

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Présenté par :

AZZOUZ Tarik

BACHIOUA Khaled

Thème

**ANALYSE DE FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTE D'UN
ECHANTILLON CT 2D PAR LOGICIEL ABAQUS**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
MAKRI HOCINE	MCA	Président
AMROUNE SALAH	MCA	Encadreur
ROUABHI YUCEF	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2021 / 2022

RESUME

ملخص

الهدف من هذا العمل هو حساب معامل شدة الإجهاد K النمط I لقسم متصدع باستخدام طريقة العناصر المحدودة، وذلك باستخدام البرنامج Abaqus، يعتمد الحساب على التكامل J Rice. العمل أنجز على عينة CT.

Résumé

L'objectif de ce travail est de calculer le facteur d'intensité de contrainte K en mode I d'une section fissurée à l'aide de la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel ABAQUS. Le calcul est basé sur l'intégrale de Rice J. notre travail a été fait sur une éprouvette CT.

Abstract

The objective of this work is to calculate the pattern stress intensity factor for a fractured section using the finite element method, using the software. Calculation is based on J Rice integral. We worked on the CT specimen.

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Liste des figures : I

Liste des tableaux : IV

INTRODUCTION GENERALE..... 1

1 LA THEORIE DE LA MECANIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT 2

1.1 INTRODUCTION : 2

1.2 DESCRIPTION DE L'ENDOMMAGEMENT 5

1.3 MECANIQUE LINEAIRE ET NON-LINEAIRE DE LA RUPTURE..... 5

1.3.1 MODES DE RUPTURE : 6

1.3.2 ÉTUDE D'UN MILIEU ELASTIQUE FISSURE 6

1.3.3 PLASTICITE CONFINEE..... 7

1.3.4 PLASTICITE ETENDUE 8

1.4 APPROCHE GLOBALE EN MECANIQUE DE LARUPTURE : 9

1.4.1 FACTEURS D'INTENSITE DES CONTRAINTES : 9

1.5 L'INTEGRALE DE RICE (INTEGRALE J) : 9

1.5.1 Intégrale J d'un spécimen de poutre en porte-à-faux double : 13

1.5.2 Utilité de J : 14

1.5.3 Interprétation graphique de J : 14

1.5.4 Comportement des matériaux élasto-plastiques : 14

1.5.5 Extension du NMLER (mécanique non-linéaire élastique de la rupture) à l'MEPR (mécanique élasto-plastique de la rupture) : 15

2 SIMULATION NUMERIQUE PAR ABAQUS 18

2.1 INTRODUCTION : 18

2.2 GENERALITE SUR LE CODE DE CALCUL ABAQUS : 18

2.2.1 ABAQUS/STANDARD : 18

2.2.2 ABAQUS/EXPLICIT : 19

2.2.3 ABAQUS/CAE : 19

2.3 LES DIFFERENTS FICHIERS POUR LA SIMULATION SOUS ABAQUS : 19

2.3.1 FICHER D'ENTREE (INPUT FILE) : 19

2.3.2 FICHER DE RESULTATS (OUTPUT FILE) : 19

2.4 AUTRES FICHIERS CREEES PAR ABAQUS LORS DE LA SIMULATION: 19

2.5 ORGANISATION DE L'INTERFACE ABAQUS CAE (COMPLETE ABAQUS ENVIRONNEMENT) : 20

2.6 LES MODULES : 21

2.6.1 MODULE PART : 21

2.6.2 MODULE PROPERTY : 23

2.6.3 MODULE ASSEMBLY : 24

2.6.4 MODULE STEP : 24

2.6.5	MODULE INTERACTION :	25
2.6.6	MODULE LOAD :	26
2.6.7	MODULE MESH :	26
2.6.8	MODULE JOB :	27
2.6.9	MODULE VISUALIZATION :	27
2.6.10	MODULE SKETCH :	28
2.7	L'ARBRE DU MODELE :	28
2.8	LES ELEMENTS DANS ABAQUS :	28
2.8.1	DEGRE DE LIBERTE (DDL) :	28
3	PARTIE NUMERIQUE: CALCUL DE PROPAGATION DE FISSURE (ABAQUS)	34
3.1	INTRODUCTION :	34
3.2	PRESENTATION DU PROBLEME :	34
3.3	CONSTRUCTION DU MODELE DANS ABAQUS :	35
3.3.1	CREATION DE LA GEOMETRIE:	35
3.3.2	PROPRIETES DU MATERIAU:	37
3.3.3	CREATION DE L'ASSEMBLAGE:	39
3.3.4	CREATION DE LA FISSURE:	40
3.3.5	ÉTAPES ET PARAMETRES DE SORTIE:	43
3.3.6	CHARGEMENT ET CONDITIONS AUX LIMITES:	45
3.3.7	MAILLAGE:	47
3.4	RESULTATS ET DISCUSSION :	52
3.5	CALCUL DE K_I :	55
3.6	CONCLUSION.....	55
	CONCLUSION GENERALE	56
	BIBLIOGRAPHIE:	57

Liste des figures :

Figure 1–1 : Modes de rupture 6

Figure 1–2: Les zones de champs mécaniques 7

Figure 1–3: Plasticité en pointe de fissure 7

Figure 1–4: Contraintes en pointe de fissure 9

Figure 1–5: Contour d'intégration 10

Figure 1–6: Les contours pour l'intégrale J 11

Figure 1–7: Chemins pour le calcul de l'intégrale J autour d'une fissure 12

Figure 1–8: Poutre en porte-à-faux 13

Figure 1–9: Interprétation géométrique de l'intégrale J 14

Figure 1–10: Courbe contrainte-déformation élasto-plastique 15

Figure 2–1: Organisation d'abaqus [20] 20

Figure 2–2: Réalisation de la mise en données d'un problème 21

Figure 2–3: Module Part 22

Figure 2–4: création de la géométrie 22

Figure 2–5: propriété Matériaux et section 23

Figure 2–6: Instance et assemblage 24

Figure 2–7: Création de step 25

Figure 2–8: interaction 25

Figure 2–9: création des chargements 26

Figure 2–10: Création de maillage 26

Figure 2–11: Lancement de calcul 27

Figure 2–12: Affichage des résultats 27

Figure 2–13: Les types d'intégrations et le nombre de nœuds 29

Figure 2–14: Quelque élément dans Abaqus [22] 29

Figure 2–15: Exemple d'élément poutre 30

Figure 2–16: Éléments solides 1D 30

Figure 2–17: Éléments solides 2D 31

Figure 2–18: Éléments axisymétriques 2D 32

Figure 2–19: Éléments coques et 3D 33

Figure 3–1: Modèle de la plaque fissurée 34

Figure 3–2: Création de la géométrie 35

Figure 3–3: Dessin de la plaque 36

Figure 3–4: Esquisse 36

Figure 3–5: Plaque avec les demi-cercles partitionnés 37

Figure 3–6: Définition du matériau 38

Figure 3–7: Définition de la section 38

Figure 3–8: Attribution de la section 39

Figure 3–9: Création de l'assemblage 40

Figure 3–10: L'emplacement de la fissure 40

Figure 3–11: Création de la fissure 41

Figure 3–12: Pointe de fissure et direction de propagation 42

Figure 3–13: singularité 43

Figure 3–14: Création de l'étape « traction » 43

Figure 3–15: Paramètres de sortie(1) 44

Figure 3–16: Paramètres de sortie(2) 44

Figure 3–17: Définition de la charge 45

Liste des figures

<i>Figure 3–18: Encastrement</i>	46
<i>Figure 3–19: Décomposition de la plaque</i>	47
<i>Figure 3–20: Région 1 : précision du maillage</i>	48
<i>Figure 3–21: Région 2 : précision du maillage</i>	48
<i>Figure 3–22: Choix des éléments(1)</i>	49
<i>Figure 3–23: Choix des éléments(2)</i>	50
<i>Figure 3–24: Contrôle du maillage</i>	50
<i>Figure 3–25: Contrôle du maillage region 1</i>	51
<i>Figure 3–26: Contrôle du maillage region 2</i>	51
<i>Figure 3–27: Maillage de la plaque</i>	52
<i>Figure 3–28: Création de "job"</i>	52
<i>Figure 3–29: Analyse</i>	53
<i>Figure 3–30 : maillage et déformé de la plaque fissuré</i>	53
<i>Figure 3–31: Résultats</i>	54

Liste des tableaux :

Tableau 3-1: application numérique 35
Tableau 3-2: Valeurs de J..... 54

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La présence de défauts dans les structures affaiblit leur résistance mécanique, peut entraîner leur ruine, et être à l'origine de catastrophes graves. Afin d'éviter celles-ci, ingénieurs et scientifiques doivent donc être capable de prédire le comportement des structures fissurées, et d'en garantir l'intégrité.

Selon les cas, la présence de fissures peut être constatée lors d'inspection si le composant est accessible au contrôle, ou supposée lorsque l'on souhaite évaluer la sûreté d'un composant.

La mécanique de la rupture est la science qui étudie le comportement des structures fissurées. Elle fournit les outils nécessaires pour l'analyse de l'intégrité de structures. Il s'agit d'un domaine scientifique relativement récent puisqu'il est apparu après la première guerre mondiale, notamment avec les études de Griffith en 1920 et d'Irwin en 1957.

Du point de vue numérique, la propagation de fissure est un problème complexe puis qu'il nécessite de suivre la géométrie de la fissure au cours du temps. On a alors recours à des procédés de type remaillage et projection de champs, coûteux en temps de calcul, et dont la validité théorique pose un certain nombre de questions. On a vu ces dernières années se développer des méthodes permettant de prendre en compte implicitement des discontinuités ; comme la méthode des éléments finis étendus. Grâce à des fonctions d'interpolation enrichies, on peut alors représenter implicitement une discontinuité mobile -comme une fissure- sans remaillage.

On propose d'utiliser la méthode des éléments finis étendus pour simuler la propagation de fissure en fatigue en modélisant le mode I. Des essais expérimentaux en mode I ont été effectués au laboratoire montrent la potentialité de méthode.

Le présent mémoire s'articule de la manière suivante :

Chapitre 1 : il consiste en une étude bibliographique, afin de rappeler les notions de la mécanique de la rupture et de présenter les outils nécessaires à cette étude.

Chapitre 2 : nous allons présenter le programme de modélisation numérique par la méthode des éléments finis Abaqus.

Chapitre 3 : dans ce chapitre, nous allons présenter les étapes nécessaires pour construire le modèle numérique avec le logiciel Abaqus.

CHAPITRE 1

LA THEORIE DE LA MECANIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT

1 LA THEORIE DE LA MECANIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT

1.1 INTRODUCTION :

Grâce aux progrès réalisés dans le domaine de la mise en forme des métaux durant les trois derniers siècles, le fer et l'acier ont progressivement remplacé le bois et le ciment comme matériaux structuraux de base. Malgré leurs hautes caractéristiques, les structures réalisées à partir de ces matériaux ont connu des accidents importants dès le milieu du 19^{ème} siècle. L'origine de ces accidents était la rupture inattendue de composants critiques de ces structures. L'un des premiers incidents enregistré sur une structure importante fut la rupture d'une chaîne du pont suspendu Montrose en Mars 1830 en Grande Bretagne. Depuis, il y a eu un nombre important d'effondrements de ponts, dont le King's Bridge à Melbourne (1962) ou encore le Point Pleasant Bridge en Virginie (1967). Les accidents ferroviaires dus à une rupture brutale des essieux, des roues ou encore des rails ont également été très nombreux. Entre 1860 et 1870, le nombre de personnes victimes d'accidents de train en Grande Bretagne s'élevait environ à 200 par an. De nombreux accidents intervinrent également sur des pipelines, des pétroliers, ou encore sur des avions. En 1950, 2 avions Comet se sont brisés à haute altitude à cause d'un problème de rupture par fatigue sur les trous des rivets près des hublots, lesquels étaient de forme carrée ! Ces risques d'accidents étaient d'autant plus grands que l'utilisation d'alliages à hautes caractéristiques mécaniques (ténacité, rigidité...), permettant la réalisation de structures de plus en plus complexes et sollicitées, a énormément augmenté. En fait, les estimations de tenue des structures, fondées sur les caractéristiques mécaniques classiques, ne tenaient pas compte de la ténacité des matériaux en conditions réelles de service, et les chercheurs étaient alors incapables d'expliquer le phénomène de rupture brusque sous des sollicitations bien inférieures à celles de la limite d'élasticité.

Si Griffith est souvent cité comme le premier chercheur à avoir introduit la mécanique de la rupture (en tant que science), ces travaux restent basés sur des études antérieures. On peut notamment citer l'article de Wieghardt, paru en 1907 et traduit en anglais [01], dans lequel l'existence de la singularité du champ des contraintes en pointe de fissure dans un matériau élastique linéaire fut reconnue.

A partir de ces résultats, Griffith [02] s'est intéressé en 1920 au problème de la rupture, dans un milieu élastique fissuré, d'un point de vue énergétique. Il a ainsi mis en évidence une variable (appelée plus tard taux de restitution d'énergie) caractérisant la rupture, et dont la valeur critique est une caractéristique du matériau. Viennent ensuite les premiers

développements théoriques d'analyse des champs de contraintes et de déformations au voisinage d'une fissure en élasticité. Ces études, menées notamment par

Sneddon I. N [03], puis [04] en 1957, ont permis de définir les facteurs d'intensité de contraintes, caractérisant l'état de sollicitation de la région dans laquelle la rupture se produit.

Entre 1960 et 1980, la mécanique de la rupture connaît un grand succès scientifique, avec notamment l'apparition de la mécanique non linéaire de la rupture qui a permis de mieux prendre en compte le comportement plastique des matériaux. De nombreux travaux sont publiés à cette période ; on peut citer par exemple [05] et [06] qui introduisent la notion d'intégrales indépendantes du contour telles que l'intégrale J , dont les propriétés ont permis de caractériser la ténacité d'un matériau lorsque la plasticité n'est plus confinée à la pointe de fissure. C'est également à cette période que les premiers travaux concernant la mécanique de la rupture dans les matériaux multicouches sont réalisés [07,08].

Tous les développements théoriques réalisés à cette époque ont permis de déterminer la forme exacte de la singularité, et des champs asymptotiques en pointe de fissure nécessaires à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux. De plus, ils représentent une solution précise à de nombreux problèmes de géométries simples, et peuvent donc être utilisés comme solutions approchées pour des problèmes plus complexes.

L'apparition de la méthode des éléments finis a permis d'étudier la mécanique de la rupture d'un point de vue numérique, proposant ainsi des solutions plus précises à des problèmes plus complexes. Apparurent alors une multitude de méthodes permettant de calculer les facteurs d'intensité de contraintes, le taux de restitution d'énergie, ou encore de découpler les différents modes de rupture. Parmi ces nombreuses méthodes, les plus facilement implémentables donnent bien souvent des résultats approchés, ou dépendants du maillage, alors que les autres nécessitent des techniques éléments finis avancées.

La mécanique de la rupture couvrant un domaine extrêmement vaste, nous commencerons par spécifier de façon précise le cadre de l'étude. Puis nous introduirons les notions fondamentales liées aux approches locales et globales en mécanique linéaire de la rupture. Cela nous amènera à faire un tour d'horizon des différentes méthodes numériques utilisées pour le calcul de grandeurs caractéristiques telles que les facteurs d'intensité de contraintes, ou le taux de restitution d'énergie (intégrale J en elasto-plasticité).

La mécanique de la rupture a globalement pour objectif de prévoir le comportement des fissures susceptibles de se trouver dans tous composants industriels soumis à des sollicitations mécaniques

La mécanique linéaire de la rupture a tout d'abord été étudiée. Elle concerne les matériaux dont le comportement est élastique linéaire. Compte tenu de cette linéarité, ainsi que de la possibilité d'appliquer les théorèmes de superposition, les calculs sont relativement simples à réaliser. Dans le cadre de travaux sur des matériaux fragiles comme le verre, les chercheurs du milieu du siècle ont ainsi pu déterminer une grandeur scalaire notée K qui caractérise les champs de contraintes et de déformations au voisinage de la fissure. Ce paramètre a permis d'établir un critère (K critique) pour déterminer l'amorçage de la propagation et a pu être relié à l'énergie libérée par la fissure au cours de sa propagation.

Au cours des années 70, de nombreuses études ont porté sur la recherche d'un paramètre permettant d'étendre la mécanique de la rupture au comportement élasto-plastique des matériaux.

Parmi les différents paramètres, l'intégrale de contour J , dont la paternité est attribuée à RICE [05] mais reste discutée [09, 10], a connu un large succès en raison de la facilité de mise en œuvre et de ses propriétés numériques, à savoir une énergie obtenue par une simple intégrale de contour, indépendante de celui-ci.

L'interprétation analytique de cette intégrale, a permis à [11] d'associer J à un critère d'amorçage (J critique), qui fut étendu à la propagation ductile par la suite via les courbes de résistance à la déchirure $J-\Delta a$.

Ces propositions d'applications et les propriétés numériques de J sont à l'origine de la situation de quasi-monopole dont bénéficie actuellement cette intégrale dans les laboratoires, comme en témoignent les normes en vigueur. Pourtant depuis les premiers travaux prometteurs, il est clairement apparu que les grandeurs définies à partir de J , et supposées intrinsèques au matériau, souffrent d'un problème de transférabilité des éprouvettes de caractérisation aux structures.

Une explication de ces phénomènes a été apportée grâce à l'approche globale à deux paramètres, associant à J un second paramètre représentatif du degré de confinement de la plasticité dans la structure. En effet, de ce confinement dépend la sollicitation du matériau en pointe de fissure et de son évolution. Ce second paramètre est déterminé directement à partir du champ de contrainte calculé numériquement ou par comparaison de ce champ à un champ de référence.

Pour aller plus loin, d'autres auteurs se sont intéressés à l'énergie dissipée par les mécanismes de la rupture en déchirure ductile. Certaines de ces études sur la modélisation énergétique de la déchirure seront présentées, notamment les travaux de Turner, qui semblent être les plus avancés sur le sujet.

Une autre approche, nommée 'approche locale', a connu un succès important ces dernières années grâce, en partie, au progrès des capacités de calcul. Elle a pour ambition de prévoir la propagation et la rupture en tenant compte des mécanismes d'endommagement dans le comportement du matériau en pointe de fissure. Cette démarche est radicalement différente des autres car elle ne s'appuie pas sur le calcul d'une grandeur énergétique telle que J . Les différents modèles proposés pour la déchirure ductile seront présentés, mettant en évidence leurs possibilités mais aussi leurs inconvénients.

Il est important d'insister sur le fait que cette bibliographie ne s'intéresse qu'aux études menées sur la déchirure ductile, à savoir la propagation stable de fissure sous chargement monotone croissant dans un matériau ductile. Nous nous limiterons également au cas d'une fissure sollicitée en mode I (Contrainte d'ouverture normale au plan de fissuration).

1.2 DESCRIPTION DE L'ENDOMMAGEMENT

L'endommagement recouvre l'ensemble des phénomènes de création de nouvelles surfaces libres, microfissurations, au sein d'un matériau sous l'effet d'une sollicitation. C'est dans ou au voisinage des inclusions quand il y en a qu'apparaît le plus souvent l'endommagement. La dureté de la matrice influence le mode d'endommagement montre que dans les matrices molles, la décohésion domine alors que dans les matrices dures, le mécanisme majoritaire est la rupture des particules. La ductilité de la matrice favorise donc, semble-t-il, la décohésion. Les micro-hétérogénéités sont donc des sites privilégiés étant à la fois des points faibles du matériau (phases souvent fragiles dans une matrice ductile) mais également des sources de forte concentration de contraintes.

Dans un processus d'endommagement on distingue généralement trois étapes: l'amorçage, l'extension par l'ouverture des microfissures créées, la rupture, par coalescence des cavités, puis par percolation d'une fissure dominante.

1.3 MECANIQUE LINEAIRE ET NON-LINEAIRE DE LA RUPTURE

La mécanique de la rupture se propose de décrire les étapes d'amorçage et de propagation de la fissuration. Selon le comportement du matériau durant la propagation d'une fissure, on peut être confronté à deux types de rupture :

Rupture fragile, en l'absence de déformation plastique significative (mécanique linéaire de la rupture).

Rupture ductile, en présence de déformation plastique non négligeable (mécanique non linéaire de la rupture). Dans ce cas, suivant l'étendue de la zone plastique en pointe de fissure, on différencie le cas de la plasticité confinée, de celui de la plasticité étendue.

1.3.1 MODES DE RUPTURE :

La fissuration se manifeste par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties, appelées lèvres de la fissure, ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants :

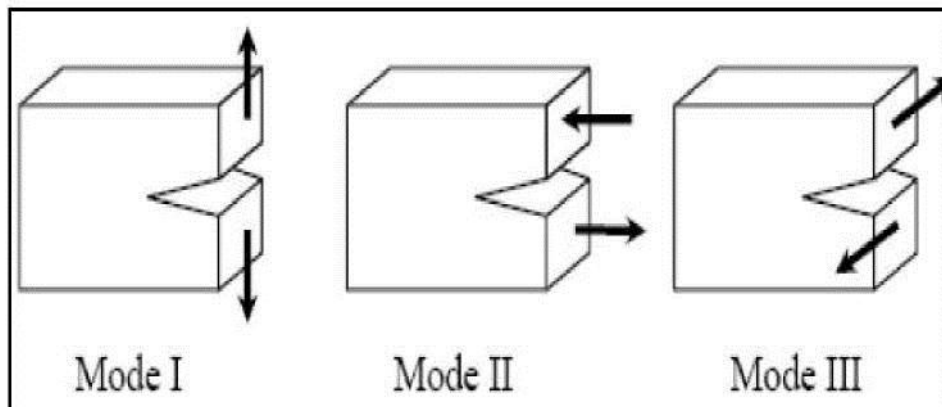


Figure 1-1 : Modes de rupture

- Mode I : ouverture (ou clivage)
- Mode II : cisaillement plan
- Mode III : cisaillement anti-plan.

mode I est le plus dangereux pour l'extension d'une fissure ; cependant, une fois amorcée et pour des sollicitations mixtes ou des géométries complexes, la fissure a tendance à bifurquer, et reste donc rarement rectiligne (2D) ou plane (3D).

1.3.2 ÉTUDE D'UN MILIEU ELASTIQUE FISSURE

Dans un milieu élastique fissuré, la région proche de la pointe de fissure peut être décomposée en trois zones [12] (Figure 1.2) :

- Zone 1 : La zone d'élaboration : au voisinage direct de la pointe de fissure, l'étude de cette zone (considérée comme ponctuelle d'un point de vue mécanique) est très complexe dans la mesure où les contraintes tendent vers l'infini (d'un point de vue théorique) à la pointe de fissure
- Zone 2 : La zone singulière : dans cette zone, le champ de contrainte présente une singularité en $r^{-1/2}$
- Zone 3 : La zone des champs lointains : extérieure aux deux précédentes, elle raccorde la zone singulière aux conditions aux limites de chargement et déplacement.

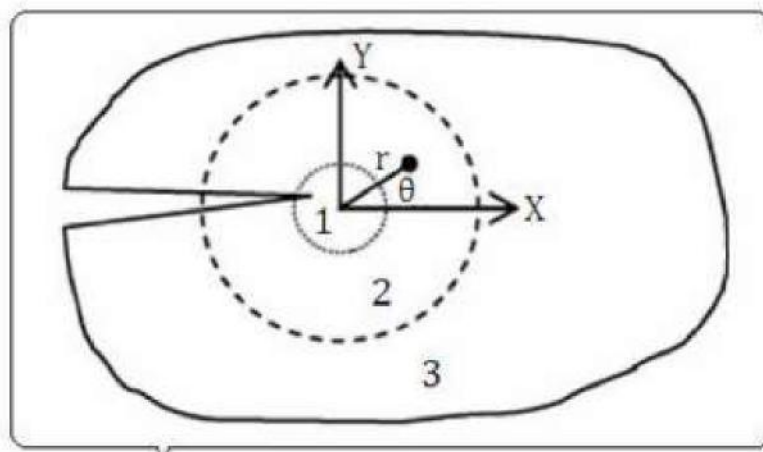


Figure 1-2: Les zones de champs mécaniques

C'est la singularité d'ordre $-1/2$ dans la zone singulière qui caractérise la solution obtenue en élasticité pure. Cette solution n'est malheureusement pas physiquement réaliste. En fait, les contraintes en pointe de fissure sont « écrêtées » par la plasticité (Figure 1-3) [13].

De plus, la signification énergétique de la rupture proposée par Griffith devient plus ambiguë, dans la mesure où elle consiste à représenter la propagation de fissure comme un déchargement. Or, en plasticité, une partie de l'énergie est dissipée (phénomène irréversible) et on ne peut donc pas toujours évaluer la fraction d'énergie « disponible » pour la propagation.

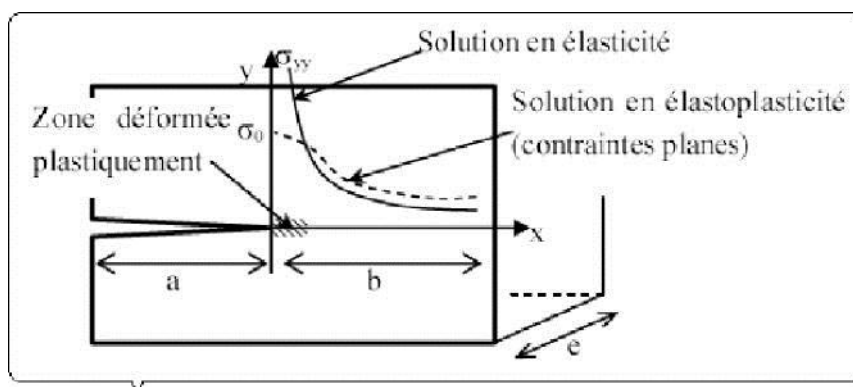


Figure 1-3: Plasticité en pointe de fissure

1.3.3 PLASTICITE CONFINÉE

La concentration de contraintes en pointe de fissure créant une plastification locale, il est nécessaire que la taille de cette zone reste petite par rapport à la longueur de la fissure, et aux dimensions de la structure, de façon à ne pas trop perturber la distribution élastique des contraintes. A titre d'exemple, la norme ASTM impose aux éprouvettes utilisées pour le calcul de la ténacité la condition suivante :

$$\min(e, a, b) \geq \frac{5}{2} \left(\frac{K_{ic}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (1.1)$$

Où σ_0 est la limite élastique, et K_{IC} la ténacité du matériau.

Lorsque c'est le cas, on peut continuer à utiliser les concepts de la mécanique linéaire de la rupture.

Plusieurs modèles proposent de déterminer la taille de la zone plastique en pointe de fissure : modèles d'Irwin, et de Dugdale-Barenblatt qui sont détaillés par [13,14].

1.3.4 PLASTICITE ETENDUE

La plasticité étendue est le domaine pour lequel la taille de la zone plastique n'est plus négligeable devant la longueur de la fissure ou la dimension du ligament. Elle s'inscrit dans le cadre de la mécanique de la rupture à comportement non linéaire, et son étude n'est que très récente. Si en élasticité linéaire, la singularité est d'ordre $-1/2$, elle est plus faible en plasticité, et vaut $-n/(n+1)$, où n , le coefficient d'écrouissage du matériau, est compris entre 0 et 0,2. La

zone d'élaboration définie en élasticité linéaire est remplacée par un champ de déformation qui ne dépend que de la limite d'élasticité en cisaillement et de l'orientation par rapport à l'axe de la fissure

A la pointe de la fissure, l'émoussement conduit à des contraintes finies. Plus loin de l'extrémité de la fissure (zone de champs semi-lointains), la distribution des contraintes et des déformations peut être approchée par la solution asymptotique proposée par [15,16]. Même si l'étude de la mécanique non linéaire de la rupture est en plein essor actuellement, la majorité des résultats obtenus d'un point de vue numérique concernent la mécanique linéaire de la rupture. Il est souvent difficile de différencier les méthodes applicables à tout type de matériau, ou uniquement aux matériaux élastiques. Sauf indications contraires, notre étude sera donc basée sur une analyse élastique du champ des contraintes, en admettant les hypothèses générales de l'élasticité linéaire classique, mais en tolérant néanmoins l'existence d'une zone de plasticité sous la condition suivante : cette zone doit à la fois être confinée et de dimension constante.

Les ruptures obtenues par fatigue, par choc thermique, ou par corrosion couvrent également un domaine de recherche important, mais elles ne seront pas abordées dans ce manuscrit.

De plus, notre étude est volontairement restreinte aux fissures planes, et supposées rectilignes par morceaux. Enfin, nous nous placerons, dans ce mémoire, dans le cas de matériaux homogènes et isotropes.

On peut alors distinguer deux approches concernant l'étude de la zone singulière :

- Une approche locale, caractérisée par une étude des champs de contrainte et de déformation au voisinage du front de fissure ;
- Une approche globale (ou énergétique), caractérisée par l'étude du comportement global de la structure fissurée sur le plan énergétique.

1.4 APPROCHE GLOBALE EN MECANIQUE DE LA RUPTURE :

1.4.1 FACTEURS D'INTENSITE DES CONTRAINTES :

En mécanique élastique linéaire de la rupture, le premier terme du développement limité des champs de contraintes et de déformations en pointe de fissure est proportionnel au facteur

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \\ \varepsilon_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} g_{ij}(\theta) \end{cases} \quad (1.2)$$

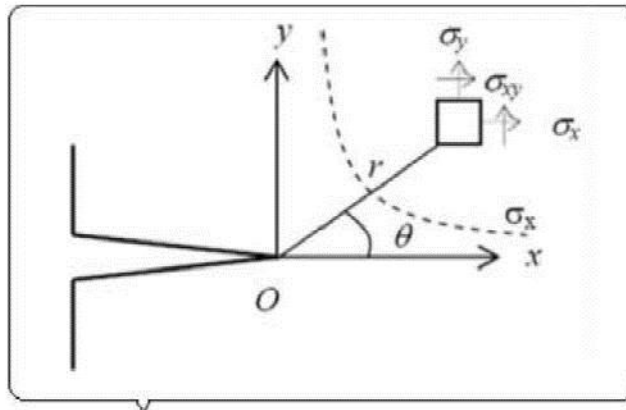


Figure 1-4: Contraintes en pointe de fissure

Le facteur K rassemble les influences des forces appliquées, de la géométrie et de la longueur de fissure. Cependant cette notion n'est valable que pour un comportement élastique linéaire, or le phénomène de déchirure fait intervenir la plasticité.

1.5 L'INTEGRALE DE RICE (INTEGRALE J) :

Comme alternative aux courbes de conception DCO, l'intégrale J a été développée. Le travail de Rice est l'un des deux articles les plus cités dans toute la littérature sur la mécanique de la rupture :

- JR Rice (1968), un chemin indépendant intégral et l'analyse approximative des concentrations de déformation par encoches et fissures. Journal de mécanique appliquée, 35, 379-386.

- L'autre article est : AA Griffith (1921), Les phénomènes de rupture et d'écoulement dans les solides. Transactions philosophiques de la Royal Society of London, A221 163-197.

Eshelby a introduit un certain nombre d'intégrales de contour comme :

$$\int_{\Gamma} \left(W dy - T_t^n \frac{\partial u_t}{\partial x} ds \right) = 0 \quad (1.3)$$

Travail effectué
Énergie de déformation par unité de volume

Il convient d'utiliser le symbole U pour l'énergie de déformation au lieu de W.

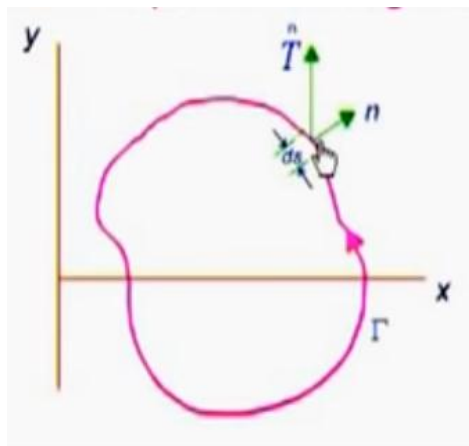


Figure 1-5: Contour d'intégration

$$W = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (1.5)$$

$$\left\{ T^n \right\} = \left[\tau_{ij} \right] \{ n \} \quad (1.6)$$

Pour les solides élastiques linéaires, l'énergie de déformation par unité de volume est :

$$U = \frac{1}{2} \int_v \left[\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{xz} \gamma_{xz} \right] dV \quad (1.7)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_v \left[\frac{1}{E} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) - \frac{2\nu}{E} (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + \frac{1}{G} (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right] dV \quad (1.8)$$

Considérons le contour fermé A, B, C, D, E, F, A

D'après les résultats d'Eshelby :

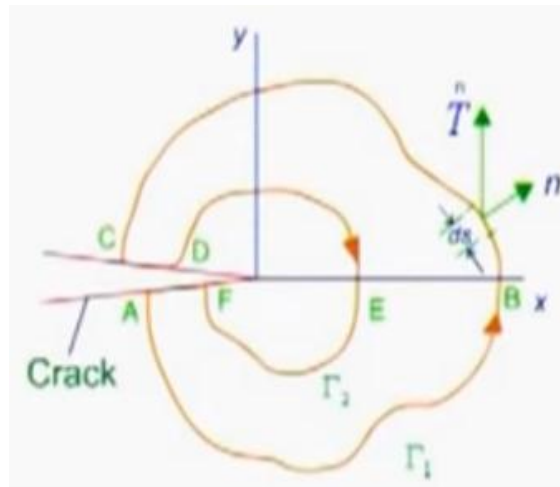


Figure 1-6: Les contours pour l'intégrale J

$$\int_{\Gamma_1} + \int_{CD} + \int_{\Gamma_2} + \int_{FA} = 0 \quad (1.9)$$

D'où :

$$\int_{CD} = 0 \quad \int_{FA} = 0$$

Par conséquent :

$$\int_{\Gamma_1} + \int_{\Gamma_2} = 0 \quad \int_{\Gamma_1} = -\int_{\Gamma_2} \quad (1.10)$$

Puisque : $\frac{n}{T} = 0$ et $dy \approx 0$

Ce résultat implique que dans les problèmes de fissures, si un contour part d'une face de fissure et se termine dans une autre face de fissure, l'amplitude de l'intégrale linéaire ne change pas.

Le résultat indique également que J-intégral est indépendant de chemin.

En prenons un chemin intégral linéaire qui entoure la pointe de la fissure de sorte que les points initial et final se trouvent sur les deux faces de la fissure. L'intégrale J est définie comme suit :

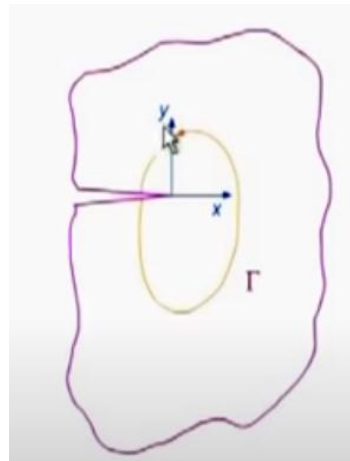


Figure 1-7: Chemins pour le calcul de l'intégrale J autour d'une fissure

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (1.3)$$

Ici, W représente l'énergie de déformation par unité de volume.

Il convient d'utiliser le symbole U pour l'énergie de déformation.

$$U = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (1.11)$$

U est l'énergie de déformation et c'est une fonction ponctuelle.

Il varie d'un point à l'autre du corps du composant.

deuxième terme de la forme développée de J est

$$\int_{\Gamma} \left(T_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + T_y \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) ds \quad (1.12)$$

$\overset{n}{T}$ est un vecteur de contrainte qui peut être obtenu par la formule de Cauchy.

$$\left\{ \overset{n}{T} \right\} = [\tau_{ij}] \{n\} \quad (1.6)$$

1.5.1 Intégrale J d'un spécimen de poutre en porte-à-faux double :

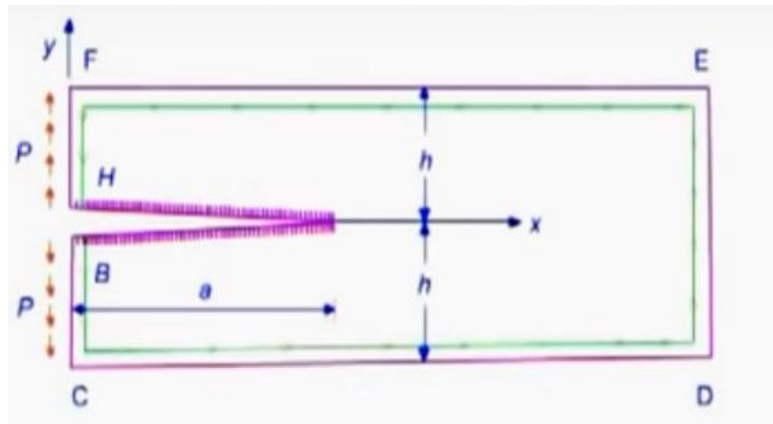


Figure 1–8: Poutre en porte-à-faux

Étant donné que J est indépendant du chemin, choisissez un chemin pour lequel l'intégrale de ligne peut être évaluée de manière pratique.

Considérons un chemin qui part d'une face de fissure vers l'autre face de fissure à travers la limite de l'éprouvette. Pour plus de clarté, le chemin est affiché légèrement à l'intérieur de la limite sous forme de ligne verte.

Les surfaces CD, DE et EF sont des surfaces libres, donc la traction est nulle. Ainsi, le second terme est nul.

U est également négligeable - donc pas de contribution à J.

Sur BC et FH, U est négligeable. En effet, l'énergie n'est due qu'au cisaillement et sa contribution est négligeable.

$$J = -2 \int_0^h \left(T_y \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) ds \quad (1.13)$$

$$J = \frac{12Pa^2}{EBh^3} \int_0^h T_y ds$$

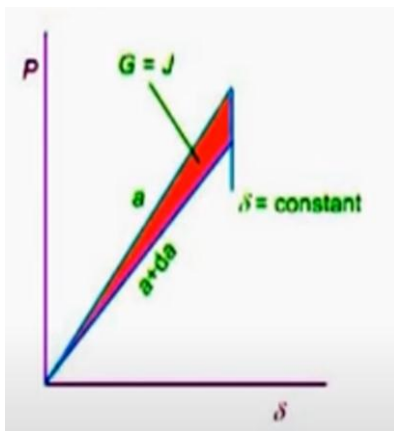
$$\int_0^h T_y ds = \int_0^h T_y dy = \frac{P}{B}$$

$$\text{donc : } J_I = G_I = \frac{12a^2}{EB^2} \frac{P^2}{h^3} \quad (1.14)$$

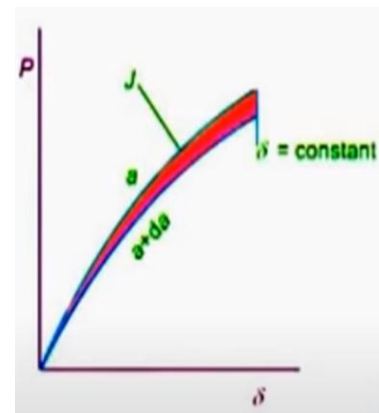
1.5.2 Utilité de J :

- L'indépendance du chemin de l'intégrale J offre une variété d'opportunités pour déterminer sa valeur.
- Il est utilisé pour évaluer K à partir de solutions d'éléments finis et également pour le calcul analytique dans certains cas.
- L'intégrale pouvant être prise à une distance quelque peu éloignée du fond de fissure, un calcul lourd et précis du champ dans la région du fond de fissure alors n'est pas nécessaire.
- Le besoin d'un maillage très raffiné peut ne pas être nécessaire.

1.5.3 Interprétation graphique de J :



Solide élastique linéaire



Solide élastique non linéaire

Figure 1-9: Interprétation géométrique de l'intégrale J

$$J = - \int_0^{\delta} \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right)_{\delta} d\delta \quad (1.15)$$

1.5.4 Comportement des matériaux élasto-plastiques :

En élasto-plastique, les chemins de chargement et de déchargement sont différents.

Pour une valeur de déformation, deux valeurs de contrainte.

Besoin de garder une trace de l'historique de chargement !

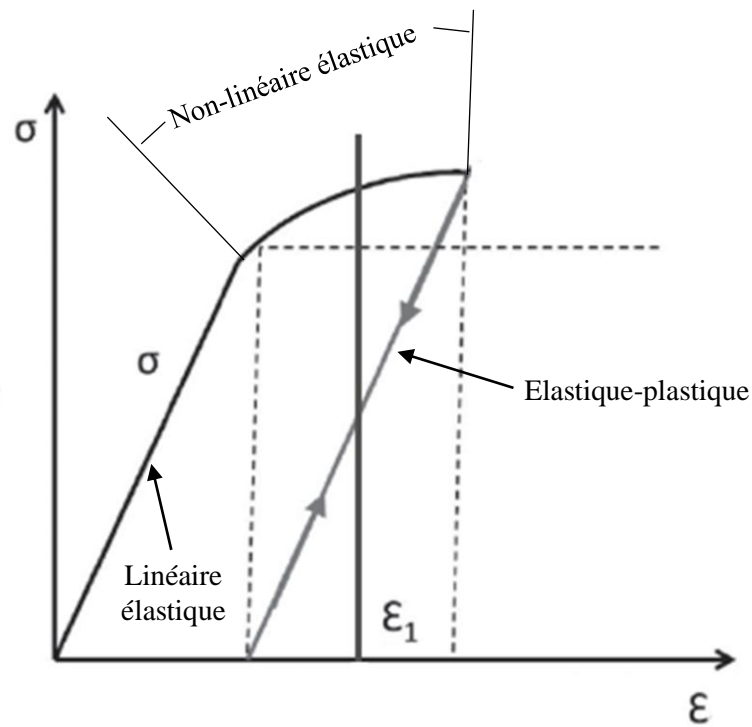


Figure 1-10: Courbe contrainte-déformation élasto-plastique

1.5.5 Extension du NMLER (mécanique non-linéaire élastique de la rupture) à l'MEPR (mécanique élasto-plastique de la rupture) :

L'extension du NMLER à l'MEPR est basée sur la théorie de la déformation de la plasticité. À condition qu'aucun déchargement ne soit autorisé, le comportement d'un matériau élasto-plastique et d'un matériau élastique non linéaire est impossible à distinguer pour un observateur extérieur - c'est-à-dire toute mesure externe de la déformation serait la même.

Les mécanismes qui se déroulent à l'intérieur des deux matériaux sont nettement différents, mais à l'extérieur, il n'y a pas de différence.

Pour que cela soit valide, les composantes de contrainte doivent rester dans une proportion fixe au fur et à mesure de la déformation.

- **Déformation/Théorie incrémentale de la plasticité**

Toute solution basée sur la théorie de la déformation de la plasticité coïncide exactement avec une solution basée sur la théorie incrémentale (écoulement) de la plasticité sous chargement proportionnel.

Sous un chargement proportionnel, les composants de contrainte changent dans une proportion fixe les uns par rapport aux autres pour lesquels aucun déchargement n'est autorisé en aucun point de la zone plastique.

La condition de chargement proportionnel n'est pas strictement satisfaite dans la pratique

- **Chargement proportionnel**

Dans les métaux de résistance intermédiaire, qui peuvent résister à une déformation plastique substantielle au-delà de l'initiation des fissures tout en présentant des quantités très limitées de croissance des fissures, un chargement presque proportionnel se produit

Le chargement proportionnel est une condition suffisante pour que les théories incrémentielles et de déformation concordent.

En raison de la simplicité mathématique relative, dans de nombreux cas, la théorie de la déformation a été utilisée.

Dans un certain nombre de problèmes stationnaires, sous une seule charge appliquée de manière monotone, la condition de chargement est proche de la proportionnalité.

Cela signifie que les composantes de déformation (et de contrainte) sont augmentées de manière monotone et dans un rapport fixe à chaque point matériel

Un certain nombre d'études utilisant les méthodes numériques telles que les éléments finis ont soutenu cette proposition.

- **MEPR (mécanique élasto-plastique de la rupture)**

Dans le comportement à la rupture élastoplastique, on observe généralement une croissance stable des fissures.

L'objectif de l'EPFM pour les applications pratiques est limité à la capacité de décrire l'initiation de la croissance des fissures et également de gérer une quantité limitée de croissance réelle des fissures.

Parmi les nombreux concepts développés, deux sont généralement acceptés : J-intégral et CTOD/COD.

- **Utilité de J**

Il faut tout de même veiller à ce que la raideur accrue du modèle numérique ne conduise pas à une sous-estimation des paramètres de rupture.

- **Dépendance du chemin de J**

Si les faces de la fissure sont chargées ou si la fissure est incurvée, J est en général dépendant du chemin,

CHAPITRE 2

SIMULATION NUMERIQUE PAR ABAQUS

2 SIMULATION NUMERIQUE PAR ABAQUS

2.1 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 [17].

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 [18].

2.2 GENERALITE SUR LE CODE DE CALCUL ABAQUS :

ABAQUS compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE, figure III.1.

2.2.1 ABAQUS/STANDARD :

ABAQUS Est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite [19].

- Résolution basée sur l'algorithme de Newton-Raphson et la méthode de Riks *
Problèmes linéaires et non linéaires

- Géométrie 1D, 2D, 3D et Axisymétrique
- Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel.

2.2.2 ABAQUS/EXPLICIT :

ABAQUS/ Explicit Un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamique ou quasi-statiques non-linéaires.

- Analyse non linéaire (discrétisation spatiale et temporelle)
- Problème transitoire et dynamique des structures
- Résolution basée sur la méthode explicite d'intégration en temps

2.2.3 ABAQUS/CAE :

ABAQUS /CAE Constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour lesdits solveurs. Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et optionnels, spécifiques à certaines applications. ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues

2.3 LES DIFFERENTS FICHIERS POUR LA SIMULATION SOUS ABAQUS :

2.3.1 FICHER D'ENTREE (INPUT FILE) :

III.3.1.1. Extension .inp : contient des mots clés décrivant la géométrie, les matériaux, les conditions limites et les chargements de la structure étudiée :

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

2.3.2 FICHER DE RESULTATS (OUTPUT FILE) :

2.3.2.1 EXTENSION .ODB : contient les contours et courbes de résultats.

2.4 AUTRES FICHIERS CREEES PAR ABAQUS LORS DE LA SIMULATION:

- Fichier .com : exécutable de vos calculs
- Fichier .res : fichier binaire de reprise
- Fichier .dat : 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.

2.5 ORGANISATION DE L'INTERFACE ABAQUS CAE (COMPLETE ABAQUS ENVIRONNEMENT) :

Il est important de savoir que le module CAE figure III.2 que vous allez utiliser pour créer votre jeu de données est relativement récent (quelques années) et qu'il est plutôt destiné à la mise en données de problèmes relativement classiques.

Donc pas toutes les commandes utilisables dans Abaqus et fait souvent le choix de paramètres par défaut [20].

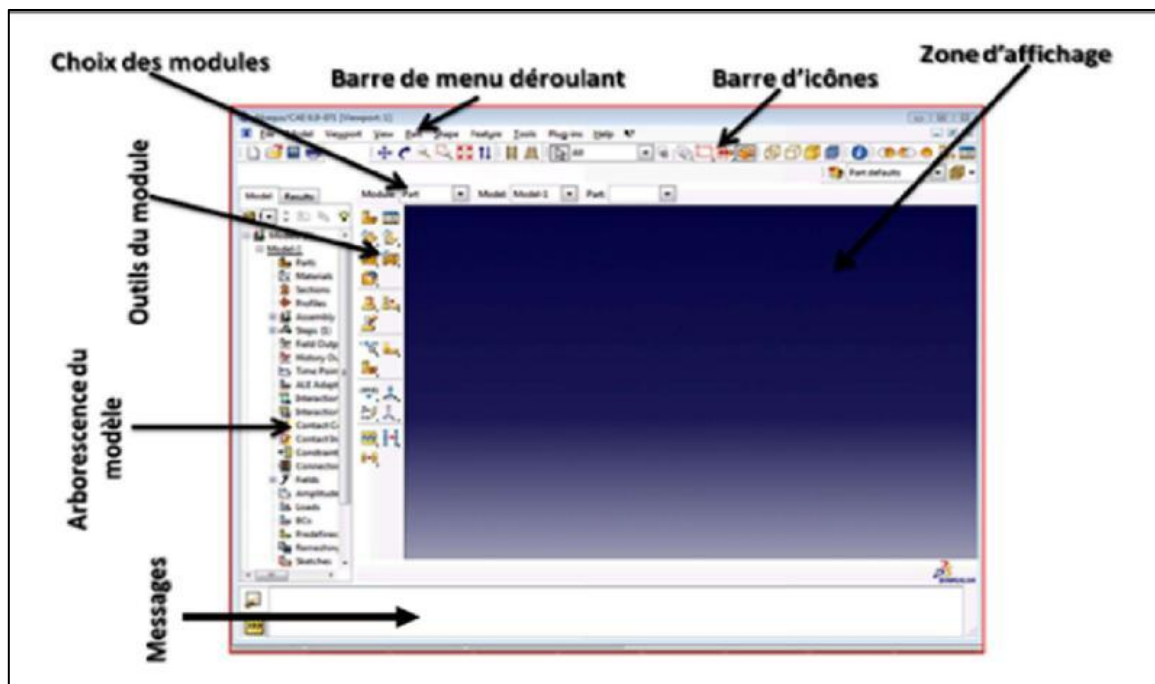


Figure 2-1: Organisation d'abaqus [20].

2.6 LES MODULES :

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les modules, figure III.3.

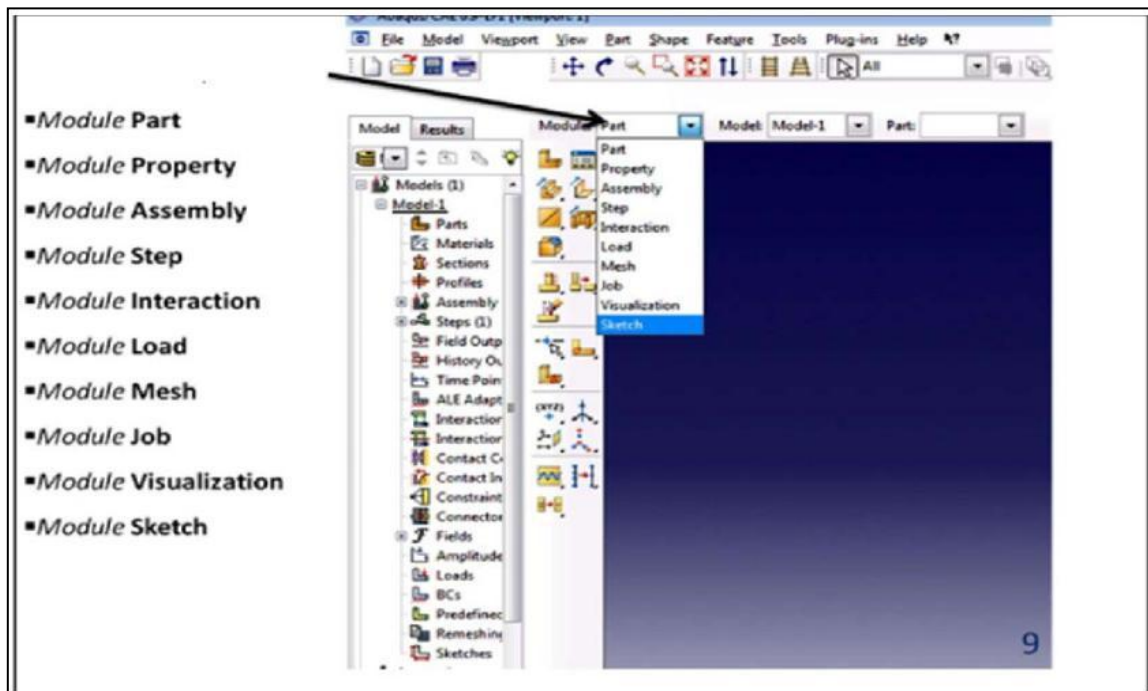


Figure 2–2: Réalisation de la mise en données d'un problème.

2.6.1 MODULE PART :

PART ce module qu'est définie la géométrie des entités du modèle. Figure 2.4 et figure 2.5. 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.

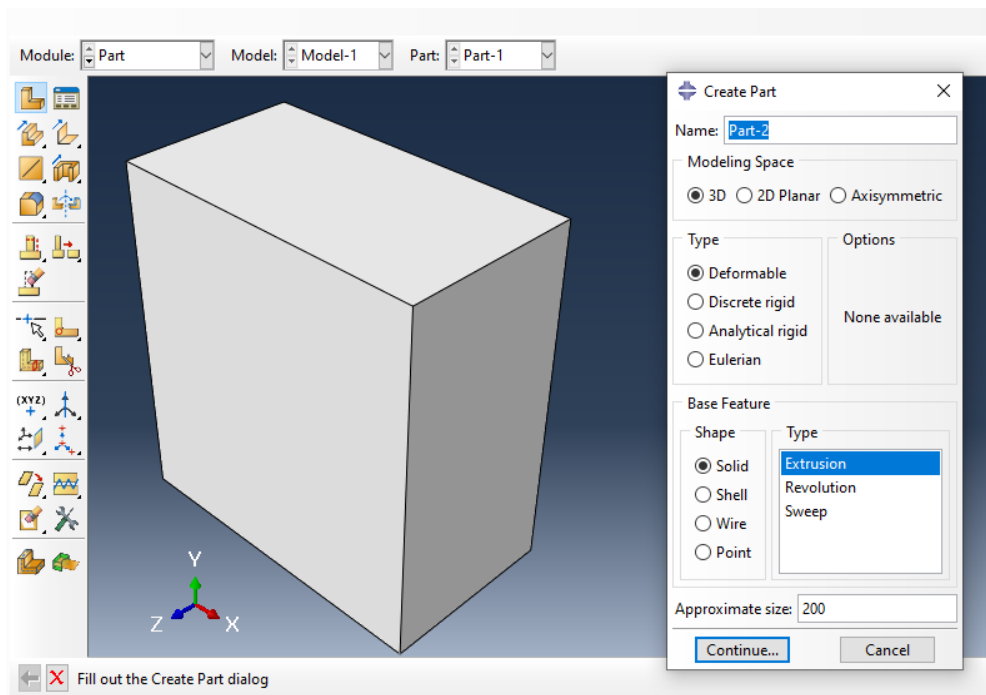


Figure 2–3: Module Part

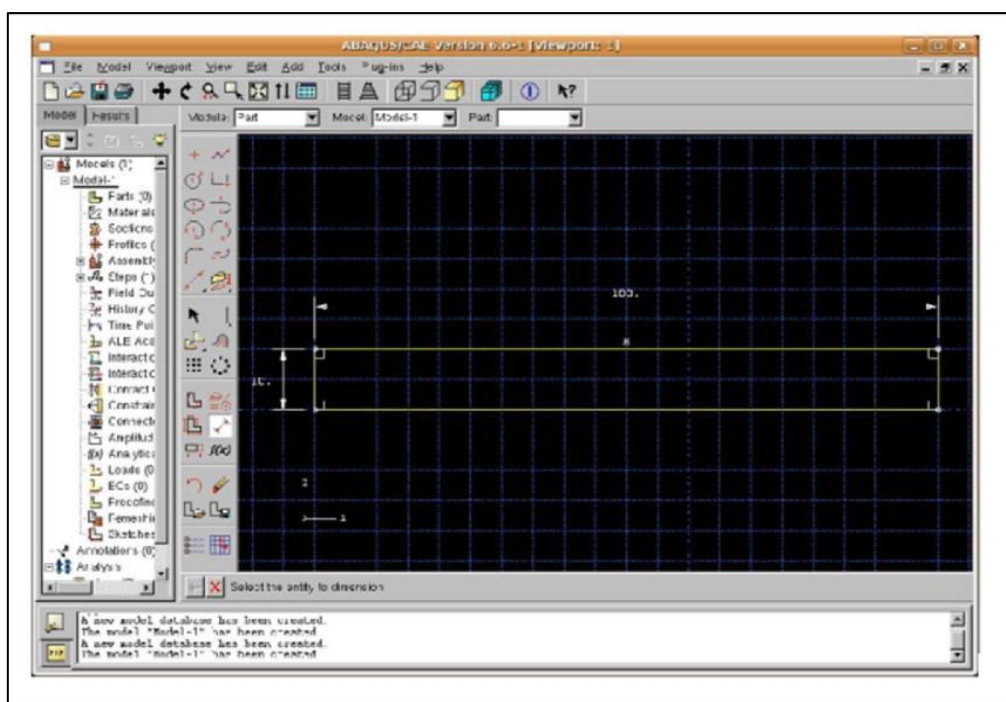


Figure 2–4: création de la géométrie .

2.6.2 MODULE PROPERTY :

On y définit les propriétés du ou des matériaux figure 2.6 (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 éventuellement la création d'une base de données, il vous reste à définir :

- Les propriétés élastiques via Mechanical, Elasticity, Elastic (module d'Young et le coefficient de Poisson pour un matériau isotrope).
- Les propriétés plastiques via Mechanical, Plasticity, Plastic. (Sous l'hypothèse d'un écrouissage isotrope, 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 ($\ln(L/LO)$).

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.

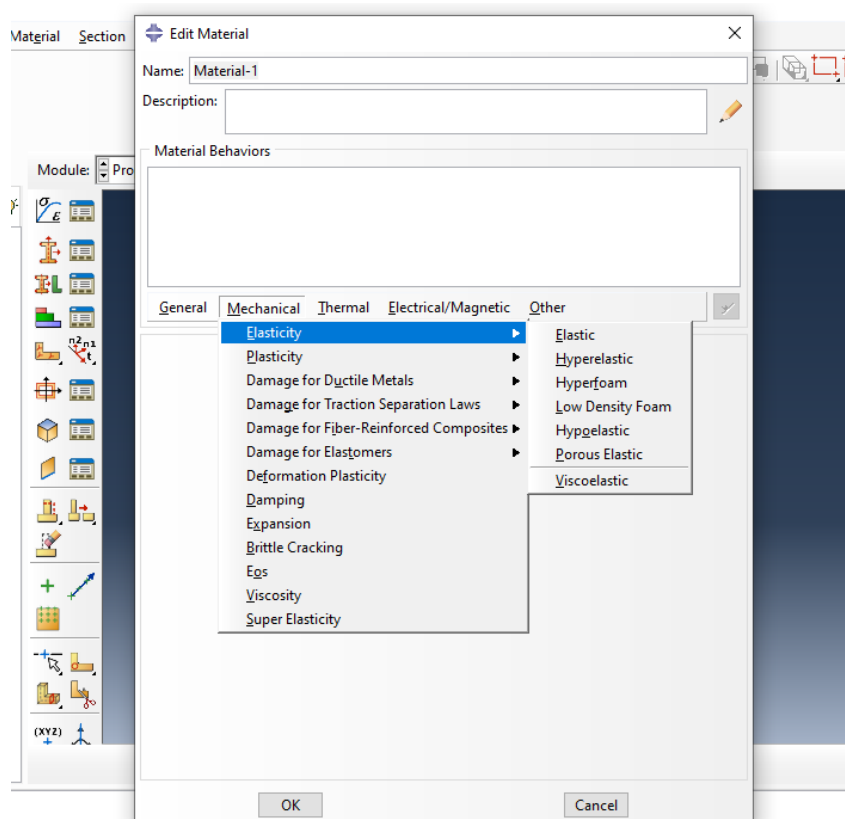


Figure 2–5: propriété Matériaux et section

2.6.3 MODULE ASSEMBLY :

Assembly ce module, il s'agit de créer une instance figure 2.7 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.

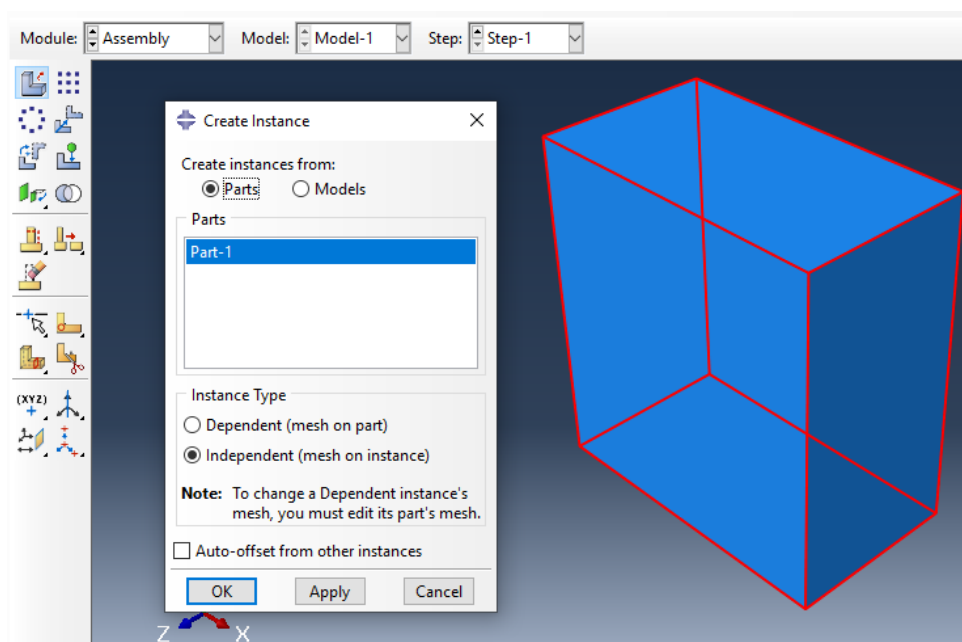


Figure 2–6: Instance et assemblage.

2.6.4 MODULE STEP :

C'est ici que vous choisirez, figure 2.8 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.

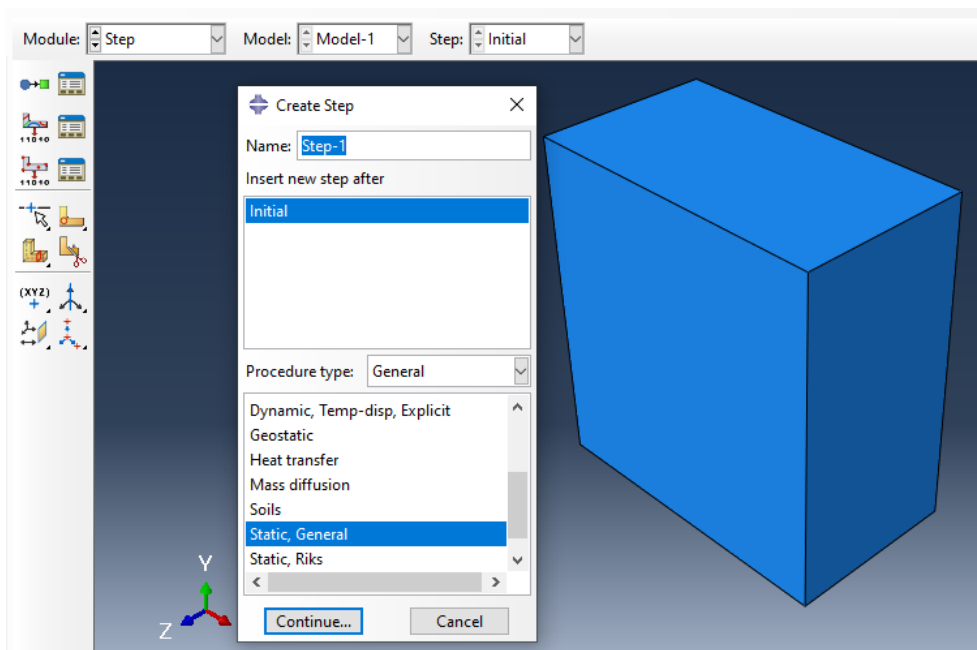


Figure 2–7: Création de step.

2.6.5 MODULE INTERACTION :

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu’elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n’étant pas suffisante Figure 2.9.

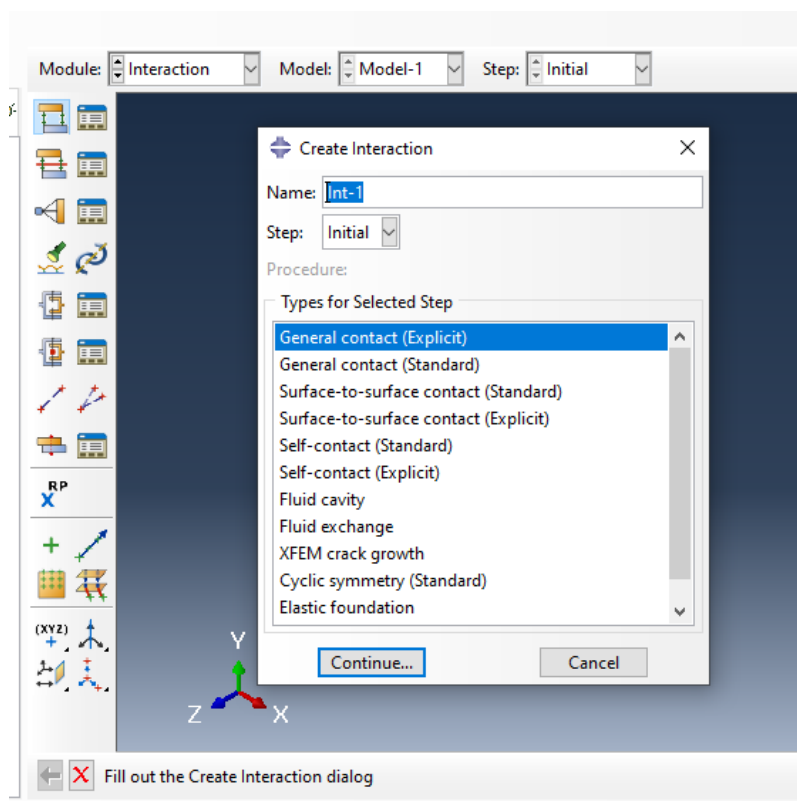


Figure 2–8: interaction

2.6.6 MODULE LOAD :

Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Figure 2.10 .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.

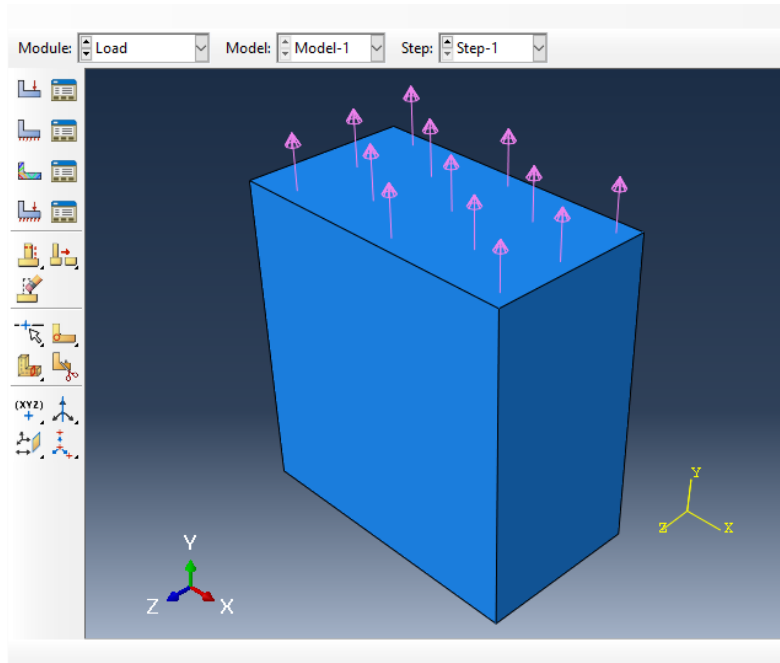


Figure 2–9: création des chargements.

2.6.7 MODULE MESH :

Mesh contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage, figure 2.11

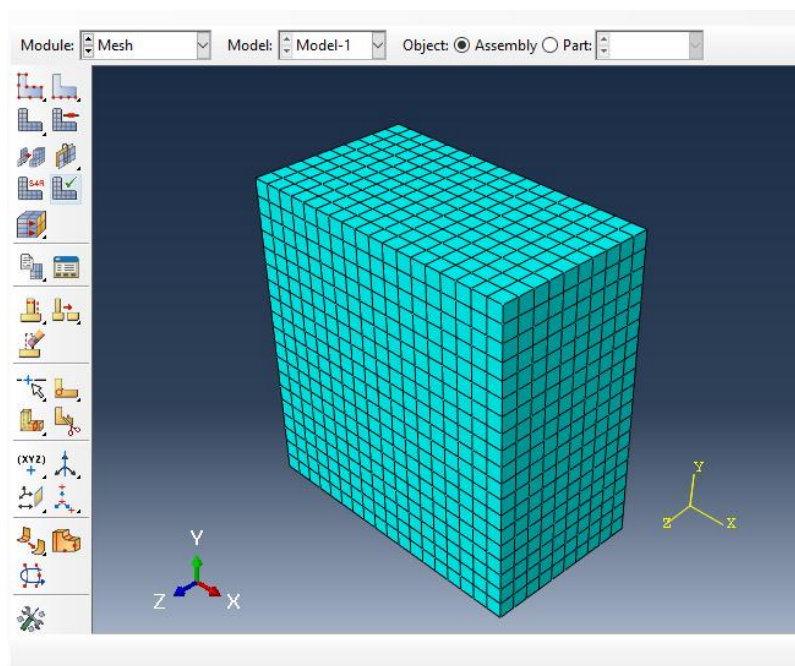


Figure 2–10: Création de maillage.

2.6.8 MODULE JOB :

Le « lancement » du calcul est classique. Figure 2.12, 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.

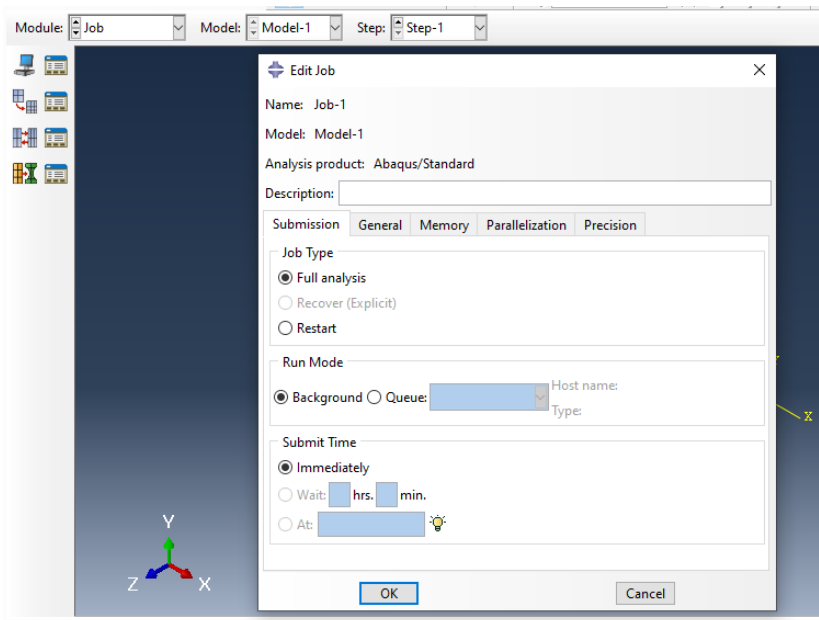


Figure 2–11: Lancement de calcul.

2.6.9 MODULE VISUALIZATION :

Visualization Est un module qui affiche tout les résultats de la pièce soit contrainte ou déformation, figure 2.13.

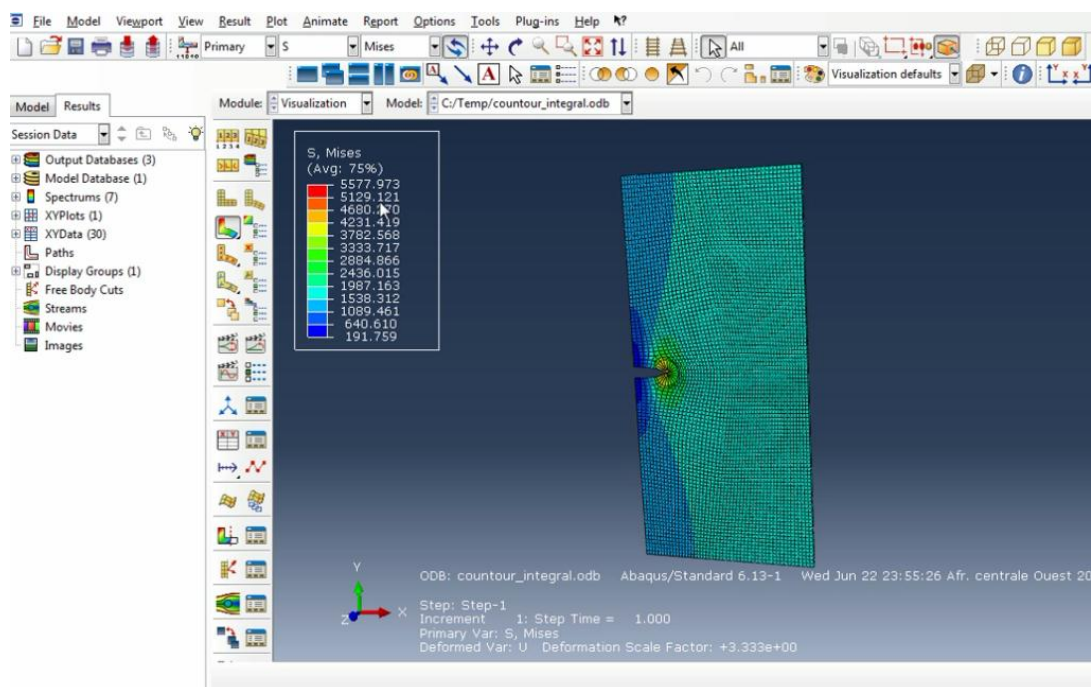


Figure 2–12: Affichage des résultats.

2.6.10 MODULE SKETCH :

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

Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

2.7 L'ARBRE DU MODELE :

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 reflète 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 principale. Par exemple, double cliquer sur Part permet de créer une nouvelle Part comme sélectionner **Part -> Create** dans la barre de menu.

2.8 LES ELEMENTS DANS ABAQUS :

Un très large choix d'éléments (plus de 100), figure 2.14.

Chaque élément est caractérisé par : famille, ddl, nombre de nœuds, intégration.

Possibilités de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard) [21].

2.8.1 DEGRE DE LIBERTE (DDL) :

- 1 Translation en direction 1
- 2 Translation en direction 2
- 3 Translation en direction 3
- 4 Rotation autour de l'axe 1
- 5 Rotation autour de l'axe 2
- 6 Rotation autour de l'axe 3

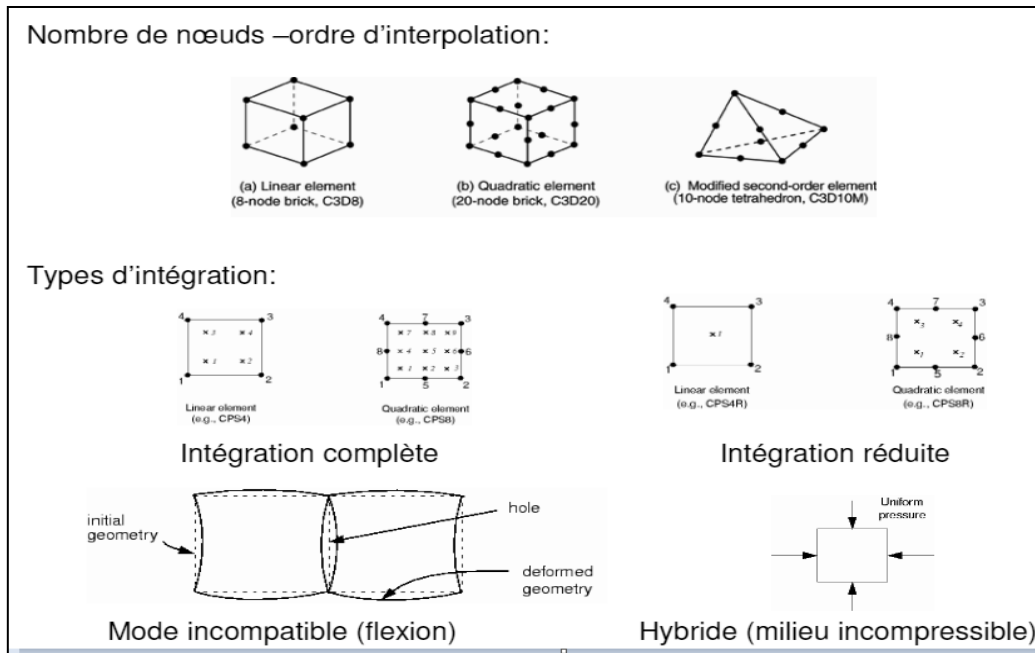


Figure 2–13: Les types d'intégrations et le nombre de nœuds

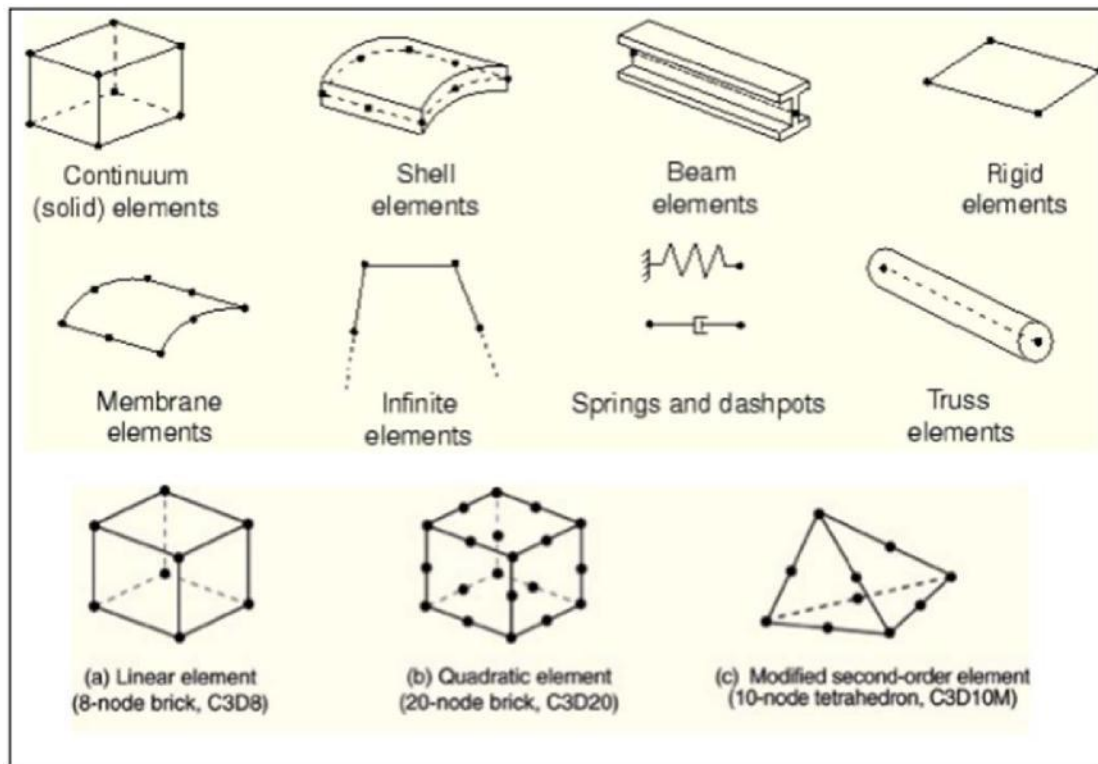


Figure 2–14: Quelques éléments dans Abaqus [22].

- les éléments :poutres

Éléments poutres:


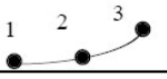
Type d'analyse	Degré(s) de liberté nodaux	Type	Réf.	Schéma
MECANIQUE	(u, v, w) : 1, 2, 3	2 noeuds, linéaire	B21/B31	
	(α, β, γ) : 4, 5, 6	3 noeuds, quadratique	B22/B32	

Figure 2–15: Exemple d'élément poutre.

- Les éléments unidimensionnels (1D) : barres, poutres rectilignes ou courbes utilisées de façon individuelle ou associées à des plaques pour modéliser les raidisseurs dans un voile.

Éléments 1D Solides:


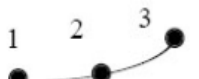

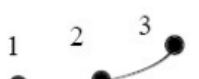

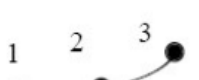
Type d'analyse	Degré(s) de liberté nodaux	Type	Réf.	Schéma
MECANIQUE	(u, v, w) : 1, 2, 3	2 noeuds, linéaire	C1D2	
		3 noeuds, quadratique	C1D3	
TRANSFERT DE CHALEUR	(température) : 11	2 noeuds, linéaire	DC1D2	
		3 noeuds, quadratique	DC1D3	
TEMPERATURE-DEPLACEMENT	(u, v, w) : 1, 2, 3	2 noeuds, linéaire	DC1D2T	
	(température) : 11	3 noeuds, quadratique	DC1D3T	

Figure 2–16: Éléments solides 1D.

- Les éléments bidimensionnels (2D) : élasticité plane (déformation on contraint) on plaque en flexion, coques courbes , de forme triangulaire ou quadrangulaire.

Éléments 2D Solides:


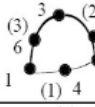






Type d'analyse	Degré(s) de liberté nodaux	Type	Réf.	Schéma
MECANIQUE DEFORMATIONS PLANES / CONTRAINTES PLANES	(u, v) : 1, 2	3 noeuds, linéaire	CPE3 /CPS3	
		6 noeuds, quadratique	CPE6 /CPS6	
	(u, v) : 1, 2	4 noeuds, linéaire	CPE4 /CPS4	
		8 noeuds, quadratique	CPE8 /CPS8	
TRANSFERT DE CHALEUR	(température) : 11	3 noeuds, linéaire	DC2D3	
		4 noeuds, linéaire	DC2D4	
TEMPERATURE-DEPLACEMENT	(u, v) : 1, 2 (température) : 11	4 noeuds, linéaire	CPE4T /CPS4T	
DEFORMATIONS PLANES / CONTRAINTES PLANES		8 noeuds, déplacement quadratique, température linéaire	CPE8T /CPS8T	

Figure 2–17: Éléments solides 2D

- **Les éléments axisymétriques** : qui constituent une classe bien particulière :

toutes à section triangulaire ou quadrangulaire, coques conique ou méridienne courbe, (éléments de volume ou coques épaisses).

Éléments 2D axisymétriques

Type d'analyse	Degré(s) de liberté/nœuds	Type	Réf.	Schéma
MECANIQUE	(u, v) : 1, 2	3 nœuds, linéaire	CAX3	
		6 nœuds, quadratique	CAX6	
	(u, v) : 1, 2	4 nœuds, linéaire	CAX4	
		8 nœuds, quadratique	CCAX8	
TRANSFERT DE CHALEUR	(température) : 11	3 nœuds, linéaire	DCAX3	
		4 nœuds, linéaire	DCAX4	
TEMPERATURE-DEPLACEMENT	(u, v) : 1, 2 (température) : 11	4 nœuds, linéaire	CAX4T	
		8 nœuds, déplacement quadratique, température linéaire	CAX8T	

Figure 2–18:Éléments axisymétriques 2D.

- Les éléments tridimensionnels (3D) : éléments de volume ou coques épaisses.

Éléments coques:

Type d'analyse	Degré(s) de liberté nœaux	Type	Réf.	Schéma
MECANIQUE	(u, v, w) : 1, 2, 3 (α, β, γ) : 4, 5, 6	3 nœuds, linéaire	S3R	
		4 nœuds, linéaire	S4R	
		8 nœuds, quadratique	S8R	
TRANSFERT DE CHALEUR	(température) : 11, 12, ...17	4 nœuds, quadratique	DS4	
TEMPERATURE-DEPLACEMENT COUPLEE	(u, v, w) : 1, 2, 3 (α, β, γ) : 4, 5, 6 (température) : 11, 13, ...17	8 nœuds, quadratique	S8RT	

Figure 2–19: Éléments coques et 3D.

CHAPITRE 3

PARTIE NUMERIQUE

CALCUL DE PROPAGATION DE FISSURE (ABAQUS)

3 PARTIE NUMERIQUE: CALCUL DE PROPAGATION DE FISSURE (ABAQUS)

3.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, on va utiliser une méthode numérique pour calculer K_I basée sur l'intégral J. Le logiciel qu'on va utiliser est « Abaqus ». Nous présentons la procédure détaillée de calcul et toutes les étapes nécessaires qu'on va suivre.

3.2 PRESENTATION DU PROBLEME :

On a une plaque métallique de forme rectangulaire avec dimensions $2h \times h$, avec une simple fissure débouchante a . On considère que le matériau est isotrope avec un module de Young E et un coefficient de poisson ν . On applique une charge de traction constante σ le long des deux bords supérieur et inférieur de la plaque (Figure 3.1).

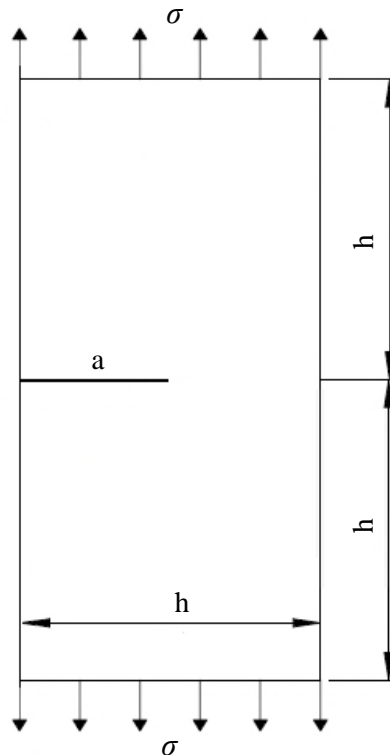


Figure 3-1: Modèle de la plaque fissurée

3.3 CONSTRUCTION DU MODELE DANS ABAQUS :

Les données de l'application numérique sont résumées dans le tableau 3.1

Grandeurs		Valeur	Unité
Longueur de la plaque	2h	4	m
Largeur de la plaque	h	2	m
Longueur de fissure	a	1	m
Module de Young	E	210	Gpa
Coefficient de Poisson	ν	0.3	
Charge de traction	σ	50	N/m^2

Tableau 3–1: application numérique

3.3.1 CREATION DE LA GEOMETRIE:

C'est dans ce module qu'est définie la géométrie des entités du modèle.

- Dans le module **Part**, on clique sur **Creat Part** (Figure 3.2 (a))
- Une fenêtre va apparaître, on la remplit comme il est indiqué sur la figure 3.2(b), puis on tape sur **Continue...**
- Ensuite, on va dessiner notre plaque à l'aide de la commande **Creat Lines : Rectangle (4 Lines)** et la dimensionner par **Add Dimension**. Enfin, on termine en appuyant sur **Done** (Figure 3.3(a)). Le résultat final est comme suit (Figure 3.3(b)).

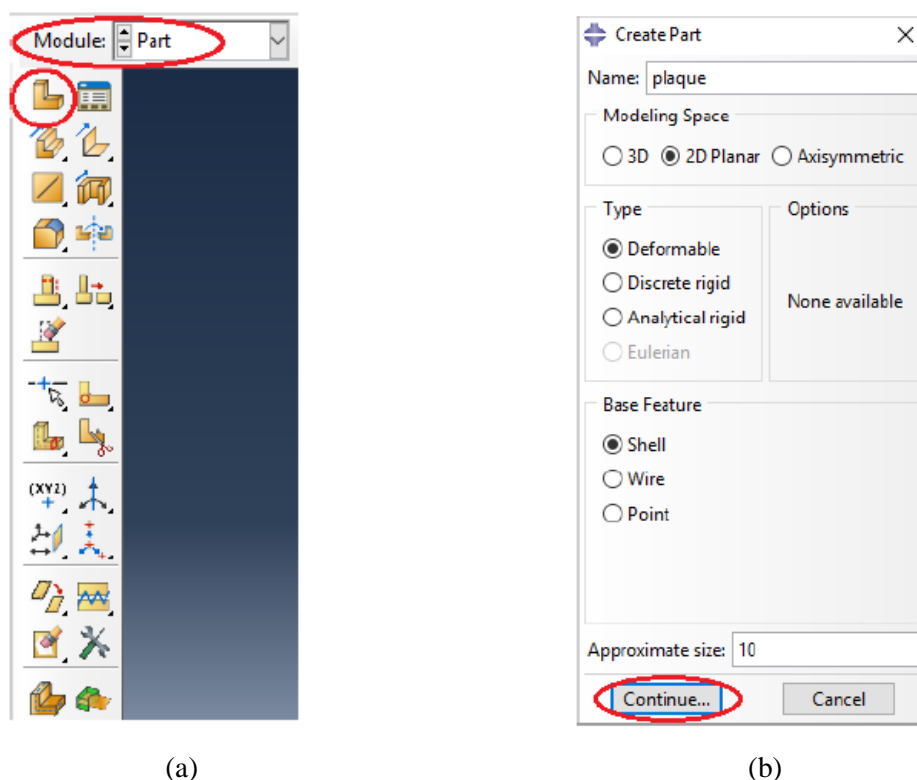


Figure 3–2: Création de la géométrie

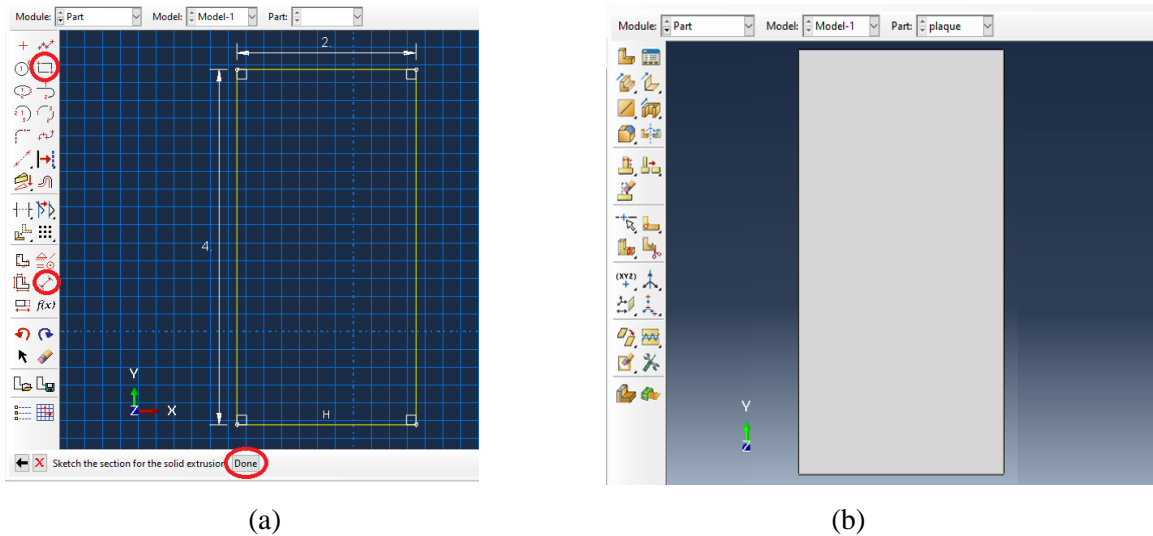


Figure 3-3: Dessin de la plaque

Après sa création de, on va faire une esquisse dans la plaque. Dans cette étape, on va :

1. Créer l'emplacement de la fissure.
2. Dessiner des demi-cercles autour de la pointe de fissure nécessaires pour la création des contours.
3. Partitionner ces demi-cercles de façon à créer la forme des éléments singuliers.
4. Raffiner le maillage.

On reste dans le même module et on clique sur **Partition Face : Sketch** (Figure 3.4(a)). À l'aide des commandes d'esquisse, on va dessiner sur notre plaque comme le montre la figure 3.4(b).

Le résultat final est comme suit (Figure 3.5) :

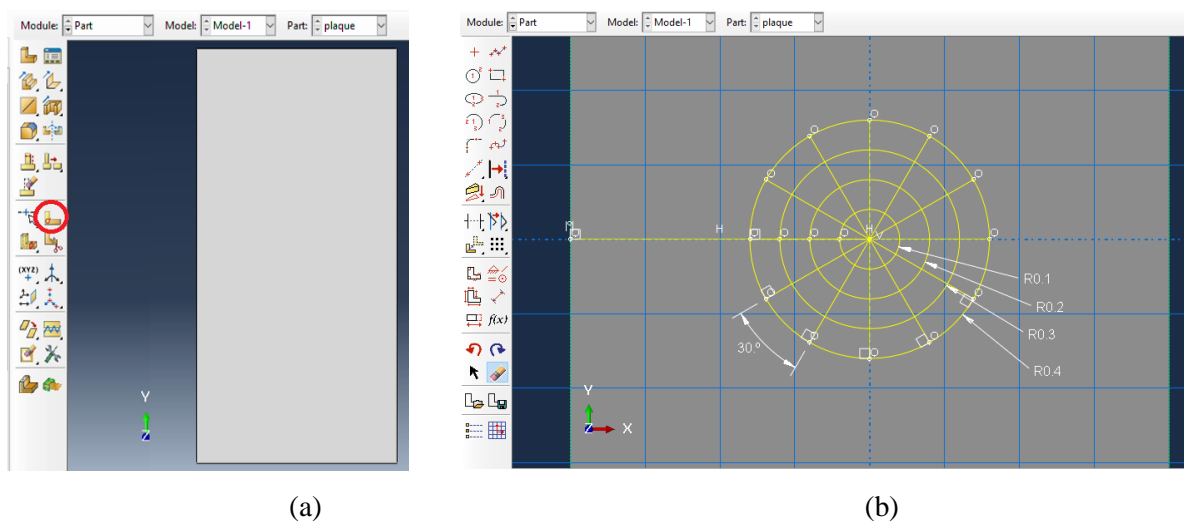


Figure 3-4: Esquisse

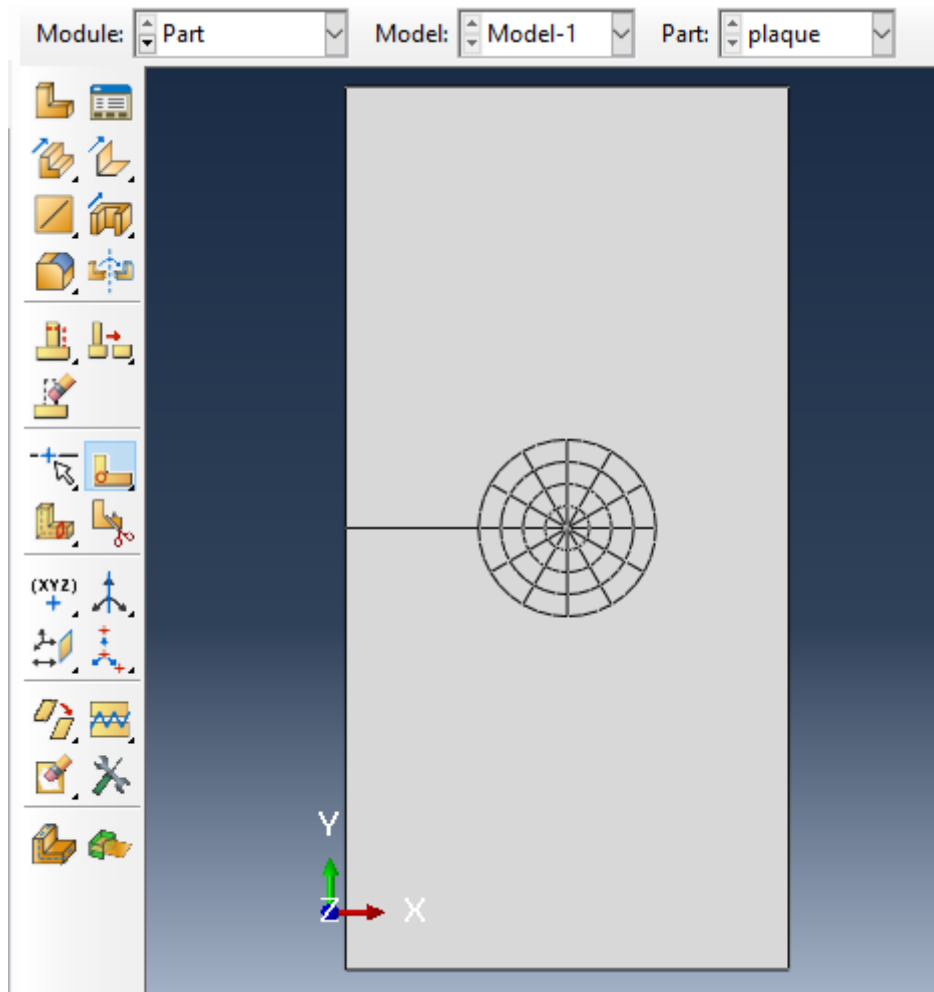
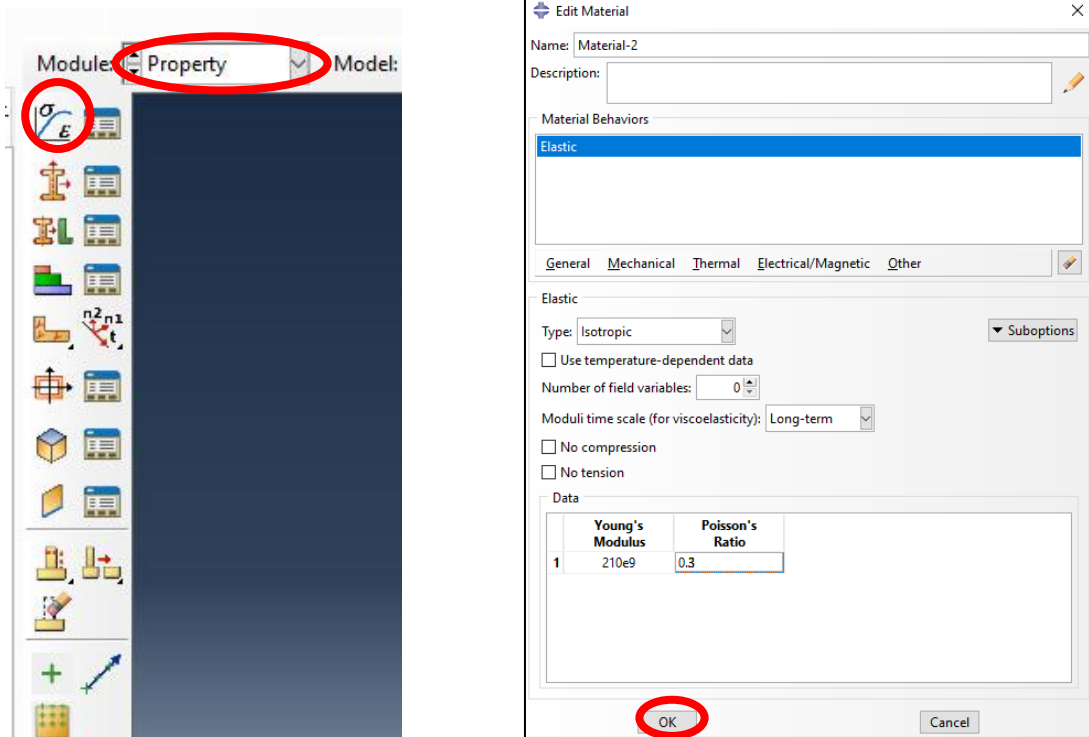


Figure 3–5: Plaque avec les demi-cercles partitionnés

3.3.2 PROPRIETES DU MATERIAU:

- Dans le module **Property**, on clique sur **Create Material** (Figure 3.6(a))
- On choisit un nom pour notre matériau, par exemple « Métal »,
- Puis on va vers **Mechanical** → **Elasticity** → **Elastic** pour définir les caractéristiques élastiques du matériau. Enfin on appuie sur **OK** (Figure 3.6(b)).

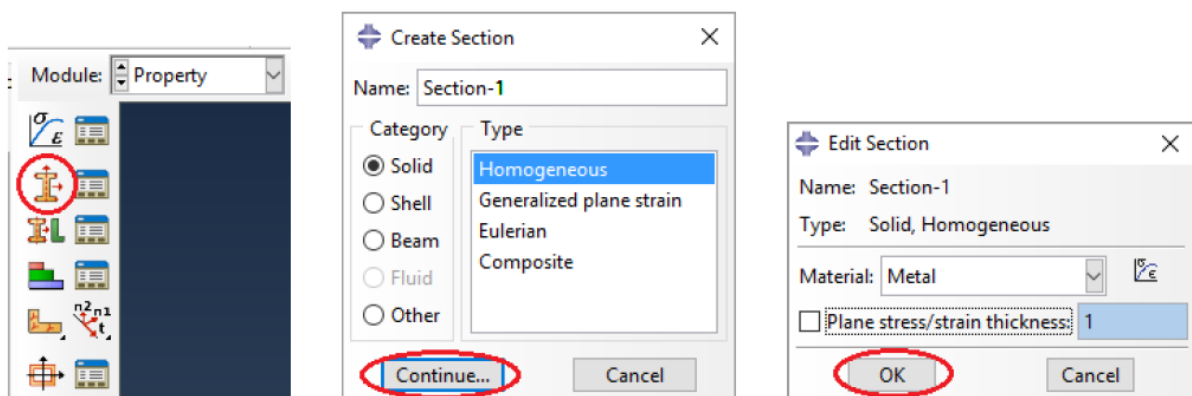


(a) (b)

Figure 3-6: Définition du matériau

Après la définition du matériau, On va créer une section :

- Dans le même module, on appuie sur **Create Section** (Figure 3.7(a)).
- On va nommer notre section « Section-1 » et sélectionner **Solid** dans **Category** et **Homogeneous** dans **Type**, on termine par **Continue...** (Figure 3.7(b)).
- Une fenêtre va apparaître, on va choisir dans **Material** notre matériau créé précédemment et on termine par **OK** (Figure 3.7(c)).

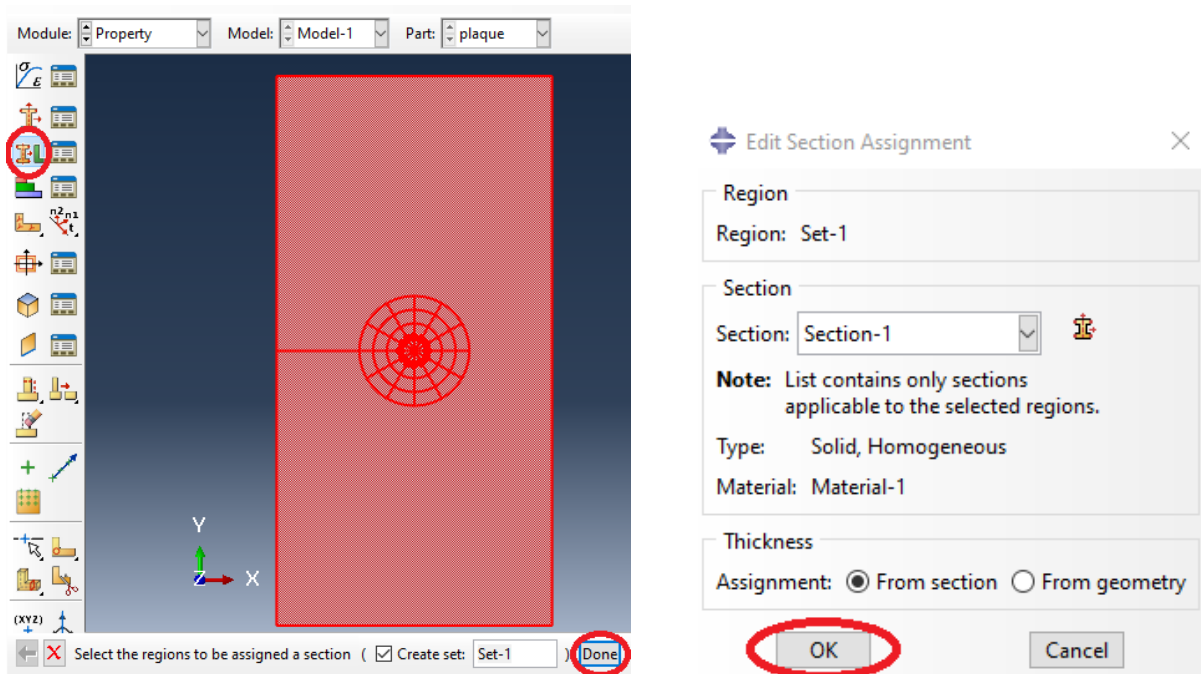


(a) (b) (c)

Figure 3-7: Définition de la section

Maintenant, on va attribuer à notre géométrie la section créée précédemment :

- Dans le même module, on appuie sur **Assign Section** puis on sélectionne la géométrie et on clique sur **Done** (Figure 3.8(a))
- Dans la nouvelle fenêtre, on choisit notre section et on tape sur **OK** (Figure 3.8(b)).



(a)

(b)

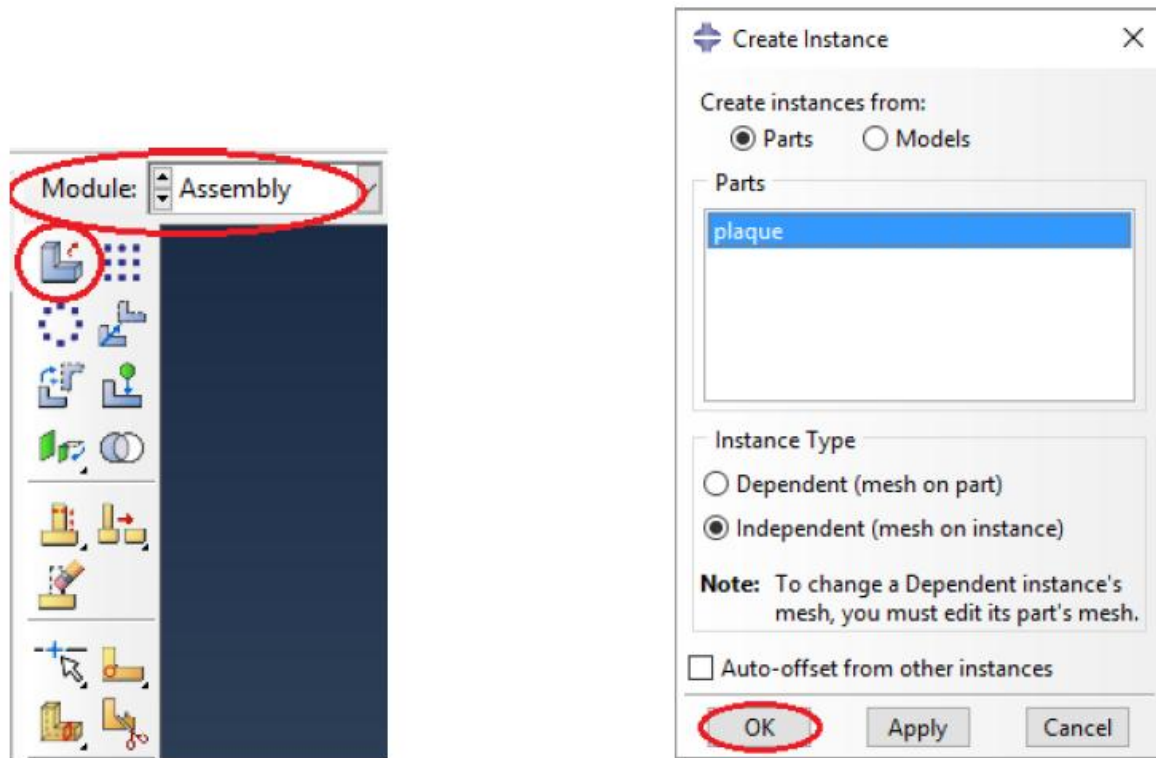
Figure 3–8: Attribution de la section

3.3.3 CREATION DE L'ASSEMBLAGE:

Dans ce module, on va créer un assemblage. Dans Abaqus, chaque modèle doit contenir un assemblage, même s'il se compose d'une seule partie :

- Dans le module **Assembly**, on sélectionne **Create Instance** (Figure 3.9(a)).
- On remarque que notre plaque a été choisie par défaut. Dans **Instance Type**, on sélectionne **Independent (mesh on instance)**
- on termine par **OK** (Figure 3.9(b)).

Ce choix signifie que le maillage se fera au niveau de l'assemblage non pas au niveau de la pièce. La création des singularités n'est possible que dans ce cas.



(a)

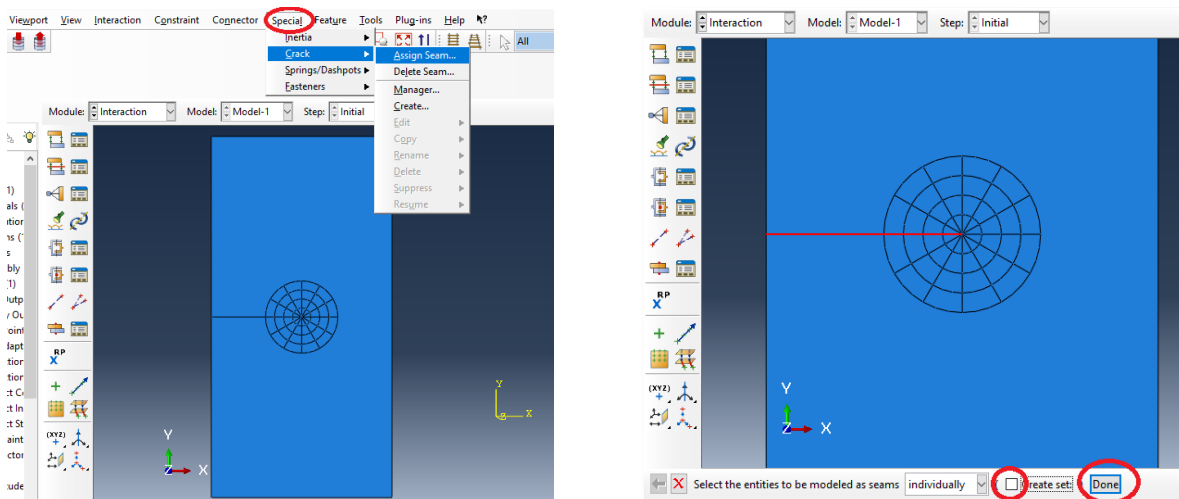
(b)

Figure 3-9: Création de l'assemblage

3.3.4 CREATION DE LA FISSURE:

Maintenant, on va passer au module **Interaction** pour la creation de la fissure :

- Dans la barre de menue, on va vers **Special** → **Crack** → **Assign Seam...** (Figure 3.10(a)).
- On sélectionne les lignes qui présentent la fissure et on appuie sur **Done**(Figure 3.10(b)).



(a)

(b)

Figure 3-10: L'emplacement de la fissure

- Dans la barre de menu, on va vers **Special** → **Crack** → **Create...** (Figure 3.11(a)).
- On va nommer notre fissure « fissure », puis on choisit dans **Type**, **Contour integral** et on appuie sur **Continue...** (Figure 3.11(b))

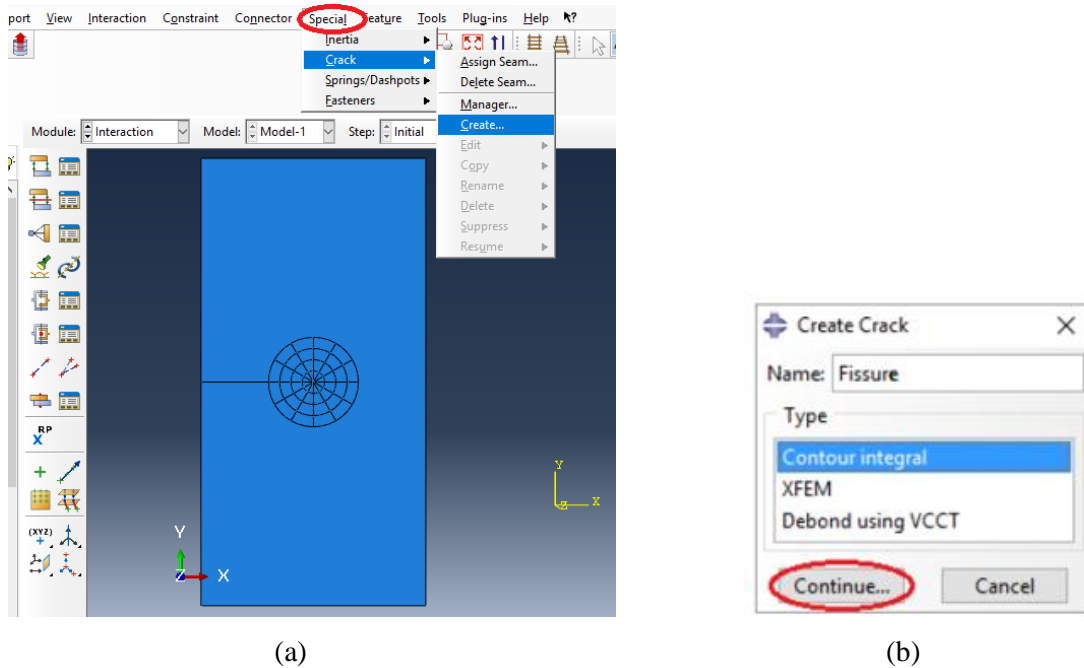
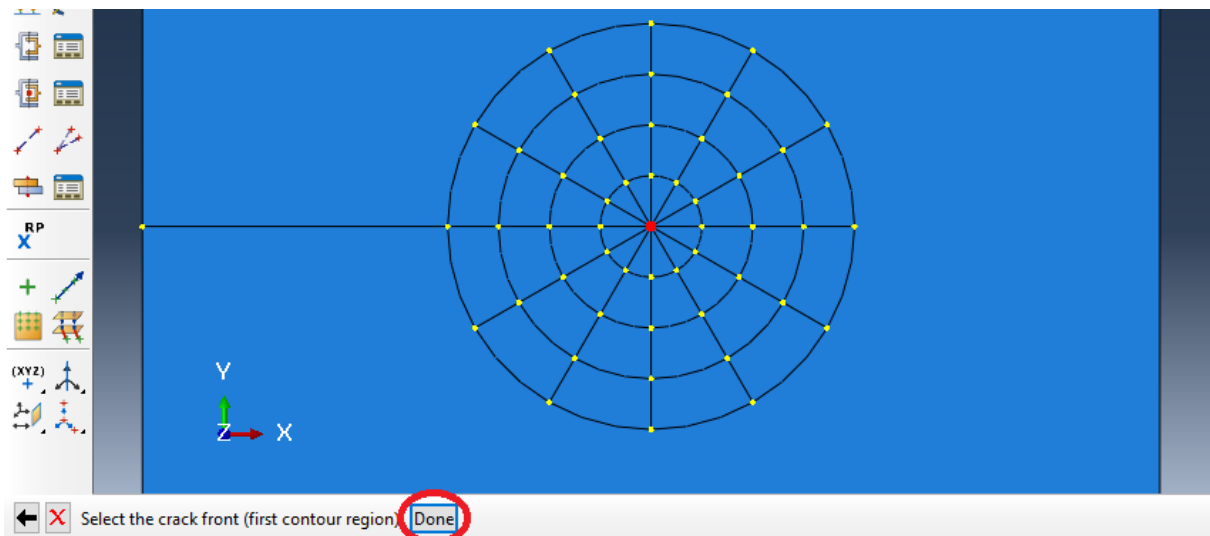
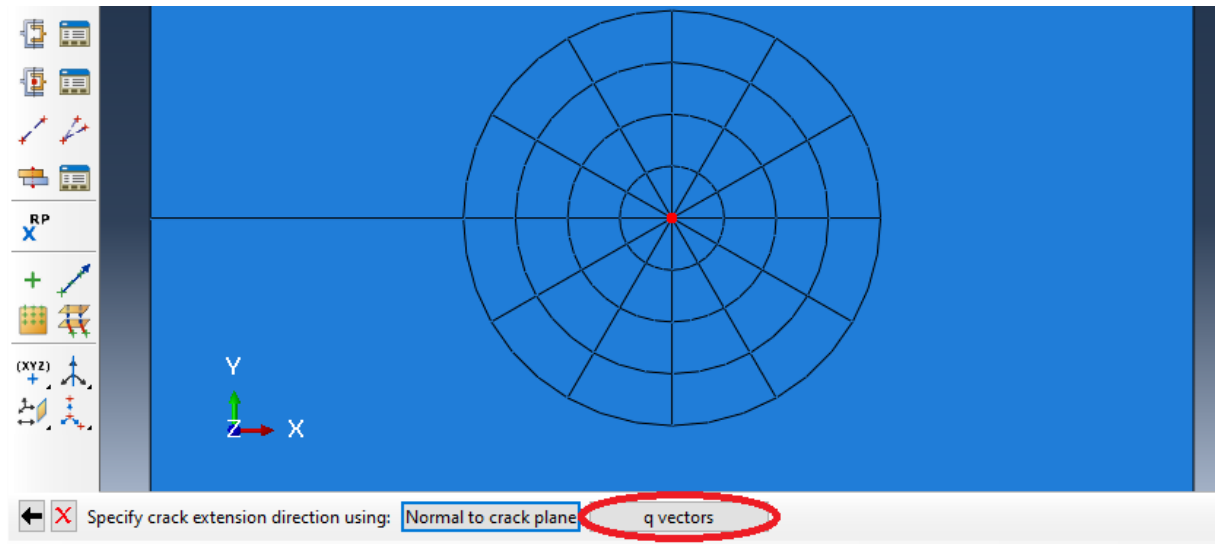


Figure 3–11: Création de la fissure

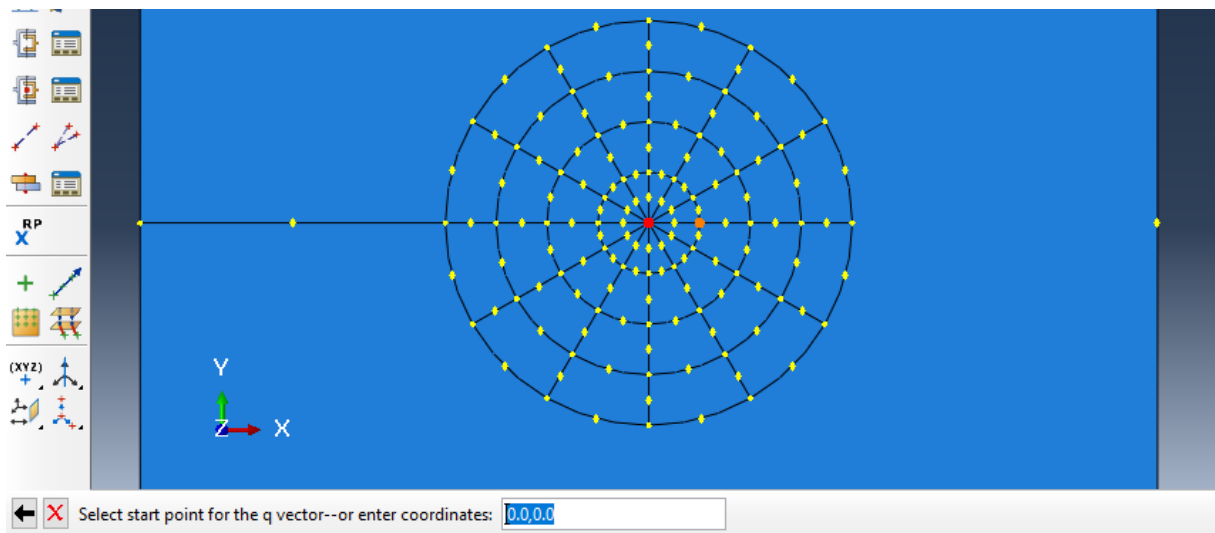
- On va entrer la position de la pointe de fissure. On clique sur le centre des cercles (point en rouge) puis sur **Done** (Figure 3.12(a)).
- Pour choisir la direction de propagation de la fissure. On clique sur **q vectors**, on sélectionne la pointe de fissure comme origine du vecteur direction et un point sur son horizontal à droite comme son extrémité (Figures 3.12(b) ,3.12(c), 3.12(d)).



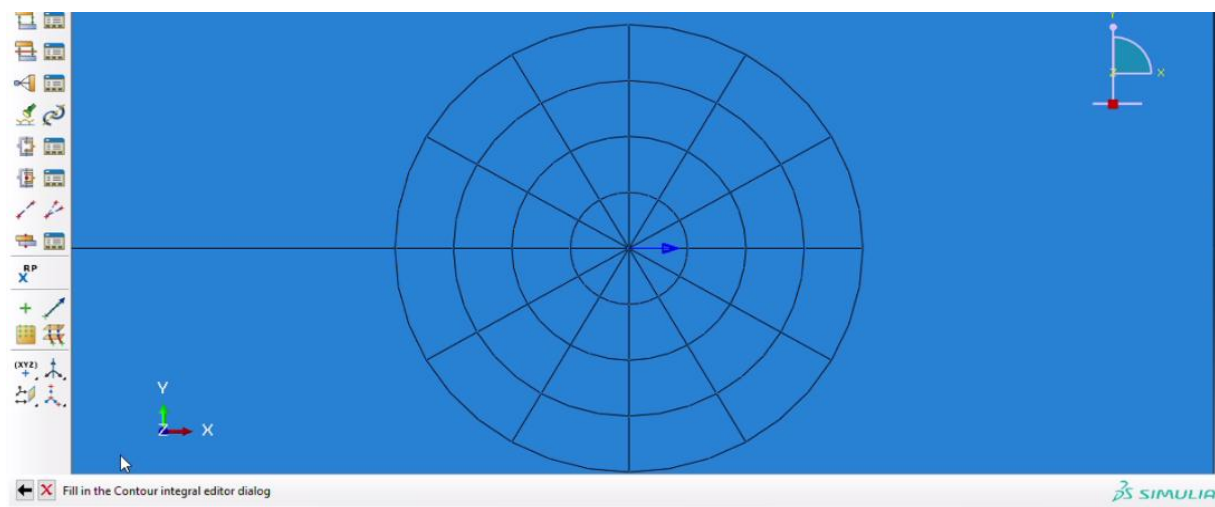
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3–12: Pointe de fissure et direction de propagation

Dans la nouvelle fenêtre **Edit Crack**, dans l'onglet Singularity, on va définir les paramètres de la singularité. On met 0.25 dans **Midside node parameter ($0 < t < 1$)** :, on choisit **Collapsed element side, single node** et on termine par **OK** (Figure 3.13(b)).

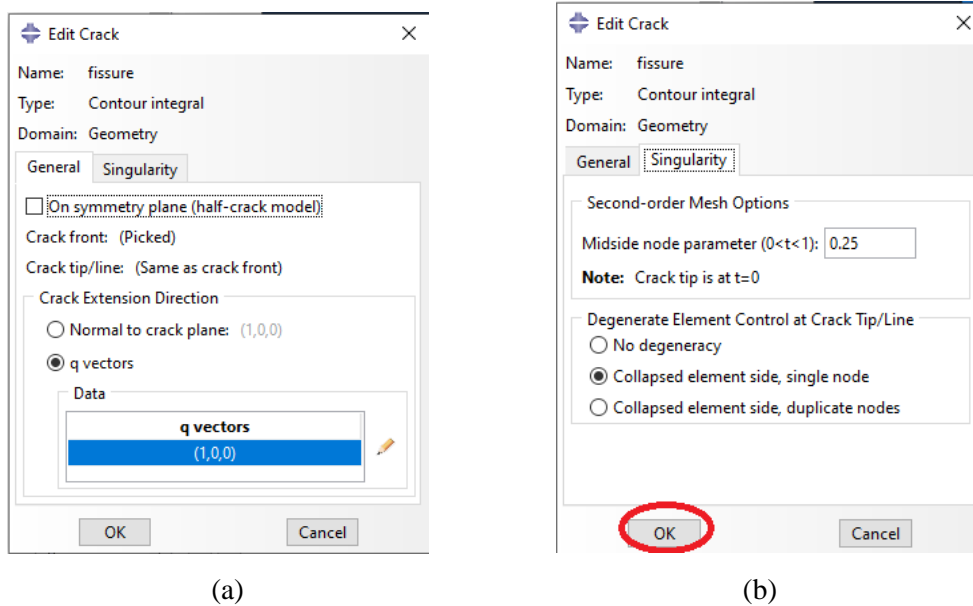


Figure 3–13: singularité

3.3.5 ÉTAPES ET PARAMETRES DE SORTIE:

Dans notre étude, on aura besoin d'une seule étape de calcul :

- Dans le module **Step**, on clique sur **Create Step** (Figure 3.14(a)).
- Ensuite, on va nommer notre étude « traction », et puisque cette dernière est statique, on choisit **Static, General** puis on tape sur Continue... (Figure 3.14(b)).
- Dans la fenêtre sortante **Edit Step** On laisse les paramètres par défaut et on termine par **OK**.

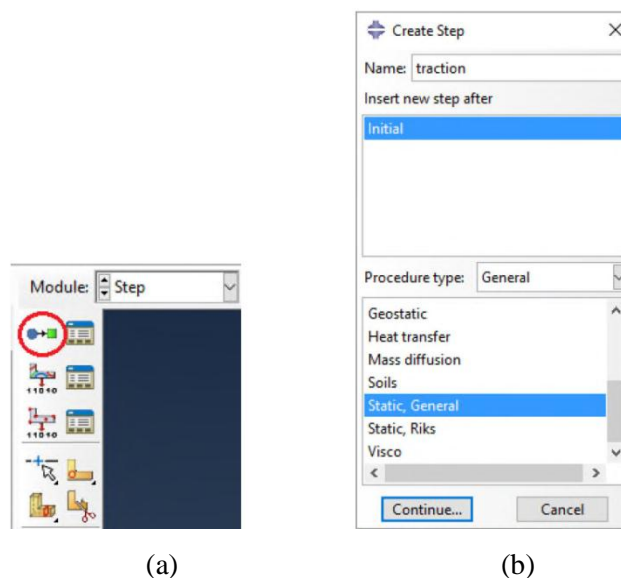
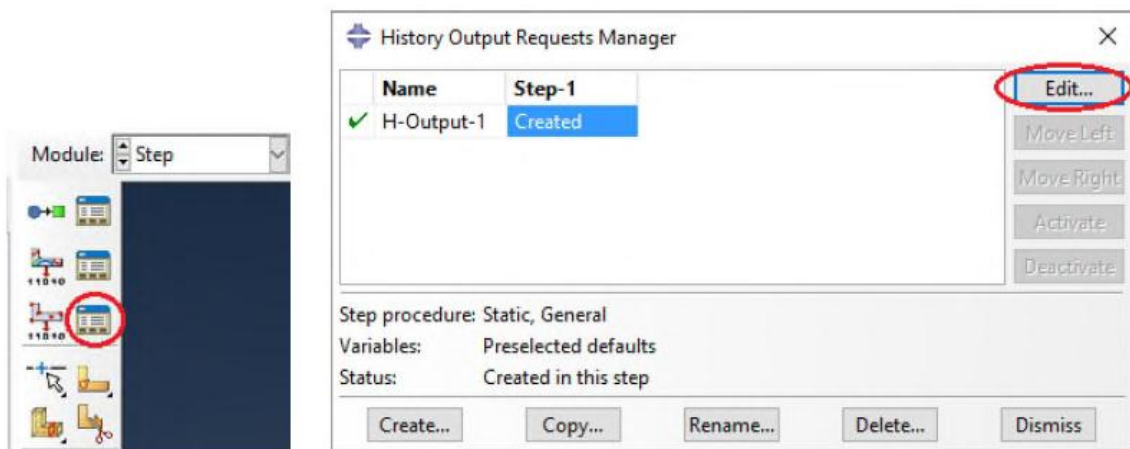


Figure 3–14: Création de l'étape « traction »

Maintenant, on va choisir les paramètres de sortie. On reste dans le même module :

- On clique sur **History Output Manager** (Figure 3.15(a)).
- Dans la nouvelle fenêtre, on clique sur **Edit...** (Figure 3.15(b)).



(a)

(b)

Figure 3–15: Paramètres de sortie(1)

- Dans la nouvelle fenêtre, on choisit **Domain** : → **Crack** → **fissure**. Ici, on a sélectionné la fissure qu'on a créé auparavant.
- Ensuite, **Frequency** → **Last increment**.
- Pour le nombre de contours, on met 6.
- Enfin, dans **Type** : , on choisit **J-integral** et on tape sur **OK** (Figure 3.16). À la fin on aura comme résultat 6 valeurs de J (une pour chaque contour).

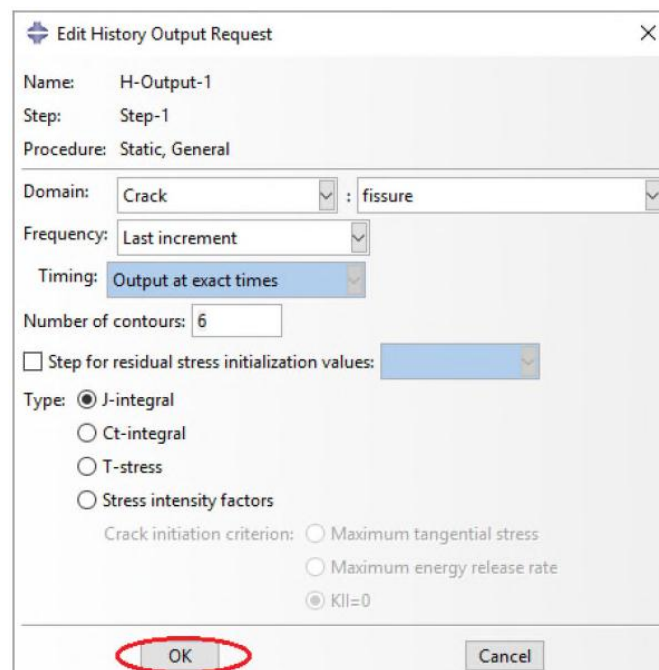


Figure 3–16: Paramètres de sortie(2)

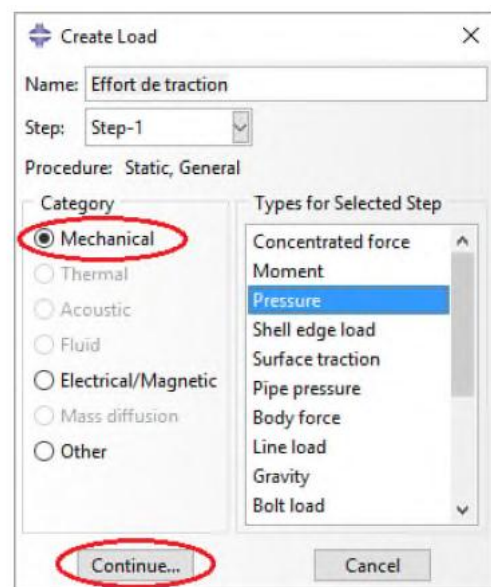
3.3.6 CHARGEMENT ET CONDITIONS AUX LIMITES:

On va définir maintenant la charge de traction u :

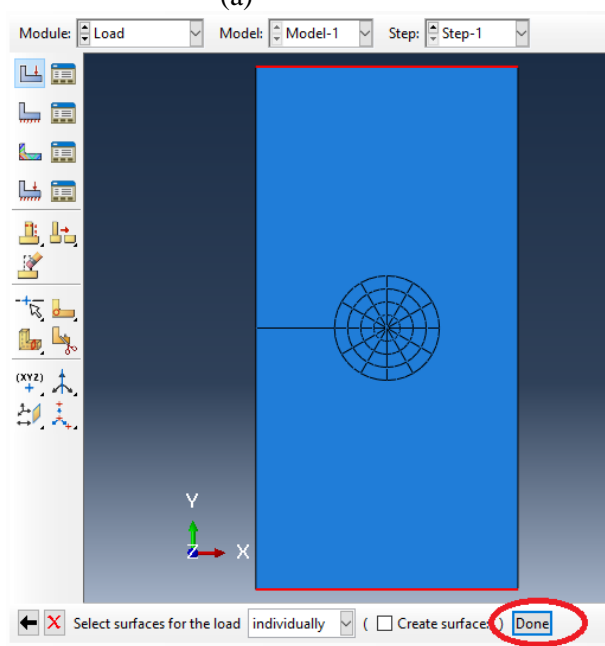
- On sélectionne le module **Load** puis, On clique sur **Create Load** (Figure 3.17(a)).
Puis, on va vers **Mechanical** → **Pressure** et sur **Continue...** (Figure 3.17(b)).
- On sélectionne le bord supérieur et le bord inférieur (en rouge) puis **Done** (Figure 3.17(c)).
- Dans la nouvelle fenêtre, on tape -1 dans **Magnitude** : (Figure 3.17(d)). Le signe (—) est dû à la direction de la charge (signe (+) : charge de compression).



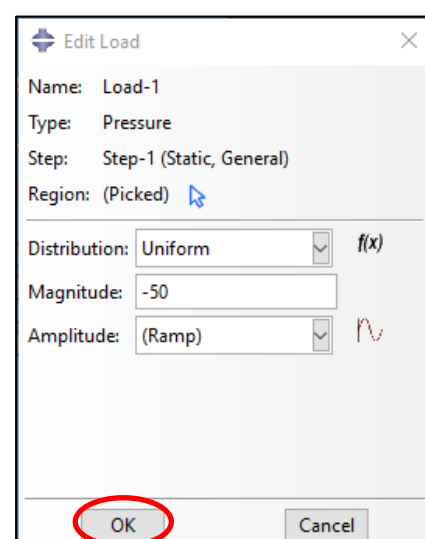
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3–17: Définition de la charge

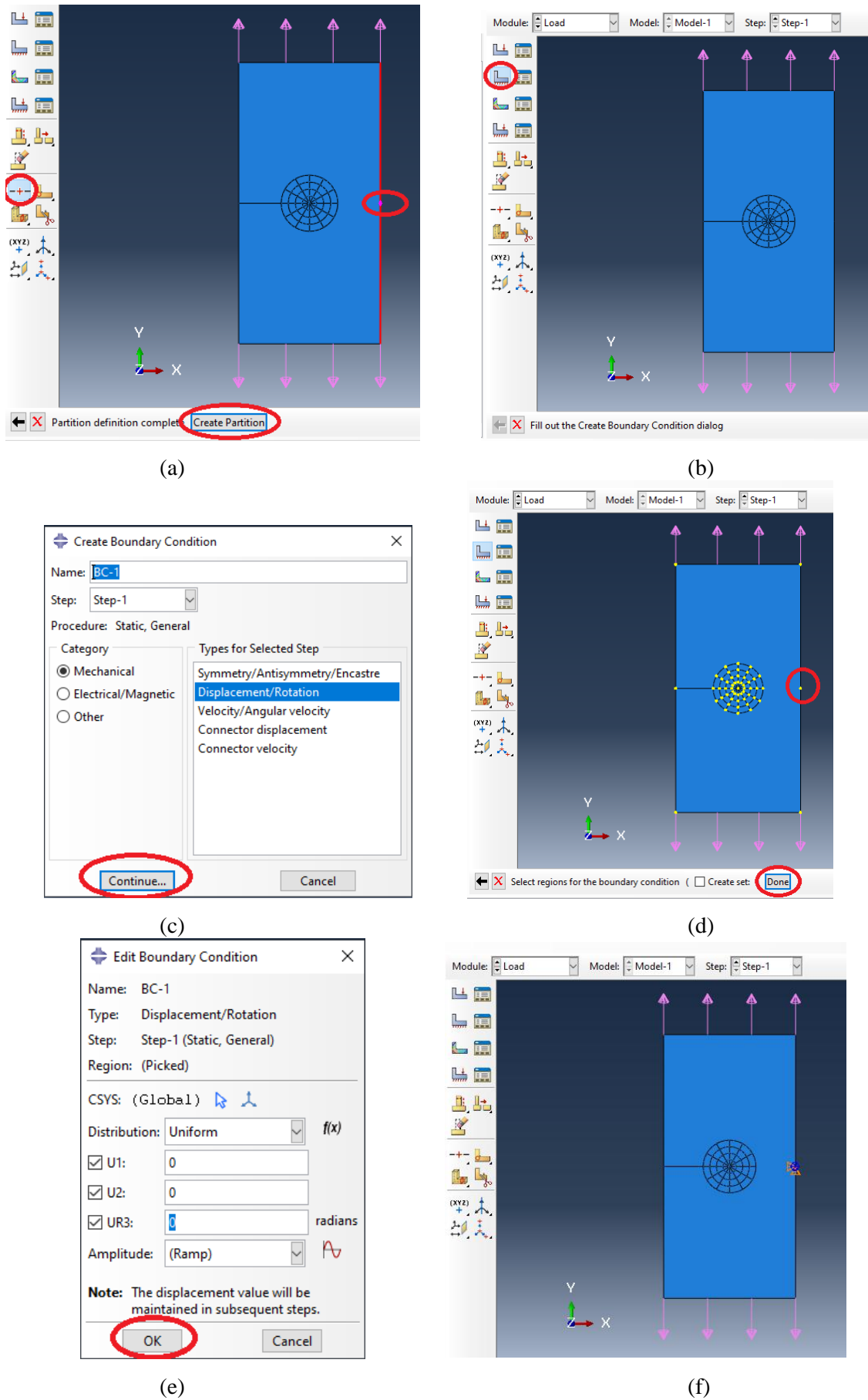


Figure 3–18: Encastrement

3.3.7 MAILLAGE:

Pour effectuer le maillage, il faut passer par trois étapes :

1. Définir la précision du maillage.
2. Choix des éléments.
3. Contrôle du maillage.

- **Définir la précision du maillage**

La plaque peut être décomposée en deux régions (Figure 3.19) :

Région 1 : c'est la superficie délimitée par le grand cercle.

Région 2 : c'est toute la plaque sauf la région 1.

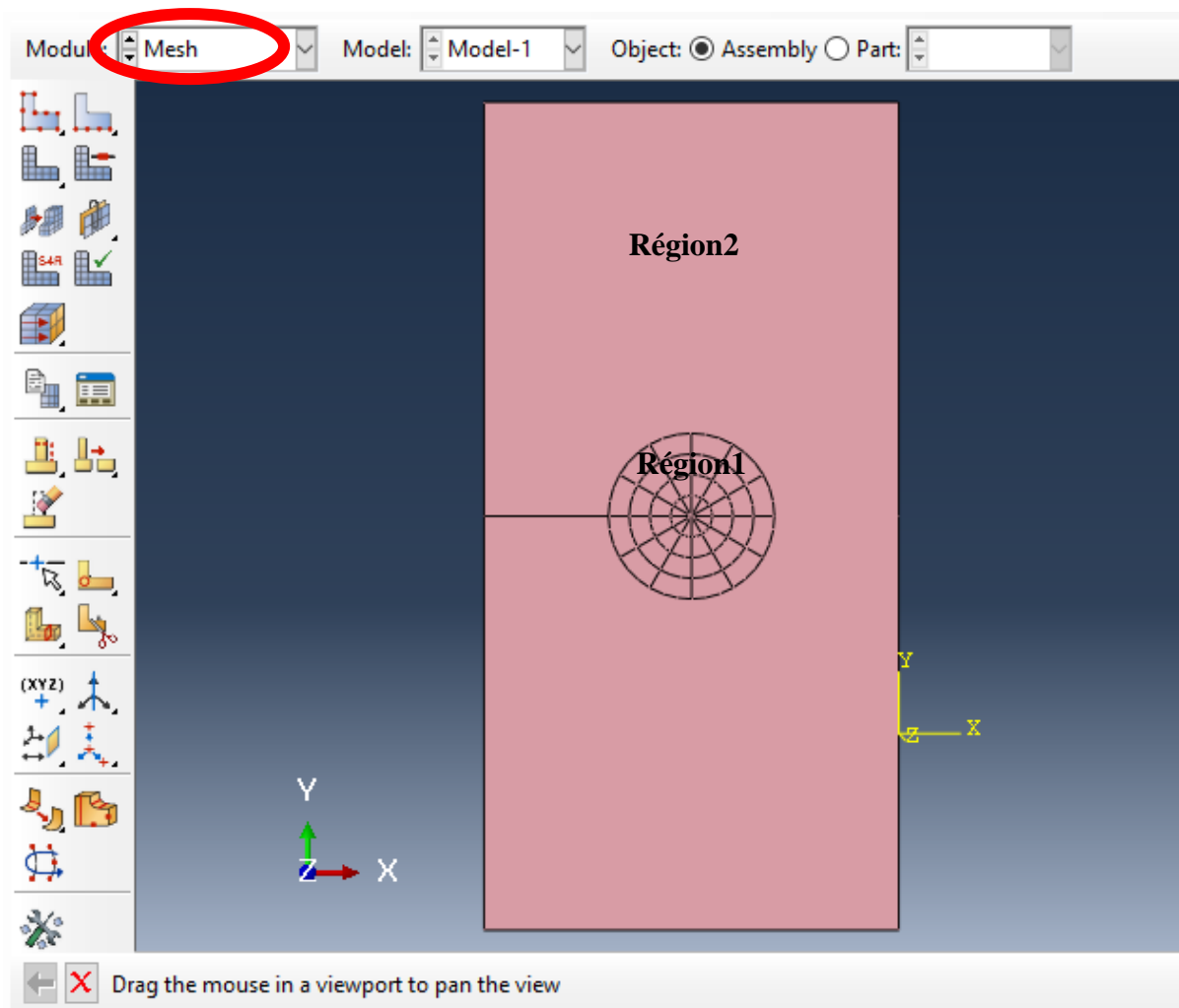


Figure 3–19: Décomposition de la plaque

Région 1 On rappelle qu'on avait décomposé la région 1 en six portions identiques. Le maillage de cette région se fera de sorte que les zones formées par l'intersection des cercles avec les segments radiaux contiennent chacune un élément.

- Dans le module **Mesh**, On clique sur **Seed Edges**, puis on sélectionne tous les segments et les arcs de cercle de la région 1 et on appuie sur **Done**
- Dans la nouvelle fenêtre, on sélectionne **Methods** → **By number** et on met 1 dans **Number of elements** :. On appuie sur **OK** pour terminer

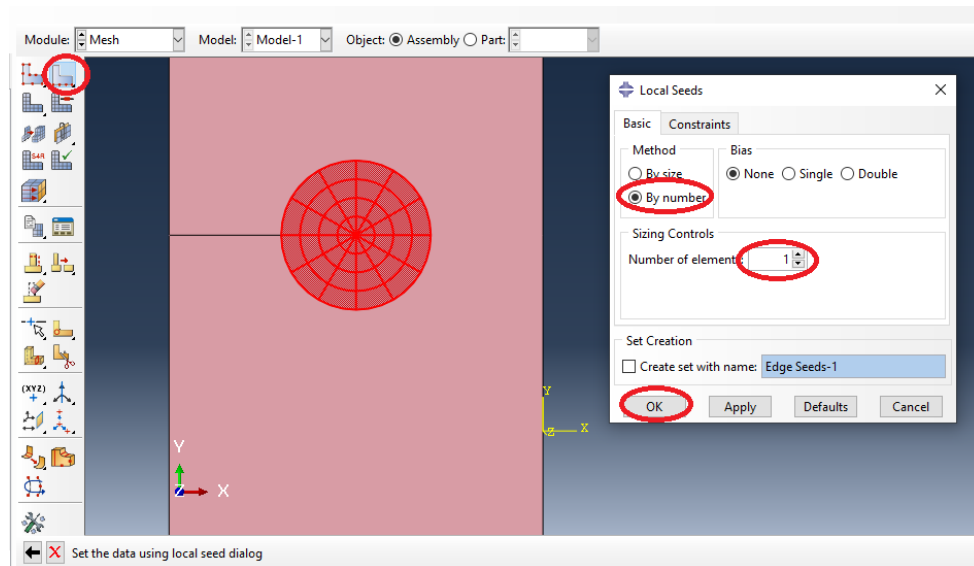


Figure 3–20: Région 1 : précision du maillage

Région 2 Le réglage de la précision du maillage de la région 2 est fait par la commande **Seed Part instance**. Dans la nouvelle fenêtre, dans **Approximate global size** :, on met **0.2**, cette valeur correspond à une approximation sur la taille des éléments. On termine par **OK** (Figure 3.21).

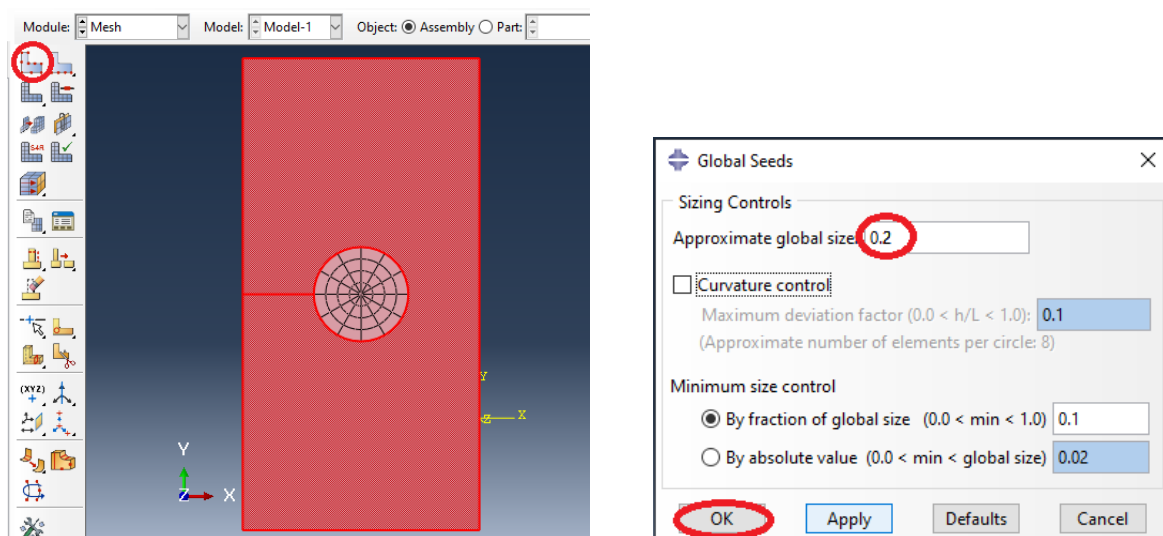


Figure 3–21: Région 2 : précision du maillage

- Choix des éléments

Dans notre étude, on va utiliser des éléments de degré 2.

On sélectionne toute la plaque, puis dans la barre de menu : **Mesh** → **Element Type...** (Figure 3.22).

Dans la nouvelle fenêtre, on sélectionne :

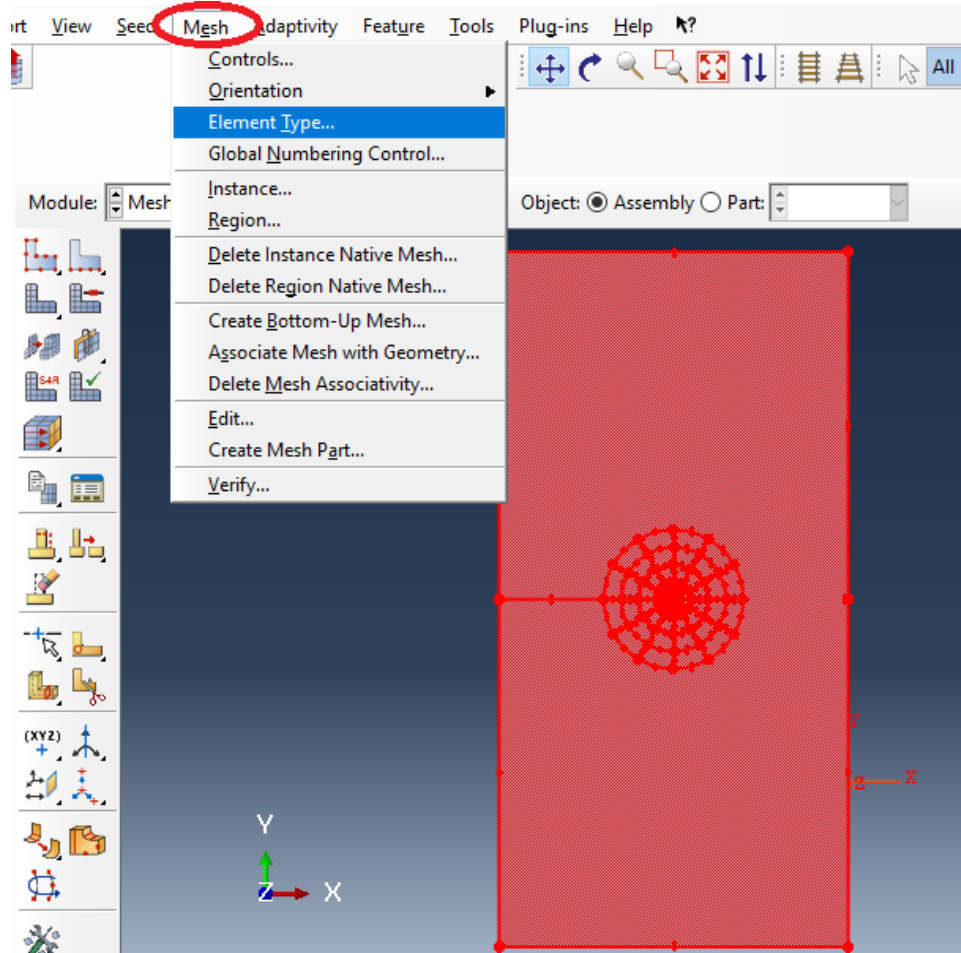


Figure 3–22: Choix des éléments(1)

1. **Standard** dans **Element Library**.
2. **Plane Stress** dans **Family** (situation de contraintes planes).
3. **Quadratic** dans **Geometric Order** (éléments de degré 2).

Les onglets **Quad** et **Tri** correspondent respectivement aux options relatives aux éléments de types quadrilatère et triangle. On laisse le réglage par défaut. On termine par **Ok**

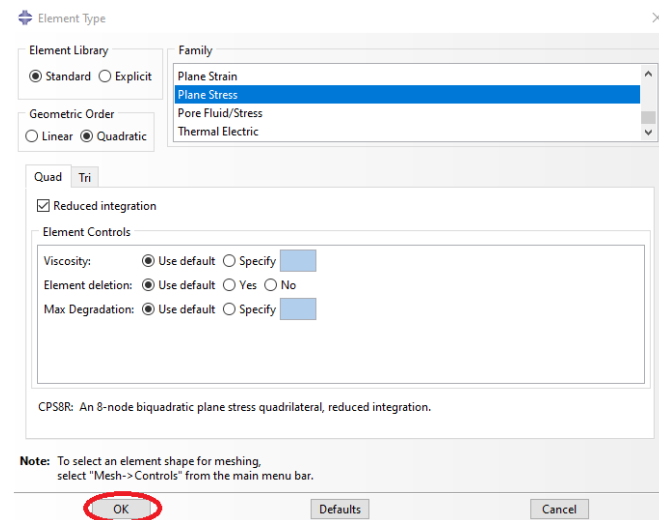


Figure 3–23: Choix des éléments(2)

- **Contrôle du maillage**

Dans la barre de menu, On clique sur **Mesh** → **Controls...**, on sélectionne la région 1 et on appuie sur **Done** (Figure 3.24).

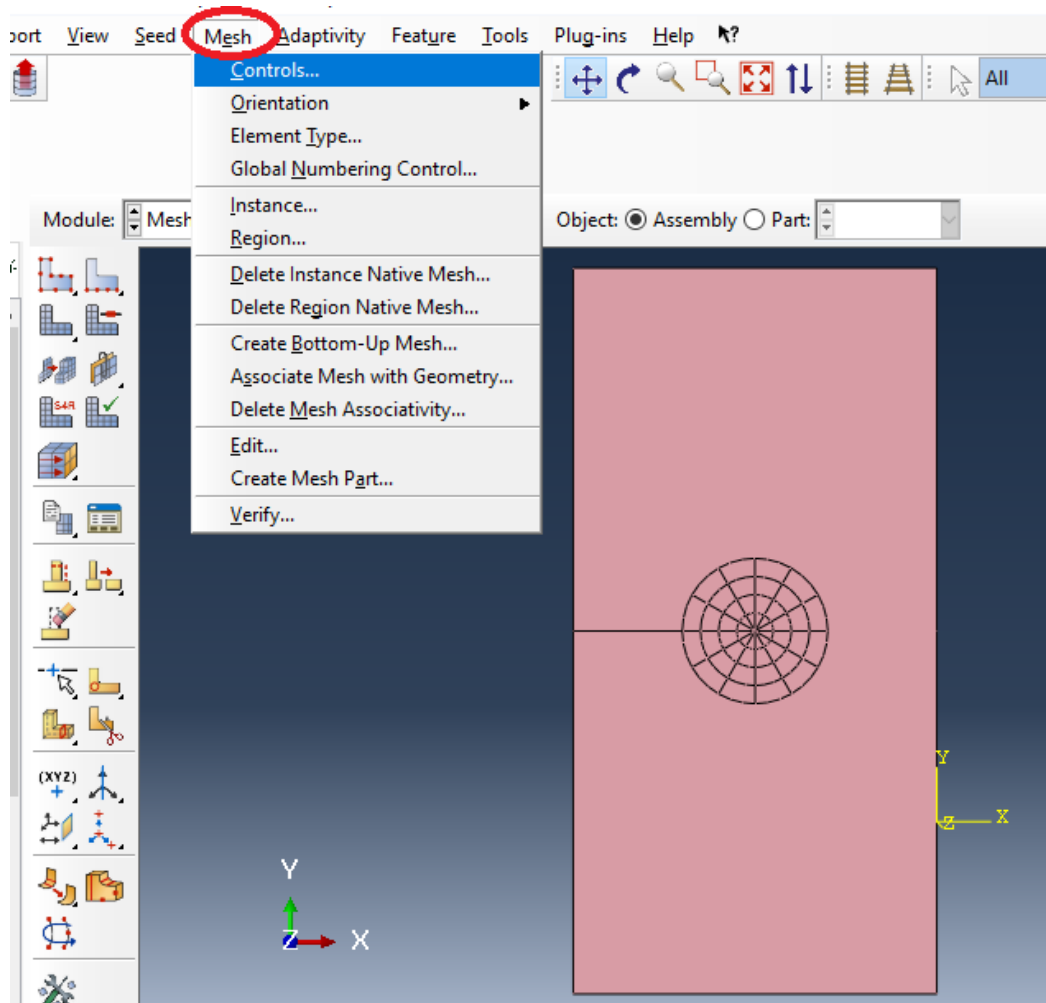


Figure 3–24: Contrôle du maillage

Dans la nouvelle fenêtre, on remplit comme suit (Figure 3.25) :

1. **Quad** dans **Element Shape**.
2. **Free** dans **Technique**.
3. **Advancing Front** dans **Algorithm**.

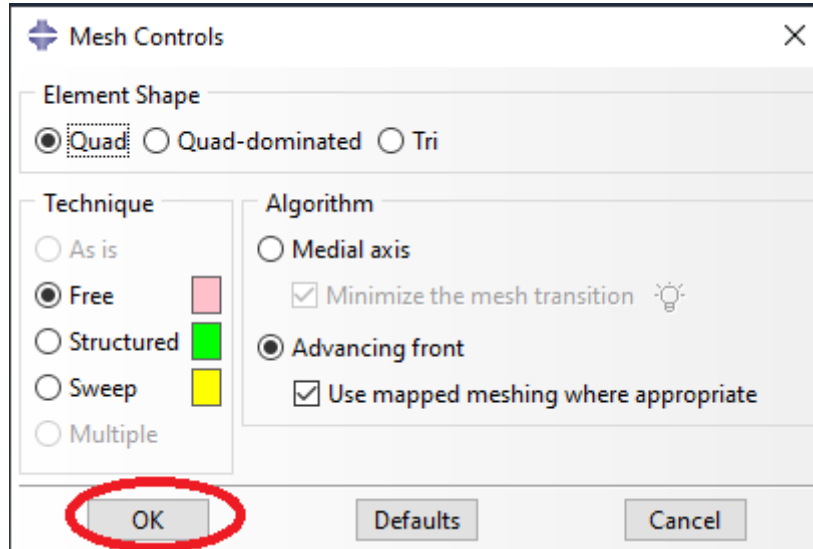


Figure 3–25: Contrôle du maillage region 1

On passe à la région 2, on fait la même chose sauf pour **Algorithm**, on sélectionne **Media' axis**. Maintenant, le maillage peut être créé. On appuie sur **Mesh Part Instance**, puis sur **Yes** (Figure 3.26(a)). Le résultat final est comme suit (Figure 2.27(b)) :

On constate que 196 éléments ont été créés

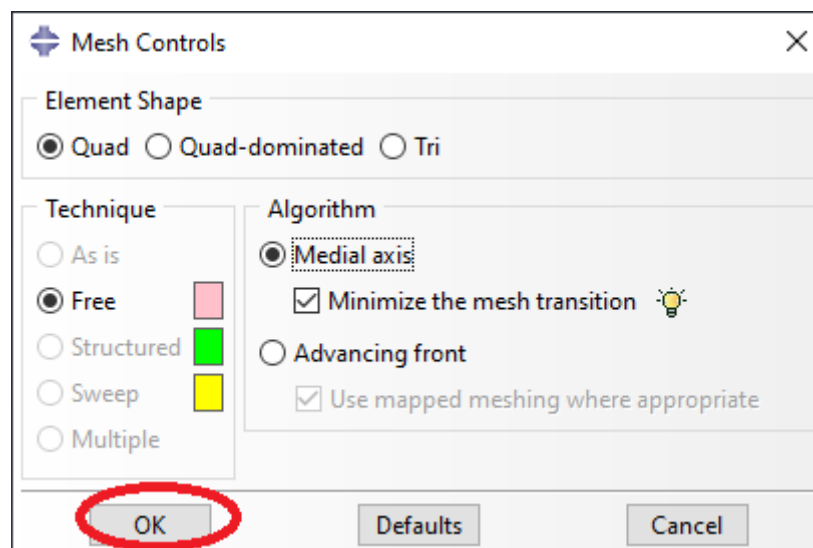


Figure 3–26: Contrôle du maillage region 2

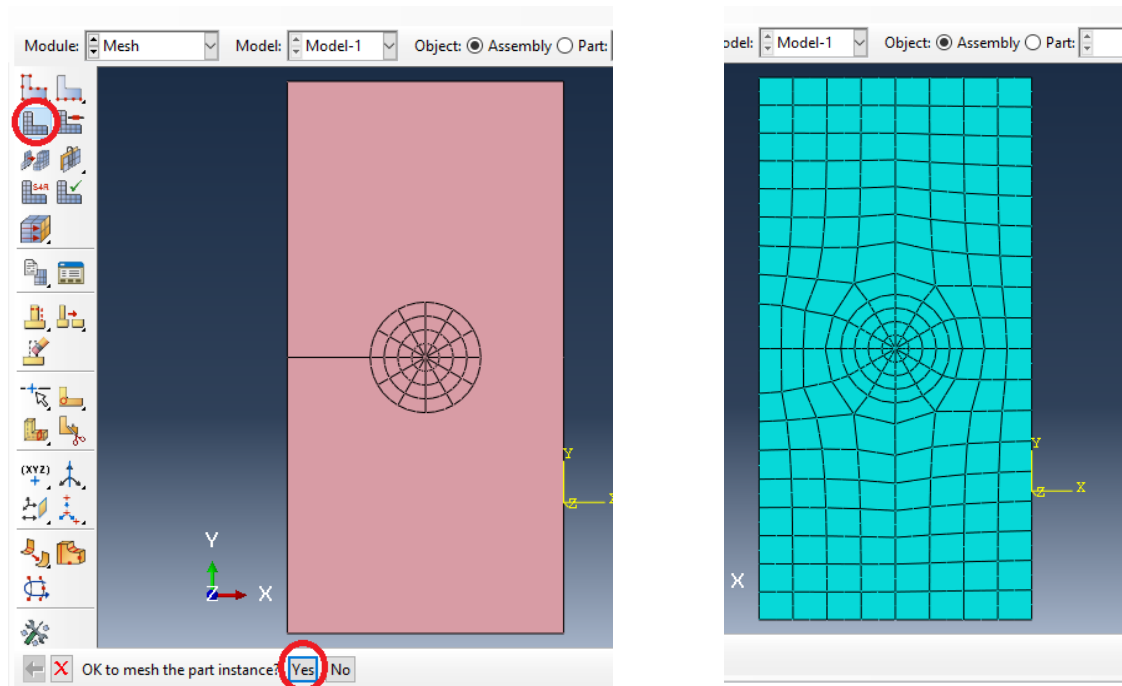


Figure 3-27: Maillage de la plaque

3.4 RESULTATS ET DISCUSSION :

Maintenant, on va passer au module **Job**, on clique sur **Create Job** (Figure 3.30(a)). Dans la nouvelle fenêtre, on clique sur **Continue...** (Figure 3.28(b)).

Dans la fenêtre **Edit Job**, on laisse tous les paramètres par défaut et on appuie sur **OK** (Figure 3.28(c)).

Après la création du Job, on va lancer l'analyse. Pour cela, on clique sur **Job Manager** (Figure 3.29(a)). Dans la nouvelle fenêtre, on appuie sur **Submit** (Figure 3.29(b)). On attend quelques instants jusqu'à l'affichage de **Completed** dans Status. On accède aux résultats par **Results** (Figure 3.29(c)).

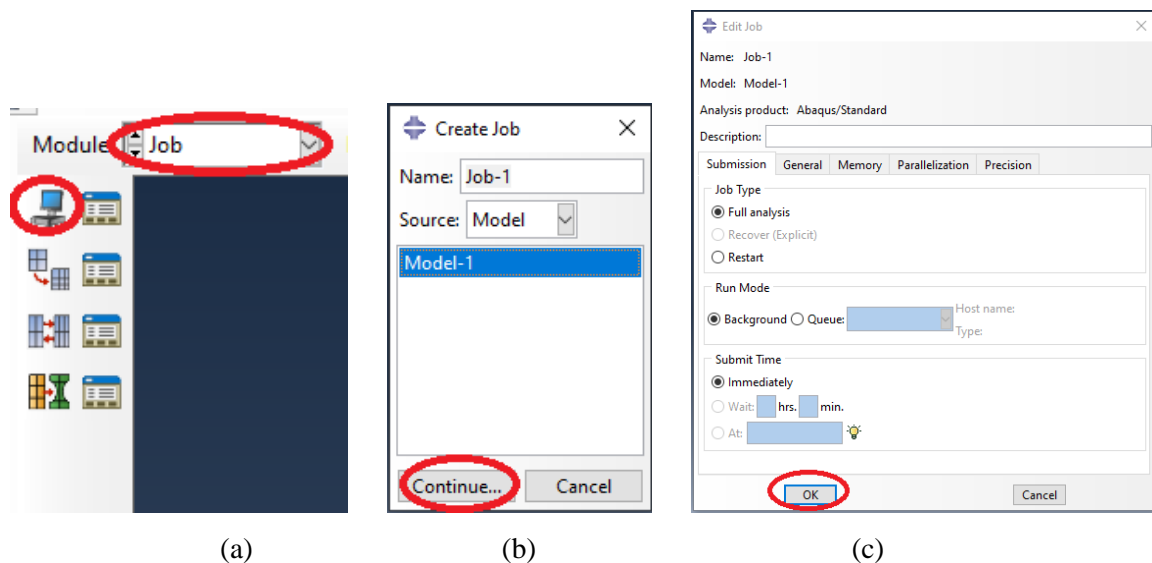
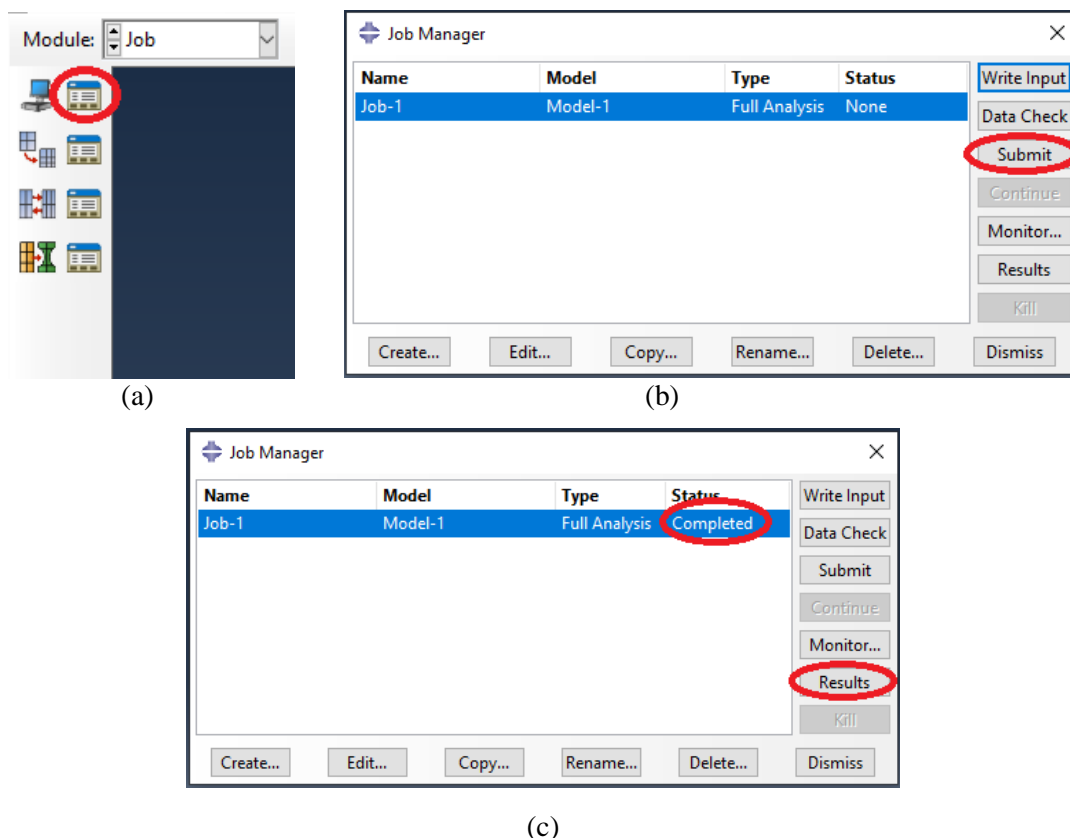


Figure 3-28: Création de "job"



(c)
Figure 3–29: Analyse

Pour voir la deformation on clique sur **plot deformed shap**

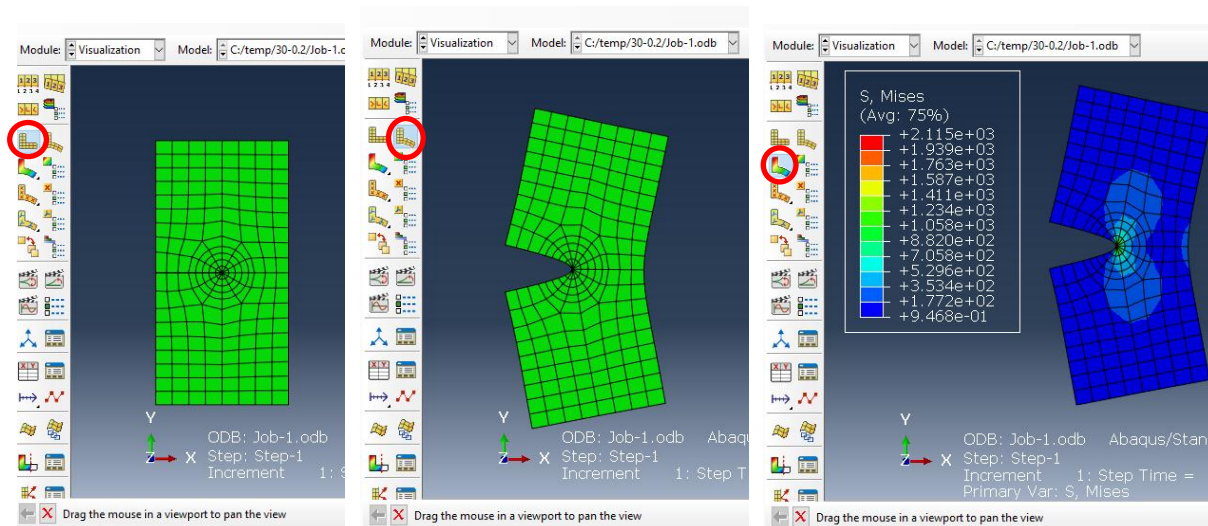


Figure 3–30 : maillage et déformé de la plaque fissuré

Dans le module **Visualization**, on appuie sur **Create XY Data** (Figure 3.31(a)). Puis sur **Continue...** (Figure 3.31(b)). Dans la nouvelle fenêtre, on sélectionne les six lignes et on appuie sur **Save As...** (Figure 3.31(c)). Puis, on décoche **Plot curves on OK** (on n'a pas besoin des courbes), on termine par **OK** (Figure 3.31(d)). On appuie sur **XY Data Manager** (Figure 3.31(e)). Dans la nouvelle fenêtre, on retrouve la liste des valeurs de J relatives à tous

les contours du premier jusqu'au sixième : **XYData-1, XYData-2,..., XYData-6** (Figure 3.31(f)). On clique sur la valeur qu'on veut pour afficher, on prend pour exemple la valeur du contour N° 1: $J = 1.1631 \times 10^{-11} \text{N/m}$

Les valeurs de J sont données dans le tableau ci-dessous :

Contour	$J(10^{-7} \text{ N/m})$
N°1	2.9078
N°2	2.9616
N°3	2.9645
N°4	2.9649
N°5	2.9652
N°6	2.9664

Tableau 3–2: Valeurs de J

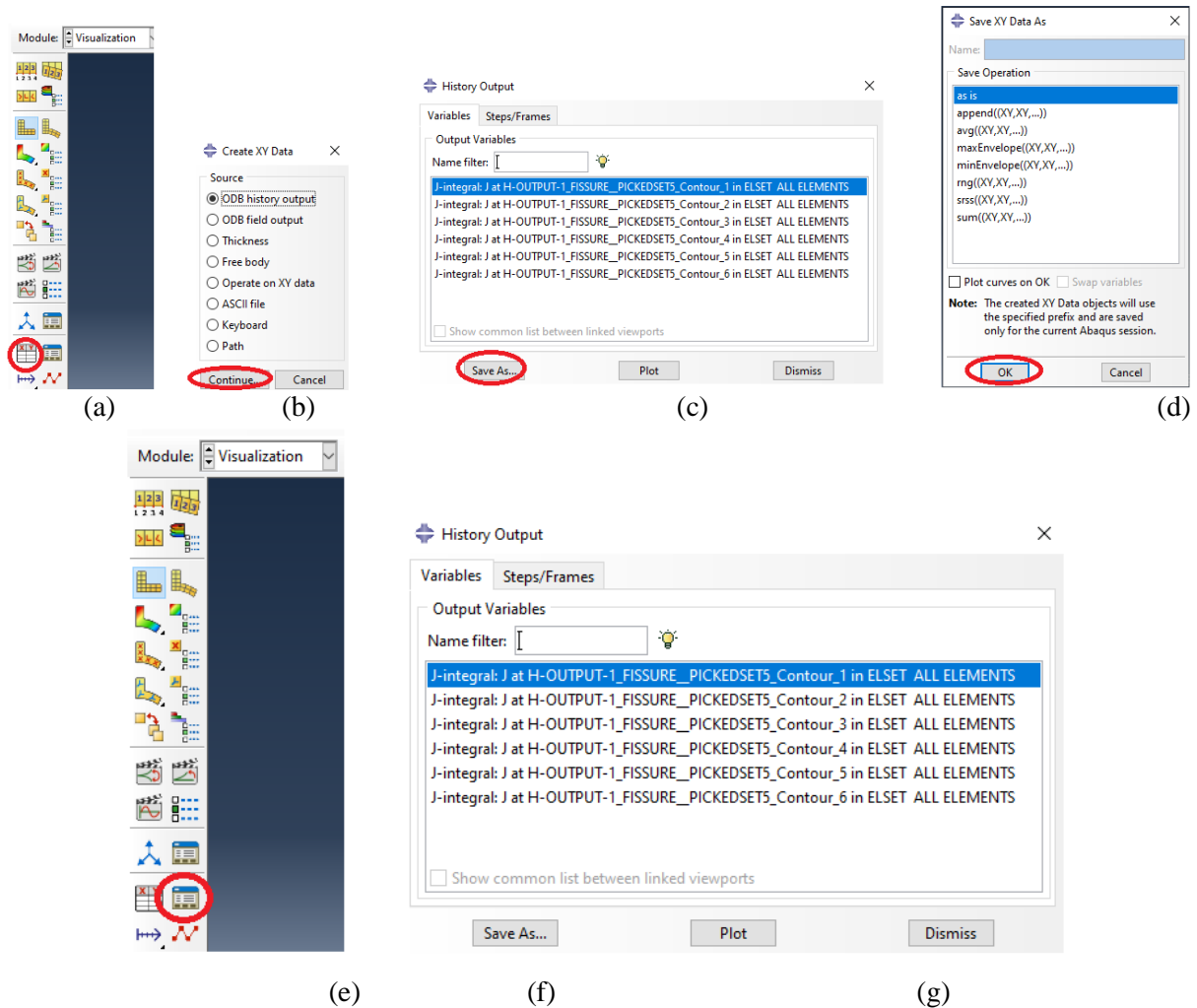


Figure 3–31: Résultats

En théorie, la valeur de J est indépendante du contour choisi. Mais en calcul numérique, ce n'est pas le cas. En effet, d'après le tableau 2.2, les valeurs se rapprochent à partir du contour N° 3 dans les deux cas. Cela signifie que les deux premiers seront écartés. En général, lorsqu'on a un problème élastique, les valeurs de J des deux premiers contours sont écartées [23]. On note aussi qu'il y a des cas où on a besoin de plus de six contours. On prendra comme valeur finale la moyenne des quatre dernières valeurs :

$$J = \frac{(2.9645 + 2.9649 + 2.9652 + 2.9664) \times 10^{-7}}{4}$$

$$J = 2.96525 \times 10^{-7} \text{ N/m}$$

3.5 CALCUL DE K_I :

Le calcul de K_I se fait à partir de la relation :

$$J = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \quad (3.1)$$

Situation de contraintes planes : $E' = E$

Mode d'ouverture I : $K_{II} = K_{III} = 0$

L'équation (3.1) devient

$$J = \frac{K_I^2}{E}$$

$$K_I = \sqrt{JE}$$

$$K_I = \sqrt{2.96525 \times 10^{-7} \times 210 \times 10^9}$$

$$K_I = 249.54 \text{ N/m}^{3/2}$$

3.6 CONCLUSION

Dans notre étude, on a utilisé le logiciel Abaqus. On a constaté que c'est un logiciel très pratique et flexible lorsqu'on calcule K_I par la méthode « Intégral J ».

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans notre travail, nous avons calculé le facteur d'intensité de contrainte en mode I en utilisant le logiciel Abaqus. Ce travail rentre dans le cadre de l'étude des fissures par une approche locale dans le domaine de la mécanique de rupture. Nous avons présenté un état de l'art sur les principales grandeurs et paramètres physiques utilisés dans cette étude ; le FIC et l'intégrale de Rice J . Ce dernier est utilisé dans la méthode des éléments finis.

Dans le deuxième chapitre Nous nous sommes familiarisés avec le programme de simulation ABAQUS et en quoi il consiste. Divers fichiers de simulation sous abaqus et l'organisation de son interface.

Dans le troisième et le dernier chapitre, nous avons présenté les étapes nécessaires pour le calcul du FIC dans Abaqus. Nous avons défini les propriétés du matériau, établi les conditions aux limites et le chargement, créé le maillage et calculé le K_I .

On peut retenir de cette étude que le logiciel Abaqus est facile et flexible à utiliser, ainsi que sa documentation est disponible.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE:

[01] Wieghardt, K. "Uber das Spalten und Zerreißen elastischer Körper." *Z. Mathematik and Physik* 55.2 (1907): 60-103. [English translation by HP Rossmanith: Wieghardt.K (1995)] "On splitting and cracking of elastic bodies". *Fatigue and Fract . Eng. Mater. Struct* 12(12).1371-1405.

[02] Griffith, Alan A. "The phenomena of rupture and flow in solids." *Philosophical transactions of the royal society of London. Series a, containing papers of a mathematical or physical character* 221 (1921): 163-198.

[03] Sneddon, I. N. "The elastic stresses produced in a thick plate by the application of pressure to its free surfaces." *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.* (1946).Vol. 42. No. 03. Cambridge University Press,

[04] Irwin. G.R.. "Estimates of stress intensity and rivet force for a crack arrested by a riveted stiffener". Discussion based on 'Analysis of stress and strains near the end of a crack traversing a plate'. *J. Appl. Mech.* 24: (1957) 361 -364.

[05] Rice, James R. "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks." ", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, 1968, pp.379-386.

[06] Bui, H. D. "Dualité entre les intégrales indépendantes du contour dans la théorie des solides fissurés." *CR Acad. Sci. Paris* 276 (1973): 1425-1428.

[07] Erdogan, Fazil, and G. C. Sih. "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear." *Journal of basic engineering* 85.4 (1963): 519-527.

[08] Comninou, Maria. "The interface crack." *J. appl. Mech* 44.4 (1977): 631-636.

[09] Eshelby, J.D. "Energy relations and the energy-momentum tensor in continuum mechanics." *Fundamental Contributions to the Continuum Theory of Evolving Phase Interfaces in Solids.* Springer Berlin Heidelberg, 1999. 82-119.

[10] Kheysin, D. Ye, and N. V. Cherepanov. "Preobrazovaniye formy i peremeshcheniye vozdushnykh vklyucheniye vo l'du [Transformation and movement of air inclusions in ice]." *Problemy Arktiki i Antarktiki, Vyp* 32 (1969): 100-05.

[11] Begley, J.A. and Landes, J.D. "The J -integral as a fracture criterion. Fracture Toughness", ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, (1972).1–23.

[12] Zhang, C.H. "Elastodynamic analysis of a periodic array of mode III crack in transversely isotropic solids". *Journal of Applied Mechanics* 59: (1992), 366–371.

[13] François.D : "Influence of hydrides on the strengths of Zircaloy-4 plate", *Proc. of 8th Int. Conf. on Fracture, Kiev, Ukraine, (1993), pp. 693-700.*

[14] Baouch. D "Validation numérique des paramètres de fissuration en élastoplasticité", *Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal Clermont II. (1998)*

[15] Hutchinson, J.W. "Singular behaviour at the end of a tensile crack in a hardening material". *Journal of Mechanics and Physics of Solids* 16, (1968). 13–31.

[16] Rice, J.R. and Rosengren, G.F. "Plane Strain Deformation near a Crack Tip in a Hardening Material". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 16, (1968). 1–12.

[17] DENIS ABRY. *Présentation général d'Abaqus. Formation des masters ; école central de paris. 2008.*

[18] PATRICKH ROZICHI. *Formation ABAQUS ; Université de Nantes. France 2007.*

[19] MEFTEH KAMEL. *Cours : Introduction général au logiciel Abaqus université de Biskra. 2013.*

[20] MEFTEH KAMEL. *Présentation Abaqus. Formation des masters ; université de Biskra .2014.*

[21] Ceux-ci ; Markyao Amegadzie, *Effet de la pression de forge sur la microstructure de l'alliage Inconel 738 Super soudé par friction linéaire ; p 3 © Copyright 2012, Mark Yao Amegadzie.*

[22] MICKAEL ABBAS. *Principe et fonctionnement ABAQUS .université de technologie de Compiègne .2011*

[23] Dassault Systèmes. *Abaqus 6.12 analysis user's manual volume 2 : Analysis, 2012. p 11.4.2-4.*