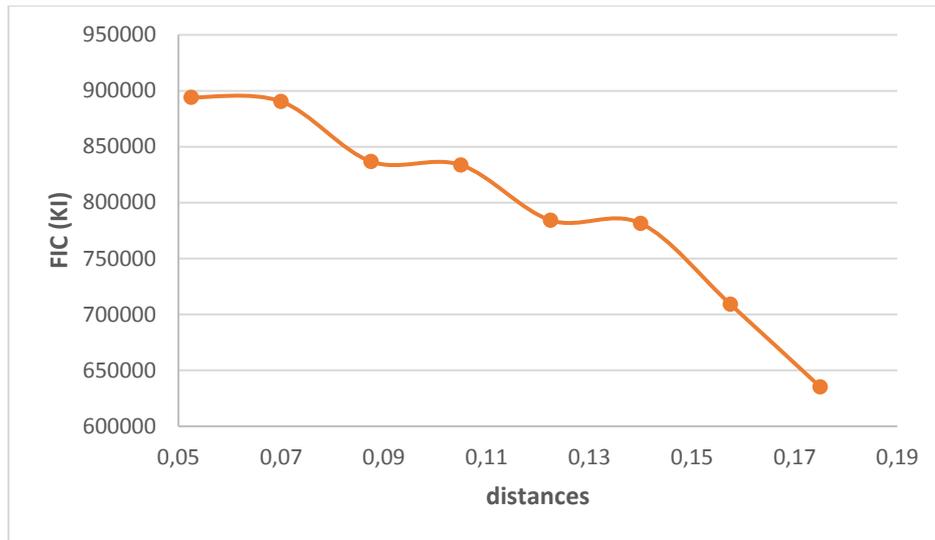


Figure III.17 : facteur d'intensité de contrainte en mode II (KII)

c.2. Evolution de la flèche (déplacement maximal) :

Les résultats de la variation du déplacement maximal en fonction de la taille de fissure sont représentés dans le Tableau III.9.

La taille de la fissure (m)	D max (m)
a_1	1.12 E-1
a_2	1.12 E-1
a_3	1.12 E-1
a_4	1.12 E-1
a_5	1.15 E-1
a_6	1.15 E-1
a_7	1.16 E-1
a_8	1.16 E-1

TABLEAU III.9 : Déplacement maximale en fonction de la taille de la fissure

Les figures suivantes représentent le déplacement maximal de la poutre en fonction de la taille de la fissure. On remarque que la courbe augmente légèrement et proportionnellement avec l'augmentation de la taille de fissure.

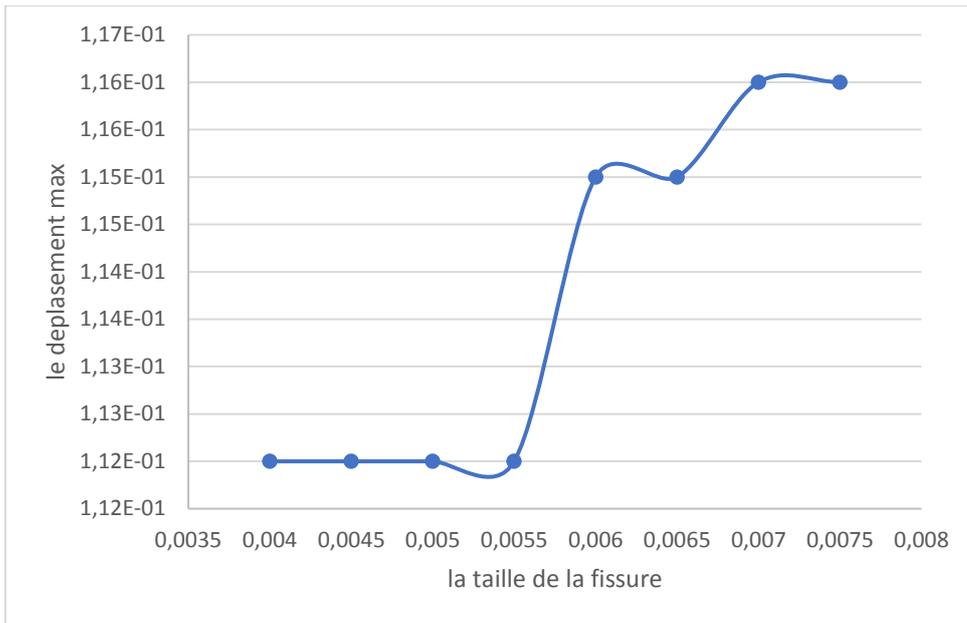


Figure III.18 : le déplacement maximal

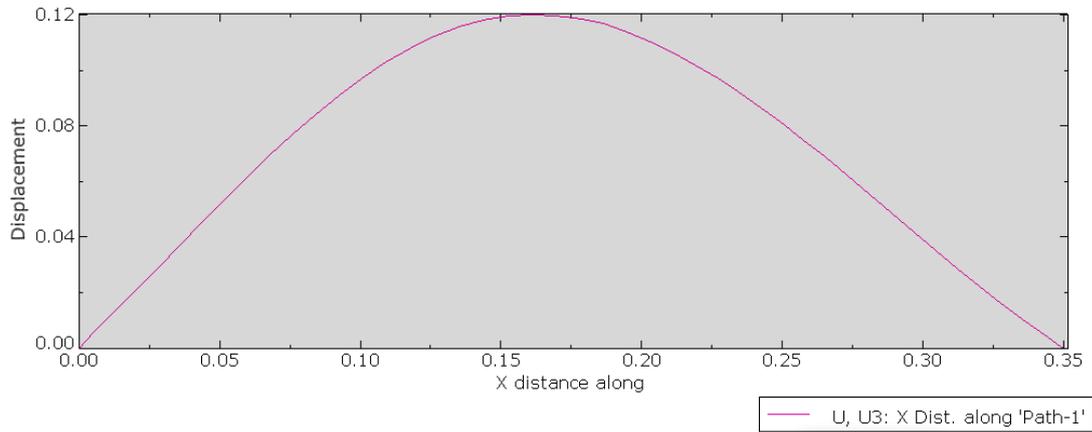


Figure III.19. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure

a_1 Par abaques

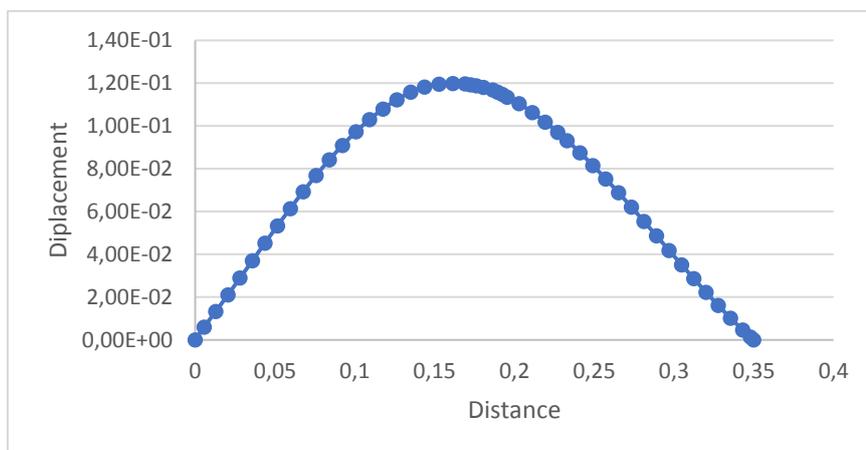


Figure III.19. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure

a_1 Par EXCEL

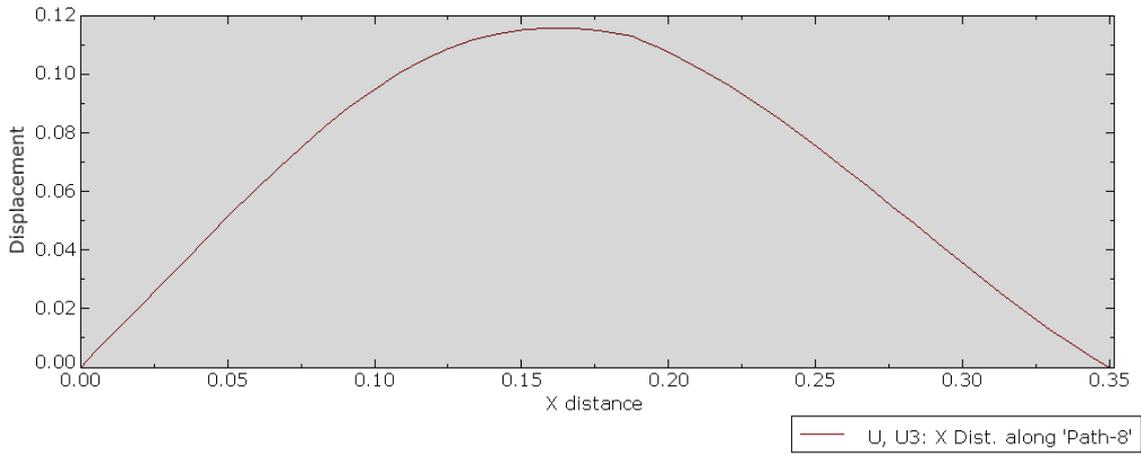


Figure III.20. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_8 Par abaques

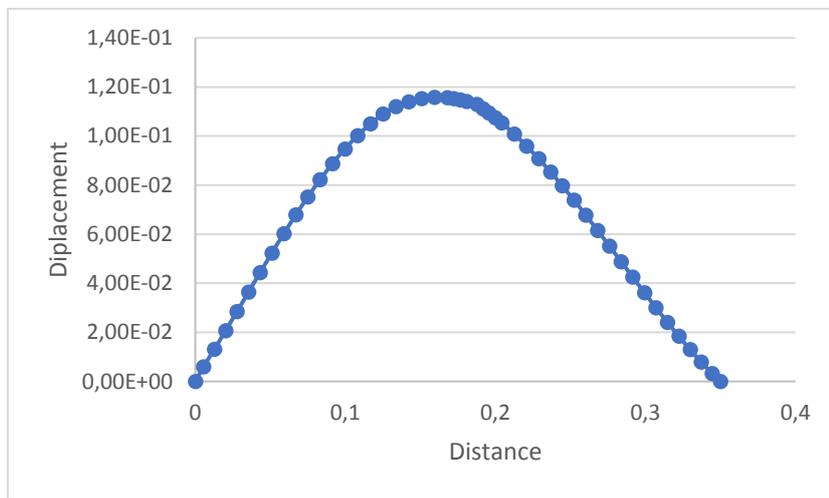


Figure III.20. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_8 Par EXCEL

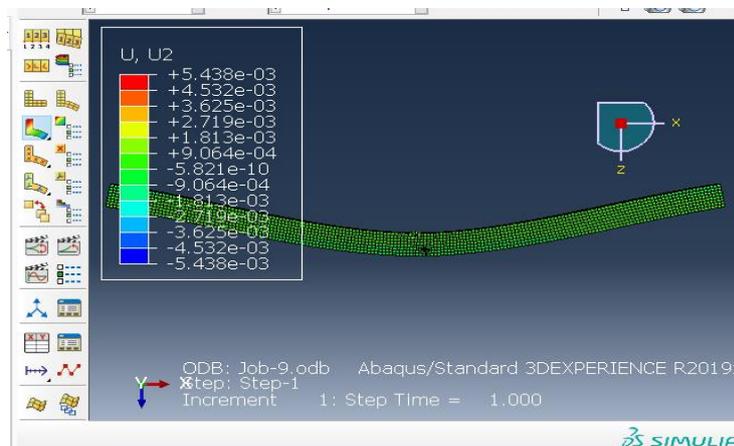


Figure III.21. A : Déformation de la poutre Influence de la taille de la fissure

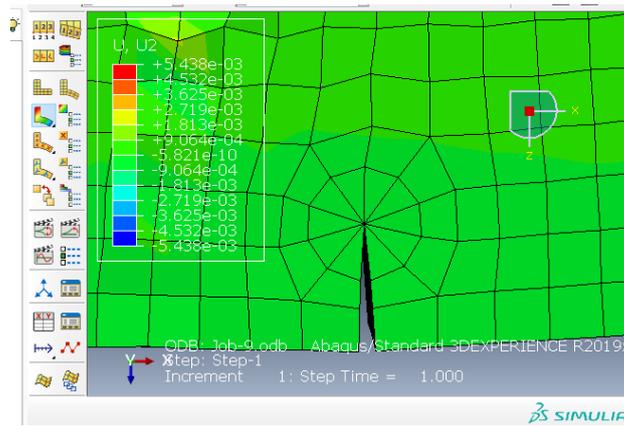


Figure III.21. B : l’ouverture de la taille de la fissure

c.3. Evolution de la contrainte suivant l’axe OY :

Les résultats de la simulation numérique de l’évolution de la contrainte suivant l’axe OY, en fonction de la taille de la fissure sont tracés sur la figure III.22. On observe l’augmentation de la contrainte en fonction de la taille de fissure, qui résulte de la concentration de contrainte au fond de fissure

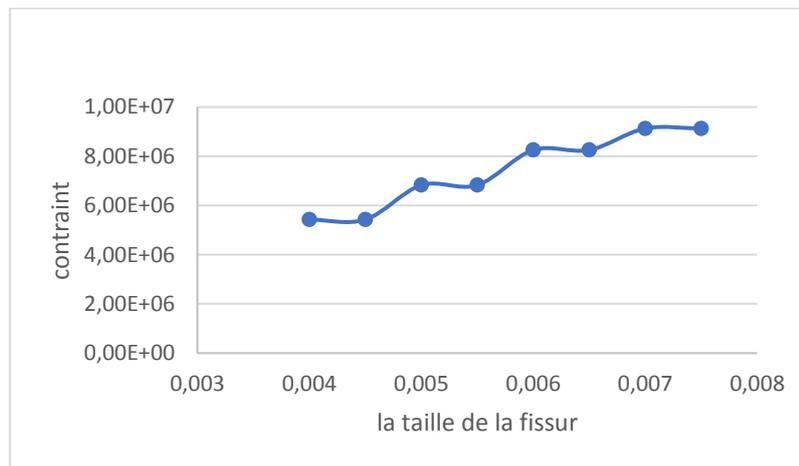


Figure III.22 : Contrainte suivant l’axe OY

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudiées les paramètres k_I , k_{II} , D , et σ en fonction de la position de la charge, de la valeur de la charge et de la taille de la fissure.

A partir des résultats trouvés on peut conclure :

- ✓ L'évolution de FIC en mode I et II est inversement proportionnelle par rapport à la position de la charge appliquée
- ✓ Le comportement de la poutre en termes de déplacement maximal est très remarquable au niveau de la fissure.
- ✓ La position de la charge appliquée joue un rôle très important, sur la résistance de la poutre.
- ✓ Plus la taille de la fissure est grande ; plus la déformation et le déplacement maximal de la poutre sont grands.
- ✓ Le facteur d'intensité de contrainte en mode I dépend de la taille de fissure avec une relation proportionnelle, qui affecte l'ouverture de la fissure.
- ✓ La force appliquée sur la poutre affecte la contrainte suivant l'axe OY, en approchant plus du front de fissure.

Chapitre IV

Simulation et calcul numérique : Flexion 4 Points

IV.1. Introduction

Dans ce quatrième chapitre nous étudions le comportement d'une poutre près fissurée, chargé en flexion quatre points. Les évolutions des facteurs d'intensité de contrainte, de déplacement maximal (flèche) et de la contrainte suivant l'axe OY, ont été traités en fonction de la position d'application de la charge, de la taille de fissure et de la valeur de charge.

IV.2. Dimensionnement et caractéristiques de la poutre

Pour notre simulation, on utilise les mêmes caractéristiques et les mêmes dimensions de la poutre du chapitre précédent (chapitre III).

IV.3. Conditions aux limites

Dans ce chapitre, on élimine tous les degrés de liberté suivant les directions « OX, OY, OZ » ; par l'élimination des mouvements de translation et de rotation dans les deux extrémités de la poutre (position des appuis) et on applique une charge (force) sur les deux cotées de la poutre (deux charges, appliqué symétriquement), suivant le cas étudié.

Trois cas ont été étudiés :

- **Cas 01** : Influence de la position d'application de charge (Force constante) par rapport à la fissure (taille de fissure constante).
- **Cas 02** : Influence de la charge (la taille de la fissure constante, la position d'application de charge constante)
- **Cas 03** : Influence de la taille de la fissure (Force constante)

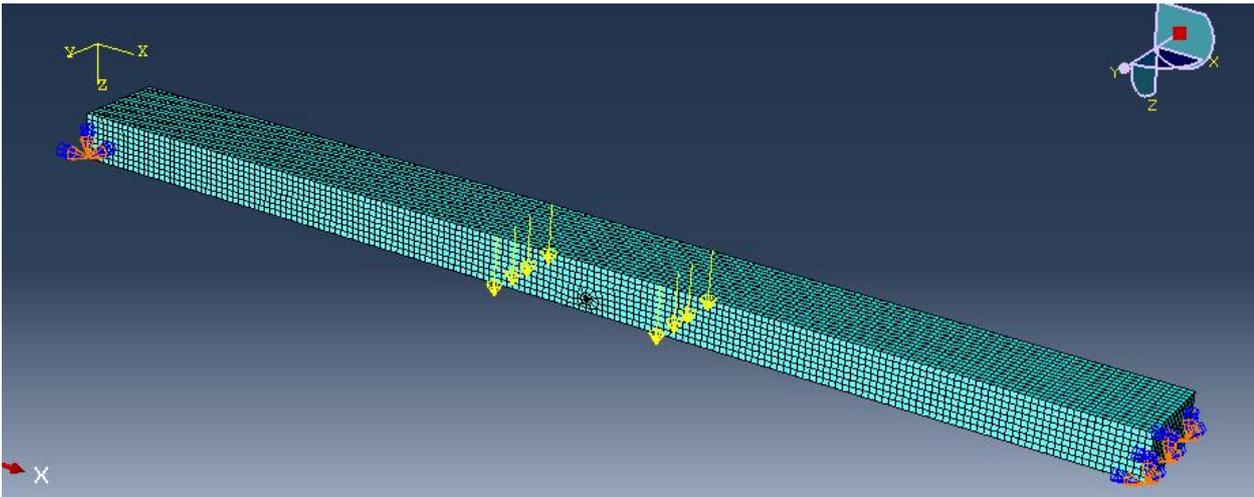


Figure IV.1 : Poutre avec les conditions aux limites

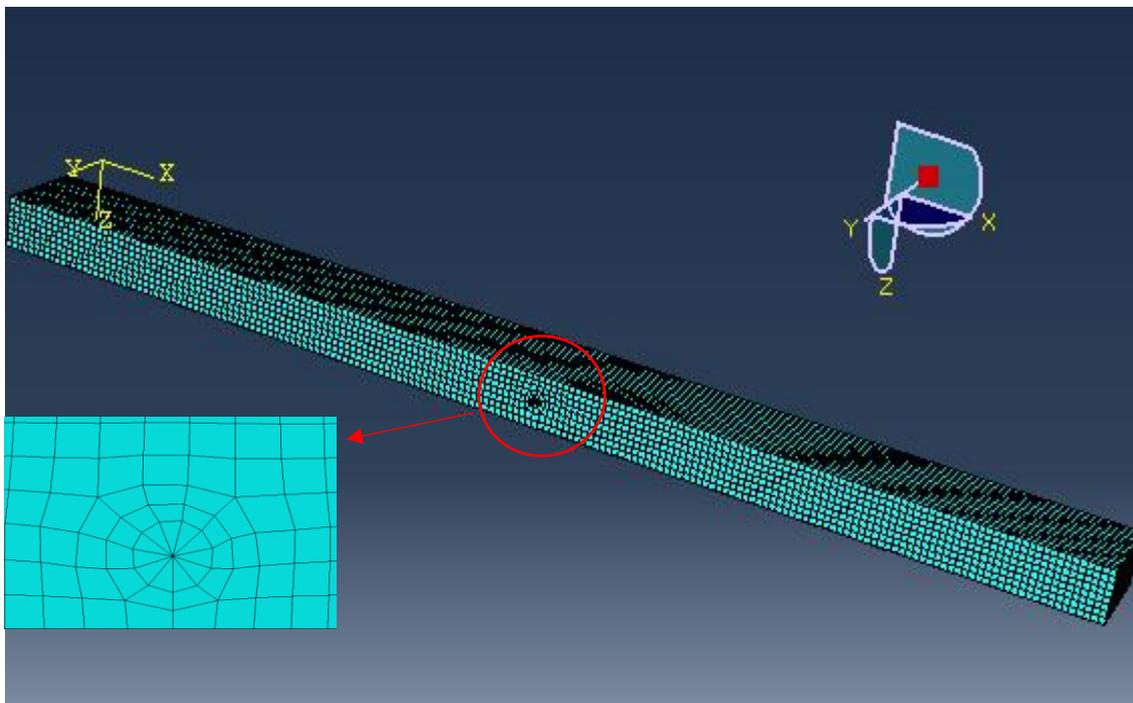


Figure IV.2 : Modélisation d'une poutre de flexion quatre points

IV.3. Résultats de la simulation

a. Cas 01 : Influence de la position d'application de charge par rapport au fissure

Pour étudier l'influence de la distance d'application de la charge, par rapport au fissure (taille de fissure constante), en termes : du facteur d'intensité de contrainte, des valeurs de contraintes et de déplacement maximal, huit configurations de la position de la charge appliquée ont été étudiées.

Le tableau suivant représente les huit configurations utilisées :

Distance par a porette de la fissure	Charge constante en (N)
$D_1 = [192.5 - 157]mm$	225 N
$D_2 = [210 - 140]mm$	
$D_3 = [227.5-122.5]mm$	
$D_4 = [245 - 105]mm$	
$D_5 = [262.5 - 87.5]mm$	
$D_6 = [280 - 70]mm$	
$D_7 = [297.5 - 52.5]mm$	
$D_8 = [315 - 35]mm$	

Tableaux IV.1 : Les différentes distances

a.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte

Les résultats de l'évolution du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la distance d'application de charge sont récapitulés dans le tableau IV.2.

Distance	$k_I(P.m^{1/2})$	$k_{II}(P.m^{1/2})$
$D_1 = [192.5 - 157]mm$	1.0214E+06	8.6014E+05
$D_2 = [210 - 140]mm$	8.0618E+05	6.2379E+05
$D_3 = [227.5-122.5]mm$	6.4643E+05	5.4030E+05
$D_4 = [245 - 105]mm$	4.6975E+05	5.0931E+05
$D_5 = [262.5 - 87.5]mm$	3.3979E+05	4.6169E+05
$D_6 = [280 - 70]mm$	2.3932E+05	1.8648E+05
$D_7 = [297.5 - 52.5]mm$	1.3285E+05	1.6638E+05
$D_8 = [315 - 35]mm$	7.3273E+04	5.8104E+04

Tableaux IV.2 : Facteur d'intensité de contrainte en fonction des positions de la force

Les figures VI.3 et VI.4 présentent l'évolution du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la distance d'application de la charge. Le FIC en mode I et en mode II présente un comportement

décroissant, en commence par la plus grande valeur (charge appliquée près de la fissure) $1.0214E+06$ et $8.6014E+05 Pa.m/2$ successivement pour le mode I et II, jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur $7.3273E+04$ et $5.8104E+04 Pa.m/2$ (charge appliquée loin de la fissure) successivement pour le mode I et II. La baisse des valeurs du FIC, est due au position d'application de la charge, car elle affecte relativement l'ouverture de la fissure, celle-ci réduite progressivement à chaque fois qu'on applique la charge plus loin (diminution de la contrainte au fond de la fissure).

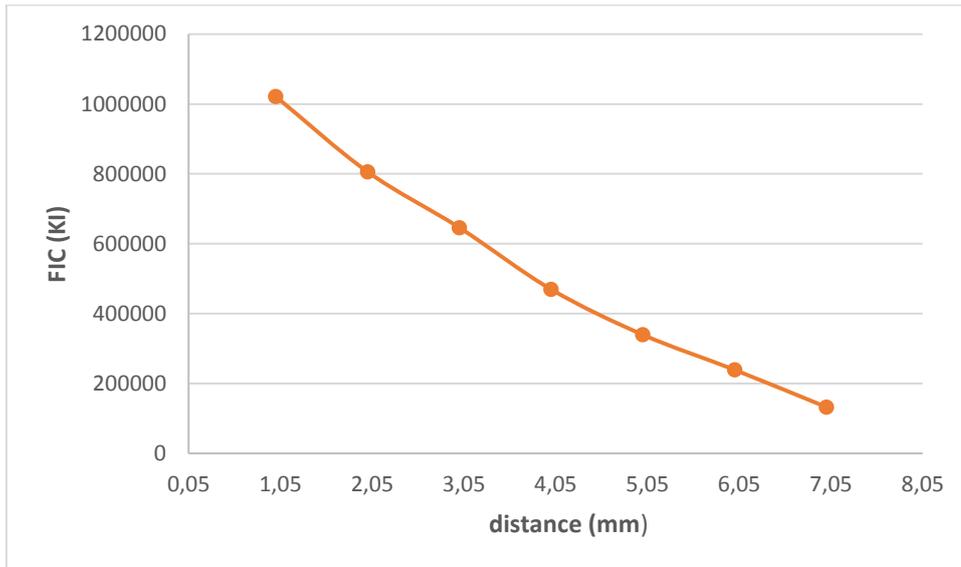


Figure IV.3 : facteur d'intensité en mode I (K_I)

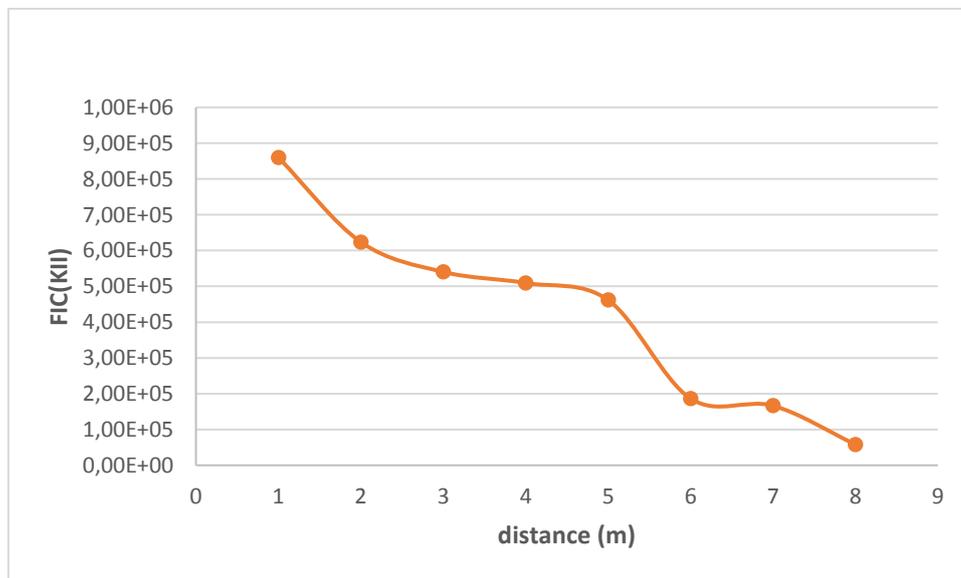


Figure IV.4 : facteur d'intensité en mode II (K_{II})

a.2. Evolution de la flèche (déplacement maximal)

Les résultats représentés dans le tableau IV.3 expose l'évolution de la flèche (déplacement maximal) en fonction de la distance d'application de la charge ($F = 225\text{ N}$).

Distance	D max (m)
D_1	5.62 E-2
D_2	8.93 E-2
D_3	1.23 E-1
D_4	1.55 E-1
D_5	1.86 E-1
D_6	2.12 E-1
D_7	2.33 E-1
D_8	2.40 E-1

Tableaux IV.3 : Déplacement maximal en fonction des positions de la force

Les figures suivantes représentent le déplacement maximal de la poutre (flexion 4 point) en plusieurs positions différentes. L'évolution du déplacement maximal de la poutre est proportionnelle par rapport à la position de la charge, comme montre la figure.

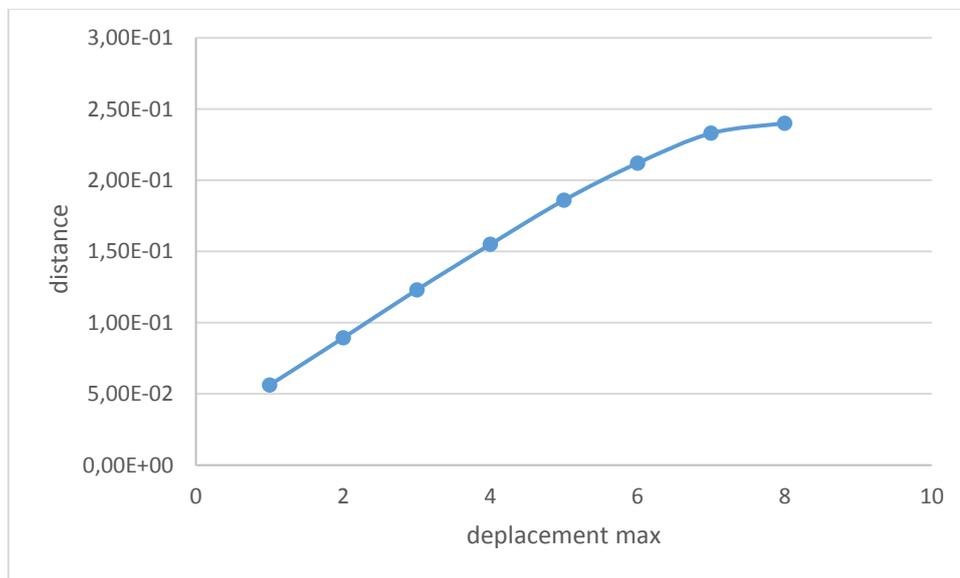


Figure IV.5 : Déplacement maximale

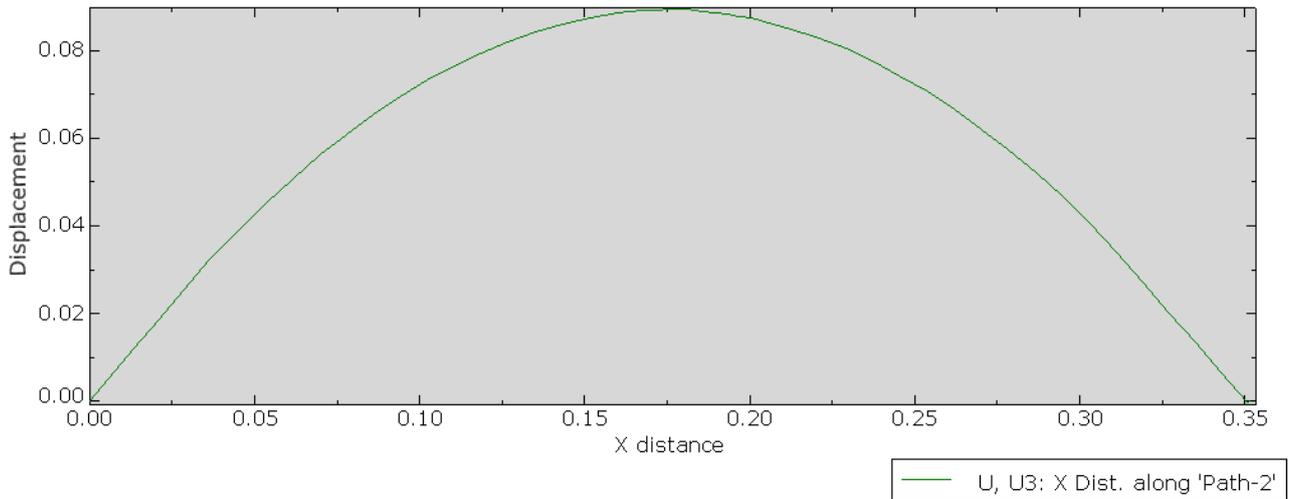


Figure IV.6. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d’application de charge D_2 par abaques

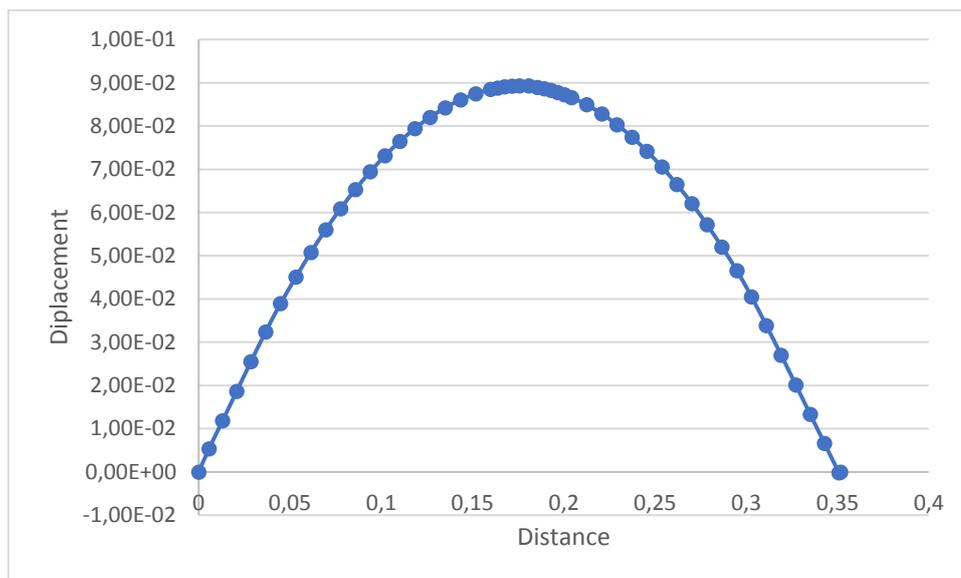


Figure IV.6. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d’application de charge D_2 par Excel

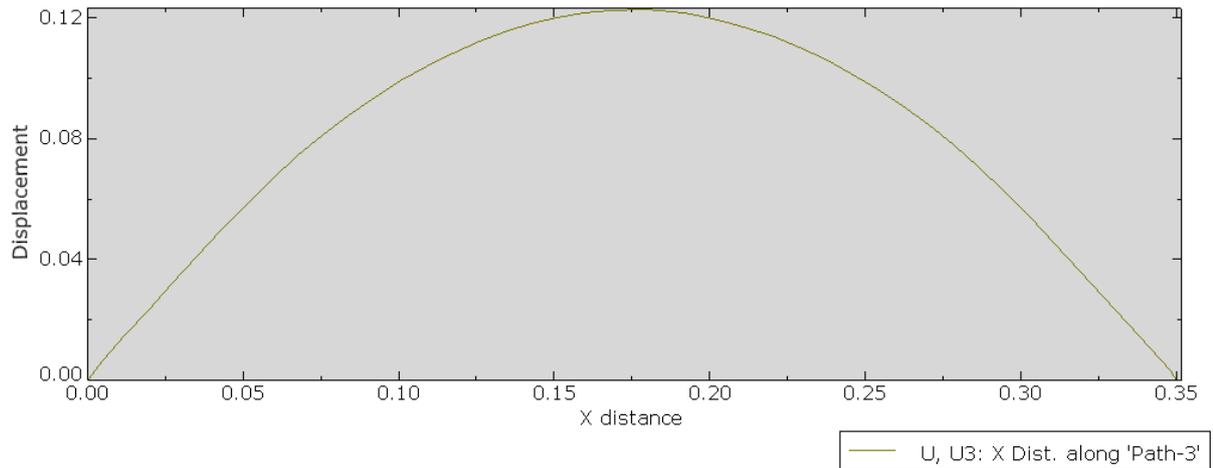


Figure IV.7.A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d’application de charge D_3 par abaques

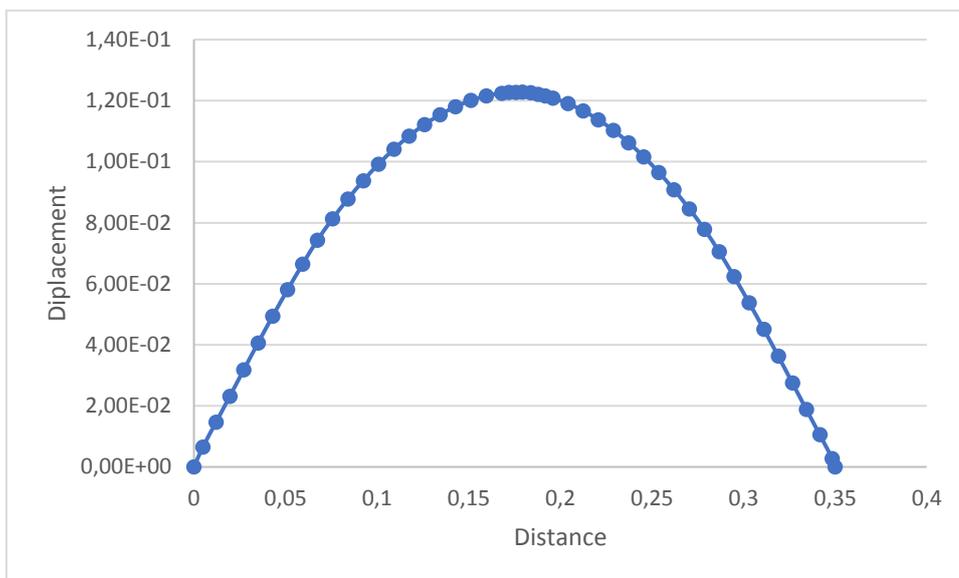


Figure IV.7.B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la position d’application de charge D_3 par Excel

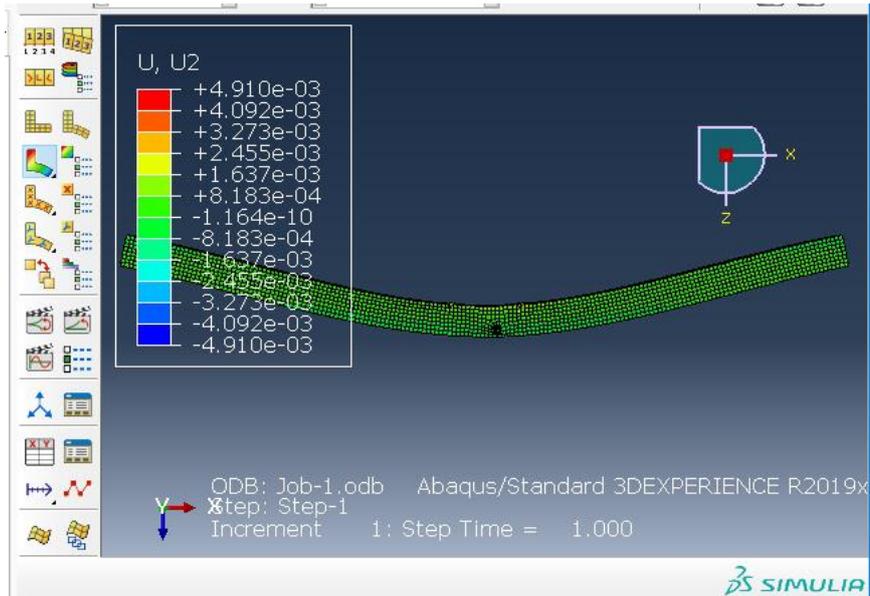


Figure IV.8. A : Déformation de la poutre Influence de la position d’application de charge

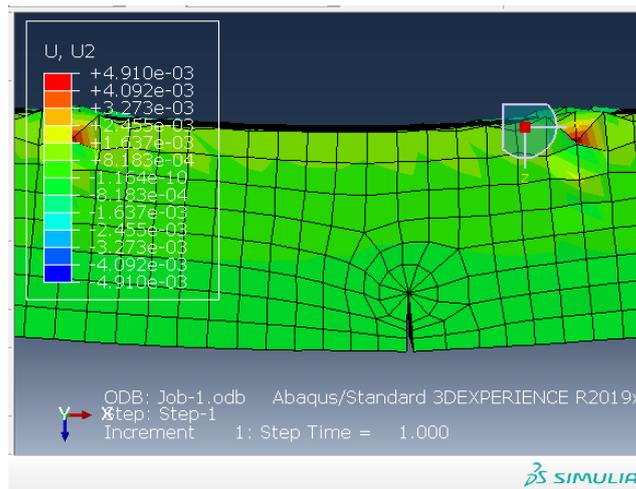


Figure IV.8. B : L’ouverture de la fissure

a. 3. Evolution de la contrainte suivant l’axe OY :

Les figures VI.9 représente l’évolution de la contrainte suivant l’axe OY en pointe de fissure, en fonction de la distance d’application de la charge. On remarque clairement, que la contrainte suivant l’axe OY est diminuée progressivement avec la distance.

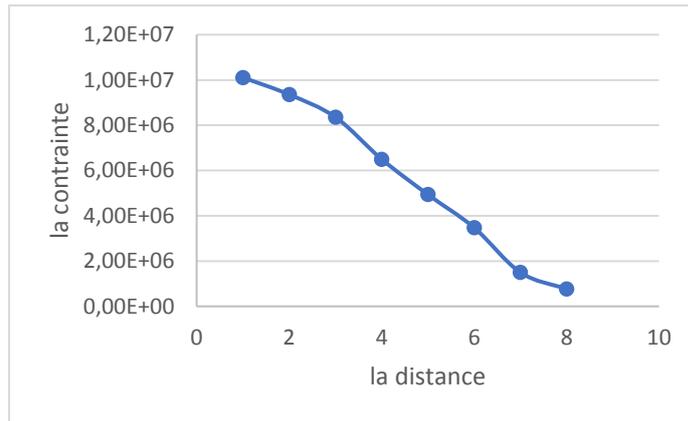


Figure IV.9 : Contrainte suivant l’axe OY

b. Cas 02 : Influence de la charge applique

Pour visualiser l’influence de la charge appliquée, en termes : du facteur d’intensité de contrainte (KI et KII), des valeurs de contraintes et de déplacements, 8 configurations ont été étudiées.

Le tableau suivant représente les 8 configurations utilisées :

La charge (N)	Distance de la fissure
$P_1 = 225 \text{ N}$	0.181 m
$P_2 = 230 \text{ N}$	
$P_3 = 235 \text{ N}$	
$P_4 = 240 \text{ N}$	
$P_5 = 245 \text{ N}$	
$P_6 = 250 \text{ N}$	
$P_7 = 255 \text{ N}$	
$P_8 = 260 \text{ N}$	

Tableaux IV.5 : les différentes charges

IV.3. b.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte

Le Tableau. IV.6 représente la variation de KI et de KII en fonction de la charge.

La charge (N)	$k_I(Pa.m^{1/2})$	$k_{II}(Pa.m^{1/2})$
P_1	8.3436E+05	5.8278E+05
P_2	8.5290E+05	5.9573E+05
P_3	8.7144E+05	6.0868E+05
P_4	8.8998E+05	6.2163E+05
P_5	9.0852E+05	6.3458E+05
P_6	9.2706E+05	6.4753E+05
P_7	9.4560E+05	6.6048E+05
P_8	9.6414E+05	6.7343E+05

Tableaux IV.6 facteurs d'intensité de contrainte en fonction de la charge

La figure IV.10 et IV.11 présentent l'évolution du facteur d'intensité de contrainte en fonction de la charge. Le FIC en mode I et mode II présente une augmentation proportionnelle avec l'augmentation de la charge appliquée.

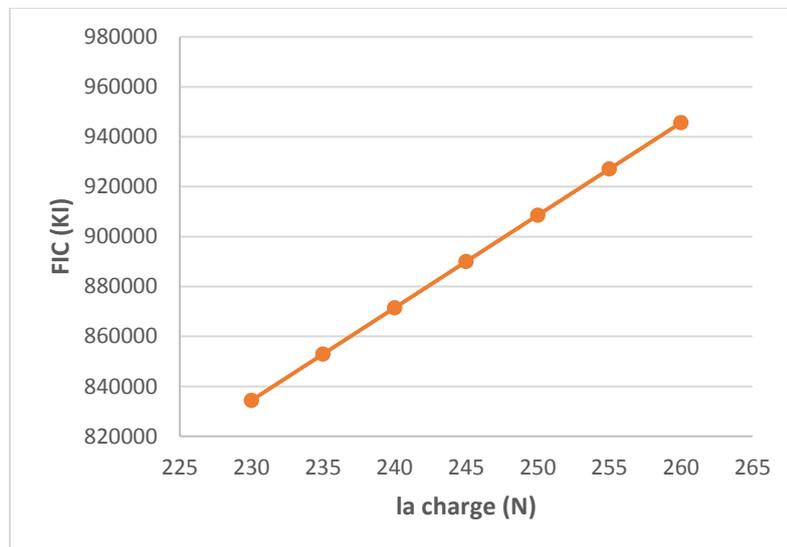


Figure IV.10 : facteur d'intensité de contrainte en mode I (KI)

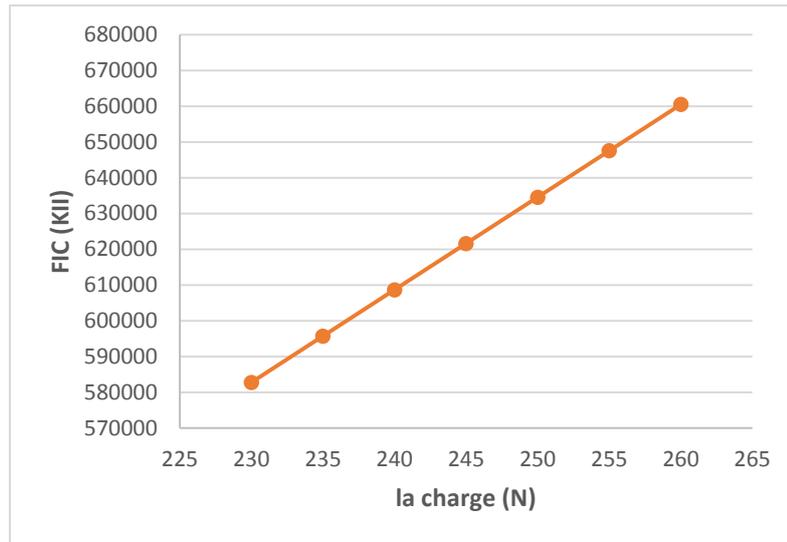


Figure IV.11 : facteur d'intensité de contrainte en mode II (K_{II})

b. 2. Evolution de la flèche (déplacement maximal)

Les résultats de la variation du déplacement maximal en fonction de la charge sont représentés dans le Tableau VI.7.

La charge (N)	D max (m)
P_1	1.33 E-1
P_2	2.53 E-1
P_3	2.58 E-1
P_4	1.17 E-1
P_5	2.70 E-1
P_6	2.79 E-1
P_7	2.81 E-1
P_8	2.86 E-1

Tableaux IV.7 : Déplacements maximums en fonction des tailles de fissure

Les figures suivantes représentent le déplacement maximal de la poutre (flexion 4 point) en fonction de plusieurs valeurs de charge appliquée. En termes de déplacement maximal (Flèche), il est clair d'après la figure IV.13, que la poutre présente un comportement proportionnelle avec la charge appliquée.

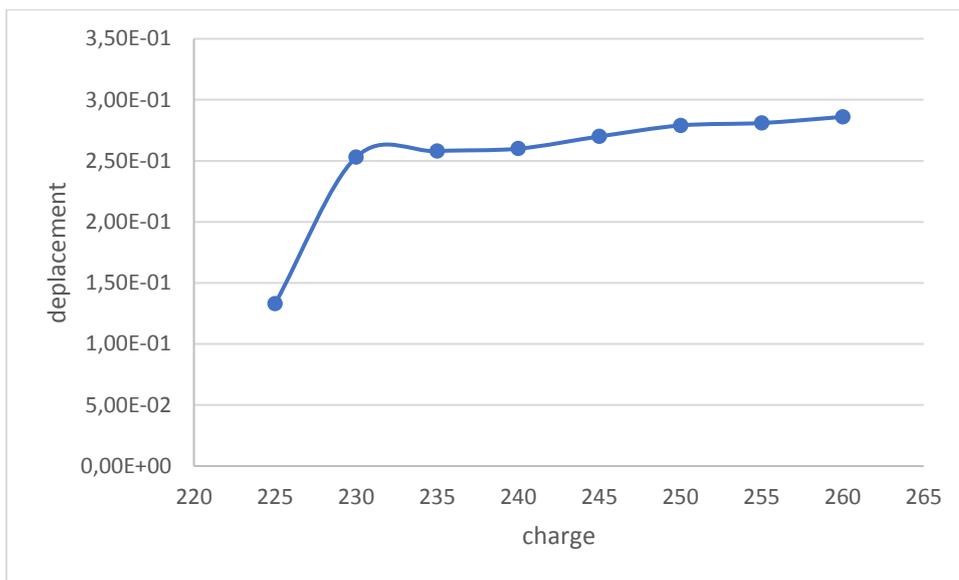


Figure IV.12 : le déplacement maximal

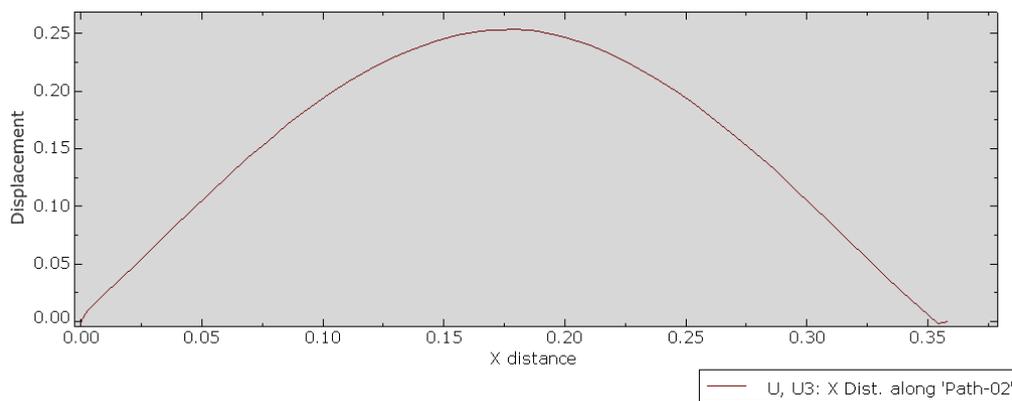


Figure IV.13. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge applique P_2 Par abaqes

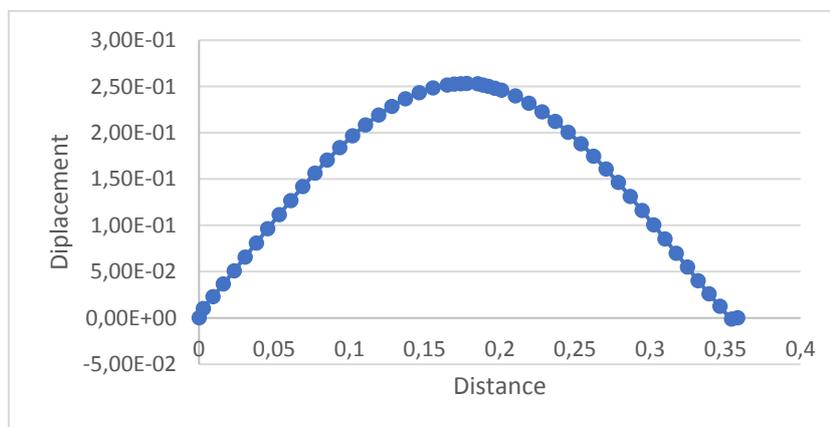


Figure IV.13. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge applique P_2 Par EXCEL

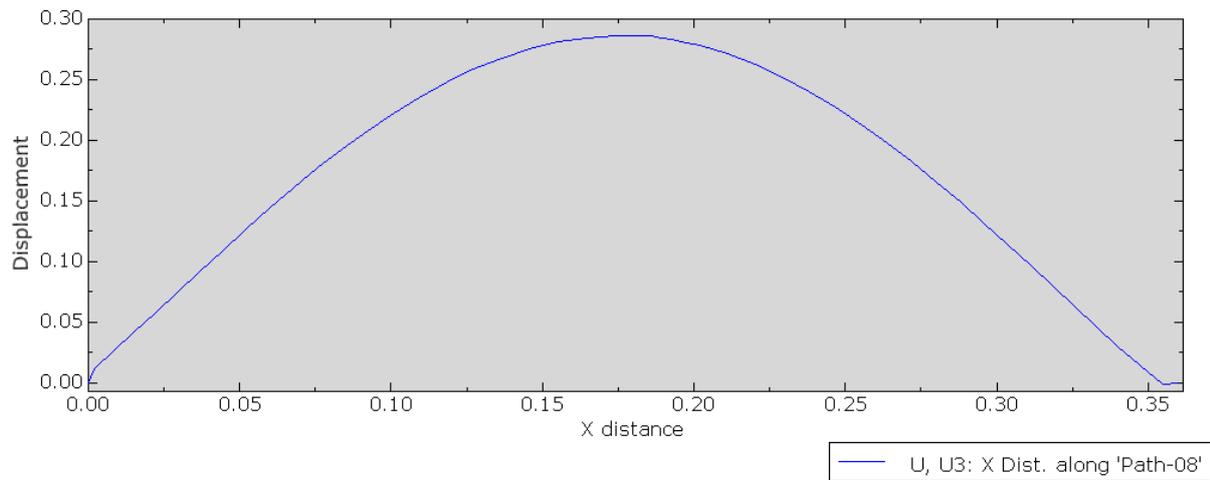


Figure IV.14 A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge appliquée P_8 Par abaques

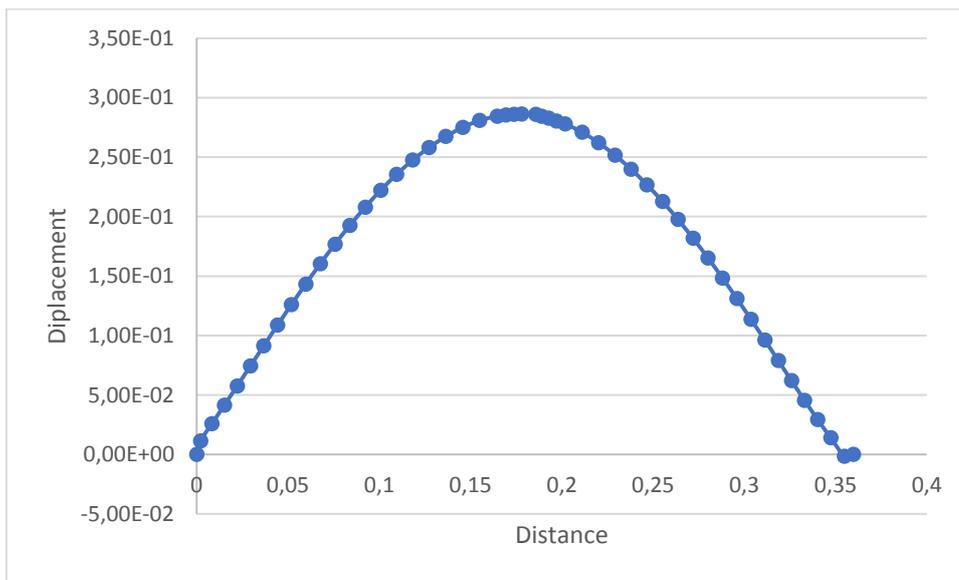


Figure IV.14. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la charge appliquée P_8 Par EXCEL

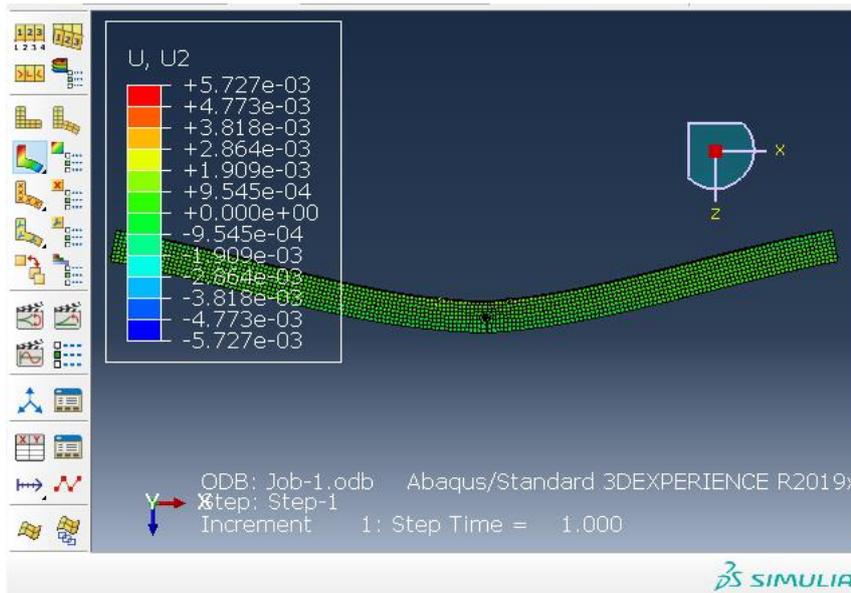


Figure IV.15. A : Déformation de la poutre ; Influence de la charge applique

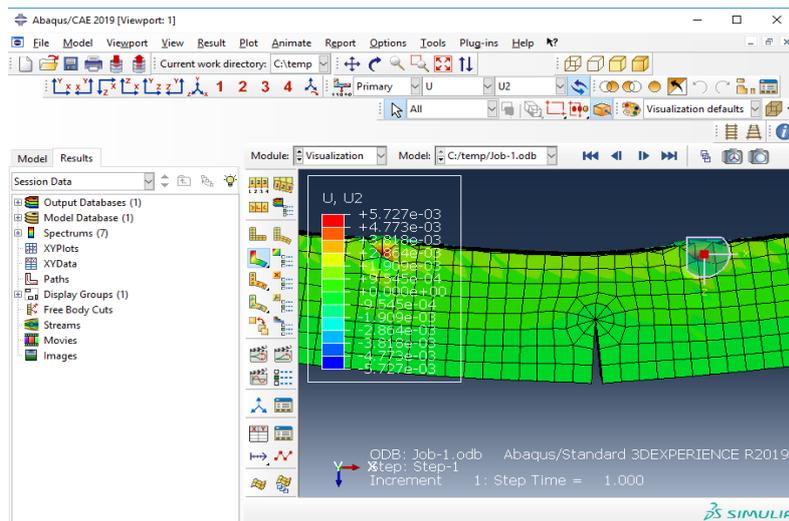


Figure IV.15. B : Louverture de la fissure

b. 3. Evolution de la contrainte suivant l'axe OY

La figure suivante permet de visualiser l'évolution de la contrainte suivant l'axe OY, en fonction de la charge appliquée. On remarque que la contrainte augmente proportionnellement avec l'augmentation de la charge appliquée.

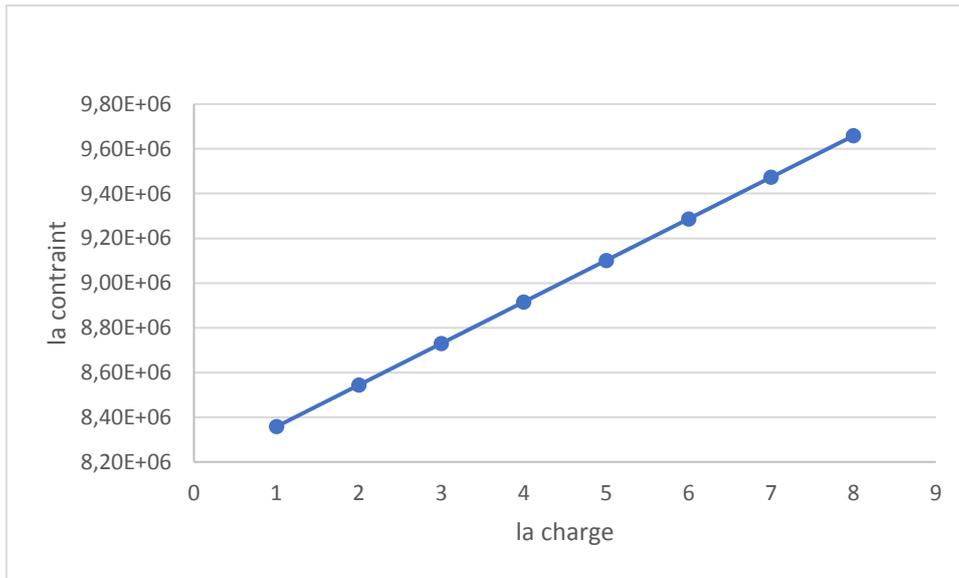


Figure IV.16 : Contrainte suivant l’axe OY

c. Cas 03 : Influence de la taille de la fissure

Pour visualiser l’influence de la taille de la fissure (charge constante appliquée à droite et à gauche), en termes : du facteur d’intensité de contrainte (KI et KII), des valeurs de contraintes et de déplacements, huit configurations ont été étudiées. Le tableau suivant représente les huit configurations utilisées :

La taille de la fissure (m)	Charge constante en (N)
$a_1 = 0.004 \text{ m}$	225 N
$a_2 = 0.0045 \text{ m}$	
$a_3 = 0.005 \text{ m}$	
$a_4 = 0.0055 \text{ m}$	
$a_5 = 0.006 \text{ m}$	
$a_6 = 0.0065 \text{ m}$	
$a_7 = 0.007 \text{ m}$	
$a_8 = 0.0075 \text{ m}$	

Tableaux IV.9 : Différentes tailles de fissure

c.1. Evolution du facteur d'intensité de contrainte

Le Tableau IV.10. Représente la variation de KI et de KII en fonction de la taille de fissure.

Distance	$k_I(Pa. m^{1/2})$	$k_{II}(Pa. m^{1/2})$
a_1	9.6414E+05	6.7343E+05
a_2	1.6364E+06	1.5122E+06
a_3	1.1973E+06	8.3429E+05
a_4	1.1946E+06	8.3725E+05
a_5	1.3938E+06	1.2879E+06
a_6	1.3896E+06	1.2907E+06
a_7	1.6412E+06	1.5086E+06
a_8	1.6364E+06	1.5122E+06

Tableaux IV.10 : Facteur d'intensité de contrainte en fonction des tailles de fissure

La figure IV.17 et La figure IV.18 traces l'évolution du FIC en mode I en fonction de la taille de fissure pour une charge constante appliquée à droite et à gauche de valeur $F = 225N$, nous remarquons que la courbe du FIC augmente avec l'augmentation de la taille de la fissure, et ceci à cause de la concentration du contrainte en pointe de fissure (ouverture de fissure).

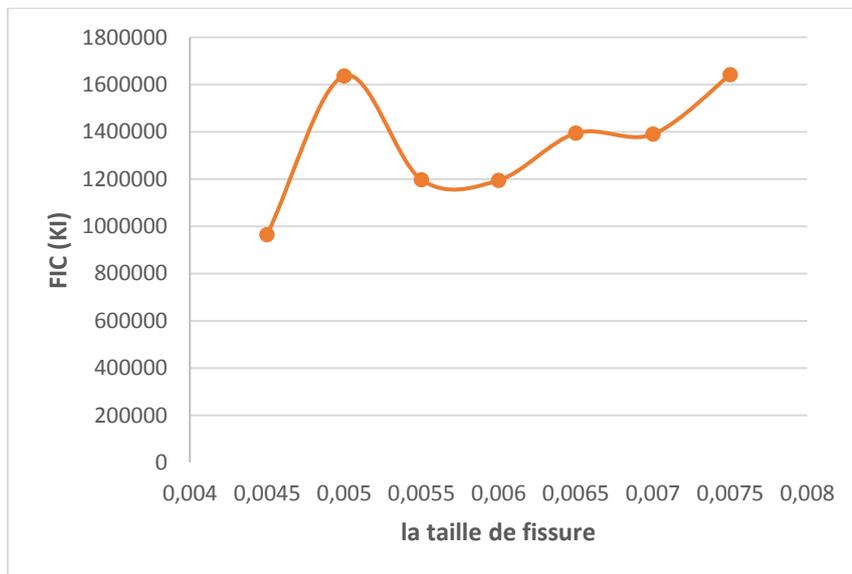


Figure IV.17 : facteur d'intensité en mode I (K_I)

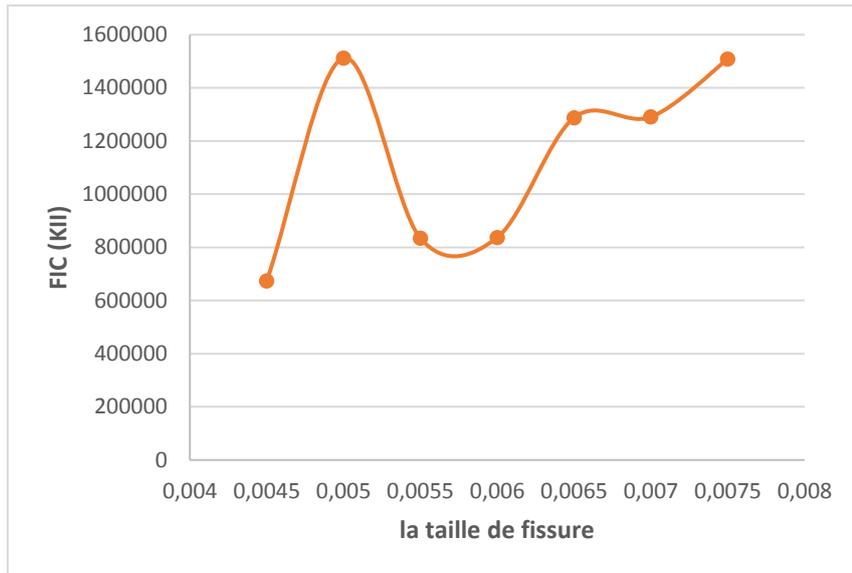


Figure IV.18 : facteur d'intensité de contrainte en mode II (K_{II})

c.2. Evolution de la flèche (déplacement maximal)

Les résultats de la variation du déplacement maximal en fonction de la taille de fissure sont représentés dans le Tableau IV.11.

La taille de la fissure (m)	D max (m)
a_1	2.56 E-1
a_2	2.56 E-1
a_3	2.60 E-1
a_4	2.61 E-1
a_5	2.63 E-1
a_6	2.63 E-1
a_7	2.69 E-1
a_8	2.69 E-1

Tableaux IV.11 : Déplacements maximums en fonction des tailles de fissure

Les figures suivantes représentent le déplacement maximal de la poutre (flexion 4 point) en fonction de la taille de la fissure. On remarque la courbe augmente légèrement et proportionnellement avec l'augmentation de la taille de fissure.

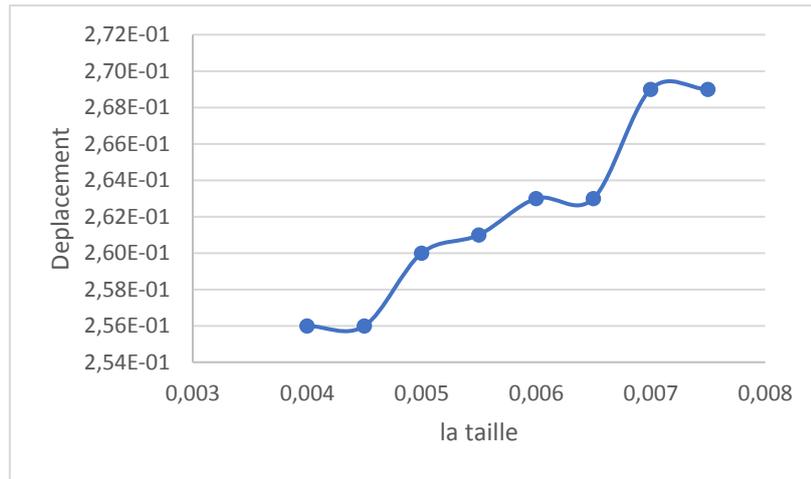


Figure IV.19 : le déplacement maximal

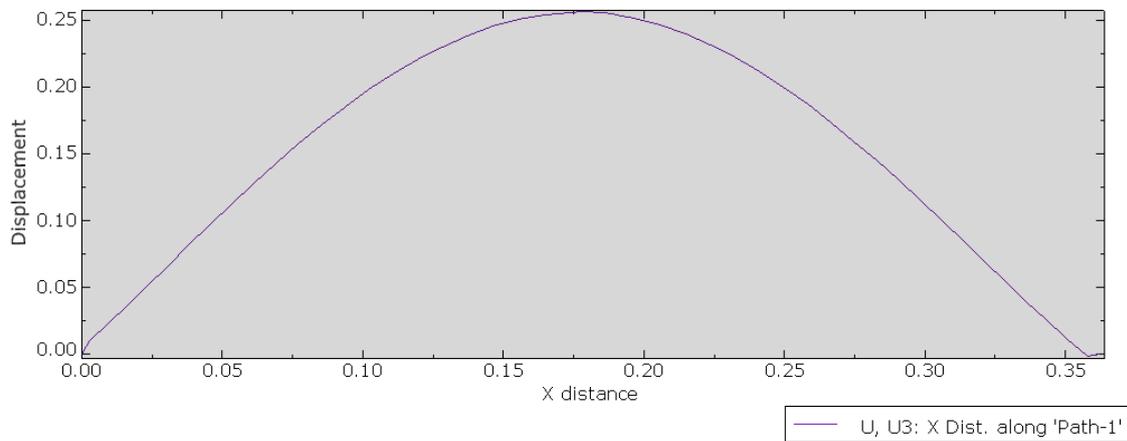


Figure IV.20. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure

a_1 Par abaques

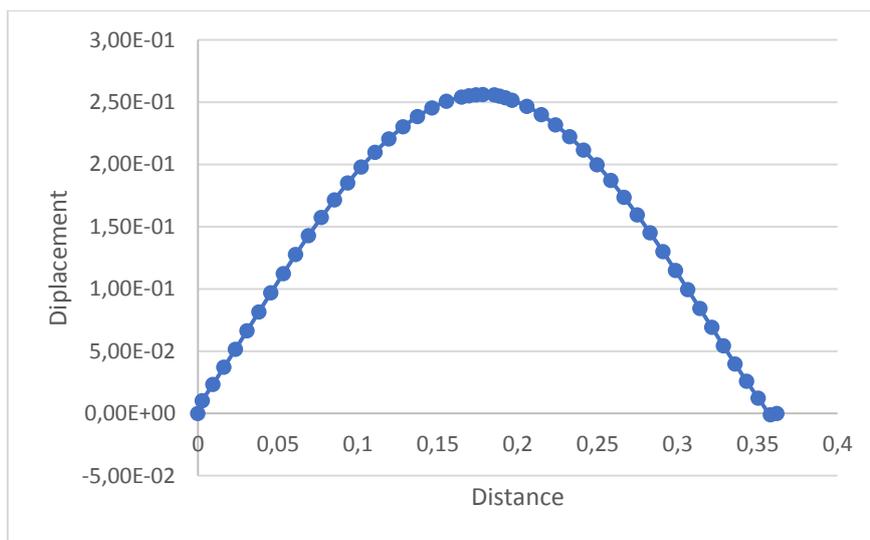


Figure IV.20. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure

a_1 Par EXCEL

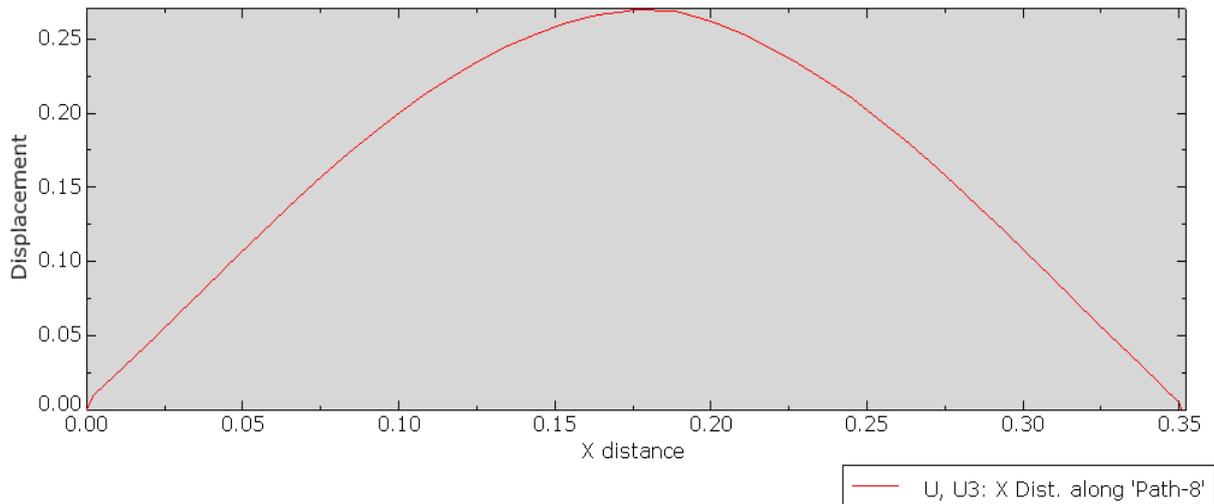


Figure IV.21. A : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_8 Par abaques

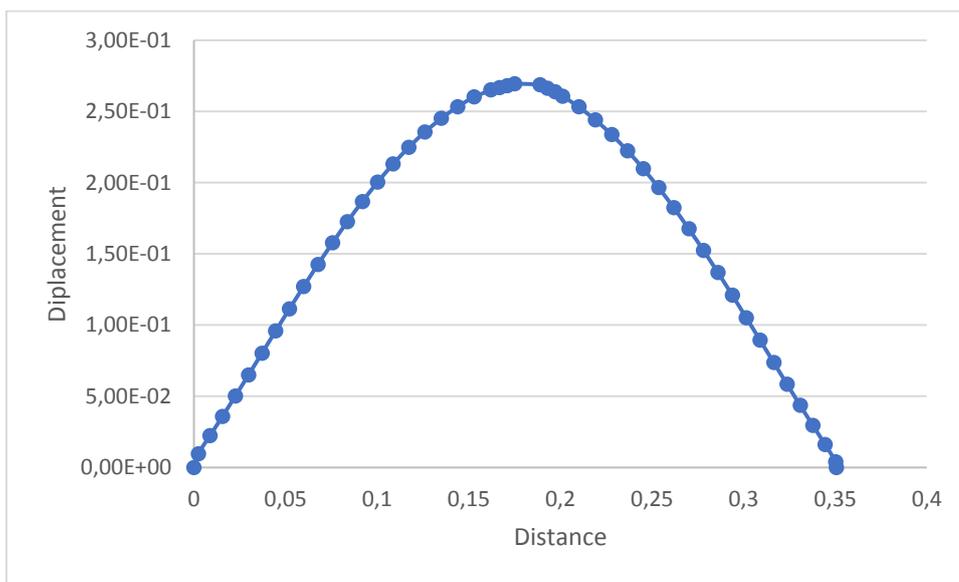


Figure IV.21. B : Déplacement maximale de la poutre Influence de la taille de la fissure a_8 Par EXCEL

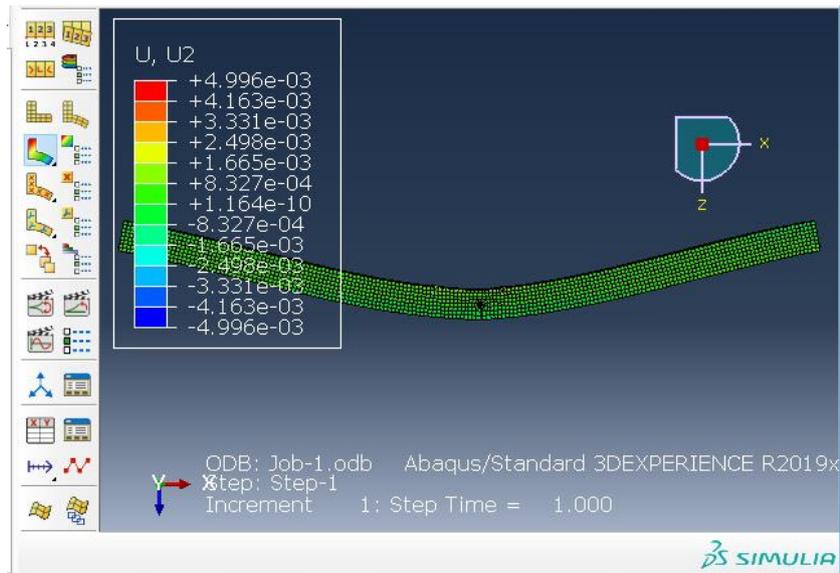


Figure IV.22. A : Déformation de la poutre ; Influence de la taille de la fissure

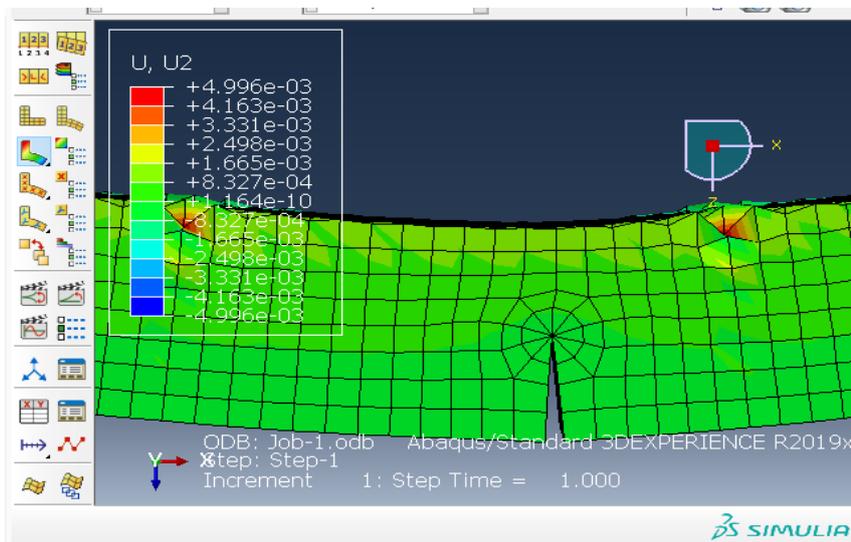


Figure IV.22. B : l'ouverture de la fissure

c. 3. Evolution de la contrainte suivant l'axe OY

Les résultats de la simulation numérique de l'évolution de la contrainte suivant l'axe OY (en pointe de fissure), en fonction de la taille de la fissure sont tracés sur la figure VI.23. On observe l'augmentation de la contrainte en fonction de la taille de fissure qui résulte de la concentration de contrainte au fond de fissure.

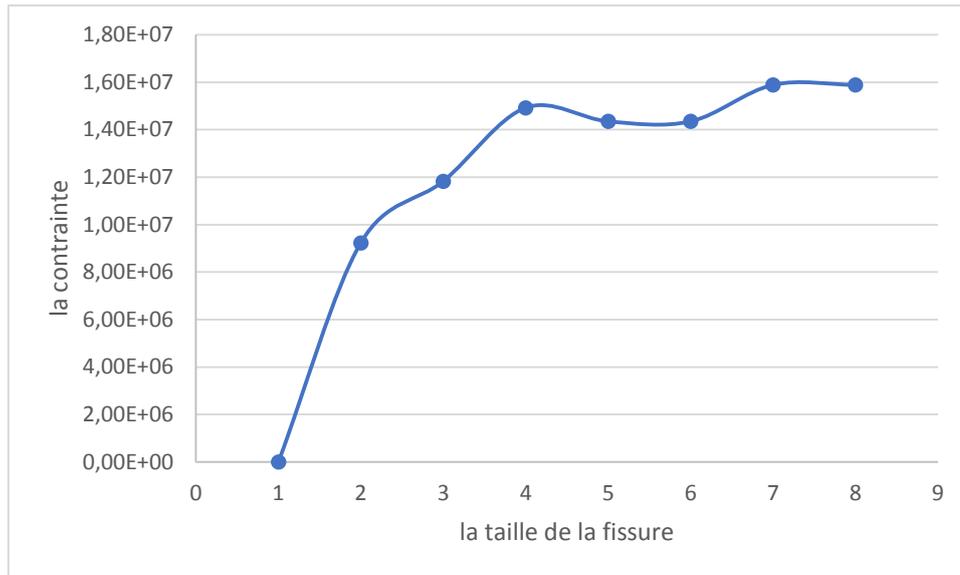


Figure IV.23 : Contrainte suivant l'axe OY

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudiées le comportement d'une poutre près fissurée, charge en flexion quatre points. Et à partir des résultats trouvés on peut conclure :

- ✓ Le facteur d'intensité de contrainte en mode I et II présente une diminution proportionnelle par rapport à la position de la charge appliquée.
- ✓ Le comportement de la poutre en termes de déplacement maximal est clairement remarquable au niveau de la fissure.
- ✓ L'ouverture de la fissure réduit proportionnellement avec la position d'application de la charge.
- ✓ Plus la taille de la fissure est grande, la poutre se déforme et se flèche plus.
- ✓ Le facteur d'intensité de contrainte en mode I dépend fortement de la taille de fissure avec une relation proportionnelle, qui affecte l'ouverture de la fissure.
- ✓ La contrainte suivant l'axe OY, est fortement affectée par la charge appliquée sur la poutre, en approchant plus du font de fissure.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'analyser par simulation, de l'évolution des facteurs d'intensité de contrainte (en mode I et II), de déplacement maximal (flèche) et de la contrainte suivant l'axe OY, d'une poutre près-fissurée, en fonction de la position d'application de la charge, en fonction de la valeur de charge applique et en fonction de la taille de fissure, en utilisant le code de calcul numérique « **ABAQUES 19** ».

Le travail nous a permis d'éclairer les points suivants :

- ✓ L'effet de la position de la force sur le facteur d'intensité de contrainte, déplacement maximal et la contrainte suivant l'axe OY.
- ✓ L'effet de la valeur de charge applique sur le facteur d'intensité de contrainte, déplacement maximal et la contrainte suivant l'axe OY.
- ✓ L'effet de la taille de la fissure sur le facteur d'intensité de contrainte, déplacement maximal et contrainte suivant l'axe OY.

Le travail réalisé dépeche sur les conclusions suivantes :

- ***Effet de la position de la charge appliquée :***

- ✓ Dans les deux cas de flexion étudiés, trois points et quatre points, l'évolution de FIC en mode I est directement proportionnel par rapport à la position de la charge appliquée, en flexion trois points, le FIC en mode II démunie avec une différence à certains points augmente.

Remarque que les valeurs du FIC en mode II sont très petites par rapport le mode I.

- ✓ Le comportement de la poutre en termes de déplacement maximal est clairement remarquable au niveau de la fissure,
- ✓ La poutre présente une résistance importante, en fonction de la position de la charge appliquée,

- ***Effet de la valeur de la charge appliquée***

- ✓ Le facteur d'intensité de contrainte en mode I dépend fortement de la valeur de charge applique avec une relation proportionnelle, et ceci pour les deux cas : flexion 3 point et

4 points, et le même pour les deux cas (flexion 3 et 4 points), le facteur d'intensité de contrainte en mode II il augmente (FIC en mode II prend des valeurs plus petites que FIC en mode I).

- ✓ Le déplacement maximal augmente dans les deux cas de flexion 3 et 4 points
- ✓ La contrainte suivant l'axe OY, est fortement affectée par la valeur de charge appliquée sur la poutre, en approchant plus du font de fissure la contraint augment au fond de la fissure
- ***Effet de la taille de la fissure :***
 - ✓ Le facteur d'intensité de contrainte en mode I dépend fortement de la taille de fissure avec une relation proportionnelle, et ceci pour les deux cas : flexion 3 point et 4 points, et le même pour les deux cas (flexion 3 et 4 points), le facteur d'intensité de contrainte en mode II il augmente (FIC en mode II prend des valeurs plus petites que FIC en mode I).
 - ✓ Les déplacements en flexion trois points sont plus grands que celle en flexion 4 points.
 - ✓ L'ouverture de la fissure augmente proportionnellement avec l'augmentation de la taille de la fissure.