

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Université d'Oran 2

Institut de Maintenance et Sécurité Industrielle



PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : Maintenance Fiabilité Qualité

Thème :

Analyse de l'effet de
l'humidité sur le
comportement en rupture des
pipelines réparés par patch en

Présenté par :

- Abdi mohamed
- Azzouzilotfiahmed

Dédicace

À mes parents qui m'ont soutenu tout au long de mes études,

À mes amis qui ont été présents dans les moments difficiles,

A mon encadrant Mr Bouiadjra Bachir pour sa disponibilité et ces conseils,

À mes professeurs qui m'ont transmis leur savoir et leur passion pour leur domaine, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, je dédie ce mémoire.

Merci pour votre soutien et votre encouragement, je n'aurais pas pu y arriver sans vous.

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier « Dieu » le tout puissant, qui lui seul ma guidé dans le bon sens durant ma vie et qui m'aide à réaliser ce modeste travail,

Je tiens à remercier vivement mon encadrant Mr Boudjra Bachir, qu'il trouve ici l'expression de ma grande gratitude pour leur soutien bienveillant et la confiance qu'il m'ont manifestés dans les moments les plus difficiles,

Je remercie aussi toutes les personnes qui nous ont aidés et nous ont encouragés à la rédaction de ce mémoire de près ou de loin.

Table des matières

CHAPITRE 1 :

1. La Rupture :	8
1.1 Introduction :	8
1.2 Aperçu historique sur la rupture :	8
1.3 Les types de rupture :	9
1.3.1 Rupture fragile :	10
1.3.2 Rupture ductile :	10
.....	11
1.3.3 Rupture par fatigue :	11
2 Méthode des éléments finis :	11
2.1 Généralité :	11
2.2 L’histoire de la méthode des éléments finis :	12
2.3 Démarche éléments finis :	13
3 Les méthodes de réparation des pipelines :	13
3.1 Généralité sur les pipelines :	13
3.2 Historique des pipelines :	14
3.3 Les méthodes de réparation des pipelines :	16
3.3.1 Réparation par patch en composite :	17
3.3.2 Méthode de meulage :	18
3.3.3 Méthode de perçage :	19
3.3.4 Réparation par demi-coquille soudée :	20
3.3.5 Ré-enrobage :	21
3.3.6 Coupe et remplacement après vidange :	22

CHAPITRE 2

1 PRESENTATION DE LOGICIEL ABAQUS :	23
2Description des possibilités d’ABAQUS	24
3 Les modules :	25
3.1 Module PART:.....	26
3.2 Module PROPERTY :	28
3.3 Module ASSEMBLY :	29
3.4 Module STEP	30

3.5	Module Interaction :	31
3.6	Module LOAD	33
3.7	Module MESH :	34
3.8	Module JOB :	37
3.9	Module Visualisation :	38

CHAPITRE 3

Effet de module de Young :	42
Effet de l'épaisseur de patch :	42
Conclusion :	42
Bibliographie :	43

Liste des figures:

CHAPITRE 1:

Figure 1:1 Exemple de la rupture fragile [4]

Figure 1:2 Exemple de la rupture ductile [4]

Figure 3:1 Première utilisation connue de pipelines pour le transport

Figure 3:2 international pipeline étend son réseau jusqu'à Montréal

Figure 3:3 Réparation par patch en composite d'une pipe acier [16]

Figure 3:4 Réparation par la méthode de meulage [11]

Figure 3:5 Perçage au fond de la fissure [11]

Figure 3:6 Géométrie de demi-coquille [18]

Figure 3:7 réparation de surface pour réfection enrobage, fuite de bentalha (Oran,Algérie)
[19]

Figure 3:8 Changement du tronçon endommagé d'une canalisation. (a) découpe/ (b) soudage

CHAPITRE 2:

Figure II:1 Etapes à suivre pour la programmation 30

Figure II:2 Géométrie de pipe

Figure 3:2 Fenetre de module Part

Figure 3:3 Fenetre de module Part

Figure 3:4 Assemblage des structures

Figure 3:5 Fenetre de module Assembly

Figure 3:6 Fenetre de module Step

Figure 3:7 Fenetre de module Interaction

Figure 3:8 Fenetre de module LOAD

Figure 3:9 Fenetre de module Mesh

Figure 3:10 Fenetre de module Job

Introduction générale

Les pipelines sont des infrastructures essentielles pour l'économie mondiale, ils sont le moyen le plus sûr pour de grandes quantités et sur de longues distances de fluide notamment le pétrole et le gaz.

Etant enterrés sous terre ou en mer, ils sont le plus souvent exposés à des risques d'endommagement causés par des agressions internes et externes à savoir la corrosion, les enfoncements, les fissures, les éraflures, l'érosion...etc. Ce qui peut altérer leurs performances voir entraîner de graves conséquences environnementaux s'ils ne sont pas assez tôt détecté.

Ainsi donc après détection de ces défaillances, ces canalisations requiert des méthodes de renforcement ou de réparation en vue de leurs redonnées leurs performances initiale.

Le but de ce travail est de modéliser une pipe en acier inoxydable réparé par un patch en composite (carbone/époxyde) en utilisant le logiciel de simulation numérique ABAQUS.

Ce travail comprendra 3 chapitres :

- Un rappel sur la rupture des matériaux, la méthode des éléments finis et les techniques de réparation des pipelines.
- Le deuxième chapitre abordera la simulation numérique.
- Le troisième chapitre sera consacré au résultat et interprétations.



CHAPITRE 1 :
Rappel

1. La Rupture :

1.1 Introduction :

La rupture des matériaux est le phénomène par lequel un matériau cesse de résister à une contrainte appliquée. La rupture peut être caractérisée par la formation de fissures ou de défauts dans la structure du matériau qui se propagent sous l'effet des contraintes appliquées. Cette propagation des fissures peut être conduire à une diminution progressive de la résistance du matériau jusqu'à la rupture final [1]. La compréhension de la rupture des matériaux permet de concevoir des matériaux plus résistants et plus durables pour diverses applications. Cette connaissance est très importante pour garantir la sécurité des personnes qui travaillent avec ces matériaux.

La mécanique de la rupture est la science utilisée pour bien comprendre la rupture des matériaux. Elle est une branche de mécanique des solides qui étudie les mécanismes physiques de la rupture des matériaux.

1.2 Aperçu historique sur la rupture :

Eviter la rupture n'est pas en soi une idée nouvelle : les concepteurs des structures de l'Égypte des pharaons ou ceux de l'empire romain nous ont laissé des édifices que l'on peut encore contempler (pyramides, ponts ...). Les matériaux utilisés avant la révolution industrielle étaient cependant limités pour l'essentiel au bois de construction, à la pierre ou à la brique et au mortier. La brique et le mortier sont relativement fragiles lorsqu'ils sont utilisés en traction. Pour ces raisons, toutes ces structures anciennes (pyramides, ponts romains...) qui ont su résister au temps, étaient chargées en compression - en fait, toutes les structures de l'époque précédant la révolution industrielle étaient conçues pour des chargements en compression. Il a fallu attendre la révolution industrielle au début du 19^e siècle, avec l'utilisation de l'acier, pour pouvoir enfin concevoir des structures capables de 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 effectivement chargés en compression alors que les seconds le sont plutôt en traction.

L'utilisation de nouveaux matériaux ductiles (acier et autres alliages métalliques) pour des chargements en traction conduisit cependant à quelques problèmes.

Des ruptures se produisaient parfois pour des niveaux de charges bien inférieurs à la limite d'élasticité.

Dans un premier temps, ces risques de rupture ont été réduits en sur dimensionnant les structures. Mais cette solution devint insatisfaisante compte tenu des nécessités d'une part d'alléger de plus en plus les structures, et d'autre part de réduire les coûts.

La recherche en mécanique de la rupture devait donc être développée. Les premiers essais de rupture ont été menés par Léonard de Vinci (1452-1519) bien avant la révolution industrielle : il a montré que la résistance à la traction d'un fil de fer variait inversement avec la longueur de ce fil.

Ce résultat suggérait déjà que les défauts contenus dans le matériau contrôlaient la résistance de celui-ci : plus le volume est important (fil de fer long) plus la probabilité de présence de fissure est importante. Cette interprétation qualitative fût précisée plus tard en 1920 par Griffith qui établit une relation directe entre la taille du défaut et la contrainte de rupture. S'appuyant sur les travaux d'Inglis, Griffith appliqua l'analyse des contraintes autour d'un trou elliptique à la propagation instable d'une fissure. Il formula ainsi à partir du premier principe de la thermodynamique, une théorie de la rupture : un défaut devient instable et conduit à la rupture lorsque la variation d'énergie liée à une propagation du défaut atteint l'énergie spécifique du matériau. Cette théorie prédit correctement la relation entre la contrainte de rupture et la taille du défaut dans les matériaux fragiles. Cependant, dans les matériaux ductiles et notamment dans les alliages métalliques, l'avancée d'un défaut s'accompagne d'une importante dissipation d'énergie due à la plastification qui se développe à l'extrémité d'une fissure, énergie dont la théorie de Griffith ne tient pas compte (puisque'elle ne considère que l'énergie de création de surface). Il a fallu attendre les travaux d'Irwin en 1948 pour que l'approche de Griffith soit applicable aux matériaux ductiles : Irwin inclut dans le bilan énergétique l'énergie due à la plastification [2].

1.3 Les types de rupture :

Les matériaux peuvent subir différents types de rupture. Parmi ces types, ils existent deux types principaux de rupture (la rupture fragile et la rupture ductile). On peut les différencier par les déformations à rupture, les contraintes, les faciès, la température...etc.

1.3.1 Rupture fragile :

La rupture fragile se produit généralement à des températures basses ou à des contraintes élevées, dans ce type de rupture le matériau se rompt brusquement sans déformation plastique significative. Les matériaux céramiques et les verres ont tendance à se rompre de manière fragile

La rupture fragile est contrôlée par la contrainte normale ou contrainte de clivage, elle se produit sans déformations plastique. Les ruptures sont transgranulaires (rupture dans un grain cohérent suivant des plans cristallographique bien définis) ; On observe des ruptures brillantes avec des facettes[3].

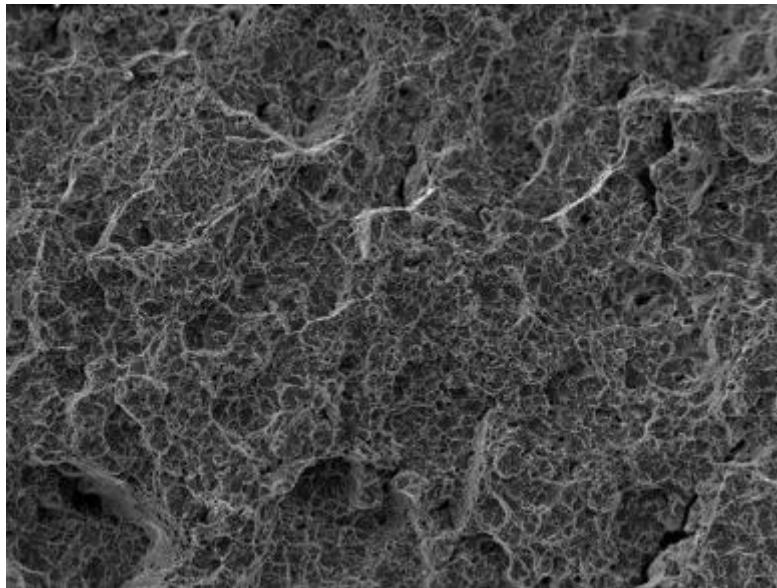


Figure I:1:1 Exemple de la rupture fragile [4]

1.3.2 Rupture ductile :

La rupture ductile est précédée d'une déformation plastique importante. L'aspect est granuleux, on observe souvent des cupules liés à une décohésion autour des inclusions[3].

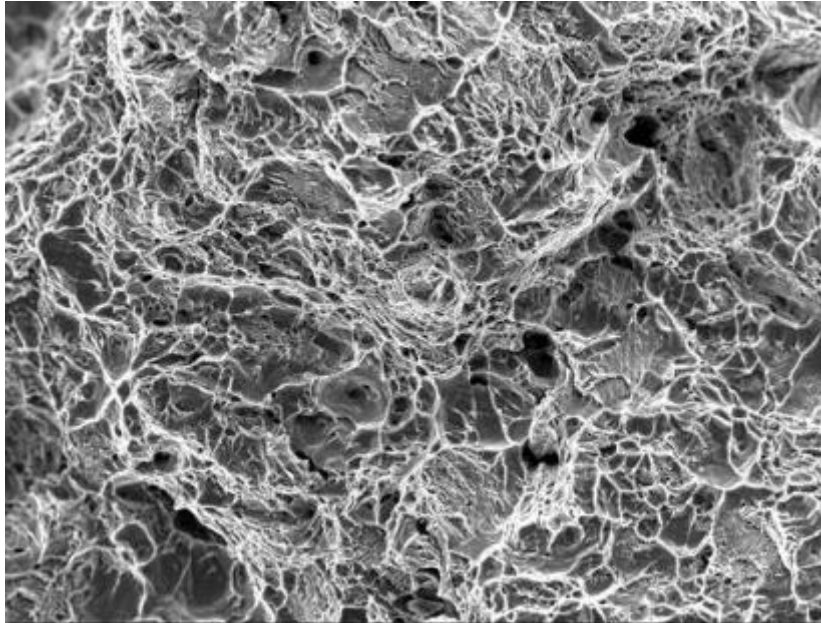


Figure I:1:2 Exemple de la rupture ductile [4]

1.3.3 Rupture par fatigue :

Parmi les défaillances d'origine mécanique, on considère que plus de 90% des défaillances sont dues à un phénomène redoutable : la rupture par fatigue. Celle-ci se produit sans prévenir, sans dissipation notable d'énergie et peut causer des dégâts considérables, en particulier sur des pièces tournantes. La fatigue est l'exposition à un chargement cyclique non monotone, qui comporte des phases de chargement et de déchargement. La fatigue peut être due à plusieurs causes : une vibration normale ou anormale (apparition d'un balourd dans une pièce tournante, par exemple), des contraintes d'origine thermique (gradients de température variables dans les temps, incompatibilité de dilatation thermique...) en plus des chargements en service qui peuvent être très sévères (amortisseur par exemple)[5].

2 Méthode des éléments finis :

2.1 Généralité :

L'évolution actuelle de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets de plus en plus complexe, coûteux, et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Nous pensons bien sûr aux projets spatiaux, aéronautiques et nucléaires dans lesquels la sécurité est vitale. D'autres types de projets d'envergure sont liés à notre environnement : contrôle de la pollution thermique, acoustique ou chimique, aménagement des cours d'eau, gestion des nappes souterraines, prévision météorologique. Pour dominer ces projets,

l'ingénieur a besoin de modèles qui lui permettent de simuler le comportement de systèmes physiques complexes. Il peut ainsi prévoir l'influence de ses décisions au moment de la conception du système.

Les sciences de l'ingénieur (mécanique des solides et des fluides, thermique...) permettent de décrire le comportement de systèmes physiques grâce à des équations aux dérivées partielles. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus utilisées aujourd'hui pour résoudre effectivement ces équations. Elle nécessite l'utilisation intensive de l'ordinateur. C'est une méthode très générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définie dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. De plus elle s'adapte très bien aux milieux hétérogènes souvent rencontrés dans la pratique par l'ingénieur.

La méthode des éléments finis consiste à utiliser une approximation simple des variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Elle fait appel aux trois domaines suivants :

- Sciences de l'ingénieur pour construire les équations aux dérivées partielles.
- Méthodes numériques pour construire et résoudre les équations algébriques.
- Programmation et informatique pour exécuter efficacement les calculs sur ordinateur.[6]

2.2 L'histoire de la méthode des éléments finis :

L'histoire de la MEF a commencé en 1819, quand Navier définit une méthode d'étude des systèmes hyperstatiques basés sur l'application des conditions d'équilibre et de compatibilité, puis Maxwell en 1864 et Castigliano en 1878 établissent d'une façon complète les théorèmes de l'énergie. Au début du 20ème siècle, des résultats fondamentaux dans le domaine des méthodes d'approximation ont été établis en effectuant une discrétisation spatiale du domaine tout en utilisant les méthodes d'approximation variationnelles. En 1955, Argyris présente une approche unifiée des méthodes des déplacements et des forces, l'année suivante Turner et Clough publient une présentation systématique de la méthode des déplacements. Ces deux publications sont particulièrement importantes et représentent véritablement le début de la MEF comme technique de calcul des structures complexes.[7]

Au départ, la méthode des éléments finis était utilisée principalement pour résoudre des problèmes de mécanique des structures. Elle a été initialement développée pour l'analyse de structures aérospatiales, notamment les ailes d'avion. Dans les années 1960, la méthode des éléments finis a gagné en popularité grâce aux avancées dans les ordinateurs et les calculs numériques.

2.3 Démarche éléments finis :

Voici les principales étapes de la construction d'un modèle éléments finis :

- discrétisation du milieu continu en sous domaines.
- construction de l'approximation nodale par sous domaine.
- calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème.
- assemblage des matrices élémentaires.
- prise en compte des conditions aux limites.
- résolution du système d'équations.[8]

3 Les méthodes de réparation des pipelines :

3.1 Généralité sur les pipelines :

Actuellement le mode de transport par pipeline a connu une ample importance à l'échelle nationale comme à l'échelle internationale, qui s'explique par une hausse des quantités des produits transportés et des consommations en énergie. Cette situation exige des entreprises de développer davantage leur logistique, voir même de varier leur mode de transport afin de garantir un approvisionnement régulier, pour faire face à la progression de la demande sur le marché. C'est dans cette vision que les entreprises pétrolières algériennes ont abordé un programme d'investissement important, visant à sécuriser l'approvisionnement du pays en produits pétroliers, à travers un maillage intelligent de pipelines, répondant au vrai besoin des différentes zones du pays. Le mode de transport par canalisation coopère sensiblement à la réduction à la fois des coûts, des délais de livraison, du trafic routier et assure aussi des transports massifs d'hydrocarbures, en veillant au respect de l'environnement avec des conditions les plus strictes de sécurité. S'il n'existait pas ! Il serait inévitable de faire circuler sur les routes, les autoroutes et les rails des milliers de camions et wagons citernes, pour assurer le même transport.

La technologie actuelle est révolutionnée et orientée vers les pipelines multi-produits. Cette dernière présente à son tour l'inconvénient de naissance d'une zone de mélange ou

contaminât entre deux produits en contact, et qui circulent séquentiellement dans le pipeline.[9]

3.2 Historique des pipelines :

On différencie le pipeline de l'aqueduc en raison de l'évacuation gravitationnelle des eaux. Des réseaux d'aqueducs pour la distribution d'eau potable existent depuis des temps historiques. La première utilisation connue de pipelines pour le transport d'hydrocarbures remonte aux environs de 500 av. J.-C. en Chine[10]

Des pipelines en bambou étaient alors utilisés pour le transport du gaz naturel issu de puits des saumures et de gaz afin de chauffer ladite saumure pour en recueillir le sel. Les segments de bambou étaient fendus dans la longueur pour en retirer les nœuds horizontaux. Les moitiés étaient ensuite recollées et liées par de la ficelle

Au XIXe siècle, les installations industrielles comprenaient des systèmes de transport locaux par canalisations en fonte, bois, acier, céramique, d'ampleur modeste. Le premier concept industriel de transport par canalisation aurait été formulé par le Russe Dimitri Mendeleïev en 1863. Il suggéra d'utiliser des tubes pour transporter du pétrole. Un autre Russe, Vladimir Choukhov aurait construit l'un des premiers oléoducs à la fin du XIXe siècle, en 1878-1880 près de Bakou. Entre-temps, un oléoduc reliant un champ de production de Pennsylvanie à une gare de chemin de fer à Oil Creek aurait été construit vers 1860 par Oil Transport Association. Le début du réseau pipelinier canadien remonte à 1853, date de l'installation d'un tuyau en fonte, d'une étendue de 25 kilomètres, conçu pour le transport de gaz naturel, vraisemblablement depuis Louisville jusqu'à Trois-Rivières.



Figure I:3 Première utilisation connue de pipelines pour le transport

À cette époque, c'était probablement le pipeline le plus long au monde. En 1862, le Canada construisit aussi l'un des premiers oléoducs au monde, qui reliait le champ pétrolifère.

En 1947, il n'existait que trois oléoducs au Canada pour transporter le pétrole. Le premier de la Turner Valley (AB) jusqu'à Calgary ; le deuxième des côtes du Maine à Montréal (QC) ; et le troisième du centre des États-Unis jusqu'en Ontario. L'expansion du réseau commencera dès les années 1950 avec la découverte d'importants gisements de pétrole brut et de gaz naturel dans l'Ouest, et stimulera l'économie canadienne.[10]



Figure I :4 international pipeline étend son réseau jusqu'à Montréal

3.3 Les méthodes de réparation des pipelines :

Dans l'industrie l'endommagement des pipelines et des réservoirs est bien constaté. Il est dû aux conditions de service et aux paramètres d'environnement. Les structures conçues pour les produits, sont affectées par plusieurs types d'endommagement : érosion, corrosion, fragilisation... Ceux-ci se constatent par : les fissures, les entailles, les trous, les défauts de géométrie complexe, ...etc

La détection des défauts consiste à l'inspection des réseaux de pipelines dans les canalisations, en effet, L'inspection est l'ensemble des théories et procédés aptes à fournir les informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure[11].

Les pipelines étant soumis à des efforts internes des produits [gaz ou pétrole] (boostés par des pompes) et des efforts externes comme il a été indiqué auparavant, des inspections deviennent plus que nécessaire.

Parmi ces moyens de détection nous pouvons citer :

- La détection visuelle.
- La détection par radiographie.
- La détection par ultrason.
- La détection par outils intelligents.

Après la détection des défauts, s'affectera le choix de types de réparation selon :

- La géométrie de la canalisation (diamètre, cintrage...).
- La nuance de fabrication de l'acier.
- La localisation de la canalisation.
- Les conditions d'exploitation.
- La localisation du défaut.
- La nature et dimension du défaut.[12]

Il existe plusieurs techniques pour la réparation des pipes, parmi ces méthodes, la technique de réparation par patch en composite (la réparation par collage et système de réparation par renforcement des fibres composite), le meulage, le perçage, la réparation par demi-coquille soudée, coupe et remplacement après le vidage et le ré-enborçage.

3.3.1 Réparation par patch en composite :

Les matériaux composites ont été employés pour la réparation des structures des pipelines et d'autres équipements pendant plusieurs années. Cependant, l'utilisation originale des matériaux composites était de réparer les canalisations corrodées avec l'intention de renforcer la section endommagée de la canalisation. En plus de réparer la corrosion, les matériaux composites ont été utilisés avec succès pour réparer des entailles, des fissures et des canalisations offshore. Aujourd'hui, la plupart des compagnies d'exploitation de pipelines utilisent principalement les matériaux composites dans les programmes de réhabilitation et de réparation.[13]

A. Réparation par collage :

Les matériaux composites sont des matériaux performants constitués par l'association à

l'échelle microscopique de plusieurs matériaux aux caractéristiques complémentaires.

Cela permet d'associer un ensemble de propriétés mécaniques ou physiques qu'il serait

impossible à obtenir avec les composants prisent de façon isolée. Outre le gain de poids, un autre avantage des matériaux composites est le caractère multifonctionnel qui

leurs est conféré par leurs propriétés orthotropes. Ils sont en effet plus largement utilisés au fur et à mesure que les connaissances concernant le processus de fabrication, leurs caractéristiques mécaniques et physiques ainsi que leur durabilité et comportement sous charge s'accumulaient.[14]

La caractérisation des matériaux composites à base de fibres et de résines est généralement complexe. Contrairement aux matériaux métalliques qui demande un nombre relativement restreint d'essais, les composites à base de fibre et de résines se distingue par la nécessité d'une multitude d'essai afin d'aboutir aux caractéristiques mécanique.[15]



Figure I:5 Réparation par patch en composite d'une pipe acier[16]

B. Réparation par renforcement des fibres composite :

Généralement, les systèmes de réparation par collage de composite peuvent être classés

en deux types : Système de réparation par matériaux composites pré-durci « Pre-cured layered » et système de réparation par matériaux composites flexible « Flexible wetlay-up system » qui sont appliqués dans la réparation des pipelines défectueux

3.3.2 Méthode de meulage :

Cette technique de réparation est basée sur le principe d'élimination des défauts par enlèvement de matière comme le montre la figure 3:4. Elle permet ainsi d'éliminer la singularité créée par le front de la fissure.[11]

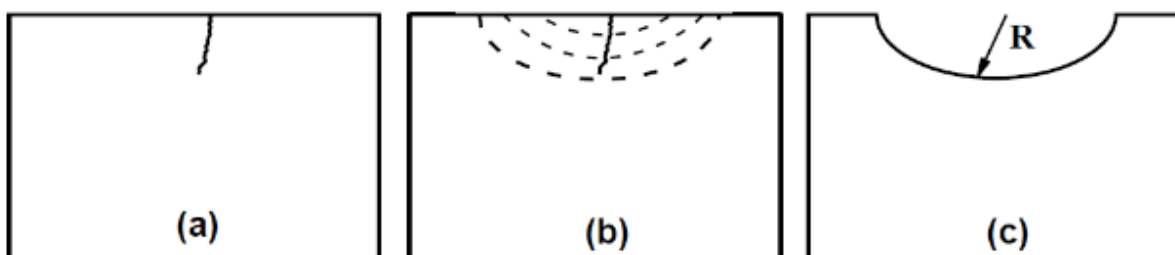


Figure I:6 Réparation par la méthode de meulage[11]

C'est une technique simple qui nécessite des moyens moins coûteux. Le meulage peut donner de bons résultats en termes de durée de vie des structures réparées. Cependant, cette technique peut fragiliser la structure du fait de la diminution localisée de la section. Cela nécessite une vérification par calculs de la tenue mécanique de telles structures après réparation.[11]

Elle est souvent recommandée dans le cas des réparations des fissures dans des structures épaisses. Elle est aussi utilisée comme technique de parachèvement dans le cas des joints soudés en vue de permettre l'extension de leur durée de vie.[11]

3.3.3 Méthode de perçage :

Le perçage d'un trou en fond d'une fissure permet un arrêt temporaire de la propagation de la fissure. Cette méthode est basée sur la modification géométrique en fond de la fissure. C'est une méthode largement répandue pour la réparation des structures métalliques endommagées. Elle est effectuée dans le but d'en augmenter la durée de vie ce qui entraîne une réduction de la contrainte maximale (figure 3:5). Cette technique apporte différents avantages ; elle est simple à réaliser, reproductible et utilisable pour des structures qui ne sont accessibles que d'un seul côté. Elle permet de garder la structure en service en attendant un éventuel changement de la pièce endommagée. L'amorçage de la fissure est retardé par le perçage du trou et la durée de vie augmente avec l'accroissement du diamètre du trou. Le perçage d'un ou plusieurs trous autour du défaut est une autre méthode proposée par plusieurs chercheurs pour réparer la structure fissurée.[11]

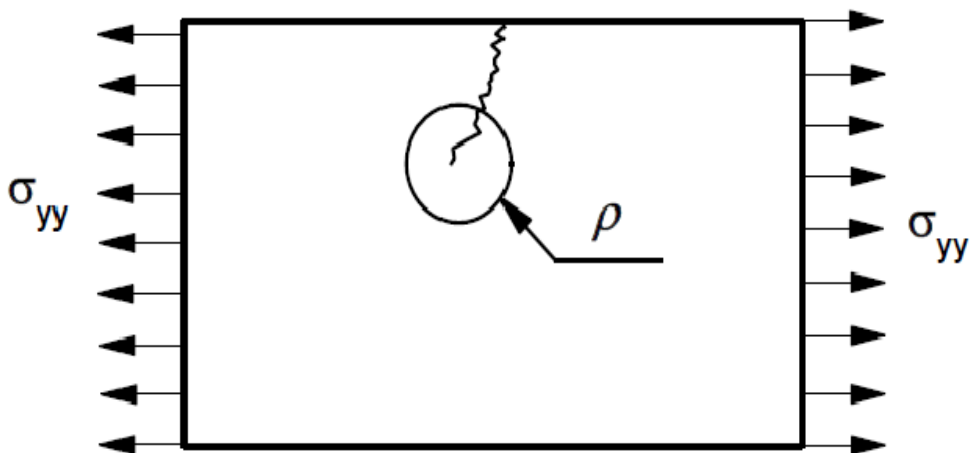


Figure I:7 Perçage au fond de la fissure[11]

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

Dans d'autres études, il existe une approximation pour le facteur de concentration de contrainte[17]. Pour un trou percé en fond d'une fissure le facteur de concentration de contrainte est donné par la formule suivante :

$$K_t = 1 + 2\sqrt{(a/\rho)}$$

3.3.4 Réparation par demi-coquille soudée :

La procédure de réparation en charge des canalisations de transport d'hydrocarbures par l'installation de demi-coquilles soudées renforce la zone défectueuse contenant toute éventuelle fuite, et est par conséquent utilisé pour réparer des défauts débouchant ou non-débouchant d'orientation axiale ou circonférentielle.

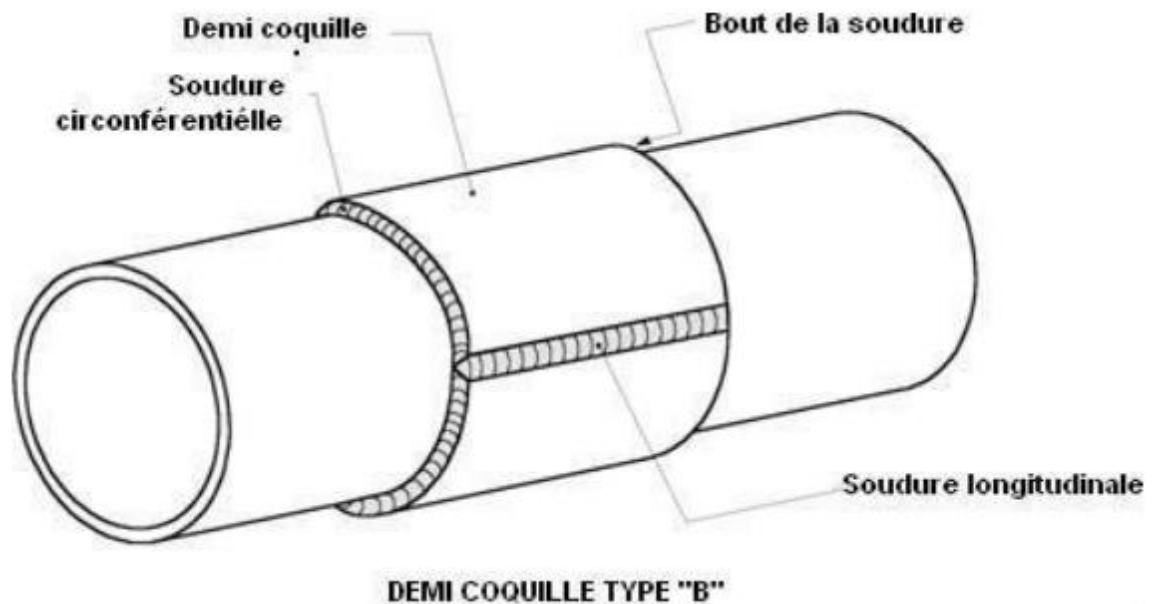


Figure I:8 Géométrie de demi-coquille[18]

Les demi-coquilles soudées permettent de réparer les défauts suivant :

- Corrosion internes et externes.
- Enfoncements simples ou combinés à d'autres défauts.
- Entailles et rayures.
- Fissures au niveau du corps du tube ou du cordon de soudure circonférentielle.

3.3.5 Ré-enrobage :

Ce type de réparation s'effectue dans le cas où l'enrobage a été touché ou après une intervention sur le pipeline pour remettre son isolation initiale.



Figure I:9 réparation de surface pour réfection enrobage, fuite de benthalha (Oran,Algérie)[19]

Il faut procéder comme suit :

- Préparation de la surface
- Choix du revêtement adéquat (compatibilité)
- Application du revêtement sur la conduite
- Contrôle du revêtement

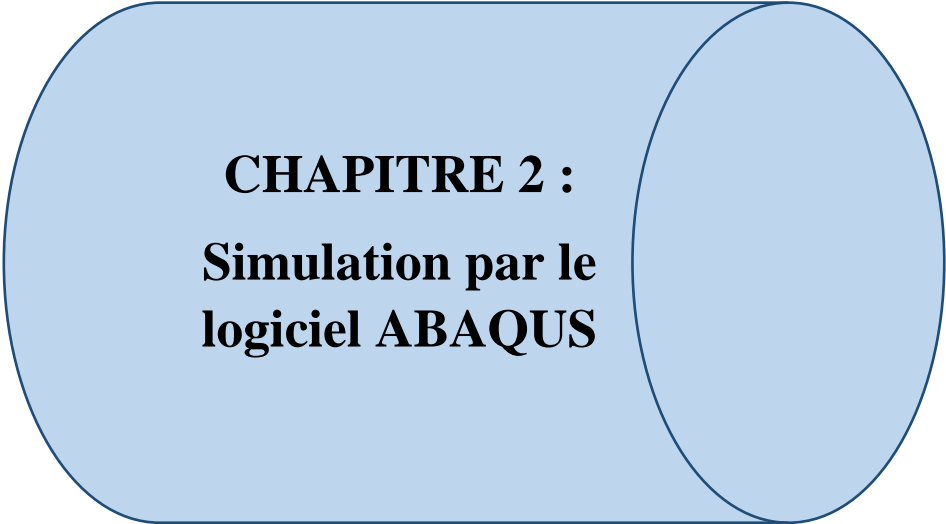
3.3.6 Coupe et remplacement après vidange :

Cette méthode est préconisée lorsque la partie endommagée perd les propriétés mécaniques pour lesquelles le pipeline a été conçu.



Figure I:10 Changement du tronçon endommagé d'une canalisation.(a) découpe/ (b) soudage

La réhabilitation apportée consiste au changement partiel de la ligne de canalisation vu le coût élevé de cette opération, elle reste la solution finale pour réparer la structure endommagée.



CHAPITRE 2 :
Simulation par le
logiciel ABAQUS

1 PRESENTATION DE LOGICIEL ABAQUS :

ABAQUS/CAETM est un code de calcul qui résout les problèmes de divers champs par la technique des éléments finis (M.E.F). Dans ce cadre il présente un système complet intégrant

non seulement les fonctions de calculs proprement dites mais également des résultats (post-traitement). ABAQUS/CAETM est un programme qui traite des problèmes d'élasticité linéaire

dans les domaines statiques et dynamiques, des problèmes non linéaires, des problèmes thermiques etc...

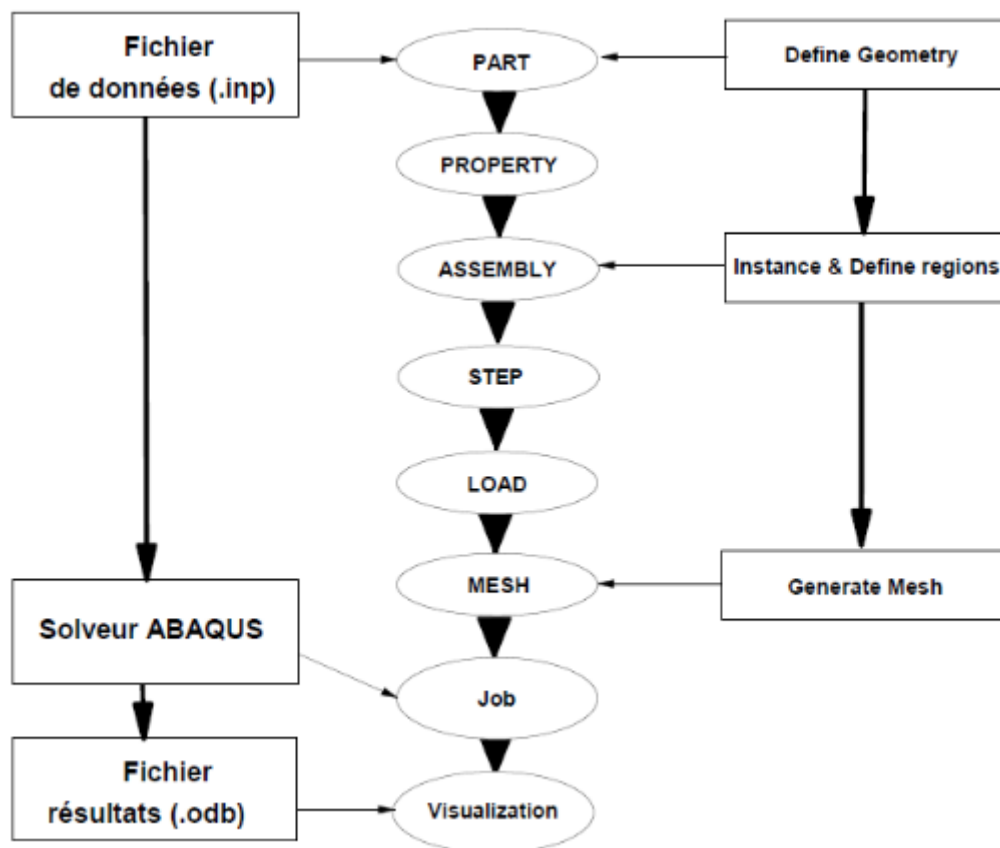


Figure II :1 Etapes à suivre pour la programmation 30

Comme le présente la figure 1:1 ABAQUS/CAE est divisé en unités fonctionnelles appelés modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

2 Description des possibilités d'ABAQUS

ABAQUS est un solveur (Standard, Explicit, Implicit, etc.) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier (entrée) ou fichier de données d'extension (.inp) et qui écrit la solution dans un fichier (de sortie) ou fichier de résultats d'extension (.odb) comme indique le tableau suivant :

Le fichier (texte) de données :	Le fichier de résultats :
Extension : inp Contenu : mots clés qui décrivent les géométries, les matériaux, les conditions aux limites	Extension : odb Contenu : contours et courbes résultats

Tableau II: 1

La réalisation d'une simulation numérique se fait en créant son propre fichier d'entrée grâce à un éditeur texte en connaissant les divers mots clés ou bien en utilisant l'interface graphique d'ABAQUS CAE. ABAQUS couvre presque tous les domaines de la physique et tous les types de problèmes

- Domaines physique :
- Mécanique.
- Thermique.
- Electrique.
- Problèmes couplés Problèmes :
- Statique et dynamique.
- Linéaires et non linéaires.

ABAQUS offre un très large choix d'éléments (plus de 100) avec la possibilité de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard)

ABAQUS est un logiciel d'analyse par éléments finis développé par ABAQUS, Inc. Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE. ABAQUS/Standard est un solveur polyvalent utilisant un schéma d'intégration implicite, Tandis que les deux autres utilisent des schémas d'intégration explicites pour résoudre des problèmes dynamiques non linéaires Ou quasi-statiques. ABAQUS/CAE est une interface de visualisation et de modélisation pour les solveurs mentionnés. La logique est écrite en C++, Fortran et Python Pour les scripts et le paramétrage, avec une interface Graphique basée sur le

FOX Toolkit. Il est utilisé dans l'industrie automobile, l'aérospatiale, La recherche scientifique et l'éducation. À l'origine, le logiciel était destiné à analyser le composant non linéaire Des Matériaux, offrant ainsi une variété de modèles Tels que le modèle Élastomères. En 2005, ABAQUS, Inc. a été acquis par Dassault Systèmes pour devenir SIMULIA. [35]

La figure suivante montre la fenêtre de l'Abaqus (figure 29).

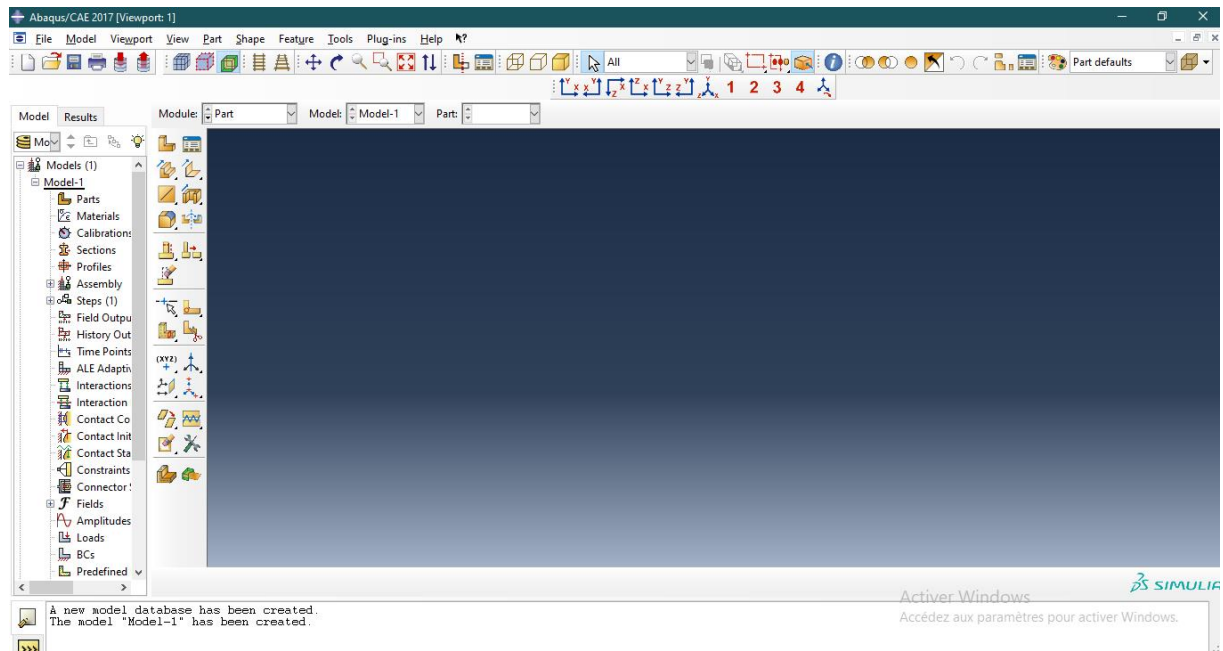


Figure II :2 Fenêtre de l'Abaqus.

3 Les modules :

ABAQUS est structuré en plusieurs modules. La réalisation simulation sous ABAQUS complète d'un projet de, s'effectue après un passage successif dans les ces modules. Nous essayons de présenter les principaux modules D'Abaques.

On va présenter les principaux modules d'ABAQUS, considérons une réparation d'un pipeline par patch composite. Le diamètre extérieur pipeline est $Do= 620\text{mm}$ et le diamètre intérieure $Di= 480\text{ mm}$; l'épaisseur de la colle $ec=0.15\text{mm}$; l'épaisseur de patch $ep=4\text{ mm}$. La charge et la pression appliquées est $F= 50\text{MPa}$ et $P= 100\text{MPa}$. Le tableau suivant montre les propriétés des pièces a modéliser. (Tableau 4)

	E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	E ₃ (GPa)	V ₁₂	V ₁₃	V ₂₃	G ₁₂ (GPa)	G ₂₃ (GPa)	G ₁₃ (GPa)
Patch (carbone /époxyde)	150	25	25	0,21	0,21	0,21	7,2	5,5	5,5
Adhesive (FM73)	2,55			0,32					
Pipe (acier inoxydable SA312Type 304)	204			0,3					

Tableau II:2 Propriétés du pipeline, colle et patch composite

3.1 Module PART:

Ce module permet de modéliser des pièces par révolution ou par extrusion. Il permet aussi de créer et d'éditer des géométries et des entités (Points, traits, et Plans de référence). Ces entités comprennent à la fois les Parties déformables et les parties rigides. Pour les créer, il faut utiliser L'icône de création.- Création de le pipe : Dans l'arbre du modèle on cliquer deux fois sur (Parts) Dans la boîte de dialogue Create Part On Nommer la pièce pipe et On Sélectionne (3D/Déformable/Solid/Extrusion) on Mettre Approximate size 200 (figure II :3)

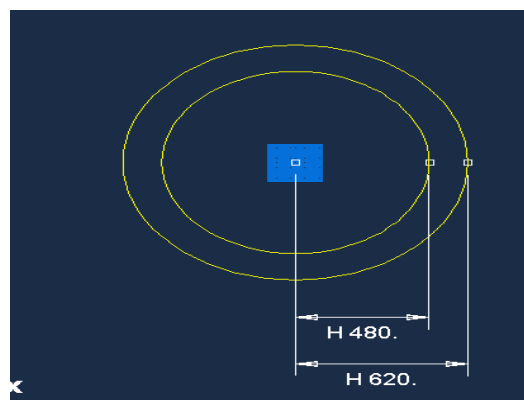
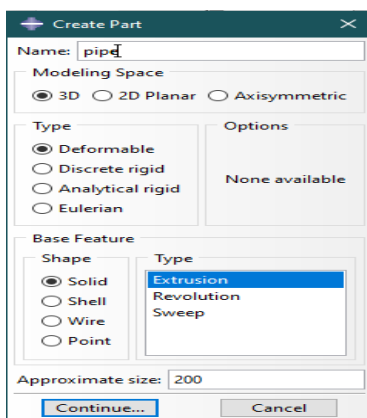


Figure II:3 Création de pipeline plaque

Figure II :4 Désignation de la plaque

Puis cliquer Continue, Mettre la valeur 10000 dans la case (Depth) (Figure 32) et on cliqué sur OK (Figure II:6)

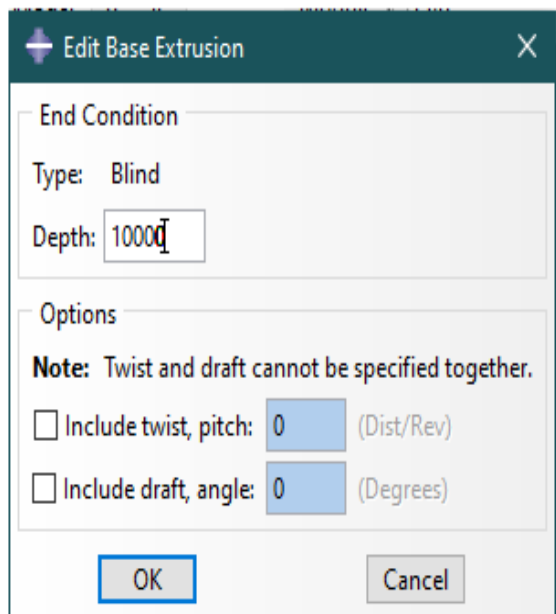


Figure II :6 Confirmation de l'extrusion

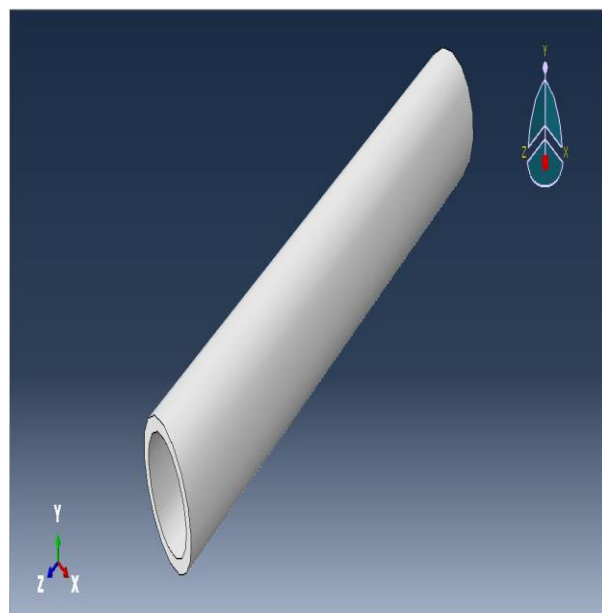


Figure II :5 Désignation de l'épaisseur

Ensuite, de même façon on crée la colle et le patch. A la fin on obtient 03 pièces

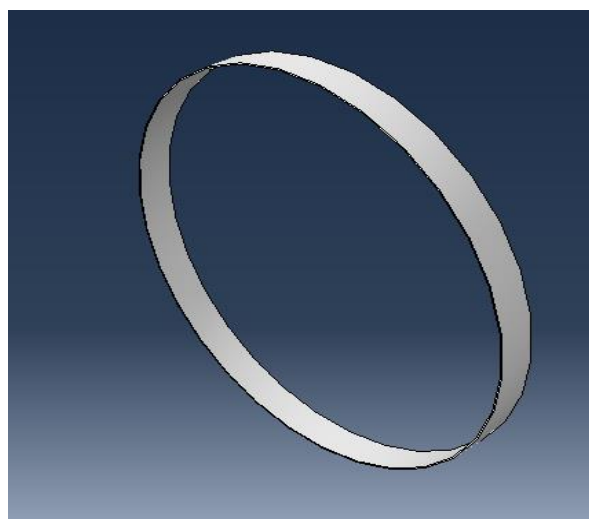


Figure II :8 Le patch

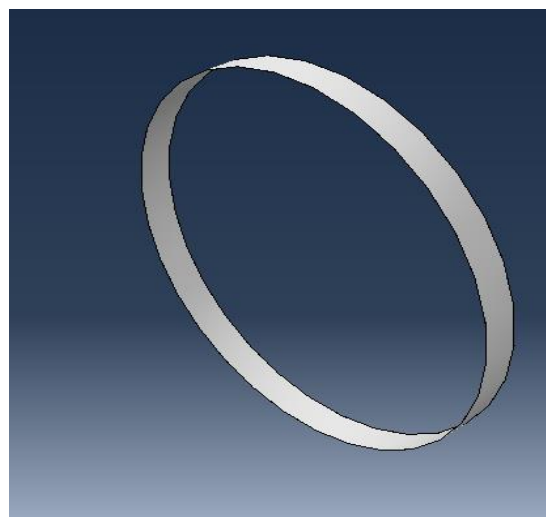


Figure II :7 La colle

3.2 Module PROPERTY :

Le module PROPERTY permet de définir les propriétés du ou des matériaux des parties déformables qui constituent le modèle ainsi que et la masse des corps rigides si Nécessaire. Dans ce module et selon le cas étudié, on est amené à définir des propriétés élastiques et/ou Plastiques (ou autres). Pour ce faire il suffit de cliquer sur l'icône (Création d'un matériau) (Figure II:9). Il est préférable de donner un nom Spécifique à Chacun des matériaux ce qui permet la création d'une base de données propre au projet. On définit par la suite : les propriétés élastiques via (Mechanical/ Elasticity/Elastic) (Module d'Young et le coefficient de Poisson pour le cas par exemple d'un matériau isotrope) et les propriétés plastiques via (Mechanical/Plasticity/Plastic). Dans ce module On crée aussi la section du matériau et l'assignement à toutes les parties de la pièce ou du mécanisme étudiés.

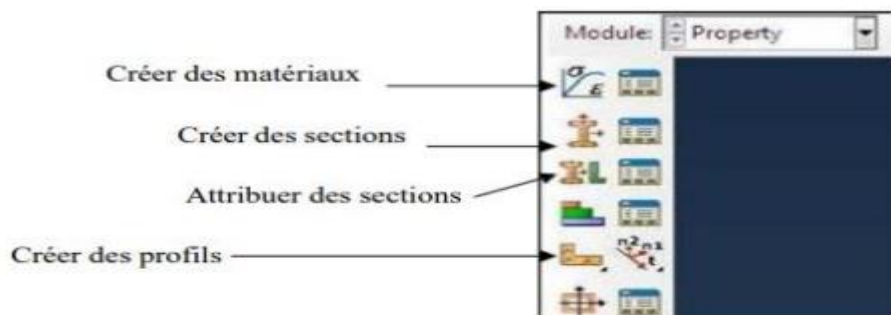


Figure II :9 Le module property.

Pour notre travaille :

Définition du matériau et ses propriétés : Dans l'arbre du modèle double clic sur Matériels, on définit le nom et les propriétés (tableau 4) de chaque matériaux (Figure II :10)

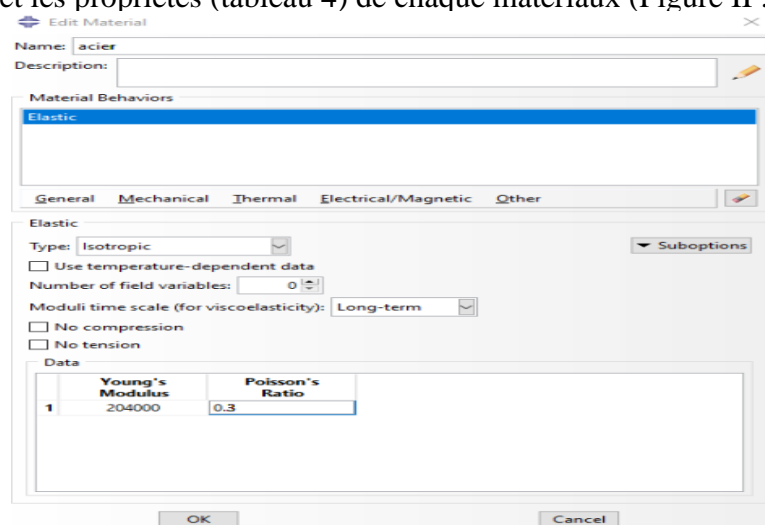


Figure II:10 Définition les propriétés, exemple pour le matériau du pipeline

Définition et affectation des propriétés de la section : Dans l'arbre modèle on double cliquer sur Sections Dans la boîte de dialogue (Create Section) qui s'affiche, nous allons créer trois sections pour le pipeline, patch et colle. On renomme chaque section et définit leur matériau.

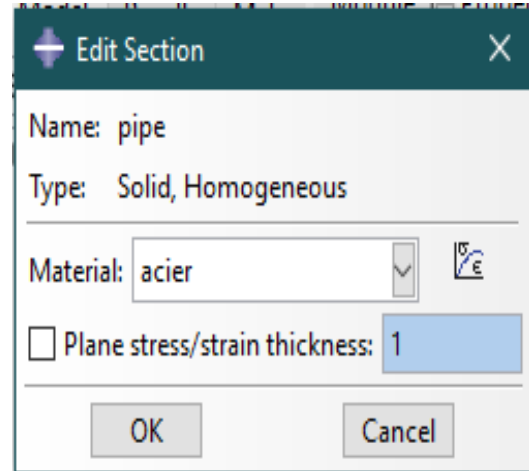
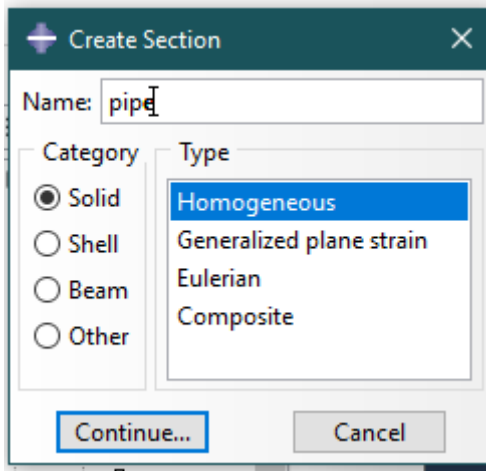


Figure II:10:1 Définition la section du pipe / Figure II:10:2 Définition du matériau de pipe

Affectation de la section à la structure : en cliquant, double-cliqué sur (Section Assignments) dans la liste des attributs de la pièce qui apparaît. Dans le (Viewport), on sélectionne la pièce entière on cliqué sur Done. Dans la boîte de dialogue (Edit Section Assignment) on choisit le section concernant la pièce.

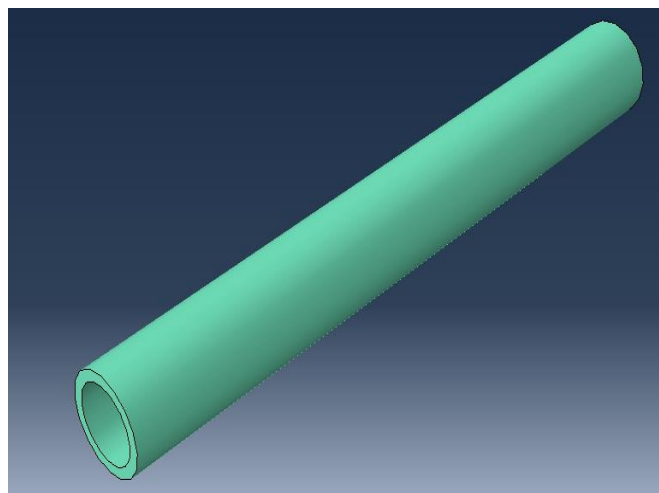
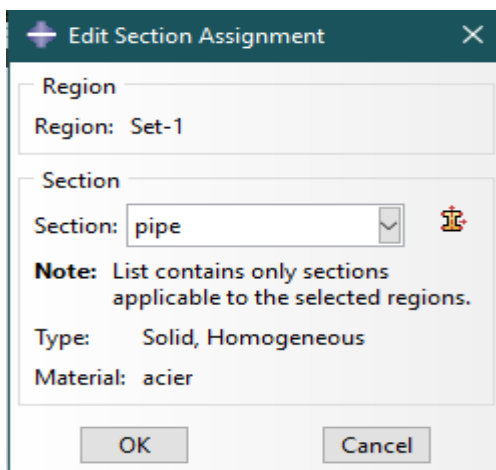


Figure III:10:3 Choix de section

Figure II:10:4 Affectation la section

3.3 Module ASSEMBLY :

Ce module, permet de créer une instance à partir des entités déjà définies dans le module Part. Ces instances seront celles qu'on manipulera par la suite dans le modèle. Dans le cas général,

à partir de l'icône en haut à gauche, on crée une instance en sélectionnant tous les éléments créés dans Part. On peut aussi dans certains cas faire subir des mouvements d'ensemble à ces instances pour les repositionner dans l'espace. Le module ASSEMBLY permet d'assembler les différentes pièces créées dans un projet. Cette étape est nécessaire même si le projet n'est composé que d'une seule pièce (Figure II:15), Après qu'ils vous aient montré les trois pièces (Pipe, patch et la colle), nous appuierons sur le bouton (Translate Instance) pour faire assembler les 3 pièces (Figure II:16)

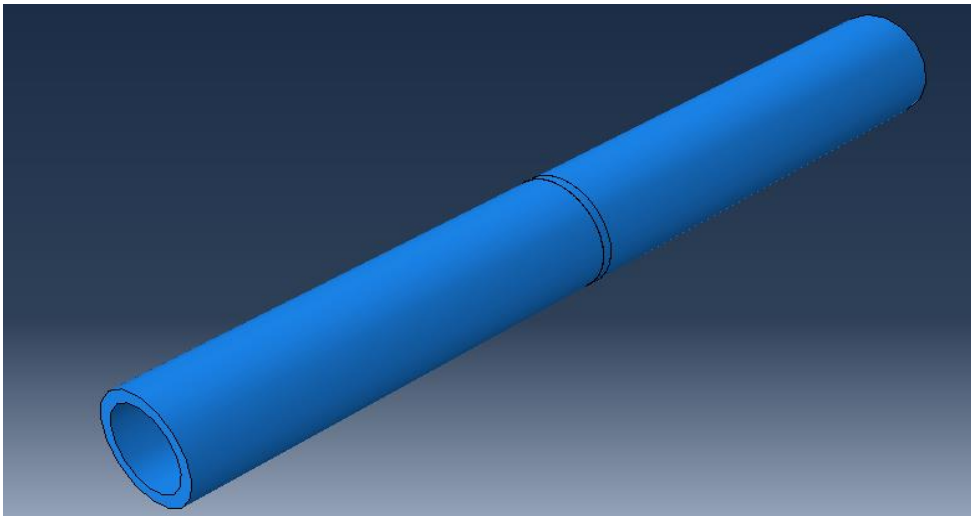


Figure II :15 La création de l'instance

3.4 Module STEP

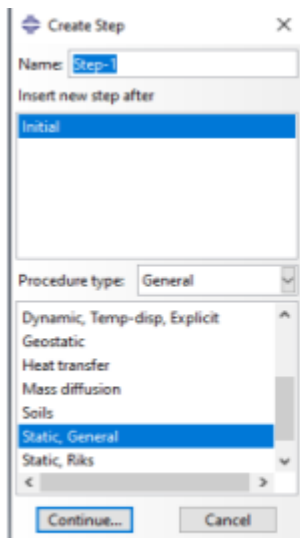
Le module STEP d'ABAQUS permet d'effectuer des étapes de calcul dans une analyse. Selon le cas, une analyse peut comporter un ou plusieurs Steps. Le choix du mode peut être statique, général (pour une analyse statique) ou dynamique explicite (pour des études de crash ou d'impact).

Dans notre cas, nous créons un Step pour notre pièce afin de simuler sa réponse statique sous une charge de 50MPa et une pression de 100MPa.

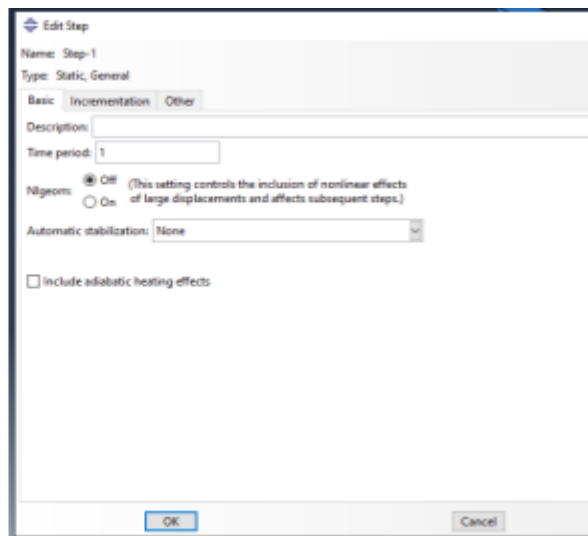
L'analyse se compose de deux Steps au total :

- Le premier Step, généré automatiquement par ABAQUS/CAE, applique les conditions aux limites en termes de déplacements (encastrement).
- Le deuxième Step d'analyse applique une pression de 100MPa et une force de 50 MPa.

Pour créer le Step d'analyse, nous double-cliquons sur l'option "Steps" et sélectionnons "Static General" comme type de procédure. Ensuite, nous continuons et acceptons les valeurs par défaut pour les paramètres du Step. Une fois le Step créé, nous cliquons sur "OK" pour le valider et fermer la boîte de dialogue "Edit Step". (Figure II:17)



(a)



(b)

Figure II :16 Assemblage de Modules

Figure II:17 Création de step.

3.5 Module Interaction :

Le module Interaction permet de définir les interactions entre les différentes parties et régions d'un modèle, qu'elles soient de nature mécanique, thermique ou autre. Son utilisation n'est obligatoire que lorsqu'il y a plusieurs instances en contact les unes avec les autres. Ce module permet de spécifier les contraintes subies par la pièce ou le système étudié, en déterminant le type d'effort qui leur est appliqué. Il permet également de définir tous les chargements et toutes les conditions aux limites du problème étudié. Il est important de noter que les chargements et les conditions aux limites sont dépendants des étapes d'analyse (Steps). Par exemple, une force appliquée à l'étape 1 peut être inactive à l'étape 2.

Pour notre travail :

Cliquer sur (Creat Contraint) et nous avons nommé (contrainte-1) puis continue (Figure II:18) choisi le type de master « surface de la pipe » cliquez sur DONE (Figure II:19) et puis choisir

le type de esclave « la colle et appuie sur OK, et maintenant dans la fenêtre de (Edit Constraint) cliquez sur OK pour confirmer la contrainte-1 (figure II:20) (Figure II:21)

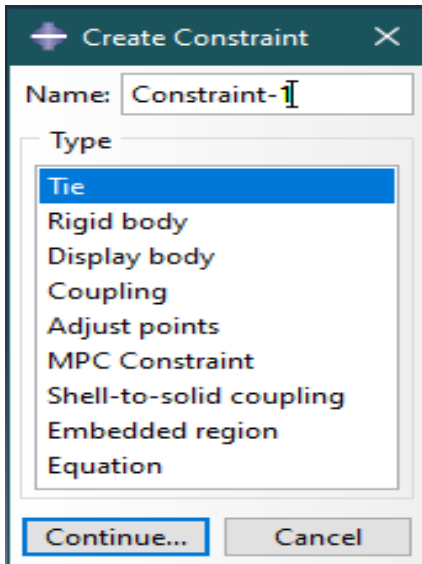


Figure II:18 Création de la contrainte

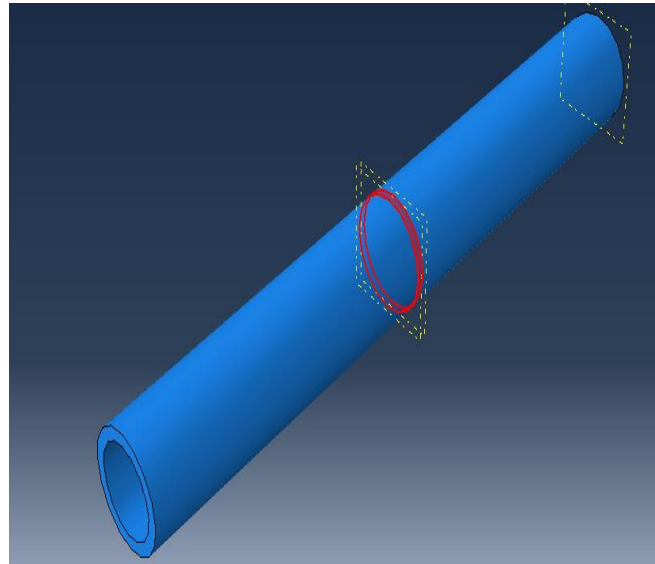


Figure II:19 Choisir le master surface

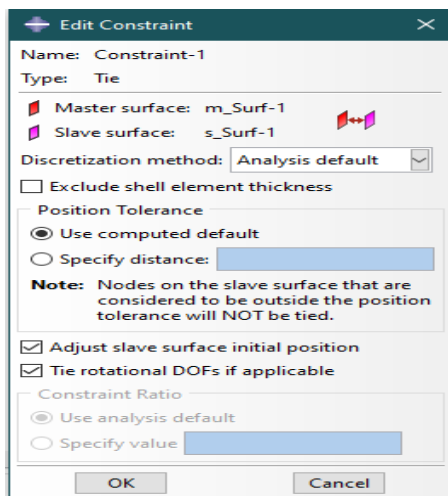


Figure II:20 La modification de contrainte

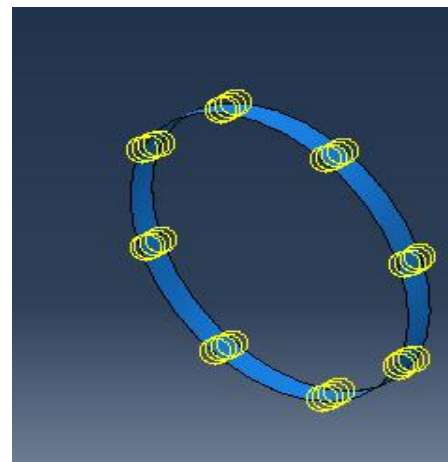


Figure II:21 Choisir l'esclave surface (la colle)

Ensuite, faire la même chose pour créer une 2 ème contrainte liée au patch avec l'autre surface de la colle. Puis on crée la fissure : en cliquant sur special toute en haut > crack > assignseam (Figure II:22) et on sélectionne la surface pour créer la fissure, puis on crée les deux cracks. (Figure II:23) (Figure II:24)

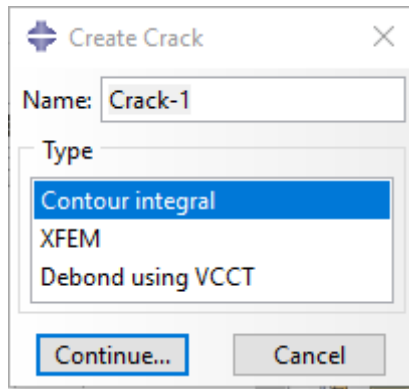


Figure II:22 Création de crack

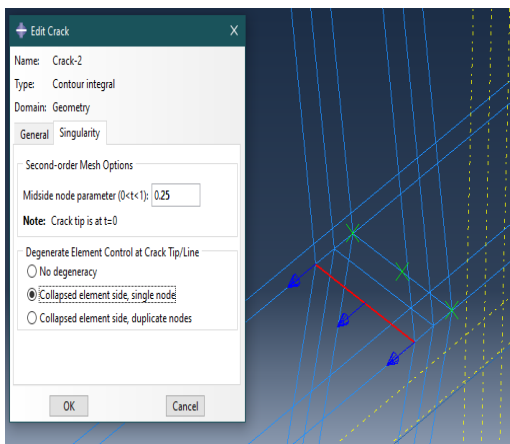


Figure II:23 Confirmation de crack-1

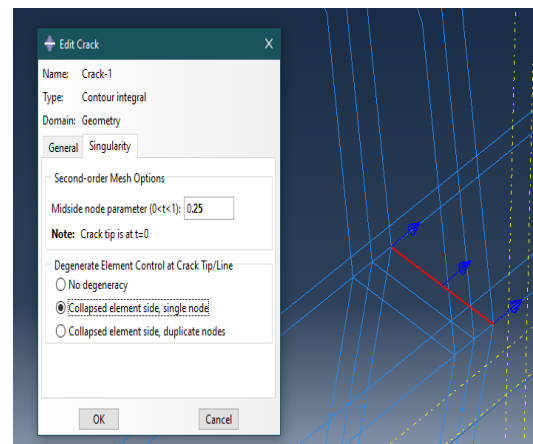


Figure II:24 Confirmation de crack-2

Après on crée les deux h-output pour les deux Crack dans le module de Step en cliquant sur (createhistory output). (Figure II:25)

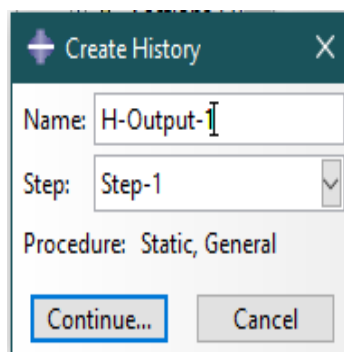


Figure II:25 Création de H-Output

3.6 Module LOAD

Pour appliquer des forces on va cliquer sur (creatload) après, choisir dans (catégorie) « Mechanical » après on sélectionne pressure et nous choisissons les surfaces aux lesquelles la pression doit être appliquée (figure II:26) et (figure II:27) ; puis on crée un autre load et on sélectionne (force centrifuge) et on fait continue sélectionner et le point où la force doit être

appliquée, (figure II:28) et (figure II:29) cliquez sur DONE. La boîte de dialogue (Edit Load) s'affiche on remplit la pression.

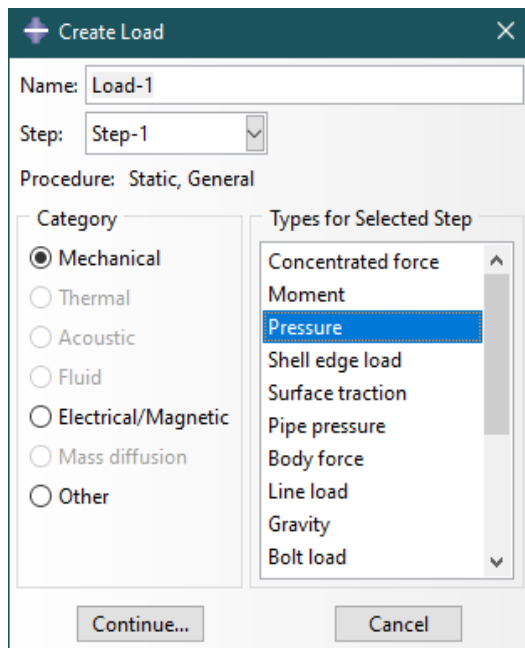


Figure II:26 Création de pression

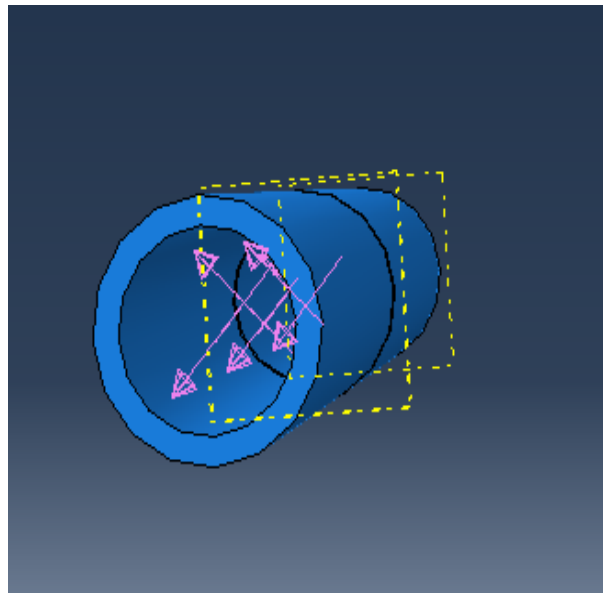


Figure II:27 Application de la pression

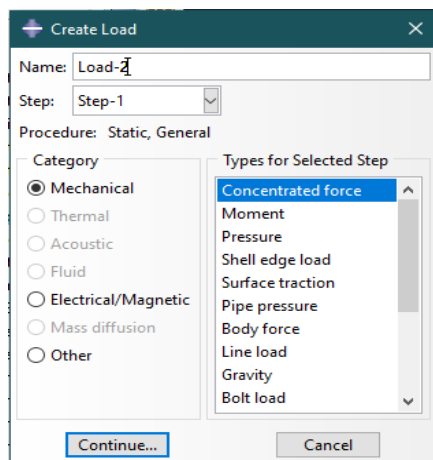


Figure II :28 Création de force

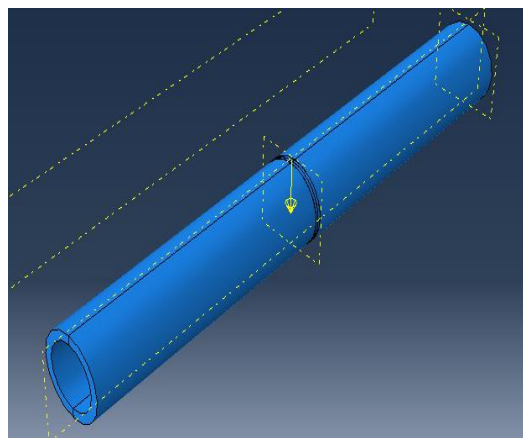


Figure II :29 Application de force

3.7 Module MESH :

Le module MESH est utilisé pour créer le maillage d'une pièce. Il offre tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage. Le maillage n'a pas besoin d'être régulier. Il peut être resserré près des zones d'intérêt, là où l'on prévoit des variations importantes de la solution. Cependant, il est important de veiller à ce que les éléments soient faiblement distordus et se rapprochent de polygones réguliers. Un maillage plus resserré permet d'obtenir une solution plus précise par la méthode des éléments finis.

Différents éléments classiques, tels que les hexaèdres et les tétraèdres, peuvent être utilisés pour réaliser le maillage de la pièce. (Figure II:30)

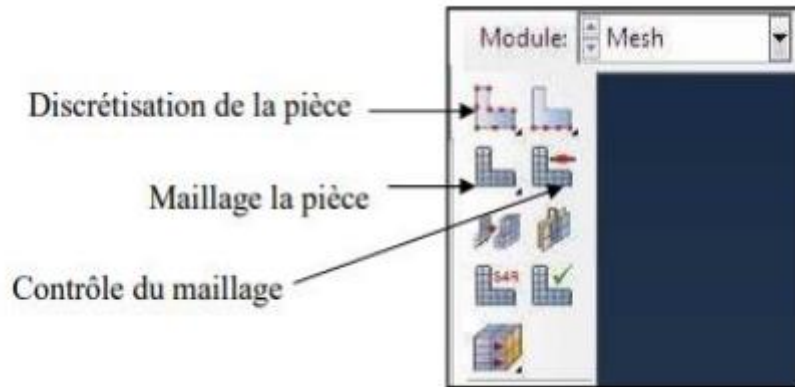


Figure II:30 Module MESH

Pour notre pièce : tout d'abord pour faire le bon maillage nous avons cliqué sur icon (Seed part instance) pour faire la discrétisation de la pièce>sélectionner toute la pièce>DONE, cliquez sur OK.

Ensuite ; mettre la valeur 250 dans (nombre of élément) (Figure II:31) et en fin, on clique sur (Mesh Part) pour confirmer le maillage.

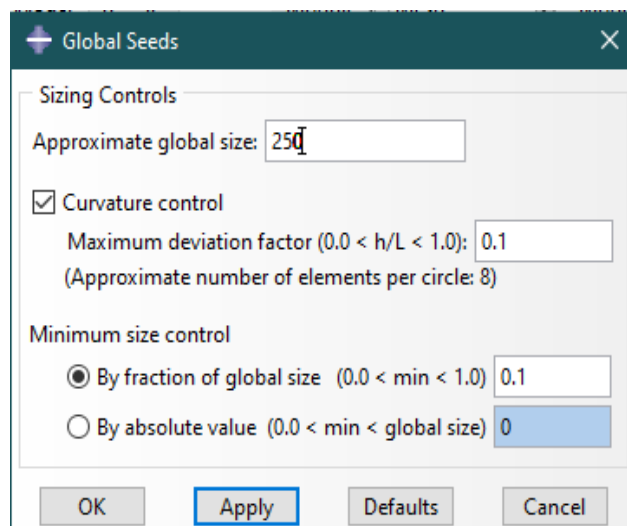


Figure II:31 Affectation le nombre des éléments de la pièce assemblée

Ensuite, cliquez sur (Seededges) et on sélectionne le périmètre de la fissure > choisir (By number) > Mettre la valeur 10 dans (number of element) (Figure II:32) et en fin, on clique sur (Mesh Part) pour confirmer le maillage. (Figure II:33)

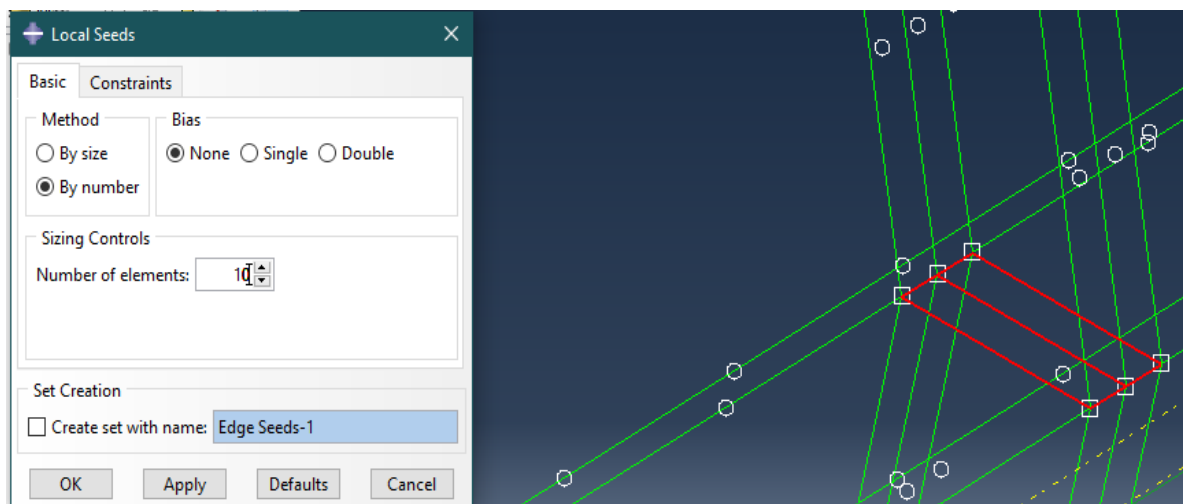


Figure II:32 Raffinement de maillage autour de la fissure

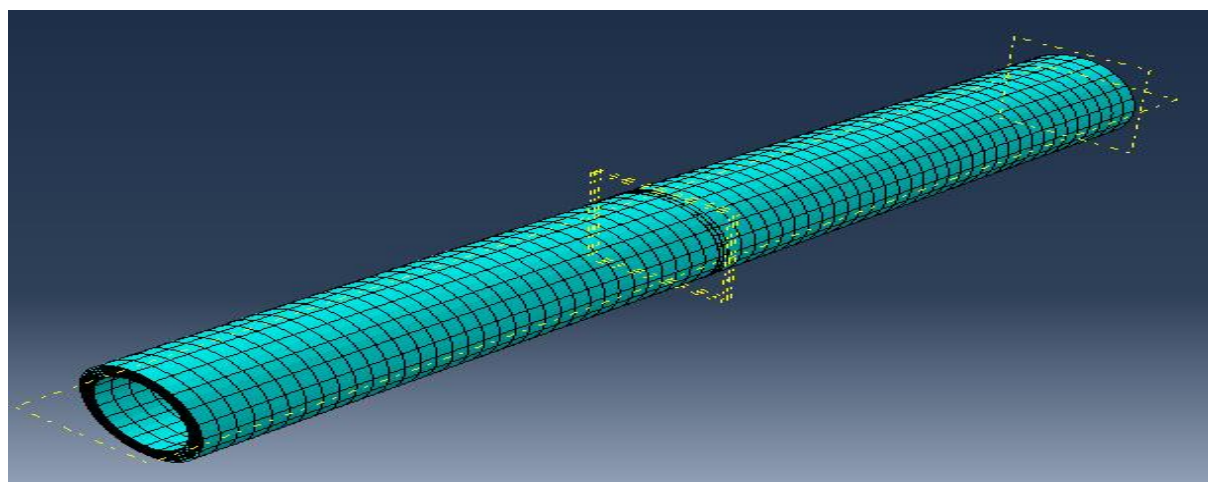


Figure II:33 Confirmation de maillage

On peut vérifier notre maillage par cliquer sur (VerifyMesh) > sélectionner la pièce > cliquer sur DONE, il apparaît la fenêtre de vérification (VerifyMesh) (Figure II:34) > appuyer sur (Highlight), il faut qu'il soit (errors 0 (0%) , warnings 0 (0%)) (Figure II:35)

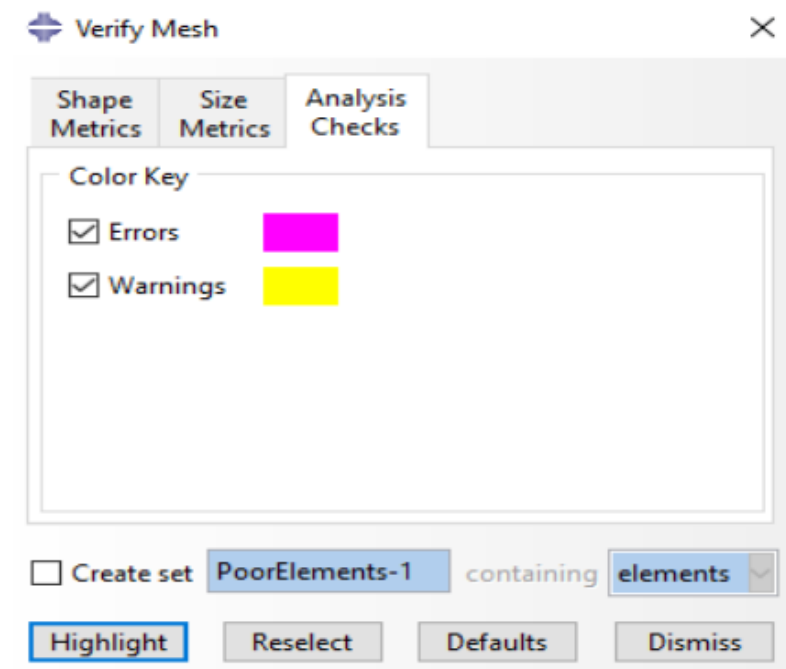


Figure II :34 Fenêtre de la vérification de maillage

```

Number of elements : 3000, Analysis errors: 0 (0%), Analysis warnings: 0 (0%)

Part instance: colle-1
Number of elements : 100, Analysis errors: 0 (0%), Analysis warnings: 0 (0%)

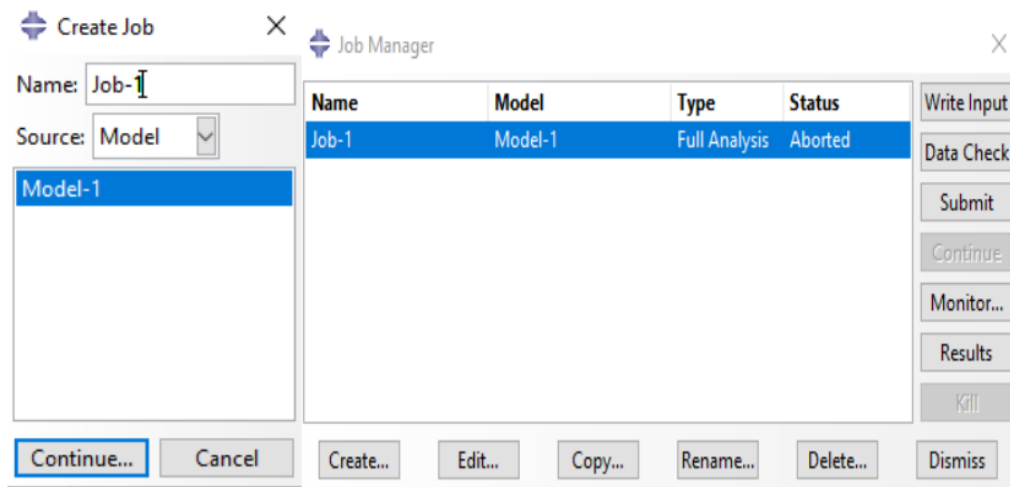
```

Figure II:35 L'analyse de (errors and warnings)

3.8 Module JOB :

Le module JOB est utilisé pour lancer le calcul et obtenir les contraintes, les déformations et les déplacements de la pièce ou du système étudié. Pour créer un nouveau travail, on ouvre la boîte de dialogue en double-cliquant sur Jobs, puis on donne un nom au job, par exemple "Job-1", et on clique sur OK. Pour soumettre le travail, on clique sur Submit (1) et (2) la

(figure II:36). Une fois l'analyse terminée, en bas de la fenêtre de visualisation (Viewport), ABAQUS affiche "CompletedSuccessfully". (Figure II:37)



(1)

(2)

Figure II:36 Création de job Figure

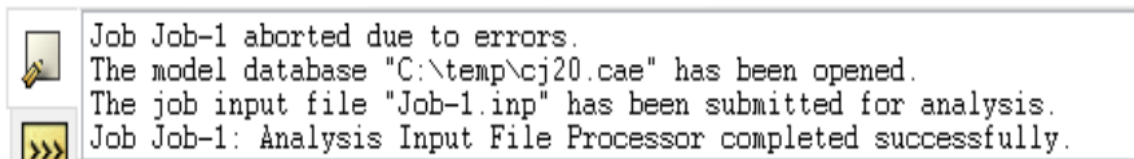


Figure II:37 L'affichage de message de la réussite

3.9 Module Visualisation :

Le module VISUALIZATION est utilisé pour visualiser les résultats. (Figure II:38).

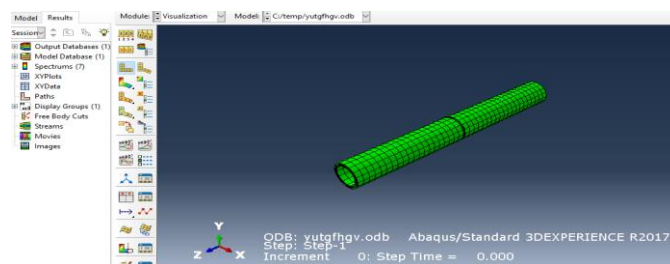


Figure II:38 Visualisation les résultats

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	E	ep	cont	J
3	3	N3	2	Incl	125000	2	147000	20
4	4	N4	17	Incl	125000	2	147000	20
5	5	N5	5	Incl	134000	2	135000	17
6	6	N6	12	Incl	134000	2	135000	17
7	7	N7	8	Incl	122000	3	152000	19
8	8	N8	13	Incl	125000	3	152000	17
9	9	N9	11	Incl	134000	3	129000	14
10	10	N10	3	Incl	122000	5	147000	16
11	11	N11	16	Incl	122000	5	147000	16
12	12	N12	18	Incl	125000	5	143000	12
13	13	N13	4	Incl	125000	5	143000	12
14	14	N14	15	Incl	134000	5	124000	7
15	15	N15	10	Incl	134000	5	124000	7
16	16	N16	14	Incl	134000	5	124000	7
17	17	N17	9	Incl	134000	5	124000	7
18	18	N18	6	Incl	134000	5	124000	7

Figure II:38 Visualisation les résultats

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
1 E	Free		122000	134000
2 ep	Free		2	5

Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1 cont	Minimize	1		122447	125710
2 J	Minimize	1		6,24815	7,75316

Iteration: 5000 Iteration slider: _____

	1	2	3	4	5	6
	E	ep	cont	J	iter	log(D)
1	134000	4,9998	124080	7,0013	4104	-0,6013
2	134000	5	124079	7,0008	3908	-0,602
3	134000	4,7	125195	7,8905	5000	-0,0223
4	134000	5	124078	7,0007	2296	-0,6021

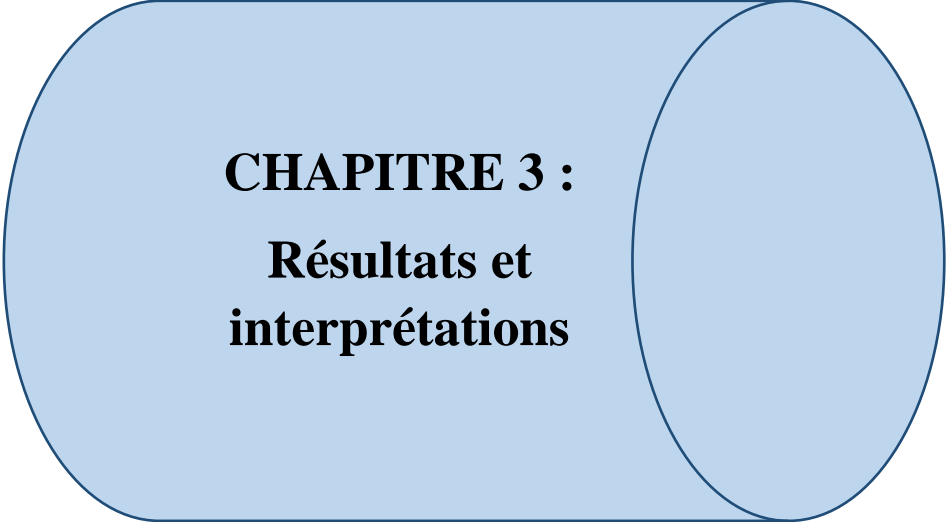
Figure II:38 Visualisation les résultats

Coefficient List - cont					
	1	2	3	4	5
1	cont	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	140375	2124,41	9,57523e-017	4628,66
3	E	-11744,1	704,54	1,15639e-009	1535,05
4	ep	-4571,07	647,423	1,31829e-005	1410,61
5	E*E	717,688	1820,6	0,700346	3966,73
6	ep*ep	-389,681	1759,04	0,828404	3832,59
7	E*ep	-308,943	715,791	0,673678	1559,57
8					
9	N = 18	Q2 =	0,929	Cond. no. =	7,7078
10	DF = 12	R2 =	0,974	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	0,963	RSD =	2406,6411
12				Conf. lev. =	0,95

Figure II:38 Visualisation les résultats

Coefficient List - J					
	1	2	3	4	5
1	J	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	13,581	0,299413	8,59822e-015	0,652363
3	E	-3,3644	0,0992977	2,77729e-013	0,21635
4	ep	-4,16071	0,0912477	8,07464e-015	0,198811
5	E*E	1,53323	0,256595	6,45745e-005	0,55907
6	ep*ep	0,374897	0,247918	0,156369	0,540165
7	E*ep	-0,963444	0,100883	5,87567e-007	0,219805
8					
9	N = 18	Q2 =	0,992	Cond. no. =	7,7078
10	DF = 12	R2 =	0,997	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	0,996	RSD =	0,3392
12				Conf. lev. =	0,95

Figure II:38 Visualisation les résultats



CHAPITRE 3 :
Résultats et
interprétations

Effet de module de Young :

Le module de Young est une propriété mécanique qui mesure la rigidité d'un matériau et sa résistance à la déformation. On remarque que la contrainte et l'intégrale J diminuent avec l'augmentation du Module de Young

1. $E=122000$: La contrainte appliquée sur le pipe et l'intégrale J seront très élevées.
2. $E=125000$: La contrainte appliquée sur le pipe et l'intégrale J seront moyens.
3. $E=134000$: La contrainte appliquée sur le pipe et l'intégrale J seront

Effet de l'épaisseur de patch :

L'augmentation de l'épaisseur de patch conduit à la diminution de la contrainte et l'intégrale J. Un patch épais favorise l'absorption des contraintes. Les résultats obtenus nous permettent de confirmer que le choix de patches plus épais permet d'augmenter significativement les performances. Pour une meilleure distribution des contraintes et la propagation de la fissure, il est préférable d'utiliser de multiples couches de patch en composites collés pour réparer la fissure.

Effet de l'humidité :

L'environnement de travail a un rôle très important sur le comportement de la fissure, pour cela on peut

Bibliographie :

- [1] J. Lemaitre, Mécanique des Matériaux Solides, 2005.
- [2] A. Zegloul, Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture, Université de Lorraine , 2016/2017.
- [3] T.Nateche, Réhabilitation et renforcement de canalisations sous pression en présence des défauts de surface, Thèse de doctorat , Univ des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf (Oran), 2011.
- [4] J.Besson, Simulation de la déchirure ductile, Paris: Centre des matériaux , Mines ParisTech, 2012.
- [5] A.F.Gourgues-Lorenzon, Comportement, endommagement et rupture par fatigue, Mines Paris, 2006.
- [6] G. G.Dhatt, Une présentation de la méthode des éléments finis, Presses Université Laval, 1981.
- [7] A.Lahmadi, Etude paramétrique de l'interaction entre ouvrage: Tunnel, bâtiment, excavation, Université El Hadj Lakhdar Batna, 2006.
- [8] H.Oudin, Méthode des éléments finis, Nante,PARIS: Ecole d'ingénieur, 2008.
- [9] D.Bennacer, Etude des phénomènes d'interface verticale des écoulements diphasique dans un pipeline, Mémoire de Magister, Université AbouBekr Belkaid – Tlemcen, 2011.
- [10] D. A.Meftah, Recherche sur la maîtrise de la technique d'élaboration des pipes pour le transport du pétrole ou du gaz naturel, Université de Msila, Msila, 2021.
- [11] J. M.P.Foulc, Durabilité des assemblages par colles, Toulouse, 2008.
- [12] F.Rivalin, Développement d'acier pour gazoduc à haute limite d'élasticité et ténacité élevée: mécanique et mécanisme ductile à grande vitesse, Thèse de doctorat, Ecole supérieur des mines, Paris, 1988.
- [13] J.Mdray, Metallurgical options for API grade X70 and X80 linepipe, 1987.
- [14] A.Benhamouda, Etude du comportement de fissure dans les tubes sous pression interne, Thèse de Magistere, Univ Mentouri, Constantine, 2010.
- [15] C. F. C. ,. M. K. L. Soutis, «predicting the compressive engineering performance of carbonfiberreinforced plastics composites,» vol. 31, pp. 531-536, 1999.
- [16] Fekih, *Etude bibliographique sur les défaillances des structures de pipelines et réparation par renforcement par manchon composite*, Mémoire de master, Univ Annaba, 2013.
- [17] M. Hafiti, Inspection en ligne et diagnostic, Arzew: Direction de traitement de canalisation ONATRACH.

- [18] M.Seyed, Formation, propagation et coalescence dans un réseau de fissure en fatigu thermique, Paris, 2004.
- [19] S. Soltane, Etude électrochimique de la corosion des acier API 5L X60 pour gazoduc en milieu environnat de sol et protection par inhibiteur de pomu phosphate, Mémoire de magister, Univ USTO, Oran, 2009.