

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Université de Ghardaïa  
Faculté des Sciences et de la Technologie

جامعة غرداية  
كلية العلوم والتكنولوجيا

القسم: الآلية والكهروميكانيك

الشعبة: إلكتروميكانيك

التخصص: ماستر 2 صيانة صناعية

غرداية في: 2025/10/16

## شهادة ترخيص بالتصحيح والإيداع:

أنا الأستاذ(ة): صلاح مراد

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس / ماستر / دكتوراه) المعنونة بـ:

« Effet d'un défaut de différente position sur les états de contraintes mécaniques »

من إنجاز الطلبة:

الداعلي نور الدين

بوحادة عبد الناصر زكرياء

التي نوقشت بتاريخ: 2025/09/22.

أشهد أن الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

مصادقة رئيس القسم :

إمضاء المسؤول عن التصحيح:

صلاح مراد



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 غرداية

Université de Ghardaïa



N° d'enregistrement  
/...../...../...../...../...

كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
قسم الآلية والكهرو ميكانيك  
Département d'automatique et d'électromécanique  
Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

**Master**

Domaine : sciences et des technologies  
Filière : électromécanique  
Spécialité : Maintenance industrielle

**Thème**

Effet d'un défaut de différente position sur les  
états de contraintes mécaniques

Présenté par :

**EDDALI Nour Eddine**

**BOUHADDA Abdennacer Zakaria**

Soutenue publiquement le : 22 septembre 2025

Devant le jury composé de :

<b>SALAH Mourad</b>	<b>Université</b>	<b>De Président</b>
<b>BOUSNAN Tawfiq</b>	<b>Université</b>	<b>Encadreur</b>
<b>BLAGHITH Abdelhakim</b>	<b>Université</b>	<b>Premier examinateur</b>
<b>ISSAWI Fares</b>	<b>Université</b>	<b>Deuxième examinateur</b>

**Année universitaire 2024 /2025**

## Dédicace :

Avec toute mon affection et ma profonde gratitude,

Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont été la lumière éclairant mon chemin,  
le soutien indéfectible dans les moments de doute, et la source de joie dans  
chaque étape franchie.

À ma famille bien-aimée, refuge constant et pilier de ma vie,

À ma mère, dont l'amour, la tendresse et les prières ont accompagné chacun de  
mes pas,

À mon père, modèle de sagesse et de persévérance, source inépuisable de  
courage,

À mes frères et sœurs, compagnons fidèles de tous les instants, toujours présents  
dans les moments décisifs,

À mes proches, qui ont su, par leurs encouragements et leur présence  
bienveillante, alléger les difficultés de mon parcours,

Et à toutes celles et ceux qui ont cru en moi, m'ont offert leur aide, leur soutien,  
leur confiance...

Je vous dédie le fruit de cet effort avec respect et reconnaissance,  
en espérant que ce travail soit à la hauteur de vos attentes et le début d'un  
humble retour pour tout ce que vous m'avez donné.

***EDDALI. Nour Eddine***

## Dédicace :

À ceux qui m'ont soutenu à chaque étape de ce parcours,  
À ceux qui m'ont transmis des valeurs nobles et m'ont offert leur amour et leur  
appui sans condition...

À ma famille bien-aimée, mon pilier et mon refuge,  
À mon père cher, symbole de sagesse et de force,  
À ma mère tendre, source inépuisable d'affection et de prières,  
À mes frères et sœurs, lumière qui a illuminé mon chemin,  
À mes proches et à tous ceux qui m'ont encouragé de près ou de loin,  
À mes enseignants, éclaireurs de savoir et de conseils,  
À mes amis fidèles, compagnons de route et de rêves partagés...

Je dédie ce modeste travail en témoignage de ma profonde reconnaissance et de  
ma sincère gratitude.

***BOUHADDA. Abdennacer Zakaria***

## **Remerciements :**

Au nom d'Allah, le Miséricordieux, le Clément

Nous rendons grâce à Allah pour son aide constante, pour la grâce de la connaissance et du travail, et pour le succès dont il nous a comblés. À lui appartient toute louange, comme il sied à sa majesté et à sa grandeur.

Nous, les étudiants, souhaitons exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, fruit d'un investissement constant et d'une expérience académique enrichissante.

Nous adressons nos remerciements avant tout à nos familles, piliers essentiels de notre parcours, en particulier à nos pères et mères, pour leurs prières continues, leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien indéfectible.

Nous exprimons également notre vive reconnaissance à l'ensemble de nos enseignants pour leurs conseils et leur accompagnement tout au long de notre formation, avec une mention spéciale à notre directeur de mémoire, Monsieur Bousnane Toufik, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et ses précieuses orientations.

Nous remercions aussi nos camarades et amis, compagnons dans ce parcours parfois difficile, pour leur aide mutuelle, leur bienveillance et leur précieuse collaboration.

À tous ceux qui ont, d'une manière ou d'une autre, contribué à la réussite de ce projet – par leurs conseils, leur aide ou leur simple présence – nous adressons nos remerciements chaleureux et nos prières sincères.

Qu'Allah bénisse ce travail et en fasse un jalon vers un avenir prometteur, si Allah le veut.

Avec toute notre estime et notre respect.

## **Résumé :**

Cette étude examine l'impact de la position d'un défaut volumique sur la distribution des contraintes mécaniques dans un tube en acier (pipeline) soumis à une pression interne, utilisé pour le transport de pétrole. L'effet de ce défaut est analysé à l'aide de la simulation par éléments finis réalisée avec le logiciel Abaqus.

Les résultats montrent que la position du défaut influence fortement les concentrations de contraintes. La zone critique identifiée correspond à la position 1 (située près de l'extrémité du pipeline), où la contrainte de Von Mises atteint 203,8 MPa. En revanche, les autres positions présentent une distribution plus homogène des contraintes, sans indication de risque de fracture.

L'étude met en évidence que même des défauts de faible taille peuvent induire des concentrations locales de contraintes mécaniques particulièrement élevées, notamment à proximité des zones d'appui. Ces résultats soulignent l'importance d'une analyse approfondie des régions critiques, tant lors des phases de fabrication que dans les opérations de maintenance des pipelines.

**Mots-clés :** Défauts volumique, Contraintes mécaniques, Logiciel Abaqus.

## **ملخص:**

تتناول هذه الدراسة تأثير موقع عيب حجمي على توزيع الضغوط الميكانيكية في أنبوب فولاذي (خط أنابيب) يتعرض لضغط داخلي، ويستخدم لنقل النفط. يتم تحليل تأثير هذا العيب باستخدام محاكاة العناصر المحدودة التي تم إجراؤها باستخدام برنامج Abaqus.

تظهر النتائج أن موضع العيب يؤثر بشدة على تركيزات الإجهادات. المنطقة الحرجة المحددة تتوافق مع الموضع 1 (الواقع بالقرب من طرف خط الأنابيب)، حيث يصل إجهاد Von Mises إلى 203,8 MPa. في المقابل، تظهر المواضع الأخرى توزيعاً أكثر تجانساً للإجهادات، دون أي مؤشر على خطر حدوث كسر.

تسلط الدراسة الضوء على أن العيوب الصغيرة الحجم يمكن أن تؤدي إلى تركيزات محلية عالية للغاية للضغوط الميكانيكية، لا سيما بالقرب من مناطق الدعم. تؤكد هذه النتائج على أهمية إجراء تحليل متعمق للمناطق الحرجة، سواء أثناء مراحل التصنيع أو في عمليات صيانة خطوط الأنابيب.

**الكلمات المفتاحية:** عيوب الحجم، الضغوط الميكانيكية، برنامج Abaqus

**Abstract:**

This study examines the impact of the position of a volumetric defect on the distribution of mechanical stresses in a steel pipe (pipeline) subjected to internal pressure and used for transporting oil. The effect of this defect is analyzed using finite element simulation performed with Abaqus software.

The results show that the position of the defect strongly influences stress concentrations. The critical area identified corresponds to position 1 (located near the end of the pipeline), where the Von Mises stress reaches 203.8 MPa. In contrast, the other positions show a more homogeneous distribution of stresses, with no indication of fracture risk.

The study highlights that even small defects can induce particularly high local concentrations of mechanical stresses, especially near support areas. These results underscore the importance of a thorough analysis of critical areas, both during the manufacturing phases and in pipeline maintenance operations.

**Keywords:** Volume defects, Mechanical stresses, Abaqus software.

## Liste de figures :

<b>Figure 1: Transport de pétrole par voie ferrée.</b>	<b>5</b>
<b>Figure 2: transport par camion-citerne.</b>	<b>5</b>
<b>Figure 3: Les pétroliers.</b>	<b>6</b>
<b>Figure 4 : Les pipelines.</b>	<b>7</b>
<b>Figure 5: Bobine d'acier</b>	<b>21</b>
<b>Figure 6: Tube souder longitudinal.</b>	<b>22</b>
<b>Figure 7: Tube souder en spirale.</b>	<b>23</b>
<b>Figure 8 : montre l'interface utilisateur du logiciel.</b>	<b>31</b>
<b>Figure 9 : La relation entre les produits Abaqus.</b>	<b>33</b>
<b>Figure 10 : Processus d'analyse complet à l'aide d'ABAQUS/Explicit.</b>	<b>36</b>
<b>Figure 11 : Pression Appliquée et conditions aux limites.</b>	<b>41</b>
<b>Figure 12 : Maillage du pipeline.</b>	<b>42</b>
<b>Figure 13 : Contrainte de Von Mises dans la plaque sans défaut.</b>	<b>43</b>
<b>Figure 14 : Contrainte S11 dans le pipeline sans défaut.</b>	<b>43</b>
<b>Figure 15 : Contrainte S33 dans le pipeline sans défaut.</b>	<b>44</b>
<b>Figure 16 : Forme de défaut.</b>	<b>44</b>
<b>Figure 17 : Positions de défaut.</b>	<b>45</b>
<b>Figure 18 : Concentration de contrainte au voisinage de défaut.</b>	<b>45</b>
<b>Figure 19 : Contrainte de V. Mises pour toutes les positions.</b>	<b>46</b>
<b>Figure 20 : Contrainte S11 pour toutes les positions.</b>	<b>47</b>
<b>Figure 21 : Contrainte S33 pour toutes les positions.</b>	<b>47</b>



## Liste des tableaux :

Tableau 1: Nuances et caractéristiques des aciers de pipelines les plus utilisés.....	12
Tableau 2: Représente la différence entre PSL1 et PSL2 selon la norme API 5L. ....	14
Tableau 3: Résume les grades courants de l'API 5L en termes de propriétés mécaniques et chimiques de base. ....	15
Tableau 4 : Exemple de structure chimique approximative (Grade X52 - PSL2). ....	15
Tableau 5 : : Autres Propriétés Clés. ....	17
Tableau 6 : Comparaison avec d'Autres Matériaux.....	17
Tableau 7 : Il s'agit d'une comparaison rapide avec d'autres matériaux de fabrication. ....	20
Tableau 8 : Différences entre PSL1 et PSL2 (API 5L). ....	24
Tableau9 : Résumé des méthodes de prévention. ....	29
Tableau 10 : Symboles et unités utilisés dans ABAQUS. ....	38
Tableau 11:les dimensions et les caractéristiques du tube. ....	40
Tableau 12 : Contraintes de V. M, S11 et S33 pour différente position.....	46

# Sommaire

## **INTRODUCTION GENERALE**

<b>Introduction Générale :</b>	<b>1</b>
--------------------------------	----------

## **CHAPTER 01 :**

<b>1 Introduction :</b>	<b>3</b>
-------------------------	----------

<b>2 L'importance du pétrole dans le monde :</b>	<b>3</b>
--	----------

<b>3 Voies de transport du pétrole et du gaz :</b>	<b>4</b>
--	----------

<b>3.1 Chemins de fer :</b>	<b>4</b>
-----------------------------	----------

<b>3.2 Les camions de transport :</b>	<b>5</b>
---------------------------------------	----------

<b>3.3 Les pétroliers :</b>	<b>6</b>
-----------------------------	----------

<b>3.4 Les pipelines :</b>	<b>7</b>
----------------------------	----------

<b>4 Définition des pipelines :</b>	<b>8</b>
-------------------------------------	----------

<b>5 Caractéristiques des pipelines :</b>	<b>8</b>
---	----------

<b>6 Matériaux les plus couramment utilisés dans la fabrication des pipelines pétroliers et gaziers :</b>	<b>8</b>
---	----------

<b>6.1 Principaux types de métaux utilisés et leurs caractéristiques :</b>	<b>9</b>
--	----------

<b>6.1.1 Matériaux standards (95% des applications) :</b>	<b>9</b>
---	----------

<b>6.1.2 Matériaux spéciaux (5% des cas) :</b>	<b>10</b>
--	-----------

<b>6.2 Données techniques clés :</b>	<b>11</b>
--------------------------------------	-----------

<b>6.2.1 Pression typique :</b>	<b>11</b>
---------------------------------	-----------

<b>6.2.2 Durée de vie :</b>	<b>11</b>
-----------------------------	-----------

<b>6.3 Critères de sélection :</b>	<b>11</b>
------------------------------------	-----------

<b>6.4 Références normatives :</b>	<b>11</b>
------------------------------------	-----------

<b>6.5 Caractéristiques des matériaux utilisés dans les pipes :</b>	<b>11</b>
---	-----------

<b>7 Définition de l'acier au carbone API 5L :</b>	<b>13</b>
--	-----------

<b>7.1 Que signifie API 5L :</b>	<b>13</b>
----------------------------------	-----------

<b>7.2 Types d'acier selon l'API 5L :</b>	<b>13</b>
---	-----------

<b>PSL1 (niveau de base) :</b>	<b>13</b>
--------------------------------	-----------

PSL2 (niveau avancé) :	13
7.3 Grades de résistance de l'acier :	14
7.4 Principales caractéristiques de l'acier API 5L :	15
<b>8 Caractéristiques de l'Acier Carbone API 5L : Module d'Élasticité (E) et Poids Spécifique (<math>\gamma</math>) :</b>	<b>16</b>
8.1 Module d'Élasticité (E) :	16
8.2 Poids Spécifique ( $\gamma$ ) :	16
8.3 Autres Propriétés Clés :	17
8.4 Comparaison avec d'Autres Matériaux :	17
8.5 Facteurs d'Influence :	17
8.6 Applications Industrielles :	17
8.7 Avantages de l'Acier API 5L :	18
<b>9 Les raisons techniques et mécaniques pour choisir "l'acier au carbone API 5L" pour les tubes de transport du pétrole et du gaz :</b>	<b>18</b>
9.1 Résistance aux pressions de service élevées :	18
9.2 Adaptation aux variations environnementales et thermiques :	18
9.3 Stabilité sous contrainte cyclique (Résistance à la fatigue) :	18
9.4 Ductilité pour absorber les déformations :	18
9.5 Compatibilité avec les techniques de soudage modernes :	19
9.6 Capacité à tolérer des défauts mineurs en fabrication :	19
9.7 Viabilité économique avec des performances garanties :	19
9.8 Compatibilité avec les systèmes de protection contre la corrosion :	19
9.9 Conformité aux normes internationales et à la sécurité La norme API 5L réglemente :	19
9.10 Expérience historique et reconnaissance mondiale :	19
<b>10 Fabrication des tubes de transport de pétrole et de gaz selon la norme API 5L : De la matière première à la production :</b>	<b>20</b>
10.1 Étape 1 : Préparation des matières premières :	20
10.1.1 Sélection des matériaux :	20

10.1.2 Formes initiales :	21
10.2 Étape 2 : Façonnage du tube :	21
10.2.1 Tubes sans soudure (Seamless) :	21
10.2.2 Tubes soudés (Welded) :	22
10.3 Étape 3 : Traitement thermique :	23
10.4 Étape 4 : Finition et protection :	23
10.5 Étape 5 : Tests et contrôles qualité :	24
10.5.1 Tests mécaniques :	24
10.5.2 Test hydrostatique :	24
10.5.3 Contrôles non destructifs (CND) :	24
10.6 Étape 6 : Marquage et emballage :	24
10.7 Applications finales :	25
11 Les problèmes pouvant survenir lors de la fabrication de tubes de transport de pétrole et de gaz selon la norme « API 5L » :	25
11.1 Problèmes lors de la préparation de la matière première (acier) :	25
11.2 Problèmes pendant le formage des tubes :	25
11.2.1 Pour les tubes soudés (Welded Pipes) :	25
11.2.2 Pour les tubes sans soudure (Seamless Pipes) :	26
11.3 Problèmes de traitement thermique :	26
11.3.1 Problèmes de finition et de tests :	26
11.3.2 Problèmes de revêtement et de protection :	26
11.3.3 Problèmes liés aux spécifications API 5L :	26
12 Définition des défauts de fabrication :	27
• Types de défauts ponctuels et leurs effets initiaux :	27
12.1 Lacunes (Vacancies) :	27
12.2 Atomes interstitiels (Interstitials):	28
12.3 Impuretés (Impurities):	28
13 Causes de la formation de bulles d'air :	28

13.1 Dissolution des gaz dans le métal en fusion : .....	28
13.2 Désoxydation inefficace : .....	28
13.3 Présence de scories (laitier) : .....	28
13.4 Infiltration d'air pendant la coulée : .....	29
14 Mécanisme de formation des bulles (étape par étape) : .....	29
15 Impact des bulles sur la qualité des tubes (selon API 5L) : .....	29
16 Conclusion : .....	30
<b>CHAPTER 02 :</b>	
1 Introduction : .....	31
2 Définition d'Abaqus : .....	31
2.1 Les problèmes impliquant plusieurs composants sont modélisés en : .....	32
2.2 Dans les analyses non linéaires, Abaqus : .....	32
3 Les produits Abaqus : .....	32
3.1 ABAQUS/Standard : .....	33
3.2 ABAQUS/Explicite : .....	33
3.3 ABAQUS/CAE : .....	34
3.4 ABAQUS/Viewer : .....	34
3.5 ABAQUS/Aqua : .....	35
3.6 ABAQUS/Design : .....	35
3.7 ABAQUS/AMS : .....	35
3.8 ABAQUS/Foundation : .....	35
4 Les bases d'ABAQUS : .....	36
4.1 Phase de préparation (ABAQUS/CAE) : .....	37
4.2 Phase de simulation (ABAQUS/Explicit) : .....	37
4.3 Phase d'analyse des résultats (ABAQUS/Viewer) : .....	37
5 Symboles utilisés dans ABAQUS pour les unités : .....	38
6 Conclusion : .....	39

## **CHAPTER 03 :**

<b>1 Introduction :</b>	<b>40</b>
<b>2 Modélisation :</b>	<b>40</b>
<b>3 Chargement et conditions aux limites :</b>	<b>41</b>
<b>4 Maillage :</b>	<b>42</b>
<b>5 Résultats et discussion :</b>	<b>42</b>
<b>5.1 Distribution de la Contrainte équivalente (Von Mises) dans le pipeline sans défaut :</b>	<b>42</b>
<b>5.2 Distribution de la Contrainte circonférentielle dans le pipeline sans défaut :</b>	<b>43</b>
<b>5.3 Distribution de la Contrainte longitudinale dans le pipeline sans défaut :</b>	<b>44</b>
<b>5.4 Distribution des trois contraintes dans le pipeline avec défaut :</b>	<b>44</b>
<b>5.4.1 Détails sur le défaut :</b>	<b>44</b>
<b>5.4.2 Contraintes de Von Mises, S11 et S33 dans le pipeline :</b>	<b>45</b>
<b>Conclusion Générale</b>	
<b>Conclusion Générale :</b>	<b>48</b>
<b>Bibliographie :</b>	<b>49</b>
<b>Liste des références des figures :</b>	<b>52</b>
<b>Liste des références des tableaux :</b>	<b>53</b>

## **Codes et Normes Techniques :**

<b>API 5L :</b>	Norme de l'American Petroleum Institute pour les tubes en acier utilisés dans le transport de pétrole, de gaz et d'eau. Définit les exigences de composition chimique, propriétés mécaniques et méthodes d'essai.
<b>ASTM A106 :</b>	Norme pour les tubes en acier sans soudure résistants aux hautes températures et pressions, utilisés dans les installations industrielles.
<b>EN 10208 :</b>	Norme européenne régissant les tubes en acier destinés au transport de gaz ou de fluides sous pression.
<b>ASME B31.4/B31.8 :</b>	Normes de conception des pipelines pour hydrocarbures liquides (B31.4) et gaz naturel (B31.), incluant les critères de sécurité.
<b>NACE MR0175 :</b>	Norme pour la sélection des matériaux résistants à la fissuration dans les environnements contenant du sulfure d'hydrogène (H <sub>2</sub> S).
<b>ISO 3183 :</b>	Norme internationale équivalente à API 5L pour les pipelines de transport de gaz et pétrole.
<b>API 579 :</b>	Norme pour l'évaluation de l'intégrité des équipements endommagés (fissures, corrosion).
<b>DNVGL-ST-F101 :</b>	Norme de DNV GL pour les systèmes de pipelines sous-marins, couvrant la conception et l'installation.

## **Abréviations Techniques :**

<b>HIC (Hydrogen Induced Cracking) :</b>	Fissuration interne due à la diffusion d'hydrogène dans l'acier, fréquente dans les environnements acides.
<b>SSC (Sulfide Stress Cracking) :</b>	Fissuration sous contrainte en présence de sulfures, typique dans l'industrie pétrolière.
<b>PSL (Product Specification Level) :</b>	Niveau de qualité dans API 5L : PSL1 (exigences de base) et PSL2 (exigences avancées pour environnements critiques).
<b>RTP (Reinforced Thermo plastic Pipes):</b>	Tuyaux thermoplastiques renforcés, utilisés pour les gazoducs à basse pression.
<b>FBE (Fusion Bonded Epoxy) :</b>	Revêtement anticorrosion à base de résine époxy appliquée par fusion.
<b>3LPE (3-Layer Polyethylene) :</b>	Revêtement anticorrosion triple couche (époxy + adhésif + polyéthylène).
<b>ERW (Electric Resistance Welding) :</b>	Soudage par résistance électrique pour tubes.
<b>SAW (Submerged Arc Welding) :</b>	Soudage à l'arc submergé sous flux protecteur.
<b>LSAW (Longitudinal Submerged Arc Welding):</b>	Soudage longitudinal à l'arc submergé pour tubes de grand diamètre.
<b>HFW (High Frequency Welding) :</b>	Soudage par induction à haute fréquence.
<b>UT (Ultrasonic Testing) :</b>	Contrôle non destructif par ultrasons pour détecter les défauts internes.
<b>RT (Radiographic Testing) :</b>	Contrôle non destructif par radiographie pour inspecter les soudures.
<b>MFL (Magnetic Flux Leakage) :</b>	Méthode de magnétoscopie pour détecter les défauts de surface.
<b>OES (Optical Emission Spectrometry) :</b>	Spectrométrie d'émission optique pour l'analyse chimique des métaux.
<b>ABAQUS/CAE :</b>	Module de modélisation et pré-traitement du logiciel de simulation ABAQUS.
<b>ABAQUS/Explicit :</b>	Module d'ABAQUS pour les analyses dynamiques rapides (chocs, explosions).



## **Mots-Clés Techniques :**

<b>Contrainte de Von Mises (<math>\sigma_{\text{von Mises}}</math>) :</b>	Contrainte équivalente utilisée pour prédire la plasticité d'un matériau sous chargement multiaxial.
<b>Contrainte axiale (S11) :</b>	Contrainte longitudinale dans un tuyau, induite par la pression interne, le poids propre ou les forces externes.
<b>Contrainte circonférentielle (S33) :</b>	Contrainte périphérique dans un tube.
<b>Limite d'élasticité (Yield Strength) :</b>	Contrainte maximale avant déformation plastique. Exemple : X65 ( $\geq 450$ MPa).
<b>Ductilité (Elongation) :</b>	Capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans rompre. Exprimée en % (ex : $\geq 20\%$ pour API 5L).
<b>Fatigue :</b>	Endommagement progressif sous chargements cycliques (ex : démarrages/arrêts de pompes).
<b>Fluage (Creep) :</b>	Déformation lente sous charge constante à haute température.
<b>Concentration de contraintes :</b>	Amplification locale des contraintes autour des défauts (bulles, fissures)
<b>Défaut ponctuel :</b>	Imperfection microscopique (lacune, atome interstitiel, impureté) affectant les propriétés mécaniques.
<b>Module d'élasticité (E) :</b>	Mesure de la rigidité d'un matériau. Valeur typique pour l'acier : 210 GPa.
<b>Coefficient de Poisson (<math>\nu</math>) :</b>	Rapport entre la déformation transversale et longitudinale sous charge. Valeur typique : 0.3.

# **Introduction générale**

### Introduction Générale :

Les oléoducs et gazoducs comptent parmi les infrastructures les plus vitales et stratégiques au monde, car ils jouent un rôle central dans la continuité de l'approvisionnement énergétique à travers les continents, depuis les zones de production jusqu'aux raffineries et aux stations de distribution. Ces pipelines, qui s'étendent parfois sur des milliers de kilomètres, sont quotidiennement exposés à des influences mécaniques et environnementales complexes, notamment des pressions internes élevées, des variations thermiques, des forces résultant du mouvement du sol et du frottement avec l'environnement extérieur, ce qui nécessite leur conception et leur mise en œuvre selon des normes strictes en termes de résistance, de durabilité et de sécurité.

Dans ce contexte, l'utilisation d'acier au carbone conforme à la norme API 5L est l'une des options techniques les plus répandues en raison de son équilibre idéal entre performances mécaniques et coût. Cependant, le processus de fabrication des tubes n'est pas exempt de défauts. Au cours des différentes étapes de production (coulée, formage, soudage ou traitement thermique), certains défauts micro ou macroscopiques peuvent apparaître, tels que des lacunes, des fissures, des vides gazeux ou des variations d'épaisseur, qui peuvent être invisibles mais qui affectent fortement la répartition des contraintes à l'intérieur du matériau, en particulier lorsqu'il est soumis à des charges multiples ou variables.

Il est intéressant de noter que l'emplacement du défaut dans la structure du tube a une grande influence sur le comportement du tube sous contrainte. Un défaut situé à la surface extérieure peut entraîner une concentration locale des contraintes, ce qui accélère l'apparition de fissures, tandis que les défauts au centre ou dans les zones de soudure peuvent entraîner une défaillance progressive invisible. C'est là qu'interviennent les outils d'analyse avancés tels que la simulation par éléments finis (FEM) à l'aide de logiciels comme Abaqus, qui permettent de simuler avec précision la répartition des contraintes autour des défauts en fonction de leur emplacement, et donc d'évaluer les risques avant qu'une catastrophe ne se produise.

L'importance de cette étude réside dans le fait qu'elle met en évidence l'influence de l'emplacement du défaut, et pas seulement son existence, sur la modification des cartes de contraintes à l'intérieur d'un pipeline de pétrole ou de gaz, ce qui contribue à améliorer les stratégies d'inspection non destructive (NDT) et à orienter les équipes de maintenance vers les zones prioritaires, améliorant ainsi la sécurité et la fiabilité des réseaux de transport d'énergie.

### **❖ Plan de recherche et démarche adoptée :**

#### **1. Introduction Générale :**

#### **2. Chapitre I :**

- Étude des matériaux utilisés pour les tubes (acier API 5L avec ses grades : X42, X65, etc.).
- Analyse des propriétés mécaniques des matériaux (élasticité, résistance, coefficient de Poisson).
- Classification des défauts de fabrication (comme les bulles d'air) et leurs mécanismes de formation.
- Revue des normes internationales (API 5L, ASME B31) garantissant la qualité.

#### **3. Chapitre II :**

- Présentation du logiciel « Abaqus » et de ses modules d'analyse (Standard/Explicit).
- Détail des étapes de modélisation : conception, paramétrage, chargement, maillage.

#### **4. Chapitre III :**

- Modélisation d'un tuyau sain et d'un tuyau avec bulle d'air (diamètre 0,5 mm) en 7 positions distinctes.
- Application d'une pression opérationnelle constante et comparaison de la distribution des contraintes.
- Analyse des résultats via des graphiques et identification des zones les plus critiques.

#### **5. Conclusion Générale :**

# **CHAPTER 01 :**

Informations générales sur  
les pipelines

### 1 Introduction :

L'énergie est l'un des piliers fondamentaux de la croissance économique mondiale et de la continuité de l'activité humaine. Nous en sommes devenus totalement dépendants dans notre vie quotidienne, et le pétrole et le gaz naturel sont considérés comme les principales sources de cette énergie. Cependant, l'extraction de ces ressources du sous-sol n'est que le début de leur parcours, car le plus grand défi consiste à les transporter de manière sûre et efficace vers les centres de raffinage, de distribution et de consommation.

- **Dans ce chapitre, nous aborderons les points suivants :**
  - Les moyens de transport du pétrole et du gaz et le choix des pipelines comme meilleur moyen
  - Définition des pipelines et leurs caractéristiques
  - Matériaux utilisés dans la fabrication
  - Spécifications et normes internationales
  - Caractéristiques physiques et comparaison entre les matériaux de fabrication
  - Problèmes de fabrication et solutions préventives

### 2 L'importance du pétrole dans le monde :

Le pétrole est l'une des sources d'énergie naturelles les plus cruciales au monde. Il a joué un rôle central dans l'essor de la civilisation moderne, non seulement en tant que carburant essentiel pour les transports et les centrales électriques, mais aussi comme pilier de diverses industries, allant de la production pharmaceutique aux produits pétrochimiques. Au-delà de son importance économique, il représente un levier géopolitique pour les pays producteurs. Cet « or noir » est extrait des profondeurs terrestres avant d'entamer un voyage minutieux à travers des réseaux de transport hautement sécurisés, jusqu'aux raffineries ou aux sites de stockage.

Les stations de transport de pétrole et de gaz, quant à elles, constituent les artères vitales de la chaîne d'approvisionnement énergétique mondiale. Fonctionnant comme des centres névralgiques, elles reçoivent les matières premières, les stockent temporairement, puis les redistribuent via des canaux de transport ou vers des unités de traitement. Leur implantation stratégique répond à un triple objectif : optimiser l'efficacité logistique, réduire les coûts opérationnels, et garantir un approvisionnement énergétique continu.

Ces installations sont loin d'être rudimentaires. Leur architecture complexe évoque une « ville miniature » autonome. Entre les réservoirs de stockage gigantesques, les pompes intelligentes régulant les flux, les systèmes de surveillance en temps réel semblables à des yeux qui ne dorment jamais, et les équipements de sécurité formant un bouclier contre les risques, chaque élément est pensé pour fonctionner en harmonie. La conception et l'exploitation de ces stations obéissent à des règlements stricts, équilibrant préservation de l'environnement et sécurité des travailleurs et des communautés voisines.

Enfin, ces stations se déclinent selon leur environnement. Les stations terrestres, connectées aux pipelines ou aux réseaux routiers, agissent comme des « commutateurs » dans le vaste réseau de transport. Les stations maritimes, situées près des ports ou des plateformes pétrolières offshore, servent de pont entre les navires géants et la terre ferme. Malgré leurs différences, toutes partagent une mission commune : tisser un lien vital entre les ressources énergétiques et un monde assoiffé d'énergie. [1]

### **3 Voies de transport du pétrole et du gaz :**

Les transferts s'effectuent de plusieurs manières :

#### **3.1 Chemins de fer :**

Pendant plus d'un siècle et demi, les chemins de fer sont devenus un partenaire indéfectible dans le transport du pétrole brut ; l'histoire de l'industrie pétrolière et gazière est intimement liée à celle des réseaux ferroviaires. L'avantage du transport ferroviaire n'est pas seulement historique ; il est flexible, évitant la nécessité de dépenses initiales pour des infrastructures aussi grandes et coûteuses que celles requises pour les oléoducs, qui consomment des millions de dollars lors de leur construction. L'acheminement très rapide du pétrole par le rail est un atout supplémentaire pour ce mode de transport, qui permet une livraison efficace des cargaisons. Dernièrement, les quantités de pétrole transportées par train ont connu une augmentation remarquable grâce aux progrès technologiques liés à la conception des wagons-citernes et aux systèmes de contrôle, faisant ainsi du transport ferroviaire une option indispensable dans le paysage énergétique, qui est de plus en plus complexe. [2]



*Figure 1: Transport de pétrole par voie ferrée. [1]*

### **3.2 Les camions de transport :**

Les camions sont une option très utile et populaire pour le transport du pétrole brut et des produits pétroliers. Ils peuvent aller bien au-delà d'autres types de transport, tels que les trains, grâce à la flexibilité qu'ils offrent pour accéder à différentes zones sans contraintes majeures, principalement en raison de l'infrastructure routière bien établie. Ils présentent plusieurs autres avantages : contrairement aux grands modes de transport, ils transportent de petites quantités de pétrole, ce qui réduit considérablement le risque de défaillance catastrophique due à des fuites, mais ils constituent également une menace s'ils ne sont pas correctement exploités. Cela se reflète dans les routes qu'ils empruntent, loin des lacs et des rivières, en vertu de quoi les accidents soudains présentent moins de dangers pour l'environnement, ce qui en fait un compromis assez équilibré entre l'efficacité et la sécurité dans le secteur du transport de l'énergie. [2]



*Figure 2: transport par camion-citerne. [1]*



### 3.3 Les pétroliers :

Les pétroliers géants sillonnent les eaux du monde et transportent en leur sein les éléments vitaux de la planète. Cependant, tous ces navires ne chargent et ne transportent pas la même chose. Certains sont spécialisés dans le transport délicat de produits chimiques, d'autres dans le pétrole brut, le cœur qui bat pour l'industrie de l'énergie. Les troisièmes, les « navires polyvalents », peuvent transporter simultanément en vrac des solides et des liquides, en plus des barges plus petites, qui sont les maillons essentiels d'une chaîne logistique complexe. Ces opérations ne sont pas laissées au hasard : des réglementations internationales très strictes, telles que les « gardiens invisibles de l'environnement », doivent garantir l'établissement de niveaux de sécurité pour éviter les déversements de matières dangereuses dans les mers ou les rivières. Ces lois ne s'arrêtent pas aux mots écrits sur le papier, elles prévoient aussi des conceptions innovantes et des systèmes de surveillance en temps réel, car une seule goutte qui s'échappe peut mettre en péril un équilibre écologique fragile. [3]

Les pétroliers, sans conteste, constituent des véhicules complexes dans le réseau maritime de l'énergie, mais il existe des variantes différentes. On compte parmi celles-ci : les supertankers qui sont de véritables navires conçus uniquement pour le transport, à lors d'une traversée maritime longue, de quantités énormes de pétrole brut. Une autre espèce : le pétrolier, qui effectue les transportations des dérivés raffinés – allant des carburants propres comme le kérosène et l'essence, jusqu'aux produits lourds tels que le fioul lourd. Sans oublier bien sûr les pétroliers chimiques, qui sont spécialisés dans le transport compliqué de produits chimiques, et les pétroliers de brut classiques, plus compacts. Chacun a sa propre conception, un but spécifique, mais tous s'intègrent dans une complexité qui maintient le grincement du sens du mouvement qui ne s'arrête pas dans la roue de l'énergie mondiale. [3]



*Figure 3: Les pétroliers. [2]*

### 3.4 Les pipelines :

Les pipelines apparaissent comme une méthode optimale pour le transport du pétrole et du gaz, car ils présentent des avantages indiscutables : réduction des risques, maîtrise des coûts d'exploitation, vulnérabilité minimale au vol grâce à leur structure sécurisée, et moindre impact sur l'environnement. Bien plus qu'un réseau de tubes métalliques souterrains ou aériens, il s'agit d'un système ingénieux et sûr. Cette solution réalisable n'est certainement pas un simple coup de chance, mais le résultat d'efforts d'ingénierie concertés qui garantissent un mouvement ininterrompu et sûr de l'énergie jour et nuit - un maillon très important, silencieux et efficace de la chaîne énergétique mondiale. [5]

Le transport du pétrole et du gaz par pipelines ne se limite pas à relier des sites de production espacés à des raffineries ou à des usines de traitement. Il s'agit d'un processus d'ingénierie avec un souci du détail. Par exemple, les conduites de collecte semblables à de fines artères canalisent le gaz et le pétrole de la tête de puits à la station de collecte avec un diamètre inférieur à 5 cm pour capturer avec précision les matières premières. En revanche, les lignes de transport principal d'immenses artères s'étendent sur des milliers de kilomètres et mesurent jusqu'à 120 cm de diamètre pour absorber le gigantesque flux d'énergie à travers les continents. Ce contraste de taille n'est pas le fruit du hasard : il faut faire preuve d'ingéniosité pour équilibrer les considérations d'efficacité et de coût et montrer comment un petit détail peut faire une énorme différence dans le monde des infrastructures gigantesques ! [6]

Ces derniers sont considérés comme les plus courants et les plus efficaces pour leur faible coût, leur grande capacité de transport et les moins nocifs pour l'environnement.



*Figure 4 : Les pipelines. [3]*

### **4 Définition des pipelines :**

Un tuyau est généralement un canal fermé, généralement de forme cylindrique, tandis que le mot « pipeline » fait référence à une extension de tuyaux interconnectés, qui peuvent être équipés de pompes, de vannes, de systèmes de contrôle et d'autres accessoires essentiels à leur fonctionnement. Ces systèmes sont utilisés pour transporter des liquides, des gaz ou des mélanges de liquides et les pipelines sont généralement de grande taille et s'étendent sur de longues distances.

Les canalisations d'un diamètre inférieur à 5 centimètres acheminent le gaz et le pétrole des puits vers les stations centrales de collecte. En revanche, une importation sur une longue distance est d'environ 120 centimètres, comme dans les principales conduites de pétrole.

Les situations d'urgence exigent la pose de plaques d'identification sur les pipelines afin de pouvoir intervenir à temps en cas d'incident. Ces plaques sont fixées sur des piliers stables à travers les déserts et les terrains montagneux, tandis que les pipelines coulent parfois sous les eaux de surface. Ainsi, les pipelines traversent différents types de reliefs géographiques, tout en offrant des garanties environnementales strictes pour minimiser les risques de fuite ou tout autre incident possible.

### **5 Caractéristiques des pipelines :**

Les principales caractéristiques d'un pipeline sont :

- Un grand diamètre qui arrive jusqu'à 56" et peut atteindre 64".
- La capacité maximale de transport.
- La pression de service élevée (jusqu'à 100 bars).
- Une grande longueur.
- L'épaisseur (variant de 6.35 mm à 23 mm).
- Le mode de pose (aérien ou souterrain).

### **6 Matériaux les plus couramment utilisés dans la fabrication des pipelines pétroliers et gaziers :**

Dans la fabrication des oléoducs, différents types de métaux et d'alliages sont utilisés en fonction des conditions d'exploitation auxquelles ils sont exposés, telles que le niveau de pression, les températures, l'environnement chimique ambiant, ainsi que les risques de

corrosion. Les matériaux sont en effet choisis avec soin pour répondre aux défis qu'ils pourraient rencontrer pendant leur fonctionnement.

### 6.1 Principaux types de métaux utilisés et leurs caractéristiques :

#### 6.1.1 Matériaux standards (95% des applications) :

##### 6.1.1.1 Acier au carbone (API 5L) :

**Utilisation** : le plus courant dans les pipelines en raison de son faible coût et de sa haute résistance.

- **Caractéristiques** :

- Haute résistance mécanique (jusqu'à 120 000psi pour le X120)
- Haute soudabilité.
- Coût économique
- Ne convient pas aux environnements hautement corrosifs, sauf avec des revêtements protecteurs.

- **Types courants** :

API 5L Grade B/X42/X52/X60/X65/X70/X80 : Différents grades en fonction de la durabilité. [7]

- **Normes** :

- i. API 5L : Spécifie les exigences des pipelines pour le transport de fluides (pétrole, gaz).
- ii. ASTM A106 : Tuyaux en acier sans soudure pour hautes températures et pressions, typiquement dans les installations industrielles.
- iii. EN 10208 : Norme européenne pour les tubes en acier destinés au transport de gaz ou fluides sous pression. [7]

##### 6.1.1.2 Acier faiblement allié :

**Utilisation** : Dans les environnements soumis à des pressions élevées, à une corrosion modérée ou à des températures élevées. [8]

- **Composition** : Ajout de Cr (0.5-9%), Mo (0.5-1%)

- **Caractéristiques :**

- Ajoutez des éléments tels que le chrome (Cr), le molybdène (Mo) et le vanadium (V) pour améliorer la solidité et la résistance à la chaleur.
- Meilleure résistance à la corrosion par rapport à l'acier au carbone. [8]

### 6.1.2 Matériaux spéciaux (5% des cas) :

#### 6.1.2.1 Acier inoxydable :

**Utilisation :** dans les zones à forte corrosion ou lors du transport de liquides contenant des impuretés chimiques. [8]

- **Caractéristiques :**

- Haute résistance à la corrosion grâce à la teneur en chrome ( $\geq 10,5\%$ ) et en.

- **Types :**

- Austénitique (304, 316) : pour la résistance aux acides et aux chlorures.
- Duplex (2205) : combine résistance et résistance à la corrosion.
- Coût : 3-5× plus cher que l'acier carbone. [8]

#### 6.1.2.2 Alliages de nickel :

**Utilisation :** Dans des environnements difficiles (acidité élevée, température élevée ou gaz sulfurés). [8]

- **Exemples :**

- Inconel 625 : Résistant à l'oxydation et à la chaleur.
- Hastelloy (Hastelloy C-276) : pour résister aux acides forts.

- **Caractéristiques :**

- Résistance exceptionnelle à l'abrasion et aux fissures.

#### 6.1.2.3 Tuyaux plaqués / doublés :

**Utilisation :** Lorsque le coût élevé des alliages complets est un obstacle.

- **Caractéristiques :**

- Une couche intérieure en acier inoxydable ou en alliage de nickel avec une coque extérieure en acier au carbone.
- Un équilibre entre coût et performance.

### **6.1.2.4 Tuyaux thermoplastiques renforcés (RTP - Reinforced Thermo plastic Pipes) :**

**Utilisation :** dans les gazoducs ou les oléoducs à basse pression ou dans les environnements chimiques. [8]

- **Caractéristiques :**
  - Haute résistance à la corrosion, poids léger, mais limité en pression et en chaleur.

## **6.2 Données techniques clés :**

### **6.2.1 Pression typique :**

- Transport : 70-100 bars
- Distribution : 5-20 bars

### **6.2.2 Durée de vie :**

- Acier carbone : 30-50 ans
- Inox : 50-70 ans

## **6.3 Critères de sélection :**

- Pression/température
- Nature du fluide
- Environnement (sol, marin...)
- Budget

## **6.4 Références normatives :**

- API 5L / ISO 3183
- ASME B31.4/B31.8
- ASME B31.4 / B31.8
- NACE MR0175
- MR0175

## **6.5 Caractéristiques des matériaux utilisés dans les pipes :**

La demande croissante d'acier utilisé dans les pipelines transportant du pétrole et du gaz contenant du sulfure d'hydrogène a conduit au développement d'aciers résistant à la fissuration induite par l'hydrogène et à la fissuration induite par l'hydrogène (HIC). Au cours des dix dernières années, d'intenses recherches métallurgiques, notamment sur les processus de

production de l'acier, ont permis de répondre à certaines exigences fondamentales du marché, telles que la production d'aciers micro-alliés avec des limites d'élasticité allant de X42 à X60. Des tôles d'acier résistant à l'hydrogène sulfuré et à l'acide (X60/X65/X70) ont également été développées dans le but d'atteindre des résistances encore plus élevées à l'avenir. [1]

Les spécifications des aciers utilisés dans les oléoducs et les gazoducs sont fixés par deux normes principales de l'American Petroleum Institute (API) :

- Spécification 5L : pour les aciers de qualité standard.
- Spécification 5LX : Pour les qualités à haute résistance.

Ces spécifications sont largement utilisées dans le monde entier. Les nuances d'acier les plus utilisées possèdent certaines caractéristiques mécaniques et de résistance chimique spécifiques, comme indiqué dans le tableau ci-dessous. [9]

*Tableau 1: Nuances et caractéristiques des aciers de pipelines les plus utilisés. [1]*

Spécification API	Grade	Limite D'élasticité (Kg/mm2)	Résistance À la rupture (Kg/mm2)
<b>5L</b>	A	21	34
<b>5LX</b>	B	25	42
<b>5LX</b>	X42	29	42
<b>5LX</b>	X46	32	45
<b>5LX</b>	X52	37	47
<b>5LX</b>	X56	39	52
<b>5LX</b>	X60	41	55
<b>5LX</b>	X65	46	56

L'acier au carbone reste le choix dominant en raison de son rapport performance/prix, tandis que les alliages spéciaux sont réservés aux situations ou zones critiques.

### 7 Définition de l'acier au carbone API 5L :

L'acier au carbone API 5L est l'un des matériaux les plus utilisés dans la fabrication de pipelines pour le transport du pétrole, du gaz, de l'eau et d'autres fluides. Il est fabriqué selon des spécifications très strictes appelées API 5L, qui ont été établies par l'American Petroleum Institute (API) pour garantir la qualité des tuyaux en acier utilisés dans les projets énergétiques du monde entier. [10]

#### 7.1 Que signifie API 5L :

Il s'agit d'une norme technique qui spécifie les exigences relatives aux tuyaux en acier adaptés à des applications particulières :

- Transport de gaz naturel.
- Transport de pétrole brut et de produits pétroliers raffinés.
- Transport d'eau et d'autres liquides.
- Applications industrielles nécessitant une résistance à des pressions élevées.

#### 7.2 Types d'acier selon l'API 5L :

L'acier est classé en deux grandes catégories, en fonction de la qualité et des applications : [10]

##### PSL1 (niveau de base) :

- Convient aux applications courantes avec des exigences standard.
- Utilisé dans des environnements non extrêmes.

##### PSL2 (niveau avancé) :

- Nécessite des essais chimiques et mécaniques plus poussés.
- Utilisé dans des environnements présentant des risques élevés ou des exigences de sécurité élevées (comme les zones à haute pression ou à température extrême).



**Tableau 2: Représente la différence entre PSL1 et PSL2 selon la norme API 5L. [2]**

Critère	PSL1	PSL2
Niveau de qualité	Basique	Plus strict
Essais mécaniques	Non obligatoires Pour tous les diamètres	Obligatoires pour Tous les diamètres
Essai de résilience (Charpy V)	Non requis	Obligatoire pour les diamètres > DN250
Analyse chimique	Moins stricte	Analyse complète Requise sur le produit fini
Propriétés Mécaniques	Définies de manière Générale	Contrôlées avec plus de précision (limite D'élasticité, traction, etc.)
Essais non Destructifs (NDT)	Pour certains types De soudure uniquement	Requis pour tous Les tuyaux soudés
Documentation De traçabilité	Basique	Complète : numéro De coulée, certificats, résultats d'essais, etc.
Tolérances Dimensionnelles	Standard	Plus strictes
Utilisation typique	Applications Standards à faible risque	Applications critiques, Zones sismiques, transport de gaz à haute pression

### 7.3 Grades de résistance de l'acier :

Les tubes sont classés en fonction de leur résistance dans les grades suivants :

- Grade B (adapté à un usage général).
- Série X (X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80). [7]

Plus le nombre après le X est élevé, plus la résistance à la traction et la limite d'élasticité sont élevées, ce qui convient aux projets exigeants.

*Tableau 3: Résume les grades courants de l'API 5L en termes de propriétés mécaniques et chimiques de base. [3]*

Grade	Limite d'élasticité (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement (%)	Remarques
Grade B	≥ 245	≥ 415	22–30%	Faible résistance
X42	≥ 290	≥ 415	21–28%	Début de la série X
X52	≥ 360	≥ 460	20–26%	Très courant
X60	≥ 415	≥ 520	19–24%	Pression moyenne
X65	≥ 450	≥ 535	18–23%	Transport de gaz
X70	≥ 485	≥ 570	17–22%	Haute résistance
X80	≥ 555	≥ 625	15–20%	Exigences strictes

#### 7.4 Principales caractéristiques de l'acier API 5L :

- Composition chimique : A base de fer et de carbone, avec ajout d'éléments d'alliage tels que le manganèse et le silicium pour l'amélioration des propriétés.

*Tableau 4 : Exemple de structure chimique approximative (Grade X52 - PSL2). [3]*

L'objet	Max (Max %)
C (carbone)	0.24
Mn (manganèse)	1.40
P (phosphore)	0.025
S (soufre)	0.015

- Procédés de fabrication : Disponible sous forme de tube soudé ou sans soudure, fabriqué selon les besoins.
- Polyvalence : Capable de survivre à des conditions extrêmes de résistance à la haute pression et aux changements de température.

### 8 Caractéristiques de l'Acier Carbone API 5L : Module d'Élasticité (E) et Poids Spécifique ( $\gamma$ ) :

#### 8.1 Module d'Élasticité (E) :

##### ❖ Valeur standard :

"210 GPa" (Gigapascals) ou »30 000 ksi " (kilo-livres par pouce carré). [12]

##### ❖ Caractéristiques :

- Constant pour toutes les nuances API 5L (X42 à X120).
- Indépendant de la teneur en carbone ou des traitements thermiques.
- Utilisé pour calculer les déformations élastiques et les contraintes.

#### 8.2 Poids Spécifique ( $\gamma$ ) :

##### ❖ Valeur standard :

« 78.5 kN/m<sup>3</sup> » ou « 7.85 g/cm<sup>3</sup> » (équivalent à une densité de 7.85). [12]

##### ❖ Calcul du poids linéaire :

$$W = \gamma \times A$$

(A = section transversale du tube)

**8.3 Autres Propriétés Clés :***Tableau 5 : : Autres Propriétés Clés. [4]*

Propriété	Valeur
Coefficient de Poisson	0.3
Dilatation thermique	$12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Limite d'élasticité	290 MPa (X42) à 830 MPa (X120)
Résistance à la traction	415 MPa (X42) à 1 030 MPa (X120)

**8.4 Comparaison avec d'Autres Matériaux :***Tableau 6 : Comparaison avec d'Autres Matériaux. [5]*

Matériau	Module d'Élasticité (GPa)	Poids Spécifique (KN/m³)
Acier API 5L	210	78.5
Acier Inox 316L	193	80.1
Alliage Inconel 625	207	84.2

**8.5 Facteurs d'Influence :**

- **Température :**
  - (E) diminue de "0.5 % par 100 °C » au-dessus de 200 °C.
  - ( $\gamma$ ) reste stable jusqu'à 900 °C.
- **Composition chimique :**
  - Les éléments d'alliage (Mn, Si) n'affectent pas significativement (E).

**8.6 Applications Industrielles :**

- **Conception des pipelines :** [12]
  - Calcul de la rigidité flexionnelle (EI).
  - Analyse des charges statiques et dynamiques.
- **Normes de référence :** [13]
  - "API 5L" (spécifications techniques).
  - "ASME B31.4/B31.8" (conception des pipelines).
  - "EN 10208" (équivalent européen).

### 8.7 Avantages de l'Acier API 5L :

- Rapport coût-performance optimal : Coût inférieur aux aciers inoxydables.
- Résistance mécanique élevée : Adapté aux pressions jusqu'à "100 bars".
- Facilité de soudage : Compatible avec les techniques industrielles standards.

## 9 Les raisons techniques et mécaniques pour choisir "l'acier au carbone API 5L" pour les tubes de transport du pétrole et du gaz :

### 9.1 Résistance aux pressions de service élevées :

« Résistance à la traction (Tensile Strength) » et « Limite élastique (Yield Strength) » définies avec précision dans la norme API 5L garantissent que les tubes peuvent supporter des pressions internes allant jusqu'à plusieurs centaines de bars, essentielles pour le transport de fluides et de gaz sous haute pression. [15]

**Exemple :** Les tubes de grade « X65 » offrent une limite élastique  $\geq 450$  MPa et une résistance à la traction  $\geq 535$  MPa, adaptés aux applications marines et aux tubes profonds enterrés. [15]

### 9.2 Adaptation aux variations environnementales et thermiques :

L'acier au carbone résiste à des "températures de fonctionnement variables" (généralement entre  $-20^{\circ}\text{C}$  et  $200^{\circ}\text{C}$ ) sans altération de ses propriétés mécaniques, ce qui convient aux environnements désertiques ou froids.

Son « coefficient de dilatation thermique faible » (environ  $12 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ ) réduit les dilatations et contractions dues aux variations de température, limitant ainsi les fissures. [16]

### 9.3 Stabilité sous contrainte cyclique (Résistance à la fatigue) :

Les tubes API 5L sont conçus pour résister aux « contraintes cycliques » causées par les fluctuations de pression et les vibrations, réduisant ainsi le risque de "fissuration par fatigue" sur le long terme. [17]

### 9.4 Ductilité pour absorber les déformations :

Le pourcentage de « ductilité (Elongation) » de cet acier (généralement  $\geq 20\%$ ) lui permet de se déformer sans se rompre sous des forces externes telles que les mouvements du sol ou les séismes, renforçant sa sécurité opérationnelle. [17]

### **9.5 Compatibilité avec les techniques de soudage modernes :**

Des méthodes comme « SMAW », « FCAW » et « SAW » sont compatibles avec les propriétés de l'acier au carbone, assurant des soudures robustes et fiables lors de l'installation sur site [18]

### **9.6 Capacité à tolérer des défauts mineurs en fabrication :**

La norme API 5L autorise des tolérances sur l'épaisseur et la courbure, permettant une fabrication économique sans compromettre la sécurité, avec des tests rigoureux comme « l'essai hydrostatique » et « l'ultrason » pour valider la qualité [18]

### **9.7 Viabilité économique avec des performances garanties :**

Comparé à d'autres matériaux comme l'acier inoxydable ou les composites, l'acier au carbone offre un « rapport performance/prix optimal », idéal pour des projets à grande échelle comme les oléoducs transcontinentaux. [18]

### **9.8 Compatibilité avec les systèmes de protection contre la corrosion :**

Les tubes peuvent être recouverts de revêtements tels que « la résine époxy (FBE) » ou « le polyéthylène tri-couche (3LPE) » pour se protéger de la corrosion électrochimique, prolongeant leur durée de vie à plus de 30 ans. [19]

### **9.9 Conformité aux normes internationales et à la sécurité La norme API 5L réglemente :**

- La composition chimique (limite du soufre et du phosphore).
- Les tests de qualité (essai de pliage, impact Charpy V-Notch).
- Les procédés de fabrication (refroidissement, traitement thermique).

### **9.10 Expérience historique et reconnaissance mondiale :**

Les pays producteurs de pétrole comme l'Arabie Saoudite, la Russie et les États-Unis utilisent l'acier API 5L dans leurs oléoducs, témoignant de sa fiabilité dans des conditions extrêmes. [18]

*Tableau 7 : Il s'agit d'une comparaison rapide avec d'autres matériaux de fabrication. [6]*

Matériau	Avantage principal	Inconvénient majeur	Pourquoi choisir l'acier au carbone ?
Acier inoxydable	Résistance élevée à la corrosion	Coût très élevé	API 5L offre des performances similaires avec des revêtements économiques
Plastique (HDPE)	Léger et anti-corrosion	Inadapté aux hautes pressions	L'acier au carbone résiste à des pressions 10 fois supérieures.
Acier forgé	Résistance extrême	Coût de fabrication élevé	API 5L équilibre résistance et coût.

L'acier au carbone API 5L est le « choix idéal » pour les oléoducs et gazoducs grâce à sa combinaison unique de « résistance mécanique », de « durabilité dans des conditions extrêmes », de « rentabilité » et de « conformité aux normes internationales ». La personnalisation de ses nuances (X42, X65, X65, X65, X80) permet d'adapter le matériau à chaque projet en fonction des contraintes et des environnements attendus.

## **10 Fabrication des tubes de transport de pétrole et de gaz selon la norme**

### **API 5L : De la matière première à la production :**

Les tubes API 5L sont fabriqués selon des spécifications strictes pour résister aux pressions élevées et aux conditions extrêmes. Le processus se divise en deux méthodes principales : « les tubes sans soudure (Seamless) » et « les tubes soudés (Welded) ». Voici les étapes détaillées :

#### **10.1 Étape 1 : Préparation des matières premières :**

##### **10.1.1 Sélection des matériaux : [20]**

Utilisation d'aciers au carbone ou d'alliages à haute résistance (grades X42 à X120) conformes à l'API 5L.

Composition chimique contrôlée (carbone, manganèse, silicium, nickel, chrome) pour éviter la fragilité ou la corrosion.

Exclusion des matériaux à haute teneur en soufre et phosphore (risque de fissuration).

### 10.1.2 Formes initiales :

- **Pour les tubes sans soudure :**

Billetes (blocs cylindriques) de 100–250 mm de diamètre.

- **Pour les tubes soudés :**

Tôles ou bobines d'acier découpées selon le diamètre final du tube.



*Figure 5: Bobine d'acier. [4]*

### 10.2 Étape 2 : Façonnage du tube :

#### 10.2.1 Tubes sans soudure (Seamless) :

- **Chauffage initial :**

Les billetes sont chauffées à 1200–1300°C dans des fours à gaz ou à induction.

- **Perçage rotatif (Mannesmann) :**

Une machine perce la billette en rotation avec un mandrin pour créer un tube creux.



- **Étirage :**
  - Laminage à mandrin : Le tube est étiré entre des rouleaux et un mandrin pour réduire son épaisseur.
  - Laminage à plug : Utilisation d'un plug fixe pour ajuster l'épaisseur.
- **Calibrage final :**
  - Passage dans une série de rouleaux pour ajuster le diamètre extérieur ( $\pm 0,2$  mm).
- **Redressage :**
  - Pressage hydraulique ou laminage pour corriger la rectitude.

### 10.2.2 Tubes soudés (Welded) :

- **Formage cylindrique :**
  - **Method LSAW (Longitudinal Submerged Arc Welding):**

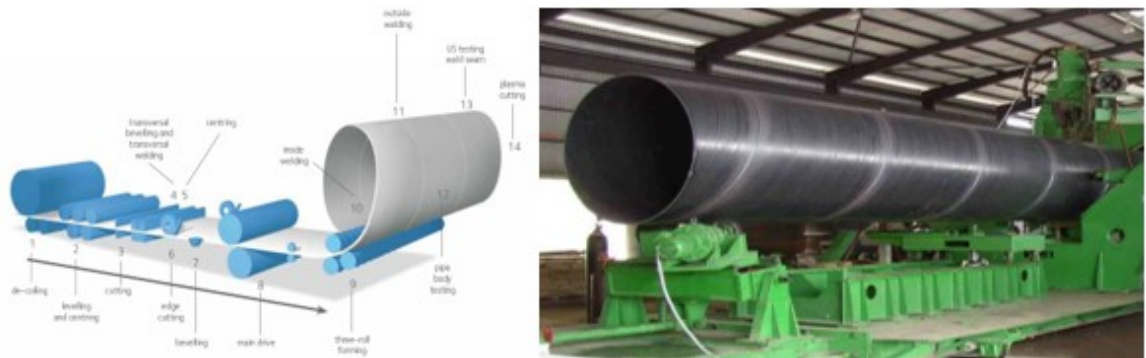
La tôle est pliée en forme de U, puis en O, avant soudage longitudinal.



*Figure 6: Tube souder longitudinal. [5]*

### ▪ Soudage spiralé (SAW) :

Enroulement hélicoïdal de la tôle autour d'un mandrin, avec soudage continu.



*Figure 7: Tube souder en spirale. [6]*

### ▪ Soudage par résistance électrique (ERW) :

Les bords sont chauffés par courant électrique et pressés pour fusionner.

#### ❖ Soudage :

- Soudage à l'arc submergé (SAW) : Fusion des bords sous flux protecteur.
- Soudage HFW (Haute Fréquence) : Chauffage par induction avant pressage.

#### ❖ Ébavurage :

Élimination des excès de soudure par meulage ou découpage.

### 10.3 Étape 3 : Traitement thermique :

#### • Normalisation :

Chauffage à 900–950°C, refroidissement à l'air pour homogénéiser la structure cristalline.

#### • Trempe et revenu :

- Trempe : Refroidissement rapide dans l'eau ou l'huile pour durcir l'acier.
- Revenu : Réchauffage à 500–700°C pour réduire la fragilité.

### 10.4 Étape 4 : Finition et protection :

#### • Nettoyage abrasif :

Projection de grenaille ou de sable pour éliminer les oxydes.

#### • Revêtement anticorrosion :

- Enduction FBE (Fusion Bonded Epoxy) : Couche époxy protectrice.

- Revêtement 3LPE : Triple couche (époxy, adhésif, polyéthylène).

### 10.5 Étape 5 : Tests et contrôles qualité :

#### 10.5.1 Tests mécaniques :

- Traction : Mesure de la limite élastique (Yield Strength) et de la résistance à la rupture.
- Résilience Charpy : Résistance aux chocs à basse température.

#### 10.5.2 Test hydrostatique :

Pression interne supérieure de 20–30 % à la pression de service, maintenue pendant 10 secondes.

#### 10.5.3 Contrôles non destructifs (CND) :

- Ultrasons (UT) : Détection de fissures internes.
- Radiographie (RT) : Inspection des soudures.
- Magnétoscopie (MFL) : Détection des défauts de surface.

### 10.6 Étape 6 : Marquage et emballage :

- **Marquage :**

Gravage ou impression laser des informations (diamètre, épaisseur, grade API 5L, numéro de lot).

- **Emballage :**

- Enveloppe protectrice en plastique ou papier anti-humidité.
- Protections en caoutchouc aux extrémités pour le transport.

*Tableau 8 : Différences entre PSL1 et PSL2 (API 5L). [7]*

Critère	PSL1	PSL2
Analyse chimique	Basique (C, Mn)	Complète (Ni, Cr, etc.)
Tests de traction	Sur un échantillon	Sur multiples échantillons
Tests de résilience	Non requis	Obligatoires
Contrôles CND	Partiels	Exhaustifs

### 10.7 Applications finales :

- Transport haute pression de pétrole et de gaz.
- Réseaux souterrains ou sous-marins.
- Installations industrielles chimiques.

Ce processus garantit des tubes capables de résister à des pressions allant jusqu'à « 20 000 psi » (1380 bars), en conformité avec les normes internationales de sécurité et de durabilité.

## 11 Les problèmes pouvant survenir lors de la fabrication de tubes de transport de pétrole et de gaz selon la norme « API 5L » :

### 11.1 Problèmes lors de la préparation de la matière première (acier) :

- **Impuretés chimiques:** [25]

Teneur élevée en « soufre (S) » ou « phosphore (P) », provoquant une « fragilité à chaud » ou des fissures pendant le formage.

Déséquilibre des éléments d'alliage (molybdène, chrome) affectant la durabilité.

- **Défauts de coulée:** [25]

« Porosité » due à des gaz piégés pendant le refroidissement

« Ségrégation » (concentration localisée d'éléments).

### 11.2 Problèmes pendant le formage des tubes :

#### 11.2.1 Pour les tubes soudés (Welded Pipes) : [25]

Déformations pendant le formage : Bords mal alignés ou déformations des tôles lors du cintrage.

Défauts de soudure : « Fissures de soudure » dues à une contamination des bords ou à une température mal réglée.

« Manque de pénétration » ou « manque de fusion ». « Porosités » dans la zone soudée (gaz piégés).

### 11.2.2 Pour les tubes sans soudure (Seamless Pipes) : [25]

Fissures lors du perçage rotatif : Résultant de contraintes thermiques ou mécaniques excessives.

Variations d'épaisseur : Inhomogénéité de l'épaisseur due à des défauts de laminage ou d'étirage.

### 11.3 Problems de treatment thermique :

Refroidissement inégal : Provoque des variations de propriétés mécaniques (ex. dureté).

Formation de structures fragiles (ex. martensite) : Si le revenu (Tempering) n'est pas effectué après la trempe (Quenching). [26]

#### 11.3.1 Problèmes de finition et de tests :

Défauts de surface : Rayures ou fissures réduisant la résistance à la corrosion.

Échec au test hydrostatique : Causé par des microporosités ou défauts internes non détectés.

Faible résilience (échec au test Charpy) : Dû à des impuretés ou une structure granulaire grossière. [26]

#### 11.3.2 Problèmes de revêtement et de protection :

Revêtement inégal : Zones non protégées, vulnérables à la corrosion. Délaminage du revêtement : Dû à une préparation de surface inadéquate (impuretés, humidité). [26]

#### 11.3.3 Problèmes liés aux spécifications API 5L :

Non-conformité chimique : Ex. dépassement des limites autorisées pour le carbone ou le manganèse. « Non-respect des exigences PSL2 » : Ex. omission des tests de résilience ou du contrôle radiographique complet des soudures. [26]

- **Exemples de défauts critiques:** [26]

- Fissuration sous contrainte sulfure (SSC) : Fissures dues à l'interaction du soufre avec les contraintes en milieu acide.
- Fissuration induite par l'hydrogène (HIC) : Fissures internes causées par l'accumulation d'hydrogène dans l'acier.

- **Solutions pour surmonter ces problèmes : [26]**
  - Contrôle chimique rigoureux via des techniques comme la spectrométrie d'émission optique (OES).
  - Contrôles non destructifs (CND) : "Ultrasons (UT)" pour détecter les défauts internes.
  - Radiographie (RT) pour inspecter les soudures.
  - Optimisation du traitement thermique : Ajustement précis des températures et temps de refroidissement.
  - Test individuel de chaque tube pour les exigences « PSL2 ».
- **Conséquences de ces défauts: [26]**
  - **Défaillance des tubes en service :**

Fuites ou explosions dues à une résistance insuffisante à la pression. « Réduction de la durée de vie » : Corrosion accélérée ou fissuration sous contrainte. Le respect strict des spécifications « API 5L » (notamment « PSL2 ») et des protocoles de qualité garantit la réduction de ces risques et la production de tubes sûrs et efficacy.

## 12 Définition des défauts de fabrication :

En science des matériaux et en ingénierie mécanique, les "défauts" dans la structure cristalline influencent fortement les propriétés mécaniques des matériaux. Les "défauts ponctuels" (comme les "lacunes", les "atomes interstitiels" et les "impuretés") provoquent des perturbations locales dans l'arrangement atomique. Ces défauts modifient la distribution des contraintes mécaniques, affectant ainsi le comportement du matériau sous charge. [27]

- **Types de défauts ponctuels et leurs effets initiaux : [27]**

### 12.1 Lacunes (Vacancies) :

- Définition : Sites atomiques vides dans le réseau cristallin.
- Effat sur les constraints:
- Génèrent une « contrainte de traction » locale due à la contraction du réseau.
- Peuvent former des « vides » sous contrainte thermique ou mécanique, réduisant la résistance.

### 12.2 Atomes interstitiels (Interstitials):

- Définition : Atomes supplémentaires occupant des espaces entre les nœuds du réseau.
- Effet sur les contraintes:
- Créent une "contrainte de compression" locale par encombrement atomique.
- Bloquent le mouvement des "dislocations", augmentant la dureté.

### 12.3 Impuretés (Impurities):

- Définition : Atomes étrangers remplaçant des atomes du réseau ou occupant des positions interstitielles.
- Effet sur les contraintes:
- Atome plus grand : "contrainte de traction".
- Atome plus petit : "contrainte de compression".
- Utilisées dans les "alliages" pour renforcer les propriétés (ex. : carbone dans le fer).

## 13 Causes de la formation de bulles d'air : [28]

### 13.1 Dissolution des gaz dans le métal en fusion :

Pendant la fusion de l'acier dans des fours (ex. four à arc électrique ou convertisseur à oxygène), des gaz comme "l'hydrogène ( $H_2$ )", "l'azote ( $N_2$ )" et "l'oxygène ( $O_2$ )" se dissolvent dans le métal liquide.

Lors du refroidissement, l'acier ne peut plus retenir ces gaz, qui s'échappent sous forme de bulles.

### 13.2 Désoxydation inefficace :

Si des agents désoxydants (ex. aluminium ou silicium) ne sont pas utilisés correctement, l'oxygène reste dans l'acier, formant des oxydes (ex.  $FeO$ ) et des bulles gazeuses.

### 13.3 Présence de scories (laitier) :

Les scories (impuretés flottant à la surface du métal en fusion) peuvent piéger des gaz, libérés lors de la coulée et formant des bulles.

### 13.4 Infiltration d'air pendant la coulée :

Lors de la coulée continue (Coulée continue), un écoulement turbulent ou une conception inadéquate des moules peut introduire de l'air dans le métal en fusion.

### 14 Mécanisme de formation des bulles (étape par étape) :

- a) Phase de fusion : Les matières premières réagissent avec les gaz atmosphériques dans le four, entraînant la dissolution des gaz dans le métal liquide.
- b) Phase de refroidissement initial : Lors de la solidification de l'acier, les gaz dissous se libèrent et s'accumulent dans des zones de basse pression (ex. joints de grains ou microfissures).
- c) Phase de solidification finale : Si le refroidissement est trop rapide, les bulles restent piégées dans la structure métallique, formant des cavités permanentes. [29]

### 15 Impact des bulles sur la qualité des tubes (selon API 5L) :

- Affaiblissement des propriétés mécaniques : Les bulles réduisent la résistance à la pression et à la fatigue des tubes.
- « Concentration de contraintes » : Les fissures peuvent se propager à partir des bulles sous haute pression ou en milieux corrosifs (ex. gaz acide).
- « Non-conformité aux exigences PSL2 » : Les tubes contenant des bulles importantes ou des défauts internes sont rejetés lors des tests hydrostatiques et des contrôles non destructifs (CND). [30]

*Tableau 9 : Résumé des méthodes de prévention. [8]*

Détails	Étape
Extraction de l'hydrogène et de l'oxygène via vide	Dégazage sous vide
Élimination minutieuse des scories avant coulée	Contrôle des scories
Régulation de la vitesse pour éviter le piégeage des gaz	Refroidissement lent
Moules poreux permettant l'évacuation des gaz	Conception optimale des moules



En appliquant ces mesures, la formation de bulles d'air est considérablement réduite, garantissant des tubes conformes à "API 5L", capables de résister aux conditions extrêmes du transport de pétrole et de gaz.

### **16 Conclusion :**

À la fin de ce chapitre, on peut dire que les pipelines représentent l'un des moyens les plus efficaces, sûrs et économiques de transporter le pétrole et le gaz par rapport à d'autres méthodes de transport telles que les chemins de fer ou les camions. L'étude a prouvé que cette méthode est une solution optimale pour transporter de grandes quantités d'hydrocarbures sur de longues distances, tout en assurant la continuité du flux et en minimisant l'impact sur l'environnement. Il a également été confirmé que l'acier au carbone est le choix le plus courant pour la fabrication des conduites, utilisées dans environ 95 % des applications, en particulier celles qui sont conformes à la norme API 5L. L'acier au carbone se caractérise par sa grande solidité, sa facilité de soudage, sa bonne résistance aux contraintes extrêmes et son faible coût par rapport à d'autres métaux. En outre, différentes méthodes de fabrication et des normes de qualité strictes sont mises en évidence pour garantir l'intégrité du tube pendant son fonctionnement, ainsi que pour traiter les défauts potentiels tels que les bulles d'air ou les concentrations de contraintes susceptibles d'affecter la durée de vie du tube, ce qui fait de l'acier au carbone une solution équilibrée et idéale pour la construction de l'infrastructure essentielle du système mondial de transport d'énergie.

# **CHAPTER 02 :**

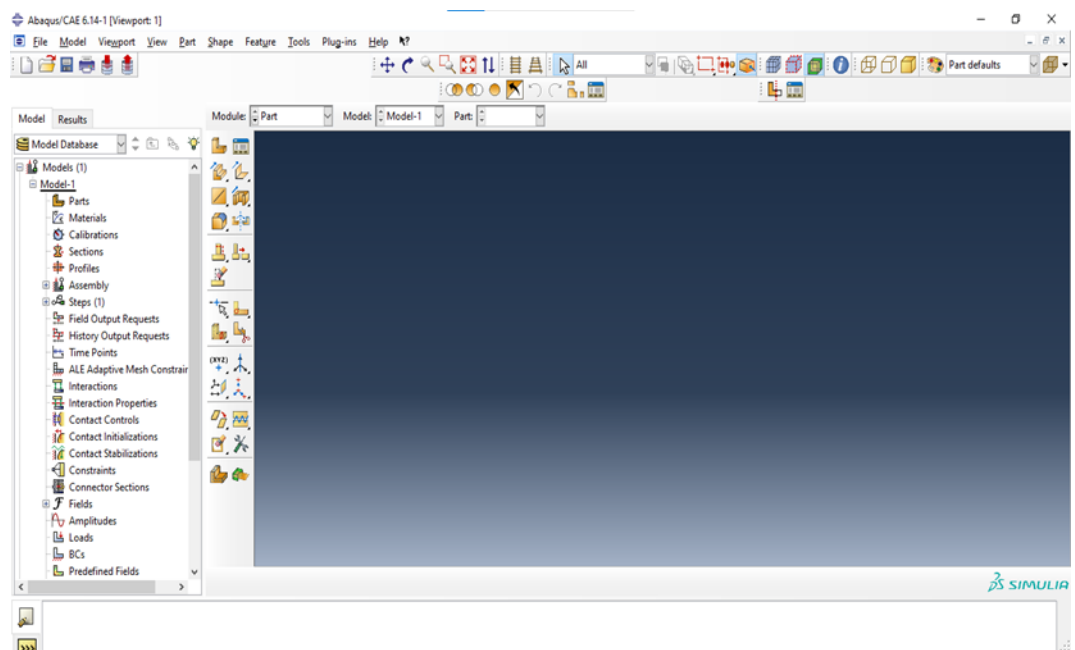
## **Présentation du logiciel**

### 1 Introduction :

Dans ce chapitre, une étude complète d'Abaqus en tant qu'outil avancé d'analyse par éléments finis (FEA), où nous apprendrons à connaître ses composants de base et ses modules les plus importants tels qu'Abaqus/Standard et Abaqus/Explicit, ainsi que des modules spéciaux tels qu'Abaqus/Aqua et Abaqus/Design. Nous expliquerons également les étapes du processus d'analyse à l'aide du logiciel, depuis la phase de préparation (Preprocessing) jusqu'à la phase de simulation (Simulation), en passant par l'analyse des résultats (Postprocessing). Nous mettrons également en évidence les différents types de charges et de contraintes qui peuvent être analysés à l'aide du logiciel, en particulier dans les conduites conformes à l'API 5.

### 2 Définition d'Abaqus :

ABAQUS est un logiciel d'analyse par éléments finis, utilisé pour étudier le comportement des modèles sous différentes charges. Abaqus/CAE offre un environnement complet pour la préparation des modèles avant l'analyse ainsi que pour l'interprétation des résultats. Il est largement utilisé dans des secteurs comme l'automobile et l'aéronautique, et il est également très apprécié dans les universités et les centres de recherche, notamment pour sa capacité à traiter des problèmes complexes et non linéaires. La figure 1 montre l'interface utilisateur du logiciel. [31]



*Figure 8 : montre l'interface utilisateur du logiciel. [7]*

Abaqus offre une large gamme de capacités pour la simulation d'applications tant linéaires que non linéaires. [32]

### 2.1 Les problèmes impliquant plusieurs composants sont modélisés en :

- Associant la géométrie de chaque composant aux modèles de matériaux appropriés, et
- Spécifiant les interactions entre les composants.

### 2.2 Dans les analyses non linéaires, Abaqus :

- Sélectionne automatiquement des incréments de charge et des tolérances de convergence appropriés, et
- Les ajuste continuellement pendant la simulation pour garantir des résultats précis et efficaces.

## 3 Les produits Abaqus :

Le logiciel Abaqus comprend deux principaux modules d'analyse : Abaqus/Standard et Abaqus/Explicit. À ceux-ci s'ajoutent quatre modules spécialisés conçus pour des tâches spécifiques dans le cadre d'Abaqus/Standard : Abaqus/Aqua, Abaqus/Design, Abaqus/AMS et Abaqus/Foundation.

L'environnement Abaqus/CAE constitue la plateforme complète du logiciel. Il permet aux utilisateurs de créer des modèles, de lancer et suivre les simulations de manière interactive, puis d'analyser les résultats. Pour ceux qui souhaitent uniquement visualiser les résultats sans créer de modèles, Abaqus/Viewer propose une version simplifiée dédiée au post-traitement.

Le logiciel offre également des interfaces permettant l'intégration avec d'autres outils d'ingénierie, comme Moldflow pour la simulation d'injection plastique, et MSC.ADAMS pour l'analyse de systèmes mécaniques, notamment avec ADAMS/Flex.

Enfin, Abaqus propose des convertisseurs facilitant l'importation de géométries depuis des logiciels de CAO externes, la conversion de données depuis d'autres outils de prétraitement, ainsi que l'exportation des résultats vers des logiciels de post-traitement tiers.

Un schéma illustrant les liens entre ces différents composants est présenté à la figure 2. [32]

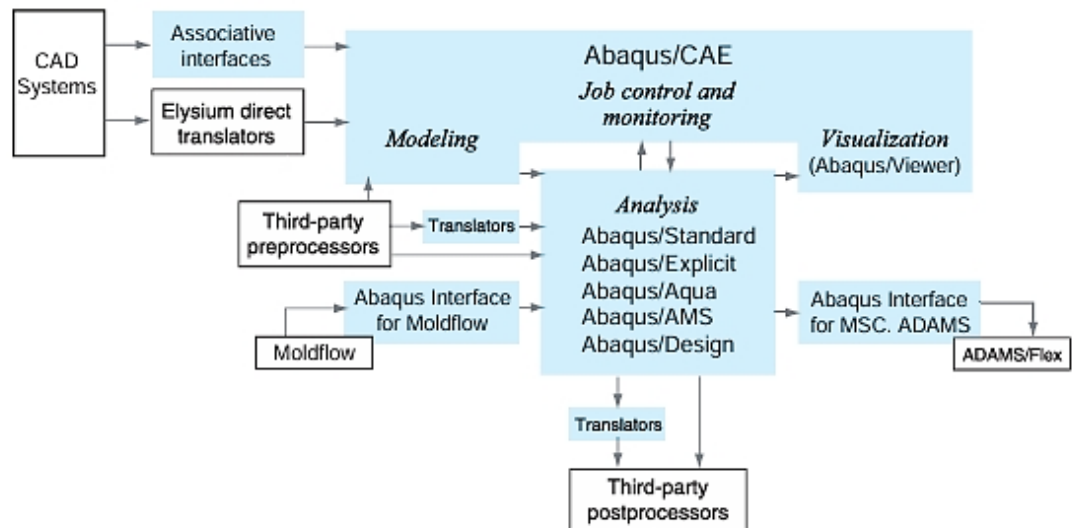


Figure 9 : La relation entre les produits Abaqus. [8]

### 3.1 ABAQUS/Standard :

ABAQUS/Standard est un logiciel d'analyse polyvalent utilisé pour simuler et résoudre une large gamme de problèmes techniques, qu'ils soient linéaires ou non linéaires. Il couvre des analyses statiques (comme les charges continues), dynamiques (comme les vibrations et les collisions), thermiques (comme le transfert de chaleur) et électriques (comme les interactions de champs électriques). En résumé, il aide les ingénieurs à comprendre et à anticiper le comportement de systèmes complexes dans diverses conditions opérationnelles, ce qui en fait un outil efficace pour concevoir et tester des modèles techniques avec précision. [33]

### 3.2 ABAQUS/Explicite :

ABAQUS/Explicit est un logiciel d'analyse spécialisé qui utilise une méthode de calcul dynamique « explicite » pour simuler des phénomènes dynamiques rapides et transitoires, tels que les problèmes de collisions et d'explosions. Ce programme se distingue par son efficacité dans la gestion de problèmes hautement complexes impliquant des changements constants dans les conditions de contact entre les composants, comme ceux rencontrés dans les processus de formage des métaux. Grâce à ces fonctionnalités, il constitue un choix idéal pour simuler des phénomènes nécessitant un suivi précis des changements instantanés, et c'est le sujet principal de ce guide complet. [33]

### 3.3 ABAQUS/CAE :

ABAQUS/CAE (l'environnement intégré d'ABAQUS) est une interface visuelle interactive qui vous permet de créer et d'analyser des modèles techniques avec fluidité. Ce logiciel vous aide à : [33]

- Concevoir directement la structure à analyser grâce à des outils de dessin, ou l'importer depuis d'autres logiciels de conception.
- Diviser le modèle en parties organisées, faciles à mailler (appliquer un Mesh).
- Ajouter des propriétés physiques et matérielles au modèle, comme définir le type de matériaux, appliquer des charges externes, ou ajuster des conditions limites (par exemple, fixer certaines parties).
- Utiliser des outils avancés pour générer un maillage précis et vérifier la qualité du modèle avant l'analyse.
- Gérer facilement les simulations (lancer l'analyse, suivre sa progression, ou l'arrêter si nécessaire).
- Visualiser et interpréter les résultats via des outils graphiques interactifs.

### 3.4 ABAQUS/Viewer :

ABAQUS/Viewer est le module dédié à la visualisation et à l'analyse des résultats au sein de l'environnement ABAQUS/CAE. Ce logiciel fonctionne comme une interface visuelle interactive qui vous permet d'explorer facilement les données de simulation technique, qu'il s'agisse de résultats de tests de contrainte, de déformations, de chaleur, ou d'autres paramètres. Ses atouts principaux sont : [33]

- Compatibilité avec tous les types d'analyses réalisées par les autres outils ABAQUS.
- Outils avancés pour convertir les données numériques en graphiques ou modèles visuels tridimensionnels.
- Aide à l'interprétation grâce à des fonctionnalités comme :
  - Colorisation du modèle selon l'intensité des contraintes ou de la température.
  - Zoom sur les zones critiques pour une étude détaillée.
  - Comparaison des résultats de différentes analyses sur un même modèle.

### 3.5 ABAQUS/Aqua :

ABAQUS/Aqua est un module complémentaire optionnel qui s'intègre à ABAQUS/Standard pour enrichir ses capacités d'analyse, notamment dans la modélisation des structures offshore géantes comme les plateformes pétrolières. Ce module permet de simuler les facteurs environnementaux qui affectent ces structures, tels que : [33]

- La puissance des vagues et la pression du vent.
- La flottabilité (interaction de la structure avec l'eau).
- D'autres effets liés aux conditions marines extrêmes.

### 3.6 ABAQUS/Design :

ABAQUS/Design est un module complémentaire optionnel intégré à ABAQUS/Standard pour effectuer des analyses de sensibilité de conception. Ces analyses aident les ingénieurs à étudier comment un modèle technique est affecté par des modifications de ses dimensions ou propriétés (comme l'épaisseur ou la forme). En d'autres termes, ce logiciel facilite l'optimisation des conceptions en identifiant les facteurs ayant l'impact le plus significatif sur leurs performances. [33]

### 3.7 ABAQUS/AMS :

ABAQUS/AMS est un module complémentaire optionnel intégré à ABAQUS/Standard pour améliorer l'analyse des fréquences naturelles (vibrations intrinsèques) des structures complexes, comme les ponts ou les avions. Ce module utilise un algorithme avancé appelé AMS (Sous-structuration Multi-niveaux Automatique) qui divise le modèle en parties plus petites analysées séparément, ce qui accélère les calculs et réduit les ressources informatiques nécessaires, surtout pour les modèles de grande taille. [33]

### 3.8 ABAQUS/Foundation :

ABAQUS/Foundation est une version simplifiée d'ABAQUS/Standard, conçue pour offrir un accès rapide et efficace aux outils d'analyse statique linéaire et dynamique de base (comme l'analyse des contraintes dans les structures fixes ou l'étude des vibrations simples). C'est une option idéale pour les projets ne nécessitant pas d'analyses complexes (non linéaires), réduisant ainsi les coûts de calcul et accélérant l'obtention de résultats dans des cas tels que : [33]

- L'analyse des bâtiments sous charges statiques.
- L'étude de la stabilité des ponts sous l'effet du vent.
- La modélisation de systèmes mécaniques à mouvement répétitif.

### 4 Les bases d'ABAQUS :

Une analyse complète avec ABAQUS/Explicit se déroule généralement en trois étapes clés :

- **Phase de préparation (Prétraitement) :**
  - Conception du modèle géométrique et définition de ses propriétés (matériaux, charges, conditions limites).
- **Phase de simulation :**
  - Exécution de l'analyse dynamique pour reproduire l'événement étudié (ex. : collision ou explosion).
- **Phase d'analyse des résultats (Post-traitement) :**
  - Extraction et visualisation des données pour comprendre le comportement du modèle (ex. : répartition des contraintes ou des déformations).

Ces étapes ne sont pas linéaires : elles sont connectées par des *boucles itératives* (voir Figure 3), vous permettant de revenir à une étape précédente pour ajuster le modèle ou optimiser les paramètres en fonction des résultats initiaux, ce qui améliore la précision de l'analyse. [33]

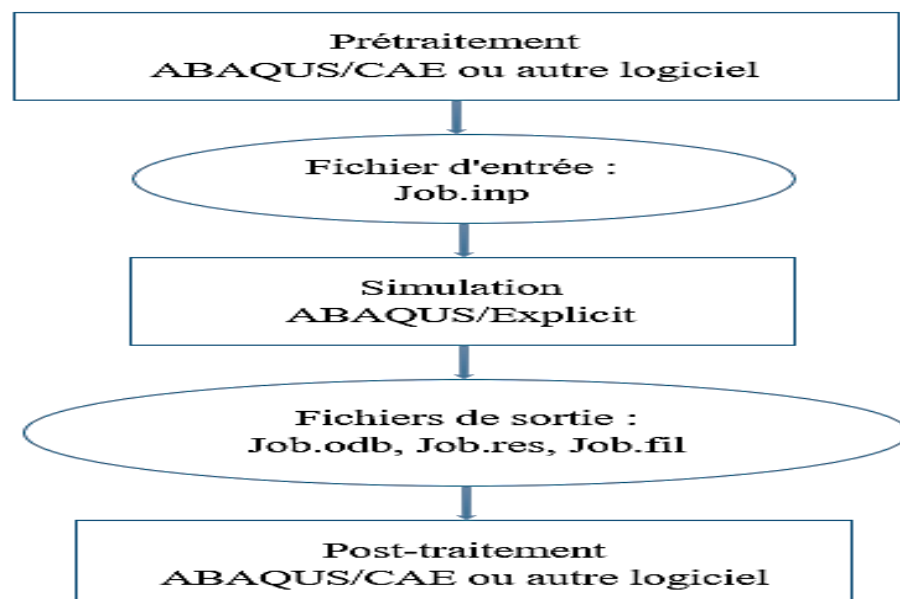


Figure 10 : Processus d'analyse complet à l'aide d'ABAQUS/Explicit. [9]



### 4.1 Phase de préparation (ABAQUS/CAE) :

C'est ici que vous construisez le modèle mathématique du problème physique à analyser (par exemple, une pièce mécanique ou une structure architecturale). Vous pouvez utiliser :

- L'interface visuelle ABAQUS/CAE pour dessiner le modèle et définir ses propriétés (matériaux, charges, conditions de fixation).
- D'autres logiciels de conception (comme AutoCAD) pour importer un modèle prêt à l'emploi.
- Un éditeur de texte (comme Notepad) pour écrire directement le fichier d'entrée dans des cas simples.
  - Exemple pratique : Pour l'analyse d'un pont, vous définissez ici ses dimensions, le type de béton utilisé et les charges prévues dues au trafic.

### 4.2 Phase de simulation (ABAQUS/Explicit) :

C'est à cette étape que la simulation dynamique est exécutée : le logiciel résout les équations mathématiques complexes basées sur le modèle préparé. Cette phase s'exécute généralement en arrière-plan (sans surveillance directe) et génère des fichiers contenant des résultats tels que :

- Les déplacements (quelle est l'amplitude du mouvement des parties ?).
- Les contraintes (où les forces se concentrent-elles ?).
  - Remarque : La durée de la simulation dépend de la complexité du modèle et de la puissance de l'ordinateur, elle peut varier de quelques secondes à plusieurs jours !
  - Exemple : Une simulation de collision de voiture peut prendre des heures en raison des détails des déformations instantanées.

### 4.3 Phase d'analyse des résultats (ABAQUS/Viewer) :

Une fois la simulation terminée (ou pendant son exécution), vous pouvez explorer les résultats à l'aide d'outils visuels interactifs tels que :

- Des cartes de couleurs pour identifier les zones de contraintes élevées.
- Des animations vidéo pour observer le mouvement du modèle pendant l'événement (comme l'effondrement d'une structure).
- Des graphiques (X-Y) pour comparer les données et évaluer les performances.

- Exemple : Dans l'analyse d'une explosion, les cartes de couleurs révèlent les zones les plus vulnérables de la structure.

## **5 Symboles utilisés dans ABAQUS pour les unités :**

Les unités sont indiquées pour la valeur à donner sur les types de charge et de flux comme suit : [34]

*Tableau 10 : Symboles et unités utilisés dans ABAQUS. [9]*

Dimension	Indicator	Exemple (S.I. unités)
Length	<b>L</b>	Mètre
Mass	<b>M</b>	Kilo gram
Time	<b>T</b>	Second
Température	<b>θ</b>	Dégréé Celsius
Electric Curent	<b>A</b>	Ampère
Force	<b>F</b>	Newton
Energy	<b>J</b>	Joule
Electric Charge	<b>C</b>	Coulomb
Electric Potentiel	<b>φ</b>	Volt
Mass concentration	<b>P</b>	Parts per million
Pression	<b>P</b>	Mégapascal

### **6 Conclusion :**

En conclusion, nous avons identifié les outils et les étapes les plus importants liés à l'utilisation d'Abaqus dans l'analyse de problèmes d'ingénierie complexes, en particulier en ce qui concerne les tuyaux soumis à différents types de charges. Nous avons montré comment ce puissant logiciel peut être utilisé pour simuler le comportement des matériaux dans des conditions de fonctionnement difficiles, et comment les résultats peuvent être extraits et analysés pour parvenir à une évaluation précise de la performance structurelle. Ce chapitre sert de base de référence pour comprendre les applications pratiques d'Abaqus dans les recherches et études futures liées aux matériaux et à l'ingénierie structurelle.

# **CHAPTER 03 :**

## **Modélisation et Résultats**

## **1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet de la présence d'un défaut, situé à l'intérieur de la paroi d'un pipeline en acier soumis à une pression interne, sur la répartition des contraintes autour de ce défaut.

Nous avons réalisé cette étude à l'aide d'une simulation numérique sous le logiciel ABAQUS, selon une méthodologie basée sur la comparaison entre un pipeline intact (sans défaut) et un autre contenant une bulle d'air de 0,5 mm de diamètre, dont la position varie à chaque simulation.

Les trois contraintes — Von Mises, S11 et S33 — sont analysées pour les deux modèles, puis comparées afin d'identifier les zones les plus critiques, susceptibles d'être des zones d'initiation de fissures.

## **2 Modélisation :**

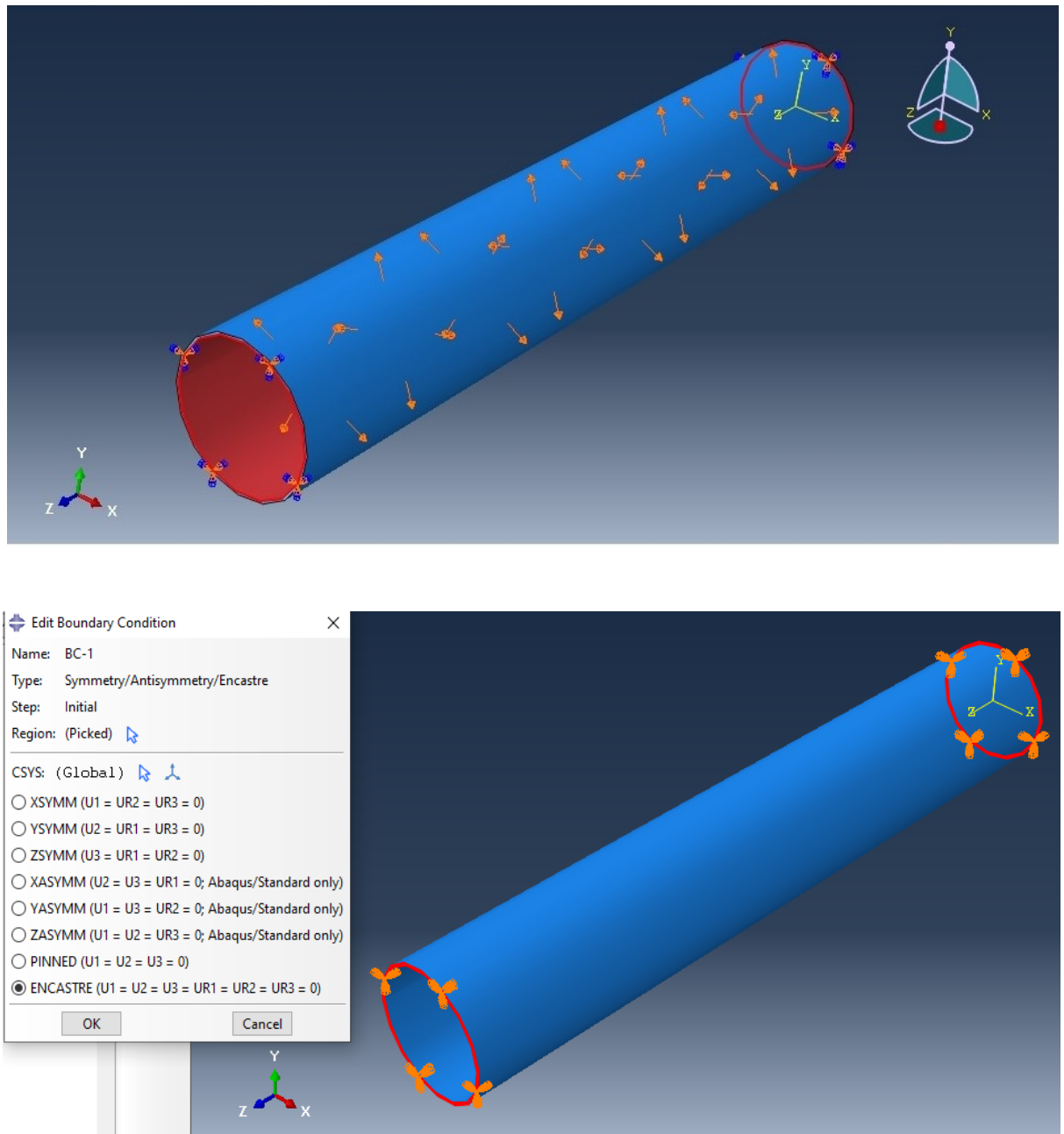
Le premier modèle consiste à simuler un pipeline intact afin d'avoir une première vision sur la distribution des contraintes. Les dimensions du pipeline ainsi que les propriétés du matériau utilisé sont présentées dans le tableau 16.

*Tableau 11: les dimensions et les caractéristiques du tube.*

<b>Longueur</b>	8000mm
<b>Diamètre intérieur</b>	660 mm
<b>Diamètre extérieur</b>	680 mm
<b>Épaisseur</b>	20 mm
<b>Module d'Élasticité</b>	210000 Mpa
<b>Coefficient de Poisson</b>	0.3

### 3 Chargement et conditions aux limites :

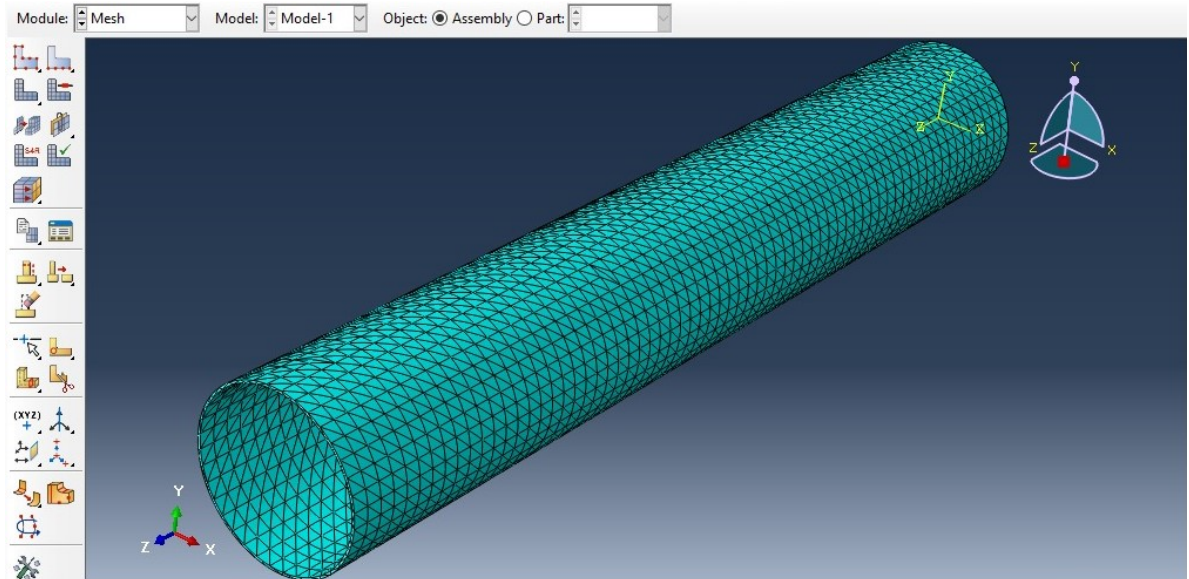
Nous avons adopté une pression uniforme de 4 bars appliquée sur la paroi interne du pipeline. Pour les conditions aux limites, les déplacements et les rotations selon les axes x, y et z ( $U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$ ) ont été bloqués aux deux extrémités du tube, comme montre la figure 11.



*Figure 11 : Pression Appliqué et conditions aux limites.*

### 4 Maillage :

Afin de simplifier le modèle nous avons choisi un maillage triangulaire avec un espacement entre les nœuds de 0.1mm, comme montre la figure 12.



*Figure 12 : Maillage du pipeline.*

### 5 Résultats et discussion :

#### 5.1 Distribution de la Contrainte équivalente (Von Mises) dans le pipeline sans défaut :

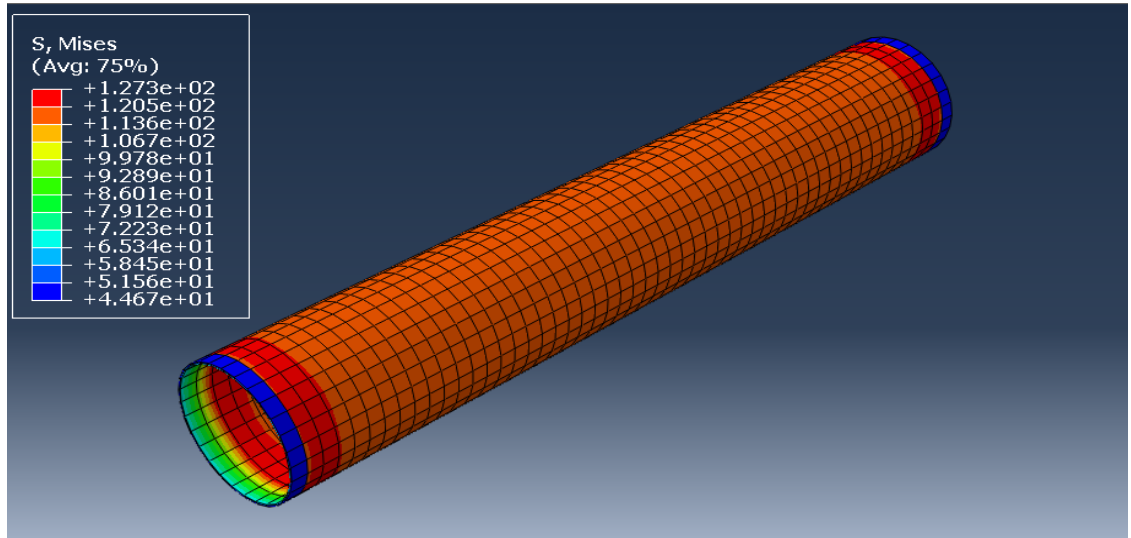
La contrainte de Von Mises est une mesure de la résistance à la déformation des matériaux. Elle est utilisée pour déterminer si un matériau va se déformer (céder) ou se rompre sous une charge composite donnée. [35]

Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$\sigma_{von\ Mises} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Si cette contrainte dépasse la limite d'élasticité du matériau, le matériau entre dans une phase de déformation plastique.

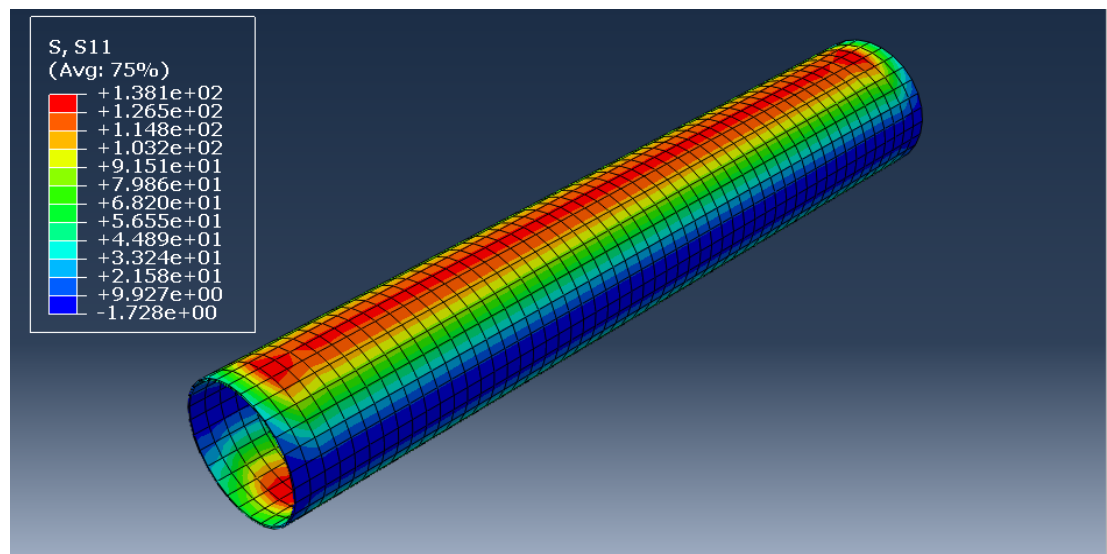
Nous avons étudié la distribution et l'intensité de la contrainte équivalente dans le pipeline sans défaut. Le résultat obtenu est présenté dans la figure 13 La valeur maximale observée est de l'ordre de 127 MPa.



*Figure 13 : Contrainte de Von Mises dans la plaque sans défaut.*

### 5.2 Distribution de la Contrainte circonférentielle dans le pipeline sans défaut :

L'étude de la contrainte circonférentielle (S11) est une étape importante pour comprendre comment le pipeline réagit aux charges internes, en particulier à la pression. Le résultat obtenu est présenté dans la figure 14 La valeur maximale observée est de l'ordre de 138 MPa.



*Figure 14 : Contrainte S11 dans le pipeline sans défaut.*



### 5.3 Distribution de la Contrainte longitudinale dans le pipeline sans défaut :

La contrainte longitudinale (S33) correspond à la contrainte selon le troisième axe (généralement l'axe Z), considéré ici comme l'axe longitudinal du modèle. Le résultat obtenu est présenté dans la figure 15, avec une valeur maximale observée de l'ordre de 74 MPa.

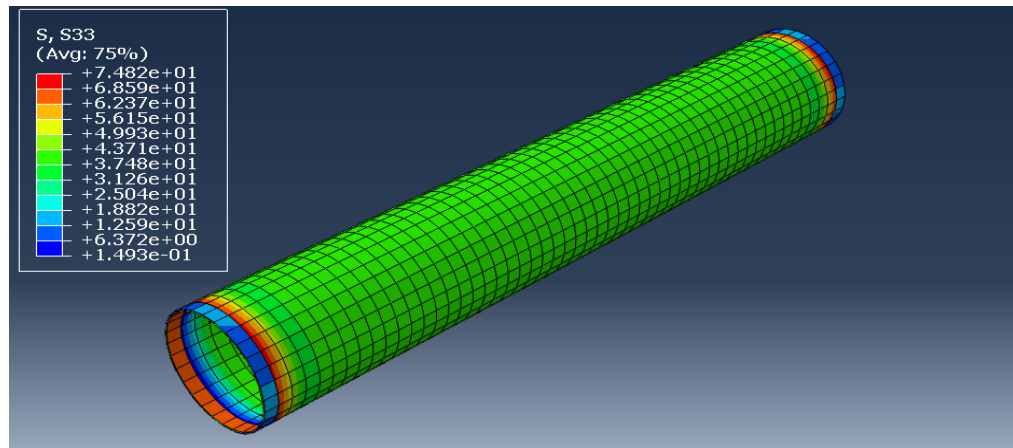


Figure 15 : Contrainte S33 dans le pipeline sans défaut.

### 5.4 Distribution des trois contraintes dans le pipeline avec défaut :

La formation de bulles d'air lors de la fabrication des pipelines est considérée comme un défaut ponctuel interne, susceptible d'affecter les performances mécaniques, notamment sous l'effet d'une pression élevée.

#### 5.4.1 Détails sur le défaut :

Un défaut volumique de forme sphérique, de rayon  $R=0,50$  mm, a été modélisé, comme illustré dans la figure 16. La position de ce défaut a été modifiée tous les 1000 mm le long du pipeline, comme montré dans la figure 17.

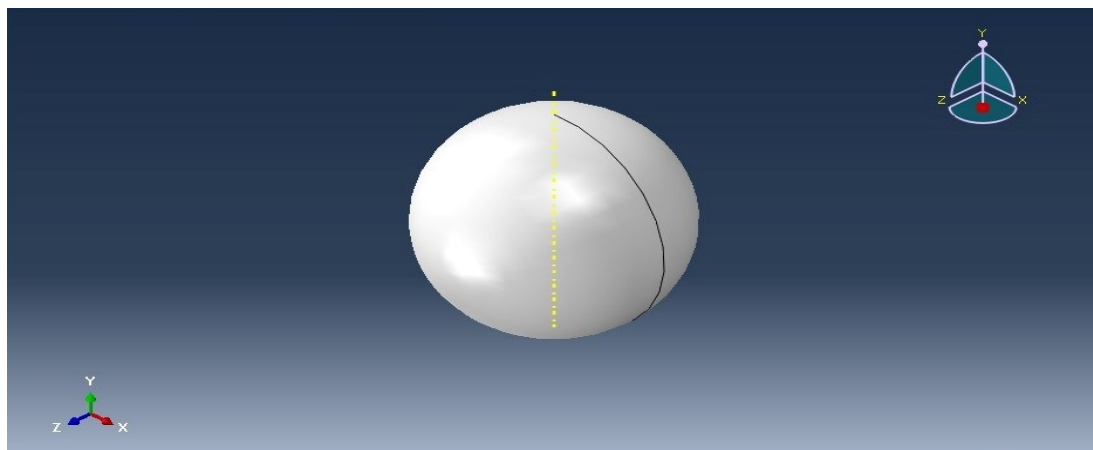
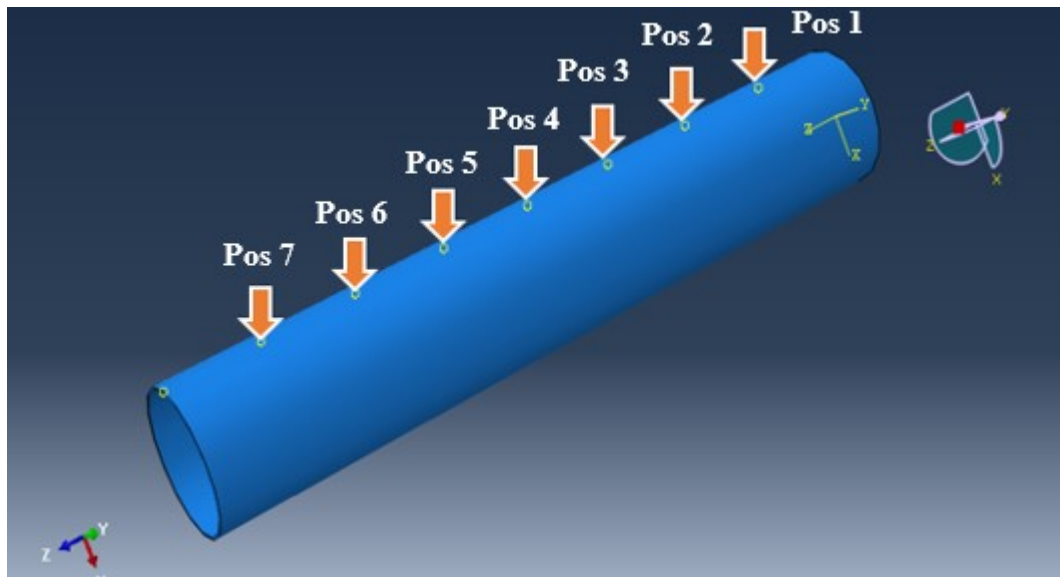


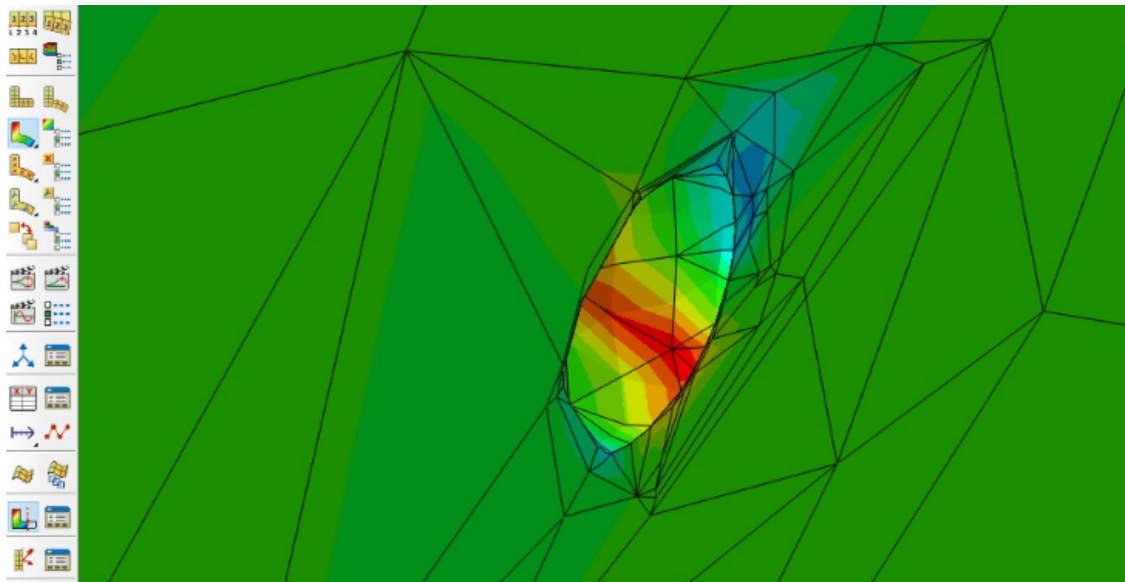
Figure 16 : Forme de défaut.



*Figure 17 : Positions de défaut.*

### 5.4.2 Contraintes de Von Mises, S11 et S33 dans le pipeline :

D'après les résultats obtenus, la présence d'un défaut à l'intérieur du pipeline augmente significativement les contraintes autour de ce défaut, comme le montre la figure 18



*Figure 18 : Concentration de contrainte au voisinage de défaut.*

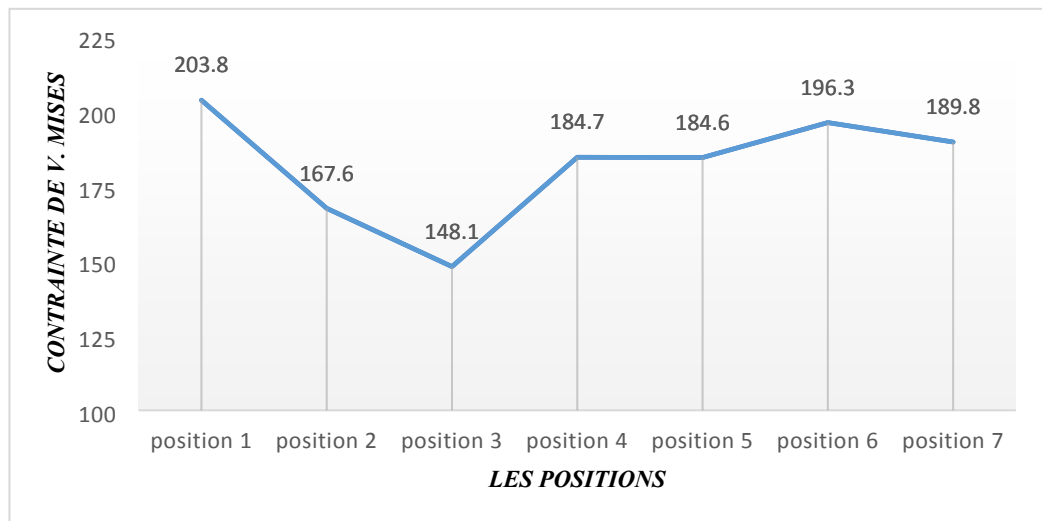
Les résultats que nous avons obtenus pour chaque position sont regroupé dans le tableau 17.

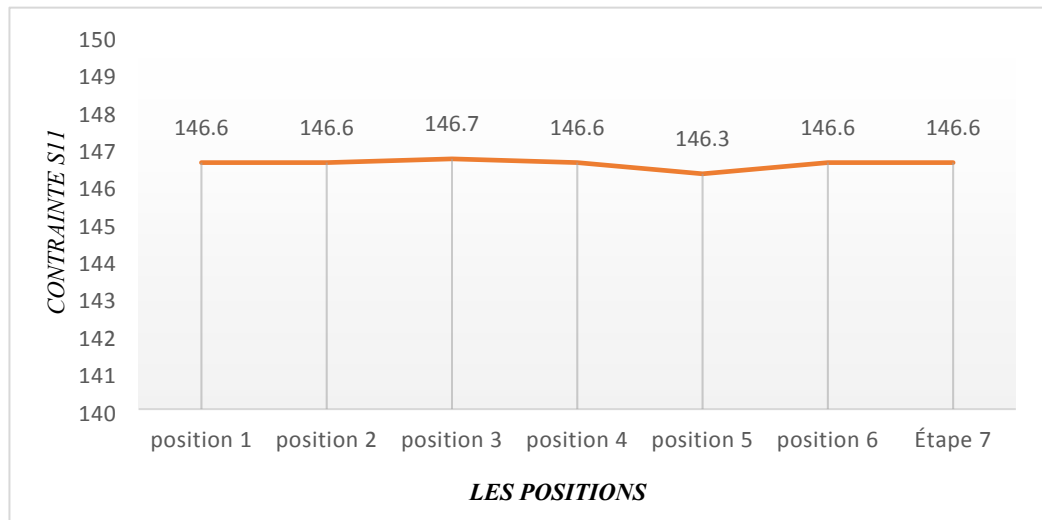
*Tableau 12 : Contraintes de V. M, S11 et S33 pour différente position.*

Contraintes	Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 4	Pos 5	Pos 6	Pos 7
V Mises	203.8 MPa	167.6 MPa	148.1 MPa	184.7 MPa	184.6 MPa	196.3 MPa	189.8 MPa
S 11	146.6 MPa	146.6 MPa	146.7 MPa	146.6 MPa	146.3 MPa	146.6 MPa	146.6 MPa
S 33	147.5 MPa	146.5 MPa	154.1 MPa	154.2 MPa	149.9 MPa	149.4 MPa	149.4 MPa

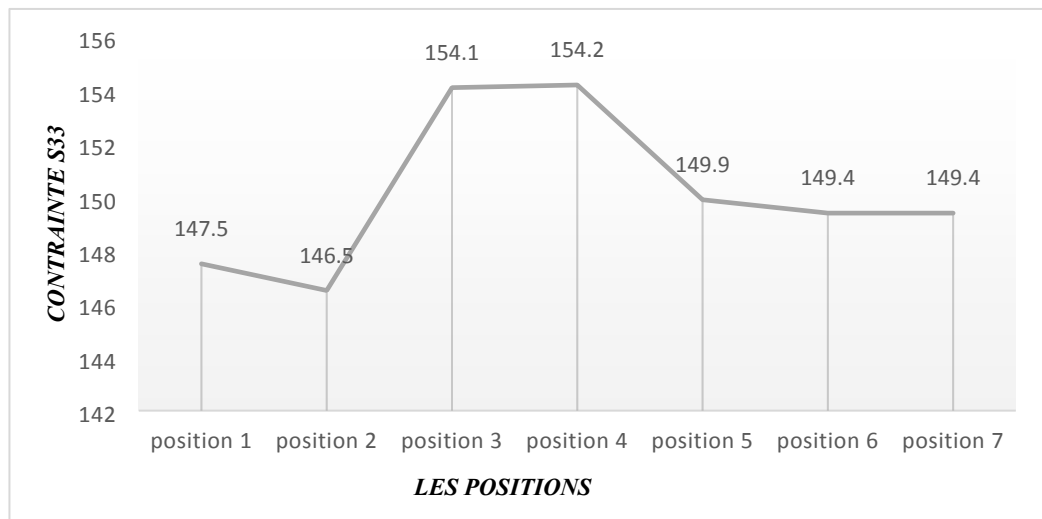
On remarque que, pour tous les cas, la contrainte de Von Mises dépasse 127 MPa (valeur correspondant au pipeline intact), que S11 dépasse 138 MPa et que S33 dépasse 74 MPa.

Pour mieux comprendre l'effet de la position du défaut sur la concentration des contraintes, nous avons présenté les résultats sous forme de courbes, comme le montrent les figures 19, 20 et 21.

*Figure 19 : Contrainte de V. Mises pour toutes les positions.*



*Figure 20 : Contrainte S11 pour toutes les positions.*



*Figure 21 : Contrainte S33 pour toutes les positions.*

La position 01 est la plus critique pour la contrainte de Von Mises, où la valeur dépasse 200 MPa. Pour S11, la valeur est de l'ordre de 146 MPa dans toutes les positions. En revanche, pour S33, les positions 03 et 04 sont les plus critiques.

# Conclusion Générale

## **Conclusion Générale :**

En conclusion, on peut affirmer que la compréhension de l'impact des défauts, selon leur emplacement, sur les contraintes mécaniques dans les pipelines de transport de pétrole et de gaz est un élément central pour garantir la fiabilité de ces infrastructures vitales. L'étude a démontré que l'acier au carbone API 5L, grâce à ses bonnes propriétés mécaniques et à son coût économique, reste le choix optimal dans la plupart des applications de transport, en particulier s'il est associé à des techniques de protection appropriées telles que des revêtements anticorrosion et des systèmes de contrôle non destructifs.

Dans le but de mieux comprendre l'effet d'un défaut sur le comportement mécanique des pipelines, une analyse de la distribution des contraintes a été réalisée afin d'évaluer l'état du pipeline après application du chargement. En conclusion, les points suivants peuvent être retenus :

- ✓ Le pipeline doit résister aux contraintes mécaniques exercées sur lui, susceptibles d'entraîner une fissuration, voire une fracture.
- ✓ Les conditions de chargement jouent un rôle déterminant dans la distribution des contraintes au sein du pipeline.
- ✓ Les niveaux de contraintes circonférentielle (S11) et longitudinale (S33) restent inférieurs au seuil critique de rupture, ce qui exclut un risque de fracture du pipeline.
- ✓ L'existence de défauts (microcavités) dans le pipeline en acier API 5L constitue un site de concentration des contraintes, ce qui peut favoriser l'amorçage de fissures conduisant à la fracture.
- ✓ La présence de microcavités dans le pipeline entraîne une augmentation des contraintes, qui se concentrent particulièrement autour de ces défauts. Cette augmentation concerne différents types de contraintes.

## **Bibliographie :**

- [1] M. Rania, «Transport de pétrole par pipelines et leurs éléments de protection,» Ecole Nationale Polytechnique , ALGERIE, 2017.
- [2] STEER, «The four primary methods of oil & gas transportation,» no date. [En ligne]. Available: <https://www.steer.com>. [Accès le 09 04 2025].
- [3] Library of Congress, «Transportation & Storage,» [En ligne]. Available: <https://www.loc.gov>. [Accès le 11 04 2025].
- [4] MARITIMAFRICA, «Les navires de transport de marchandises : Les pétroliers,» 2019.
- [5] H. Liu, «Pipeline,» no date. [En ligne]. Available: <https://www.britannica.com>. [Accès le 11 04 2025].
- [6] Ben H. Caudle, Priscilla G. McLeroy et The Editors of Encyclopaedia Britannica, «Recovery of oil and gas - Petroleum production - Britannica,» no date. [En ligne]. Available: <https://www.britannica.com>. [Accès le 11 04 2025].
- [7] API, Specification for Line Pipe, 46 éd., 2023.
- [8] NACE International, MR0175: Materials for use in H2S-containing environments in oil and gas production, n.d.
- [9] STEER, «The four primary methods of oil & gas transportation,» 18 January 2018. [En ligne]. Available: <https://www.steer.com>. [Accès le 11 04 2025].
- [10] American Petroleum Institute, API Specification 5L: Specification for Line Pipe, vol. 46, API Publishing Services, 2020.
- [11] API, API 5L: Spécification pour tubulure en acier soudé par fil à l'arc, sans soudure et soudé par fusion électrique, vol. 46, Washington, DC: Author, 2020.
- [12] American Petroleum Institute, API Specification 5L: Specification for Line Pipe, vol. 46, API Publishing, 2018.

- [13] American Society of Mechanical Engineers, ASME B31.8: Gas Transmission and Distribution Piping Systems, ASME, 2019.
- [14] European Committee for Standardization, EN 10208: Steel pipes for pipelines for combustible fluids, CEN, 2009.
- [15] Gnee Steel Group, «Tube sans soudure en acier au carbone API 5L,» no date. [En ligne]. Available: <https://www.gneesteel.com/fr/products/steel-pipe/seamless-steel-pipe/506.html>.
- [16] Gnee pipe, «Tuyau d'acier sans soudure API 5L X80,» [En ligne]. Available: <https://fr.baogangpipe.com/seamless-steel-pipe/pipeline-seamless-steel-pipe/api-5l-x80-seamless-steel-pipe.html>.
- [17] Union Victory, «Quelles sont les propriétés mécaniques du tuyau API 5L Grade B ?,» 15 03 2024. [En ligne]. Available: <https://fr.uvicsteelpipe.com/info/what-are-the-mechanical-properties-of-api-5l-g-93473834.html>.
- [18] Gnee Corten Steel, «Spécification de tuyau API 5L,» 24 05 2022. [En ligne]. Available: <https://fr.cortensteels.com/news/api-5l-pipe-specification-59299208.html>.
- [19] Tus Pipe, «API 5L X80,» [En ligne]. Available: <https://tustube.es/fr/standards/api-5l-line-pipe/api-5l-x80/>.
- [20] API, API Specification 5L - Line Pipe, vol. 46, API Publishing, 2023.
- [21] ALFAPIPE, «Rapport de stage,» ALFAPIPE, ghordaia.
- [22] EHONG, «Tube en acier LSAW de grand diamètre de 12 mètres, soudage à l'arc submergé longitudinal, finition laminée à chaud, norme API 5L,» EHONG.
- [23] Tianjin Wanlei, «Spiral Welded Steel Pipe,» Welded.
- [24] E. McAllister, Pipeline Rules of Thumb Handbook, Elsevier, 2018.
- [25] API, API SPEC 5L, API Publishing Services, 2020.
- [26] J. G. Kaufman, Heat Treatment of Steels, ASM International, 1991.
- [27] Hull, D et Bacon, D. J, Introduction to dislocations, vol. 5, Butterworth-Heinemann, 2011.



- [28] Ghosh, A et Chatterjee, A, Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice, PHI Learning Pvt. Ltd, 2008.
- [29] Verhoeven, J. D, Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist, ASM International, 2007.
- [30] American Petroleum Institute, Specification for Line Pipe (API Specification 5L, 46th ed.), Washington, DC: API Publishing Services, 2018.
- [31] M. Manjunath, Finite-Element Project ABAQUS Tutorial, 2009.
- [32] Systèmes, Dassault;, Getting Started with Abaqus, Version 6.8 éd., vol. Interactive Edition.
- [33] ABAQUS, Inc, «Getting started with ABAQUS/Standard: Keywords version (v6.6),» 2006.
- [34] Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Guide: Volume I – Introduction, Spatial Modeling, Execution & Output (Version 6.6), Dassault Systèmes, 2016.

## **Liste des références des figures :**

- [1] M. Rania, «Transport de pétrole par pipelines et leurs éléments de protection,» Ecole Nationale Polytechnique , ALGERIE, 2017.
- [2] MARITIMAFRICA, «Les navires de transport de marchandises : Les pétroliers,» 2019.
- [3] Y. SALAMI, «Le contrat de transit du GME par le Maroc ne sera pas renouvelé : Alger ferme les vannes,» algeria invest, 07 09 2021. [En ligne]. Available: <https://algeriainvest.com/premium-news/le-contrat-de-transit-du-gme-par-le-maroc-ne-sera-pas-renouvele-alger-ferme-l#!>. [Accès le 15 04 2025].
- [4] ALFAPIPE, «Raport de stage,» ALFAPIPE, ghardaia.
- [5] EHONG, «Tube en acier LSAW de grand diamètre de 12 mètres, soudage à l'arc submergé longitudinal, finition laminée à chaud, norme API 5L,» EHONG.
- [6] Tianjin Wanlei, «Spiral Welded Steel Pipe,» Welded.
- [7] M. Manjunath, Finite-Element Project ABAQUS Tutorial, 2009.
- [8] Systèmes, Dassault, Getting Started with Abaqus, Version 6.8 éd., vol. Interactive Edition.
- [9] ABAQUS, Inc, «Getting started with ABAQUS/Standard: Keywords version (v6.6),» 2006.

## **Liste des références des tableaux :**

- [1] M. Rania, «Transport de pétrole par pipelines et leurs éléments de protection,» Ecole Nationale Polytechnique , ALGERIE, 2017.
- [2] API, API 5L: Spécification pour tubulure en acier soudé par fil à l'arc, sans soudure et soudé par fusion électrique, vol. 46, Washington, DC: Author, 2020.
- [3] American Petroleum Institute, «Specification for Line Pipe (API Specification 5L), 46th ed.,» Washington, D.C., USA: API Publishing Services, 2018.
- [4] American Society of Mechanical Engineers, ASME B31.8: Gas Transmission and Distribution Piping Systems, ASME, 2019.
- [5] European Committee for Standardization, EN 10208: Steel pipes for pipelines for combustible fluids, CEN, 2009.
- [6] Gnee Corten Steel, «Spécification de tuyau API 5L,» 24 05 2022. [En ligne]. Available: <https://fr.cortensteels.com/news/api-5l-pipe-specification-59299208.html>.
- [7] E. McAllister, Pipeline Rules of Thumb Handbook, Elsevier, 2018.
- [8] American Petroleum Institute, Specification for Line Pipe (API Specification 5L, 46th ed.), Washington, DC: API Publishing Services, 2018.
- [9] Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Guide: Volume I – Introduction, Spatial Modeling, Execution & Output (Version 6.6), Dassault Systèmes, 2016.