



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

N° d'enregistrement

...../...../...../.....

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهرو ميكانيك

Département de d'automatique et électromécanique

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : électromécanique

Spécialité : maintenance industrielle

Thème

**Étude probabiliste de la dure de vie (courbe (S-N))
après réalisation des essais expérimentaux:
Application pipeline "ALFAPIPE Ghardaïa"**

Soutenu publiquement le :

Par

ZIT IMAD et KHENIFER RACHID

Devant le jury composé de :

Mr.AKERMI Fouzi MAA Univ. Ghardaïa Examineur

Mr.ZITANI Brahim MAA Univ. Ghardaïa Examineur

Mr. BENDAOUI Messaoud MCB Univ. Ghardaïa Encadreur

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr.BENDAOUI Messaoud**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Il nous a conduit dans cette entreprise avec beaucoup de Gentillesse et beaucoup de faveur et Une patience infinie avec nous pour conquérir Les difficultés que nous avons rencontrées tout au long Superviseur.
sans oublier*

*Nous remercions tous les membres du corps professoral de Faculté d'électromécanique La science et la technologie, en particulier **Mr. Le chef de département BEKKAR Belgacem**, Au final, je suis très honoré et ravi Je transmets mes chaleureux remerciements à Toute l'équipe **ALFAPIPE**.*

Dédicaces

Nous dédions humblement ce travail de recherche à nos parents qui nous ont soutenus et encouragés tout au long de nos années d'études. Nous exprimons ici notre profonde gratitude envers vous.

Nous souhaitons également remercier nos frères et tous ceux qui ont partagé avec nous les moments émouvants de la réalisation de ce travail. Votre soutien chaleureux et vos encouragements ont été inestimables tout au long de notre parcours.

Nous adressons nos remerciements à notre famille, nos proches et ceux qui nous apportent amour et vie. À nos amis, qui nous ont toujours encouragés, nous vous souhaitons encore plus de succès.

Et enfin, à tous ceux que nous aimons, merci du fond du cœur.

ZIT IMAD

KHENIFER RACHID

Résumé

L'objectif de ce thème est d'étudier la durée de vie des pipelines utilisés pour le transport du gaz naturel, du pétrole et de l'eau, fabriqués par la société ALFAPIPE dans les wilayas de Ghardaïa et d'Annaba. Le choix judicieux du métal de fabrication est un facteur crucial pour garantir une durée de vie prolongée et améliorer la résistance à la fatigue. Une série de tests a été réalisée sur des échantillons d'acier X70 pour déterminer leur dureté et leur résistance à différentes charges auxquelles le pipeline est soumis lors de son utilisation.

Une étude d'analyse de fiabilité et de probabilité de rupture a été menée pour décrire le comportement du métal dans les différentes phases de sa durée de vie, en utilisant la loi de Weibull pour les probabilités.

Des tests de rupture, de dureté et d'analyse chimique ont également été effectués pour obtenir des valeurs expérimentales de l'extension maximale et de la rupture, étudier la ténacité du métal et de la soudure du pipeline, et déterminer les composants chimiques.

Des tests de fatigue ont été réalisés sur le métal à l'aide de simulations informatiques à l'aide du logiciel ANSYS, faute de tests expérimentaux disponibles. La durée de vie de différents échantillons a été déterminée pour différentes épaisseurs après l'application de contraintes répétées.

Mots clés : Durée de vie du pipeline, Traction, Fatigue, Probabilités, Rupture, Contraintes, Fiabilité, Ténacité, Simulations.

Abstract

The aim of this theme is to study the life Span of pipelines used for the transportation of natural gas, oil, and water, manufactured by ALFAPIPE in the provinces of Ghardaïa and Annaba. The proper selection of the manufacturing metal is a crucial factor in achieving extended lifespan and improved fatigue resistance. A series of tests were conducted on samples of acier X70 steel to determine their hardness and resistance to various loads experienced by the pipeline during its usage.

A study on reliability analysis and failure probability was carried out to describe the behavior of the metal in different stages of its lifespan, using the Weibull law for probabilities.

Fracture tests, hardness tests, and chemical analysis were also performed to obtain experimental values for maximum elongation and fracture, study the toughness of the metal and the pipeline weld, and determine the chemical components.

Fatigue tests were conducted on the metal using computer simulations using the ANSYS software, due to the unavailability of experimental tests. The lifespan of different samples was determined for various thicknesses after the application of repeated stresses.

Keywords : Pipeline lifespan, Traction, Fatigue, Probabilities, Fracture, Stresses, Reliability, Toughness, Simulations.

ملخص

يهدف هذا الموضوع إلى دراسة مدى عمر أنابيب نقل الغاز الطبيعي والبتترول والماء المصنعة من قبل شركة ALFAPIPE في ولاية غرداية وولاية عنابة. يعتبر اختيار المعدن المناسب عاملاً حاسماً لتحقيق فترة حياة طويلة وتحسين مقاومة التعب.

تم إجراء مجموعة من الاختبارات على عينات من الفولاذ X70 لتحديد صلابتها ومقاومتها للأحمال المختلفة التي يتعرض لها خط الأنابيب أثناء الاستخدام.

تمت دراسة تحليل الموثوقية واحتمالية الفشل لوصف سلوك المعدن في مراحل الحياة المختلفة باستخدام قانون ويبول للإحتمالات.

تم إجراء اختبارات الانكسار والصلابة والتحليل الكيميائي للحصول على القيم التجريبية للتمدد الأقصى والانكسار ودراسة متانة المعدن ولحام الأنابيب وتحديد المكونات الكيميائي.

أجريت أيضاً اختبارات التعب على المعدن باستخدام المحاكاة الحاسوبية باستخدام برنامج ANSYS ، بسبب عدم توفر الاختبارات التجريبية. تم تحديد مدى عمر عينات مختلفة في السماكة بعد تطبيق ضغوط متكررة.

الكلمات الرئيسية: مدى عمر الأنابيب، التمدد، التعب، الاحتمالات، الانكسار، الضغوطات، الموثوقية، المتانة، المحاكاة.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES

Titre page

Liste des figures
Liste des tableaux
Introduction Général

Contents

CHAPITRE 1 :	12
ÉTAT DE L'ART	12
I-CONTRAINTES APPLIQUES SUR LES MATERIAUX	13
I.1- Types des contraintes : 13	
I.2 Effet des contraintes appliqués sur les matériaux : 16	
I.3. Contraintes spécifiques dans l'application du pipeline : 18	
II. CYCLE DE CONTRAINTE EN FATIGUE	19
II.1. Définition : 19	
II.2. Mécanismes de fatigue des matériaux : 19	
II.3. Facteurs qui influencent le cycle de contrainte en fatigue : 20	
II.4. Exemples de cycles de contrainte en fatigue dans des applications du pipeline : 22	
II.5. Conséquences de la fatigue sur la durée de vie du pipeline : 22	
III. COURBE DE WÖHLER (COURBE S - N)	23
III.1. Définition de la courbe de Wöhler : 23	
III.2. Principe : 23	
III.3. Etude de courbe Wöhler :[25] 24	
IV. MODELISATION DE LA COURBE DE WÖHLER	29
IV.1. Différents modèles de la courbe de Wöhler : 29	
CHAPITRE 2 :	32
DIFFERENTES LOIS DE PROBABILITE UTILISES EN FIABILITE	32
I.INTRODUCTION	33
I.1.définition de la fiabilité en mécanique : 33	
I.2. Objectifs et intérêts de la fiabilité en mécanique :[29] 33	
II. LES LOIS DE PROBABILITES UTILISEES EN FIABILITE	34
II.1. Lois discrètes : [30][31] 34	
II.2. Les lois continues :[32][33] 36	
III. ETUDE DE LA LOI DE WEI BULL	37
III.1. Introduction 37	
III.2. Les paramètre de la loi de Weibull : 38	
III.2. Estimation des paramètres de la loi de Weibull : 38	
III.3. Fonction de densité de probabilité : 39	
III.4. Fonction de distribution cumulative : 39	
III.5. Fonction de fiabilité : 40	
III.6. Fonction de risque :[39] 40	
III.7. Application de la loi de Weibull : 40	
III.8. Ajustement d'un modèle de Weibull : 41	
CHAPITRE 3 :	44

TABLE DES MATIÈRES

<i>ÉTUDE PROBABILISTE DE LA DURE DE VIE</i>	44
I.1.Introduction.....	45
I.2.Justification du choix de la loi de Wei bull :	45
I.3.Analyse fiabiliste de la rupture par fatigue :.....	45
I.4. Identification des paramètres (β , γ , μ) :	47
I.5. Analyse des courbes :	49
<i>CHAPITRE 4 :</i>	54
<i>ETUDE EXPERIMENTALE</i>	54
I.Introduction	55
II.Caractérisation du Matériau	55
II.1. Composition chimique (Essai d'Analyse Chimique)	55
II.2. Les propriétés mécaniques de l'acier X70	56
III.Résistance à la rupture.....	57
III.1. Essais de traction :	57
III.2. Essais de fatigue	59
III.3. Courbe de Wöhler (courbe S-N) :	65
IV.Discussion, analyse et interprétation des résultats :.....	66

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Figure 1 Essai de traction sur une éprouvette en acier	13
Figure 2. Contrainte de compression.....	14
Figure 3. Contrainte de cisaillement	14
Figure 4. Contrainte de flexion simple.....	15
Figure 5. Contrainte de torsion	15
Figure 6. Représentation schématique de la vitesse de propagation des fissures de fatigue en fonction du facteur d'intensité de contrainte	20
Figure 7. Courbe de Wöhler	24
Figure 8. Accommodation et Rochet.....	26
Figure 9. c. Adaptation.....	27
Figure 10. Fonction de la densité de probabilité.....	48
Figure 11. courbe cumulative Pf en fonction nombre de cycles	48
Figure 12. Fonction de fiabilité.....	49
Figure 13. Fonction de taux de défaillance.....	50
Figure 14. Fonction de la densité.....	50
Figure 15. La courbe rationnelle de traction pour les deux éprouvettes.....	59
Figure 16. Mesh control	61
Figure 17. Fixe Géométrie.....	62
Figure 18. Résulta de Stress Amplitude (MPa).....	63
Figure 19. Résulta de nombre de cycle	63
Figure 20. Résulta de nombre de cycle	64
Figure 21. Résulta de Stress Amplitude (MPa).....	64
Figure 22. Courbe de Wöhler	65

Liste des tableaux

Tableau 1.Nombre de cycles à la rupture.....	47
Tableau 2.les paramètres de loi de weibull.....	49
Tableau 3.Composition chimique de l'acier X70	56
Tableau 4.La norme ACIER PSL2	59
Tableau 5.Résultats de l'essai de traction sur les éprouvettes de pipeline.....	59
Tableau 6.Les propriétés de fatigue	61
Tableau 7.Les conditions des charges	62
Tableau 8.Résultats numériques.....	63
Tableau 9.Résultats numériques.....	64

INTRODUCTION GENERAL

Ce mémoire de fin d'études Master 2 se concentre sur l'étude probabiliste de la durée de vie du pipeline "ALFAPIPE Ghardaïa". Il comporte quatre chapitres principaux.

Le chapitre 1 examine l'état de l'art en mettant en évidence les contraintes appliquées et le cycle de contrainte en fatigue. La courbe de Wöhler, également connue sous le nom de courbe S-N, est présentée comme un outil de modélisation de la durée de vie du pipeline.

Le chapitre 2 explore les différentes lois de probabilité utilisées en fiabilité, en se concentrant sur la loi de Weibull. Il examine les objectifs et les intérêts de la fiabilité en mécanique et aborde les lois de probabilité discrètes et continues.

Le chapitre 3 se concentre sur l'analyse fiabiliste de la rupture par fatigue. Il justifie le choix de la loi de Weibull et procède à l'identification et à l'analyse des paramètres (β , γ , μ).

Dans le chapitre 4, une étude expérimentale est menée pour caractériser le matériau du pipeline. Elle inclut des essais de traction, des essais de fatigue (par simulation Ansys) et l'obtention de la courbe de Wöhler correspondante.

En résumé, ce mémoire vise à étudier probabilistiquement la durée de vie du pipeline "ALFAPIPE Ghardaïa". Il examine la modélisation de la durée de vie, les lois de probabilité en fiabilité et effectue une analyse fiabiliste de la rupture par fatigue. Des expériences sont réalisées pour caractériser le matériau et obtenir des résultats significatifs. Les principales conclusions et applications potentielles sont présentées dans le document.

CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART

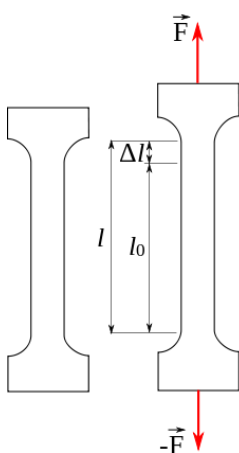
I-CONTRAINTES APPLIQUES SUR LES MATERIAUX

Les contraintes appliquées sur les matériaux se réfèrent à l'effet que les forces externes ont sur un matériau lorsqu'elles tendent à le déformer. Ces forces peuvent être de compression, de tension ou de torsion. Lorsqu'un matériau est soumis à une pression croissante, il subit une déformation élastique, une déformation plastique et finalement une rupture. Les contraintes mécaniques peuvent être considérées comme des "efforts de cohésion" de la matière et sont exprimées en pression, généralement en mégapascals (MPa) [1].

I.1- Types des contraintes :

Il existe différents types de contraintes appliquées dans la mécanique. Les contraintes peuvent être définies comme les forces internes qui agissent sur un matériau lorsqu'il est soumis à une charge extérieure.

- **Contrainte de traction** : elle se produit lorsqu'une force est appliquée pour étirer un matériau dans le sens de sa longueur. Elle est mesurée en unités de force par unité de surface et peut provoquer l'allongement d'un matériau.



ΔL est appelé l'allongement absolu

l'allongement relatif $\varepsilon_x = \frac{\Delta L}{L_0}$ sans unité

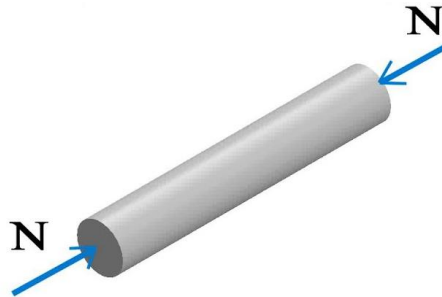
La contrainte $\sigma = \frac{F}{S}$ l'effort par unité de surface N/mm^2 ou Mpa

Poutre en traction $\sigma > 0$

Poutre en compression $\sigma < 0$

Figure 1 Essai de traction sur une éprouvette en acier

- **Contrainte de compression** : elle se produit lorsqu'une force est appliquée pour comprimer un matériau. Elle est mesurée en unités de force par unité de surface et peut provoquer le raccourcissement d'un matériau



Compression

Figure 2. Contrainte de compression

- **Contrainte de cisaillement** : elle se produit lorsqu'une force est appliquée parallèlement à la surface d'un matériau. Elle est mesurée en unités de force par unité de surface et peut provoquer le glissement d'un matériau.

Cisaillement

- Contrainte tangentielle de cisaillement (Mpa)

$$\tau_{moy} = \frac{T}{S}$$

Condition de résistance :

$$|\tau_{moy}| \leq Rpg$$

Avec : $Rpg = \frac{R_{eg}}{\alpha}$

Cisaillement

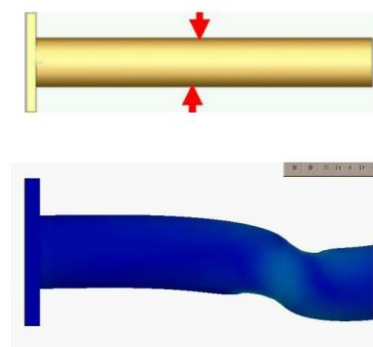
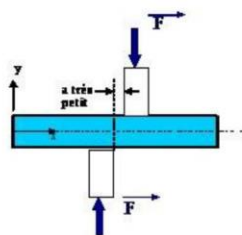


Figure 3. Contrainte de cisaillement

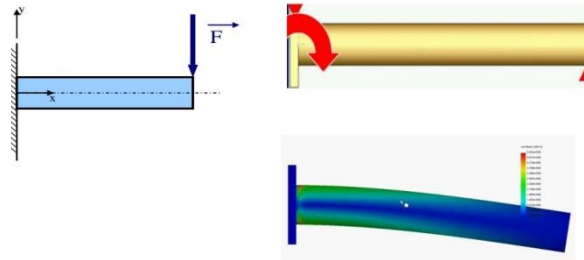
- **Contrainte de flexion** : elle se produit lorsque les forces externes tendent à plier un matériau autour d'un axe. Elle est mesurée en unités de force par unité de surface et peut provoquer la courbure d'un matériau.

Flexion simple

- Contrainte normale de flexion plane simple (Mpa) :

$$\sigma = \frac{Mfz}{I_{Gz}} \cdot \gamma$$

La condition de résistance en flexion est la même qu'en traction en prenant la valeur maximale de la contrainte.



Flexion simple

Figure 4. Contrainte de flexion simple

- **Contrainte de torsion** : elle se produit lorsque les forces externes tendent à faire tourner un matériau autour d'un axe. Elle est mesurée en unités de force par unité de surface et peut provoquer la torsion d'un matériau.[2].

Torsion

- contrainte tangentielle de torsion:

$$\tau_M = G \cdot \theta \cdot \rho_M$$

Dans le domaine élastique, le moment de torsion Mt est proportionnel à l'angle unitaire de torsion θ .

$$Mt = G \cdot \theta \cdot I_0$$

La contrainte tangentielle en fonction du moment de torsion :

$$\tau_M = \frac{Mt}{\left(\frac{I_0}{\rho_M}\right)}$$

La condition de résistance en torsion est la même qu'en cisaillement en prenant la valeur maximale de la contrainte.

Torsion

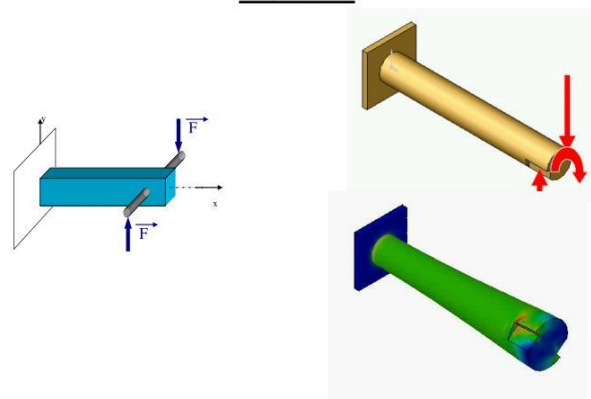


Figure 5. Contrainte de torsion

I.2 Effet des contraintes appliqués sur les matériaux :

Les matériaux répondent à un chargement par une déformation élastique ou plastique. Les propriétés mécaniques des matériaux, telles que la résistance et la ductilité, sont liées à leur comportement de déformation sous contrainte. Les contraintes appliquées aux matériaux peuvent entraîner une déformation permanente, une rupture, une fissuration ou une dégradation progressive. La compréhension des effets des contraintes appliquées est essentielle pour la sélection et la mise en œuvre des matériaux dans les applications industrielles.[3]

- **Déformation élastique** : Lorsqu'une contrainte est appliquée à un matériau, il subit une déformation élastique, qui signifie que le matériau peut se déformer sous l'effet de la contrainte, mais peut revenir à sa forme d'origine une fois que la contrainte est éliminée. Ce type de déformation est réversible et ne provoque pas de dommages permanents au matériau. Loi de **Hooke** décrit la relation linéaire entre la contrainte appliquée et la déformation élastique résultante dans le matériau :

$$\sigma = E\varepsilon$$

où σ représente la contrainte,

E représente le module d'élasticité du matériau,

ε représente la déformation élastique.

- **Déformation plastique** : Si la contrainte appliquée à un matériau dépasse une certaine limite, le matériau peut subir une déformation plastique, ce qui signifie que sa forme est modifiée de manière permanente. Cela peut se produire lorsque les liaisons atomiques à l'intérieur du matériau sont rompues, ce qui peut causer des dommages permanents au matériau. Le modèle de fluage **Norton-Hoff**

décrit la relation entre la contrainte appliquée et la déformation plastique résultante, en prenant en compte la température et le temps :

$$\varepsilon = A\sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

où ε représente la déformation plastique, σ représente la contrainte appliquée, A est une constante d'écoulement, n est un coefficient de sensibilité à la contrainte, Q est l'énergie d'activation, R est la constante des gaz parfaits et T est la température absolue.

- **Rupture** : Si la contrainte appliquée dépasse la limite de résistance du matériau, il peut se rompre. La rupture se produit lorsque le matériau ne peut plus résister à la contrainte appliquée et se brise en deux ou plus.

$$\sigma_{rupture} = F_{rupture}/A$$

où $F_{rupture}$ est la force maximale que le matériau peut supporter avant de se rompre et A est la section transversale du matériau.

- **Fissuration** : Les contraintes appliquées peuvent également causer des fissures à l'intérieur du matériau. Les fissures se produisent lorsque la contrainte appliquée est suffisamment grande pour dépasser la résistance du matériau à la propagation de fissures.
- **Dégradation progressive** : Les contraintes appliquées peuvent également causer une dégradation progressive du matériau, ce qui signifie que le matériau perd progressivement ses propriétés mécaniques, telles que la résistance et la ductilité, en raison de l'exposition à des contraintes répétées ou prolongées.

La dégradation progressive des matériaux peut être déterminée par des essais de fatigue, qui impliquent l'application répétée de contraintes à un échantillon de matériau jusqu'à ce qu'il échoue. La durée de vie du matériau peut être déterminée en utilisant la loi de fatigue de Coffin-Manson, qui est donnée par l'équation suivante :

$$N = \left(\frac{K}{\Delta\sigma}\right)^b$$

où N est le nombre de cycles de contrainte, K est une constante de matériau, $\Delta\sigma$ est l'amplitude de la contrainte, et b est un coefficient de sensibilité à la contrainte.

I.3. Contraintes spécifiques dans l'application du pipeline :

Les pipelines de transport de fluides sous pression sur de grandes distances subissent diverses contraintes spécifiques, notamment les pressions internes et externes, les vibrations, les chocs thermiques, les courbures et les torsions [4].

La pression interne peut atteindre plusieurs dizaines de MPa, tandis que la pression externe est principalement due à la charge du sol et peut varier en fonction des conditions géologiques et climatiques [5].

Les vibrations et les chocs thermiques résultent du mouvement des fluides à l'intérieur du pipeline et peuvent provoquer des contraintes cycliques [6].

Les courbures et les torsions sont causées par la topographie du terrain et les variations de direction du pipeline [7].

II. CYCLE DE CONTRAINTE EN FATIGUE

II.1. Définition :

Le cycle de contrainte en fatigue est un processus mécanique qui peut causer l'affaiblissement et la rupture des matériaux sous l'effet de contraintes ou déformations variables dans le temps. [8] et [9], ce processus peut entraîner des dommages structurels progressifs et localisés, ainsi que la croissance de fissures dans le matériau. En effet, chaque cycle de chargement appliqué sur le matériau peut augmenter légèrement la fissure existante. Il est donc important de prendre en compte la plasticité à fond de filet lors du calcul en fatigue des assemblages vissés de grandes dimensions, tels que l'on en rencontre sur les vérins à bouchons filetés ou les accumulateurs hydrauliques [10].

En somme, le cycle de contrainte en fatigue est un phénomène important à considérer dans la prévision de la durée de vie des structures soumises à des contraintes cycliques.

II.2. Mécanismes de fatigue des matériaux :

La fatigue des matériaux est un phénomène qui affecte la résistance et la durabilité des matériaux sous des charges répétitives ou cycliques. Elle peut entraîner des fissures et des défaillances dans les structures, ce qui peut avoir des conséquences graves en termes de sécurité et de coûts. Les mécanismes de fatigue peuvent varier en fonction des matériaux et des conditions de chargement, mais les principaux mécanismes comprennent la fissuration en surface, la fissuration parallèle à la surface, la fissuration transgranulaire et la fissuration intergranulaire.[11]

La fissuration en surface est causée par des contraintes de traction répétitives à la surface du matériau, qui entraînent la formation de fissures superficielles. La fissuration parallèle à la surface est causée par des contraintes de cisaillement répétitives parallèles à la surface du matériau, ce qui entraîne la formation de fissures le long de la surface. La fissuration transgranulaire est causée par des contraintes répétitives à travers les grains du matériau, entraînant la formation de fissures à travers les grains. La fissuration intergranulaire est causée par des

contraintes répétitives entre les grains du matériau, entraînant la formation de fissures entre les grains.[12]

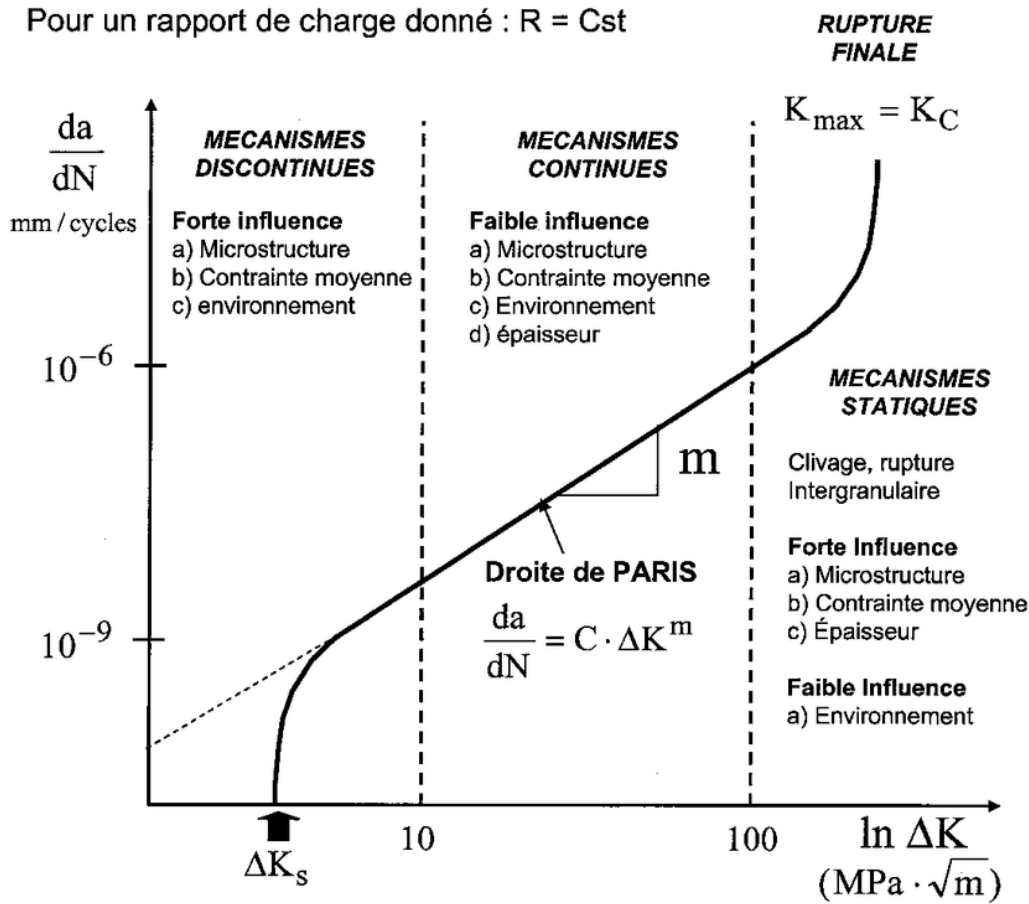


Figure 6.Représentation schématique de la vitesse de propagation des fissures de fatigue en fonction du facteur d'intensité de contrainte

II.3. Facteurs qui influencent le cycle de contrainte en fatigue :

La fatigue est un processus qui modifie les propriétés locales d'un matériau au fil du temps en raison de contraintes ou de déformations variables, conduisant à la formation de fissures et à une éventuelle défaillance de la structure. Les principales étapes de la rupture par fatigue sont l'initiation des fissures, la propagation des fissures et la rupture finale. Les paramètres utilisés pour prédire le comportement et les cycles à la rupture sont l'amplitude de la contrainte ou de la déformation, l'état de surface et l'environnement dans lequel la structure est utilisée [13].

II.3.1. Microstructure : La microstructure d'un matériau peut avoir un impact significatif sur ses propriétés de fatigue. Les alliages métalliques contenant des inclusions, des précipités ou des phases secondaires peuvent avoir une durée de vie en fatigue réduite en raison de la formation de fissures à partir de ces défauts [14]. La taille et la densité des inclusions peuvent également avoir un impact sur la durée de vie en fatigue [15].

II.3.2. Surface : L'état de surface d'un matériau peut également affecter sa durée de vie en fatigue. Les défauts de surface tels que les rayures, les entailles et les fissures peuvent agir comme des points de départ pour les fissures de fatigue, accélérant ainsi le processus de fatigue et réduisant la durée de vie de la structure [16].

II.3.3. Environnement : L'environnement dans lequel une structure est utilisée peut également affecter la durée de vie en fatigue d'une structure. Les facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité et la corrosion peuvent tous contribuer à accélérer le processus de fatigue et réduire la durée de vie de la structure [17].

II.3.4. Concentration de contrainte : La présence de points de contrainte élevée peut entraîner la formation de fissures de fatigue dans une structure. Les défauts de fabrication, les soudures et les changements de forme peuvent tous créer des points de contrainte élevée, qui peuvent accélérer le processus de fatigue et réduire la durée de vie de la structure [18].

II.3.5. Relaxation de la contrainte plastique : La relaxation de la contrainte plastique peut influencer la durée de vie en fatigue d'une structure en affectant la concentration de contrainte. La relaxation de la contrainte plastique peut réduire la concentration de contrainte, ce qui peut prolonger la durée de vie en fatigue de la structure [19].

II.4. Exemples de cycles de contrainte en fatigue dans des applications du pipeline :

- **Dans les pipelines de gaz naturel**, les cycles de contrainte en fatigue peuvent être causés par les fluctuations de pression dans le pipeline dues aux variations de la demande. Ces fluctuations peuvent causer des contraintes cycliques dans le pipeline qui peuvent conduire à la fatigue des matériaux [20].
- **Dans les pipelines de pétrole**, les cycles de contrainte en fatigue peuvent être causés par les vibrations du pipeline en réponse aux perturbations environnementales, telles que les vents forts ou les courants océaniques. Ces vibrations peuvent causer des contraintes cycliques dans le pipeline qui peuvent conduire à la fatigue des matériaux [21].
- **Dans les pipelines de liquides**, les cycles de contrainte en fatigue peuvent être causés par les fluctuations de pression dans le pipeline dues aux variations de la demande. Ces fluctuations peuvent causer des contraintes cycliques dans le pipeline qui peuvent conduire à la fatigue des matériaux [22].

II.5. Conséquences de la fatigue sur la durée de vie du pipeline :

Les conséquences de la fatigue sur la durée de vie du pipeline peuvent être les suivantes [23] :

- **La formation de fissures** : La fatigue peut causer la formation de fissures dans le pipeline, qui peuvent s'agrandir avec le temps et finalement provoquer la rupture de la conduite.
- **La diminution de la résistance à la rupture** : Les cycles de contrainte répétés peuvent entraîner une diminution de la résistance à la rupture du pipeline.
- **La réduction de la durée de vie** : Les dommages causés par la fatigue peuvent réduire considérablement la durée de vie du pipeline, entraînant une maintenance plus fréquente et des coûts supplémentaires.
- **La perte de productivité** : Si le pipeline doit être fermé pour des réparations en raison de dommages causés par la fatigue, cela peut entraîner une perte de

productivité et des coûts supplémentaires pour les entreprises qui dépendent de son utilisation.

- **Les risques pour la sécurité :** Les ruptures de pipeline causées par la fatigue peuvent entraîner des déversements de produits dangereux, ce qui peut mettre en danger la sécurité des personnes et de l'environnement.

III. COURBE DE WÖHLER (COURBE S - N)

III.1. Définition de la courbe de Wöhler :

La courbe (ou diagramme) de Wöhler est une façon de représenter des résultats d'essais de fatigue en science des matériaux. Elle est appelée courbe S-N (Stress vs Number of cycles, c'est-à-dire « contrainte en fonction du nombre de cycles ») dans les pays anglo-saxons. Dans l'industrie et le génie civil, elle est d'un emploi courant pour estimer le degré d'endommagement lié à la fatigue des matériaux.[24]

III.2. Principe :

La courbe de Wöhler est le plus ancien diagramme qui permette de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans le domaine de fatigue. Cette courbe définit une relation entre la contrainte appliquée σ (sigma parfois notée S) et le nombre de cycles à la rupture NR (en fait nombre de cycles pour lesquels on observe P% de ruptures). En pratique, la courbe de Wöhler est généralement donnée pour une probabilité de rupture $P = 0,5$.

Pour la tracer, on réalise généralement des essais simples qui consistent à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude de chargement constante S_a fluctuant autour d'une valeur moyenne fixée et à noter le nombre de cycles au bout duquel l'amorçage d'une fissure est observé, appelé ici nombre de cycles à rupture NR ; ceci est fait pour plusieurs valeurs de l'amplitude alternée S_a et de R ; le rapport de charge R est le rapport de la contrainte minimum à la contrainte maximum du cycle périodique. Pour plus de commodité, ce nombre NR est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique, et l'amplitude de

contrainte S_a est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire ou logarithmique pour plusieurs valeurs de R . $R=-1$ correspond à un cycle symétrique alterné, $R=0$ correspond à un cycle répété, $R>0$ correspond à des contraintes ondulées. La décomposition du chargement (par la méthode de comptage rainflow) permet d'exprimer celui-ci en cycles simples caractérisés par une contrainte alternée S_a et un rapport de charge R . Ainsi, à chaque structure essayée, correspond donc un point du plan (NR, S_a) et à partir d'un certain nombre d'essais à contrainte généralement décroissante, on peut établir la courbe de Wöhler.[24]

III.3. Etude de courbe Wöhler :[25]

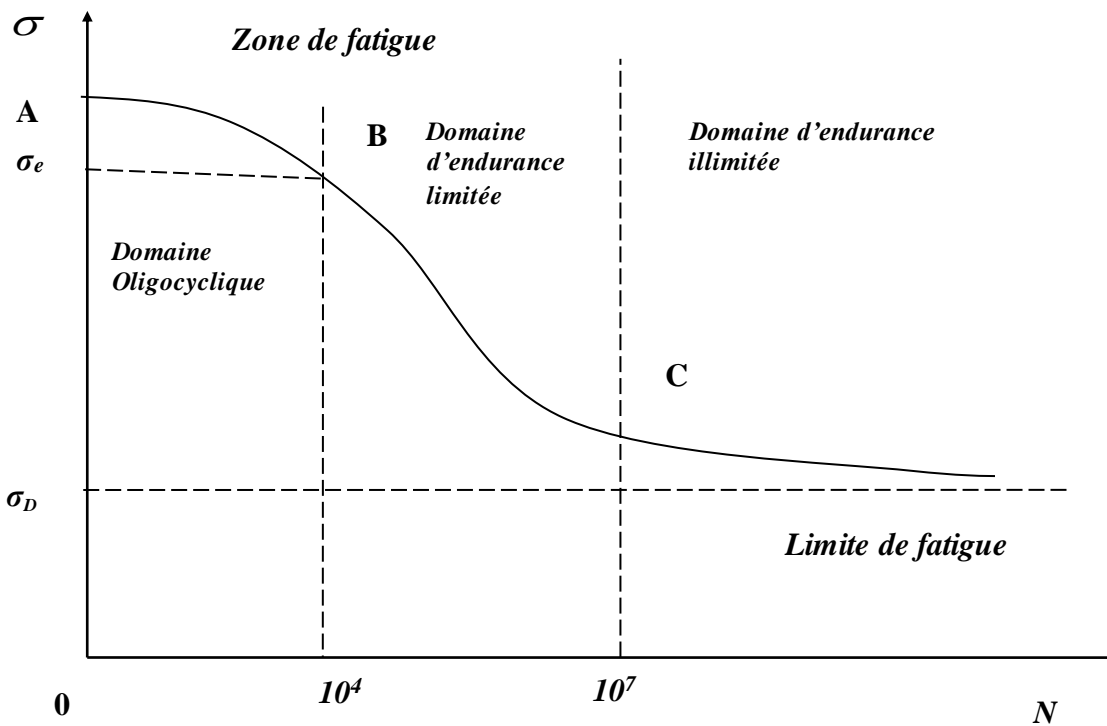


Figure 7. Courbe de Wöhler

On découpe généralement la courbe de Wöhler en trois zones dont les frontières sont assez floues.

III.3.1. Domaine de la fatigue oligocyclique :

La durée de vie la plus courte possible sur la courbe de fatigue est égale à un quart (**1/4**) de cycle lorsque la contrainte appliquée est égale à la contrainte maximale (**point A**) sur la **fig.7- de la courbe de Wöhler**. Lorsque les sollicitations se trouvent entre la contrainte maximale et la limite d'élasticité (**point B**), le matériau est sollicité en plasticité, et peut endurer un nombre de cycles de fatigue (de l'ordre de **10^4** à **10^5**), qui dépend de l'amplitude de la déformation plastique qui lui est imposée à chaque cycle. Dans ce régime, la durée de vie est fortement dépendante du comportement plastique du matériau.

Dans ce domaine on distingue deux comportements pour le matériau, lorsqu'on applique des cycles de traction-compression à contrainte imposée sur une éprouvette : l'accommodation et le rochet.

- L'accommodation plastique se produit lorsque la réponse de l'éprouvette devient périodique, un cycle d'hystérésis élastoplastique se produit comme le montre la fig. a.

- Le rochet se produit lorsque la réponse de l'éprouvette n'atteint jamais un état périodique. La déformation plastique croît sans cesse, ce qui provoque la ruine de la structure en un nombre de cycles relativement très faible comme le montre la fig. b.

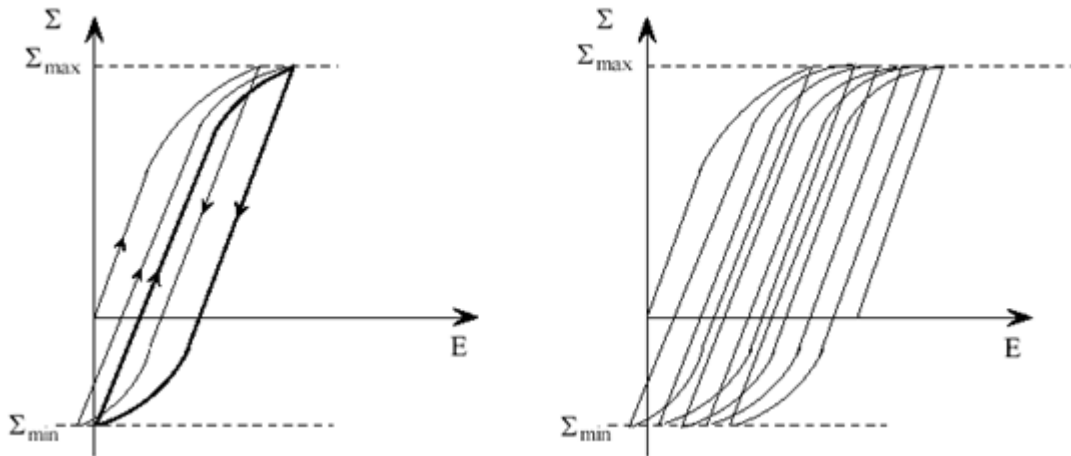


Figure 8. Accommodation et Rochet

Figure.a Accommodation

Figure.b Rochet

Dans cette zone, la rupture survient après un petit nombre d'alternance et est précédée d'une déformation plastique notable. Par suite de l'amplitude de la contrainte maximale, chaque cycle d'effort entraîne une déformation plastique provoquant soit un durcissement, soit un adoucissement du métal.

III.3.2. Domaine de la fatigue à endurance limitée :

Les sollicitations appliquées sont au-dessous de la limite d'élasticité, ou la rupture est atteinte après un nombre de cycles compris approximativement entre 10^4 et 10^6 (à 10^7). La rupture n'est pas accompagnée d'une déformation plastique d'ensemble mesurable. La réponse de l'éprouvette atteint dans ce cas un régime adapté élastique. L'adaptation élastique est un état où la réponse de l'éprouvette devient purement élastique. Il peut y avoir de la déformation plastique durant les premiers cycles. Mais au bout d'un certain nombre de cycles, à cause de l'effet d'écrouissage du matériau, elle reste constante, voir fig.9. c.

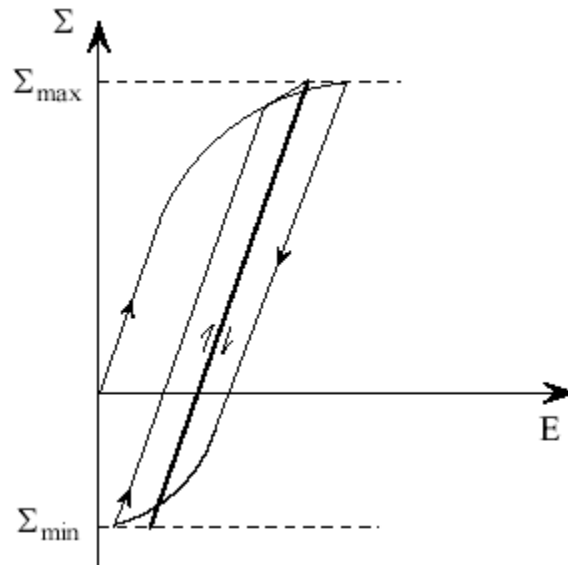


Figure 9.c.Adaptation

C'est le domaine dont travaillent la plupart des structures qui, pour diverses raisons, doivent avoir des masses et des volumes impérativement réduits (cas des structures aéronautiques ou automobiles ou nucléaires). Il existe de très nombreuses relations mathématiques reliant l'amplitude de la contrainte et le nombre de cycles à la rupture dans ce domaine, nous pouvons citer les formules suivantes :

- **Formule de Wöhler**

$$\sigma_a = a - b \log N \dots\dots\dots (III.3.a)$$

Avec $a > 0$ et $b > 0$

Cette relation ne décrit pas la totalité de la courbe de Wöhler puisque σ_a ne tend pas vers une limite σ_D lorsque $N \rightarrow \infty$. Elle ne représente que la partie BC.

- **Formule de Basquin**

$$\log N = a - b \log \sigma_a \dots\dots\dots(III.3.b)$$

Avec $a > 0$ et $b > 0$

Où

$$N\sigma_a^\beta = C \dots\dots\dots(III.3.c)$$

En posant $\beta = 1/b$ et $\ln C = a/\beta$

b est nommé index de la courbe de fatigue.

Dans l'expression de l'équation (III.3.c) : la contrainte tend vers zéro quand N tend vers l'infini. Cette relation n'est donc représentative de la courbe de Wöhler que dans sa partie BC. Par ailleurs, elle représente des droites dans des axes logarithmiques et non dans des axes semi-logarithmiques.

III.3.3. Domaine de la fatigue à endurance illimitée :

Dans ce domaine les charges appliquées sont inférieures à la limite d'élasticité, dans ce cas le matériau a un comportement purement élastique. A partir du point C, la courbe de fatigue tend vers une asymptote parallèle à l'axe des N , en dessous de cette valeur limite de la contrainte σ_D , il n'y a jamais rupture par fatigue quel que soit le nombre de cycles appliqué.

σ_D est nommée **limite de fatigue** ou **limite d'endurance**. Cette limite peut ne pas exister ou être mal définie pour certains matériaux (aciers à haute résistance, métaux non ferreux).

Il existe d'autres expressions analytiques qui peuvent présenter les courbes de Wöhler, dans les domaines d'endurance limitée ou illimitée lorsqu'elles sont connues pour un matériau ou une pièce donnée, à savoir :

- **Formule de Stromeyer**

$$\ln(\sigma_a - \sigma_D) = a - b \log N \dots\dots\dots(III.3.d)$$

Où

$$\sigma_a = \sigma_D \left(\frac{C}{N}\right)^{\frac{1}{b}} \dots\dots\dots(III.3.e)$$

Ici σ_a tend vers σ_D quand N tend vers l'infini.

- **Formule de Palmgreen**

$$\sigma_a = \sigma_D + \left(\frac{C}{A+N}\right)^{\frac{1}{b}} \dots\dots\dots \text{(III.3.f)}$$

Cette relation s'ajuste mieux aux courbes expérimentales que celle de Stromeier.

- **Formule de Weibull**

$$\frac{\sigma_a - \sigma_D}{R_m - \sigma_D} = \left(\frac{C}{A+N}\right)^{\frac{1}{b}} \dots\dots\dots \text{(III.3.g)}$$

- **Formule de Corson**

$$(\sigma_a - \sigma_D) A^{\sigma_a - \sigma_D} = \frac{C}{N} \dots\dots\dots \text{(III.3.h)}$$

- **Formule de Bastenaire**

$$(N + B)(\sigma_a - \sigma_D) e^{A(\sigma_a - \sigma_D)} = C \dots\dots\dots \text{(III.3.i)}$$

A, B, C, sont des constantes déterminées à partir des données expérimentales.

IV. MODELISATION DE LA COURBE DE WÖHLER

IV.1. Différents modèles de la courbe de Wöhler :

Il existe plusieurs modèles de courbe de Wöhler, dont voici quelques exemples :

IV.1.1. Le modèle de Goodman :

Ce modèle suppose que la contrainte maximale supportable par un matériau en fatigue est proportionnelle à la valeur moyenne de la contrainte appliquée. La

relation entre la contrainte maximale et le nombre de cycles de fatigue est donnée par

$$\sigma_{max} = (\sigma_m + \sigma_a)/F \dots \dots \dots (IV.1.a)$$

où σ_{max} est la contrainte maximale, σ_m est la contrainte moyenne, σ_a est l'amplitude de la contrainte, et F est un facteur de sécurité qui dépend du matériau et des conditions d'utilisation. Ce modèle est souvent utilisé pour les métaux.

IV.1.2. Le modèle de Gerber :

Ce modèle suppose que la contrainte maximale supportable par un matériau en fatigue est proportionnelle à la racine carrée de la valeur moyenne de la contrainte appliquée. La relation entre la contrainte maximale et le nombre de cycles de fatigue est donnée par :

$$\sigma_{max} = (\sigma_m + K_f \times \sigma_a)/K_f^2 \dots \dots \dots (IV.1.b)$$

où σ_{max} est la contrainte maximale, σ_m est la contrainte moyenne, σ_a est l'amplitude de la contrainte, et K_f est un facteur de fatigue qui dépend du matériau et des conditions d'utilisation. Ce modèle est souvent utilisé pour les matériaux composites.

IV.1.3. Le modèle de Coffin-Manson :

Ce modèle suppose que le nombre de cycles de fatigue nécessaire pour rompre un matériau est inversement proportionnel à l'amplitude de la contrainte appliquée à une certaine puissance. La relation entre le nombre de cycles de fatigue et l'amplitude de la contrainte est donnée par :

$$N = C/(\sigma_a)^m \dots \dots \dots (IV.1.c)$$

Où N est le nombre de cycles de fatigue, σ_a est l'amplitude de la contrainte, et C et m sont des constantes qui dépendent du matériau et des conditions d'utilisation. Ce modèle est souvent utilisé pour les plastiques et les métaux ductiles.

- Fatigue Design Handbook, 2nd Edition, edited by R. S. Maddox and S. R. Swanson, Society of Automotive Engineers, 1997.

- Mechanical Design of Machine Elements and Machines : A Failure Prevention Perspective, by J. E. Shigley and C. R. Mischke, Prentice-Hall, 1996.

CHAPTER 2 :
DIFFERENTES LOIS DE
PROBABILITE UTILISES EN
FIABILITE

I.INTRODUCTION

La fiabilité est un concept important dans le domaine de la mécanique. Elle consiste en la capacité d'un système mécanique à fonctionner de manière fiable, sans défaillance, pendant une certaine période de temps. La fiabilité est un aspect important à prendre en compte lors de la conception et de l'optimisation des systèmes mécaniques, car elle a des implications importantes en termes de coûts, de sécurité et de performance. Dans cette étude, nous allons examiner les objectifs et les intérêts de la fiabilité en mécanique, ainsi que les différentes techniques et méthodes utilisées pour évaluer et améliorer la fiabilité des systèmes mécaniques.

I.1.définition de la fiabilité en mécanique :

La fiabilité est la probabilité qu'un système mécanique ou un composant fonctionne correctement et sans défaillance pendant une période de temps donnée dans des conditions spécifiées.[27]

L'importance de la fiabilité en mécanique est souvent soulignée dans la littérature d'ingénierie mécanique. Les ingénieurs mécaniques doivent être en mesure de concevoir des systèmes mécaniques fiables qui peuvent fonctionner en toute sécurité et de manière fiable pendant de longues périodes de temps. Ils utilisent des méthodes de conception robustes et des tests rigoureux pour garantir la fiabilité de ces systèmes.[28]

I.2. Objectifs et intérêts de la fiabilité en mécanique :[29]

- Assurer la disponibilité optimale des systèmes mécaniques.
- Minimiser les coûts associés à la maintenance des systèmes mécaniques.
- Réduire le risque de défaillance des systèmes mécaniques.
- Maximiser la productivité des équipements mécaniques en augmentant leur temps de fonctionnement.
- Garantir la sécurité des opérateurs et des utilisateurs en minimisant les risques de défaillance des équipements.

- Réduire les temps d'arrêt imprévus pour les équipements mécaniques.
- Assurer le fonctionnement fiable et efficace des équipements mécaniques dans des conditions extrêmes.
- Garantir la disponibilité, la sécurité et la durabilité des équipements mécaniques.
- Minimiser les risques de défaillance des équipements mécaniques.

II. LES LOIS DE PROBABILITES UTILISEES EN FIABILITE

II.1. Lois discrètes : [30][31]

Les lois de probabilités discrètes sont utilisées pour modéliser les événements qui peuvent prendre un nombre fini ou dénombrable de valeurs distinctes. Dans le domaine de la fiabilité, les lois de probabilités discrètes sont souvent utilisées pour modéliser le nombre d'échecs ou le temps de défaillance d'un composant ou d'un système.

Exemples de lois de probabilités discrètes utilisées en fiabilité :

II.1.1. Loi de Poisson :

La loi de Poisson est une loi de probabilité discrète qui est utilisée pour modéliser le nombre d'événements se produisant dans un intervalle de temps donné, lorsque ces événements se produisent de manière aléatoire et indépendante. Elle est souvent utilisée pour modéliser le nombre d'échecs dans un système donné sur une période de temps donnée.

L'équation de la loi de Poisson est donnée par :

$$P(X = k) = \frac{(\lambda^k e^{-\lambda})}{k!}$$

Où :

- X est une variable aléatoire discrète qui représente le nombre d'événements qui se produisent dans un intervalle de temps donné.
- λ est la moyenne du nombre d'événements qui se produisent dans un intervalle de temps donné.
- k est le nombre d'événements qui se produisent dans un intervalle de temps donné.

II.1.2. Loi binomiale :

La loi binomiale est une loi de probabilité discrète qui est utilisée pour modéliser le nombre de succès dans un nombre fixe d'essais indépendants, où chaque essai a une probabilité de succès fixe. Elle est souvent utilisée pour modéliser le nombre de composants qui fonctionnent correctement dans un système donné.

L'équation de la loi binomiale est donnée par :

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{(n-k)}$$

Où :

- X est une variable aléatoire discrète qui représente le nombre de succès dans n essais indépendants.
- n est le nombre total d'essais.
- k est le nombre de succès dans n essais.
- p est la probabilité de succès dans chaque essai.

II.1.3. Loi de Bernoulli :

La loi de Bernoulli est une loi de probabilité discrète qui est utilisée pour modéliser un essai aléatoire avec deux résultats possibles, généralement appelés succès et échec. Elle est souvent utilisée pour modéliser des événements binaires tels que la réussite ou l'échec d'un test.

L'équation de la loi de Bernoulli est donnée par :

$$P(X = 1) = p$$
$$P(X = 0) = 1 - p$$

Où :

- X est une variable aléatoire discrète qui représente le résultat de l'essai aléatoire (1 pour succès, 0 pour échec).
- p est la probabilité de succès de l'essai.

II.2. Les lois continues :[32][33]

Les lois de probabilités continues sont utilisées pour modéliser les événements qui prennent des valeurs continues, c'est-à-dire des valeurs qui peuvent prendre n'importe quelle valeur dans un intervalle donné. Dans le domaine de la fiabilité, les lois de probabilités continues sont souvent utilisées pour modéliser le temps de défaillance d'un composant ou d'un système.

Exemples de lois de probabilités continues utilisées en fiabilité :

II.2.1. Loi normale :

La loi normale, également appelée **loi de Gauss** ou courbe en cloche, est une loi de probabilité continue qui est utilisée pour modéliser des phénomènes naturels tels que la distribution des tailles, des poids et des scores de tests dans une population. Elle est souvent utilisée en statistiques pour modéliser la distribution de données.

L'équation de la loi normale est donnée par :

$$f(x) = \left(\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}\right) e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Où :

- $f(x)$ est la densité de probabilité de la loi normale.
- μ est la moyenne de la distribution normale.
- σ est l'écart type de la distribution normale.
- x est la variable aléatoire continue.

II.2.2. Loi exponentielle :

La loi exponentielle est une loi de probabilité continue qui est utilisée pour modéliser le temps entre deux événements aléatoires et indépendants. Elle est souvent utilisée pour modéliser le temps de défaillance des composants.

L'équation de la loi exponentielle est donnée par :

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

Où :

- $f(x)$ est la densité de probabilité pour le temps de défaillance.
- λ est la moyenne de la distribution exponentielle.
- x est le temps de défaillance.

III. ETUDE DE LA LOI DE WEI BULL

III.1. Introduction

La loi de Weibull est une distribution de probabilité **continue** largement utilisée pour modéliser les temps de défaillance des systèmes ou des composants. Cette distribution a été introduite en 1951 par Waloddi Weibull, un mathématicien suédois. Depuis lors, cette distribution a été largement utilisée dans de nombreux domaines, notamment en ingénierie de la fiabilité, en économie, en finance, en prévision météorologique, en biologie, en physique et dans d'autres domaines.[34]

III.2. Les paramètres de la loi de Weibull :

La loi de Weibull est caractérisée par deux paramètres :

le paramètre d'échelle (μ) et le paramètre de forme (β). Le paramètre d'échelle est lié à la durée de vie caractéristique du matériau et le paramètre de forme est lié à la forme de la distribution. La valeur de α détermine la pente de la courbe de distribution et influence donc la fiabilité du système [35].

Plusieurs approches peuvent être utilisées pour interpréter ces paramètres. Par exemple :

si $\beta < 1$, cela implique que le taux de défaillance diminue avec le temps.

si $\beta = 1$, la loi de Weibull se réduit à une distribution exponentielle, ce qui signifie que le taux de défaillance est constant au fil du temps.

si $\beta > 1$, cela signifie que le taux de défaillance augmente avec le temps [36].

III.2. Estimation des paramètres de la loi de Weibull :

L'estimation des paramètres de la loi de Weibull peut être effectuée en utilisant des méthodes statistiques telles que la méthode des moments et la méthode du maximum de vraisemblance.

La méthode des moments implique l'égalisation des moments empiriques de la distribution aux moments théoriques.

La méthode du maximum de vraisemblance, en revanche, consiste à trouver les paramètres qui maximisent la vraisemblance de la distribution pour les données

observées. La méthode du maximum de vraisemblance est généralement considérée comme étant plus efficace pour l'estimation des paramètres de la loi de Weibull [37].

Une fois que les paramètres α et β ont été estimés, ils peuvent être utilisés pour calculer la probabilité de défaillance et la fiabilité du système. La fiabilité est définie comme la probabilité qu'un système fonctionne sans défaillance pendant une période de temps donnée [38].

III.3. Fonction de densité de probabilité :

La fonction de densité de probabilité (PDF) de la loi de Weibull est donnée par l'équation suivante :

$$f(x) = \left(\frac{\beta}{\mu}\right) \left(\frac{x - \gamma}{\mu}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\mu}\right)} \quad x \geq \gamma$$

où :

β est le paramètre de forme ($\beta > 0$)

μ est le paramètre d'échelle ($\mu > 0$)

γ est le paramètre de position ($\gamma \geq 0$).

III.4. Fonction de distribution cumulative :

La fonction de distribution cumulative (CDF) de la loi de Weibull est donnée par l'équation suivante :

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\mu}\right)^\beta\right)$$

III.5. Fonction de fiabilité :

La fonction de fiabilité (ou fonction de survie) de la loi de Weibull est donnée par l'équation suivante :

$$R(x) = \exp\left(-\left(\frac{x}{\mu}\right)^\beta\right)$$

III.6. Fonction de risque :[39]

La fonction de risque de la loi de Weibull est la fonction qui décrit la probabilité instantanée de défaillance à un moment donné t , étant donné que l'élément a déjà fonctionné pendant une certaine durée x . Elle est donnée par l'équation suivante :

$$h(t|x) = \left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \left(\frac{t}{\mu}\right)^{\beta-1}$$

où :

t est le temps, β est le paramètre de forme et μ est le paramètre d'échelle. Cette équation montre que la fonction de risque augmente avec le temps pour $\beta > 1$, atteint un maximum puis diminue. Pour $\beta = 1$, la fonction de risque est constante dans le temps.

III.7. Application de la loi de Weibull :

La loi de Weibull est largement utilisée dans les domaines de la fiabilité, de la durabilité et de la sécurité des matériaux. Elle est souvent utilisée pour modéliser la

durée de vie de produits manufacturés, tels que les composants électroniques, les véhicules, les machines-outils, les avions, etc. Elle est également utilisée pour modéliser la survie des patients atteints de maladies chroniques, tels que le cancer, le diabète, etc. [40].

En utilisant la loi de Weibull, il est possible de prédire la durée de vie restante d'un produit ou d'un système, ainsi que la probabilité de défaillance à tout moment donné. Cette information est utile pour les entreprises et les organismes gouvernementaux qui cherchent à améliorer la qualité et la durabilité de leurs produits et services.

III.8. Ajustement d'un modèle de Weibull :

La loi de Weibull est une loi de probabilité largement utilisée pour modéliser les temps de défaillance dans l'analyse de fiabilité. Cette loi est souvent utilisée pour modéliser des phénomènes qui ont une forte probabilité de défaillance initiale (défaillance prématurée) ou une forte probabilité de défaillance à un stade ultérieur (vieillesse accélérée).

Pour ajuster un modèle de Weibull aux données expérimentales, vous devez suivre les étapes suivantes :

- **Collecte de données :** vous devez collecter les données de durée de vie de l'échantillon de pipeline " ALFAPIPE Ghardaïa " à partir des essais de fatigue réalisés. Ces données doivent être sous forme de temps de défaillance ou de nombre de cycles jusqu'à la défaillance.
- **Tracé du diagramme de Weibull :** vous devez tracer le diagramme de Weibull qui est un graphique log-log de la fonction de distribution de probabilité de Weibull contre le logarithme du temps de défaillance ou du nombre de cycles.

- **Estimation des paramètres** : à partir du diagramme de Weibull, vous pouvez estimer les deux paramètres de la loi de Weibull (le paramètre de forme γ et le paramètre d'échelle β) en utilisant des techniques d'ajustement de courbe statistique.
- **Vérification de l'adéquation** : après l'estimation des paramètres, vous devez vérifier si la loi de Weibull ajustée correspond bien aux données expérimentales. Vous pouvez utiliser des graphiques de probabilité normale pour vérifier l'adéquation de la loi de Weibull ajustée aux données expérimentales.
- **Analyse des résultats** : enfin, vous pouvez utiliser les paramètres ajustés de la loi de Weibull pour calculer la probabilité de défaillance et la durée de vie prévisible du pipeline "ALFAPIPE Ghardaïa". Vous pouvez également utiliser ces résultats pour l'analyse de fiabilité et l'optimisation de la conception.

CHAPITRE 3 :
ÉTUDE PROBABILISTE DE LA
DURE DE VIE

I.1.Introduction

L'étude de la durée de vie est une discipline qui vise à analyser et comprendre la durée de fonctionnement ou de survie d'un système, d'un produit ou d'un composant. Elle joue un rôle essentiel dans divers domaines, tels que l'ingénierie, la fiabilité, la gestion des actifs et la planification de la maintenance.

Pour étudier la durée de vie, une approche probabiliste est largement utilisée afin de prendre en compte les incertitudes et la variabilité des données observées. Dans ce contexte, les lois de probabilité sont utilisées pour modéliser le comportement de la durée de vie d'un système.

I.2.Justification du choix de la loi de Weibull :

Le choix de la loi de Weibull comme modèle probabiliste pour étudier la durée de vie des pipelines de transport de gaz et de pétrole peut être justifié pour plusieurs raisons :

1. **Flexibilité** : La loi de Weibull offre une grande flexibilité pour modéliser différents comportements de durée de vie. Elle peut représenter des courbes de survie croissantes, décroissantes ou constantes, ce qui est pertinent pour les pipelines dont la durée de vie peut varier en fonction de nombreux facteurs tels que la qualité du matériau, les conditions d'utilisation, l'entretien, etc.
2. **Adaptabilité aux données réelles** : La loi de Weibull est souvent utilisée dans le domaine de la fiabilité et de la durée de vie, et de nombreuses études ont montré son adéquation avec des données réelles dans diverses applications industrielles. Elle peut donc fournir une bonne approximation de la distribution de la durée de vie des pipelines.
3. **Compatibilité avec les phénomènes de fatigue** : Les pipelines sont soumis à des contraintes cycliques dues à la pression, aux variations de température, aux vibrations, etc. La loi de Weibull est bien adaptée pour modéliser les phénomènes de fatigue, car elle permet de représenter la distribution des cycles de rupture et de prédire la probabilité de rupture à un certain nombre de cycles.
4. **Disponibilité des méthodes d'estimation des paramètres** : Il existe des méthodes statistiques bien établies pour estimer les paramètres de la loi de Weibull à partir de données expérimentales. Ces méthodes permettent d'obtenir des estimations fiables des paramètres β et γ à partir d'un échantillon de données de durée de vie.

I.3.Analyse fiabiliste de la rupture par fatigue :

Étant donné que notre étude nécessitait une base de données conséquente, nous avons initialement prévu de tester un ensemble de 50 éprouvettes afin d'obtenir une estimation précise des paramètres. Malheureusement, en raison de contraintes de disponibilité, nous

n'avons pas pu obtenir suffisamment d'éprouvettes pour mener cette étude de manière traditionnelle. Cependant, afin de progresser dans notre analyse, nous avons opté pour une approche utilisant des données aléatoires générées à l'aide d'Excel. Nous avons ainsi généré des nombres de cycles à la rupture par fatigue variant entre 40 000 et 500 000, répartis de manière aléatoire sur les 50 éprouvettes disponibles. Par la suite, nous avons choisi la loi de Weibull comme modèle probabiliste.

numéro de l'éprouvette	Nombre de cycles à la rupture	$P_f=(i-0.5) / N$	"x"ln(t)	"y"ln(ln(1/(1-F)))
1	41310	0,01	10,62885988	-4,600149227
2	61003	0,03	11,01867832	-3,49136695
3	74875	0,05	11,22357534	-2,970195249
4	82934	0,07	11,32580039	-2,623194119
5	85736	0,09	11,35902809	-2,361160846
6	94242	0,11	11,45362122	-2,14957378
7	94274	0,13	11,45396071	-1,971397744
8	97222	0,15	11,4847523	-1,816960795
9	98509	0,17	11,49790319	-1,680238248
10	105015	0,19	11,56185848	-1,557220147
11	106606	0,21	11,57689507	-1,44510072
12	113260	0,23	11,63744134	-1,341838284
13	124475	0,25	11,73186017	-1,245899324
14	138559	0,27	11,83905151	-1,156101332
15	154550	0,29	11,94827295	-1,071511917
16	182343	0,31	12,11364481	-0,991381583
17	185297	0,33	12,12971522	-0,915097528
18	191523	0,35	12,16276318	-0,842150991
19	200093	0,37	12,20653754	-0,772113638
20	204157	0,39	12,22664458	-0,7046201
21	208369	0,41	12,24706583	-0,639354802
22	239160	0,43	12,38488806	-0,576041853
23	246668	0,45	12,41579858	-0,514437136
24	254495	0,47	12,44703647	-0,454321995
25	254544	0,49	12,44722899	-0,395498114
26	258833	0,51	12,46393835	-0,337783253
27	263972	0,53	12,48359832	-0,281007617
28	283302	0,55	12,55426875	-0,225010673

29	287595	0,57	12,56930852	-0,169638247
30	288934	0,59	12,57395357	-0,114739787
31	301247	0,61	12,61568581	-0,060165654
32	311804	0,63	12,65013006	-0,005764308
33	330838	0,65	12,70938411	0,048620745
34	335425	0,67	12,72315366	0,103154446
35	339173	0,69	12,73426558	0,158014333
36	342313	0,71	12,7434808	0,21339568
37	342331	0,73	12,74353338	0,269518092
38	356046	0,75	12,78281521	0,32663426
39	361251	0,77	12,79732829	0,385041948
40	380118	0,79	12,84823701	0,445100958
41	382615	0,81	12,85478454	0,507257991
42	388982	0,83	12,87128835	0,572084496
43	404924	0,85	12,91145467	0,640336939
44	406770	0,87	12,91600319	0,713058051
45	408402	0,89	12,92000726	0,791758684
46	414400	0,91	12,93458697	0,878773939
47	422727	0,93	12,95448186	0,978047902
48	423902	0,95	12,95725758	1,0971887
49	424915	0,97	12,95964443	1,2546349
50	486543	0,99	13,09508056	1,527179626

Tableau 1. Nombre de cycles à la rupture

I.4. Identification des paramètres (β , γ , μ) :

Après avoir réalisé une analyse graphique dans la section consacrée aux probabilités (chapiter 2), nous avons pu déterminer les paramètres (β , γ , μ) de la distribution Weibull. L'ajustement graphique implique une transformation de variables qui permet de ramener l'ajustement à une simple régression linéaire. C'est précisément cette propriété de la loi de Weibull qui nous a permis de procéder à cette étape d'ajustement graphique et d'obtenir les paramètres nécessaires à notre étude.

$$\ln \ln \left(\frac{1}{[1 - F(t)]} \right) = \beta \ln(t - \gamma) - \beta \ln \mu$$

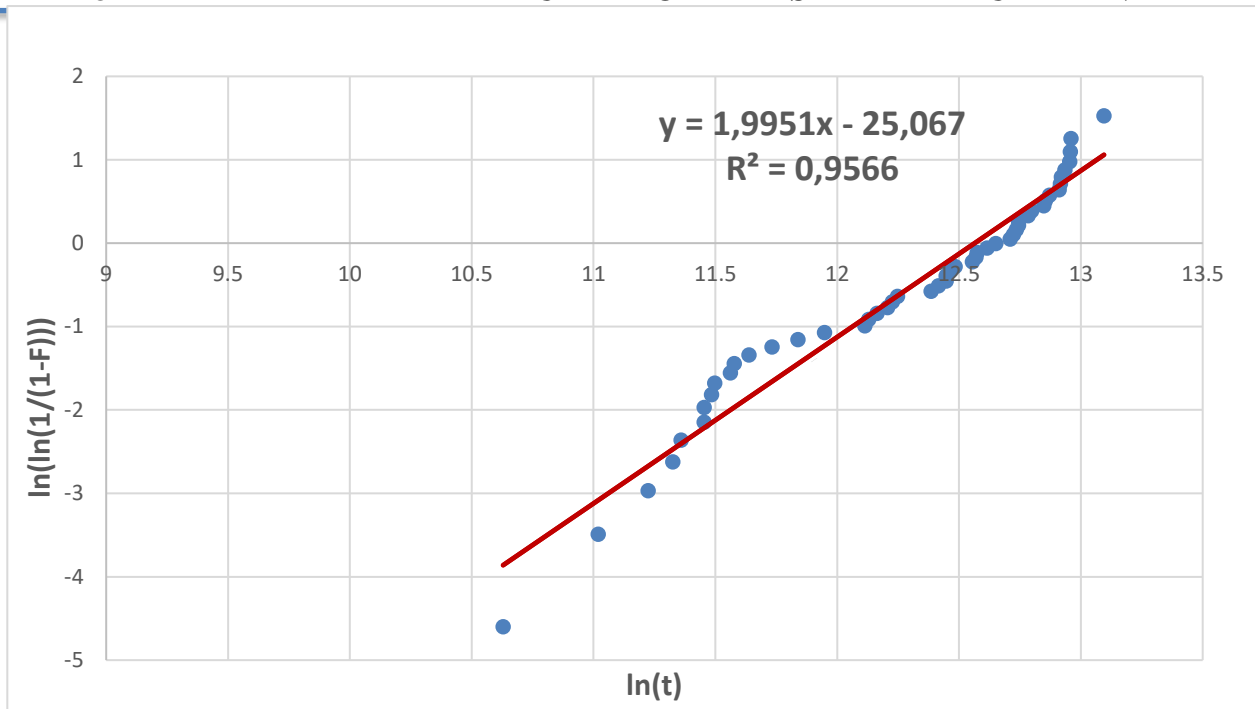


Figure 10. Fonction de la densité de probabilité

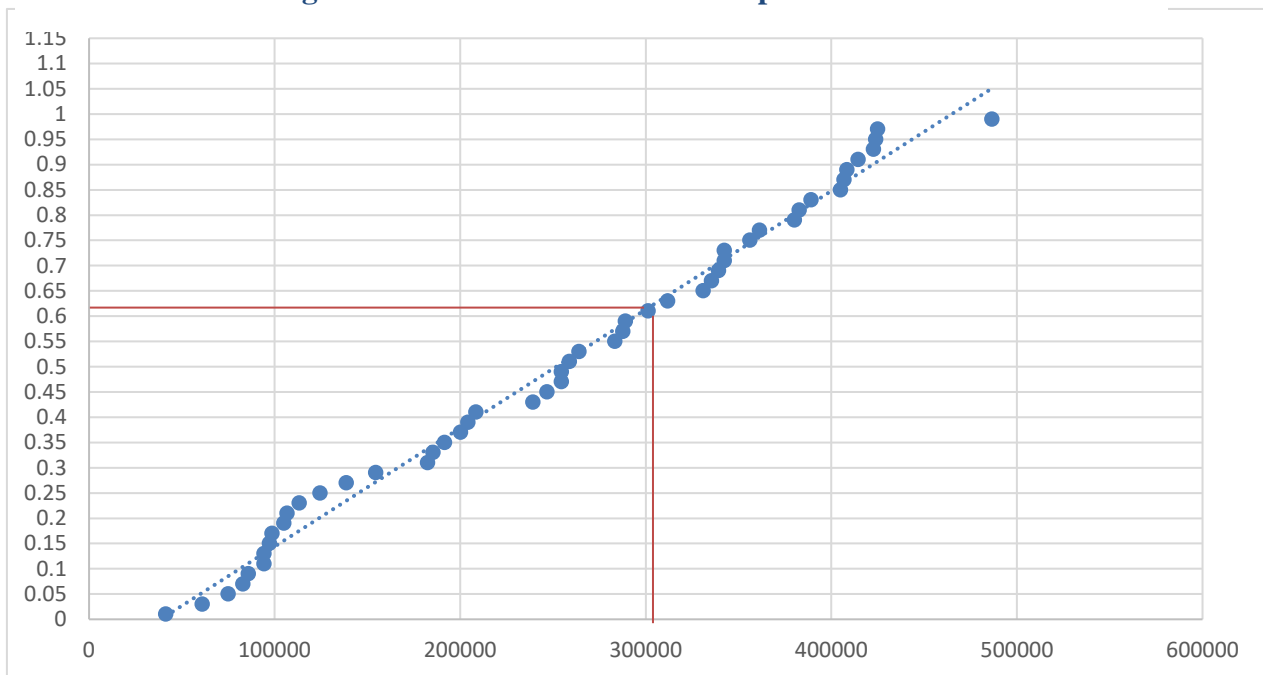


Figure 11. courbe cumulative Pf en fonction nombre de cycles

La pente de la droite est b , et la droite coupe l'axe des abscisses à la valeur $\ln(t)$ (**fig.10**).
L'origine nulle de l'axe des ordonnées correspond à nouveau au quantile caractéristique de 63 % :

$$\ln \ln \left(\frac{1}{[1 - F(t)]} \right) = 0 \Rightarrow F(t) = 1 - \frac{1}{e} = 0.632$$

À partir les 2 courbes, on détermine les paramètres (β , γ , μ) :

β	γ	μ
1,9951	0	311804

Tableau 2.les paramètres de loi de weibull

$\gamma = 0$ lorsque les points de coordonnées (t_i ; $F(t_i)$) sont alignés.

I.5. Analyse des courbes :

Une fois les paramètres de la distribution de Weibull déterminés, nous sommes en mesure de tracer les courbes de fiabilité, de taux de défaillance et de fonction de défaillance en utilisant les fonctions définies dans le deuxième chapitre. Les résultats obtenus présentent une logique cohérente : la courbe de fiabilité diminue à mesure que le nombre de cycles augmente, ce qui est attendu puisque la probabilité de défaillance augmente avec le temps. De même, le taux de défaillance augmente de manière significative à mesure que le nombre de cycles augmente, reflétant une probabilité accrue de défaillance du système. Cette observation confirme la tendance générale que l'on s'attend à observer dans le contexte de l'étude de la durée de vie des composants.

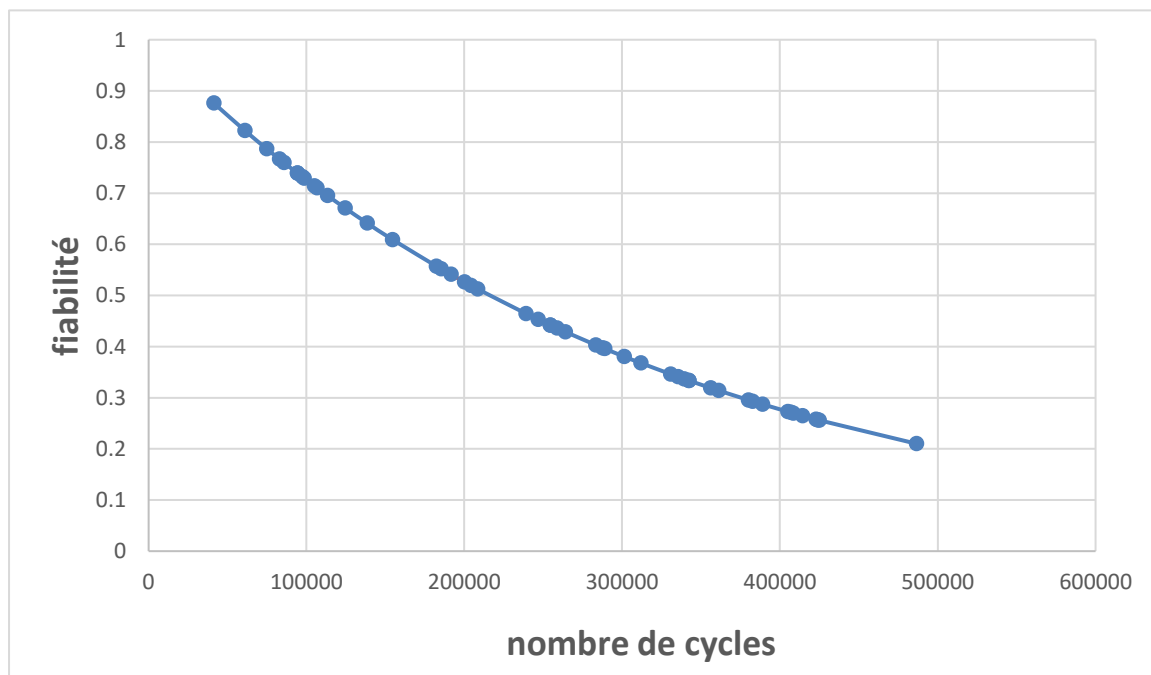


Figure 12.Fonction de fiabilité.

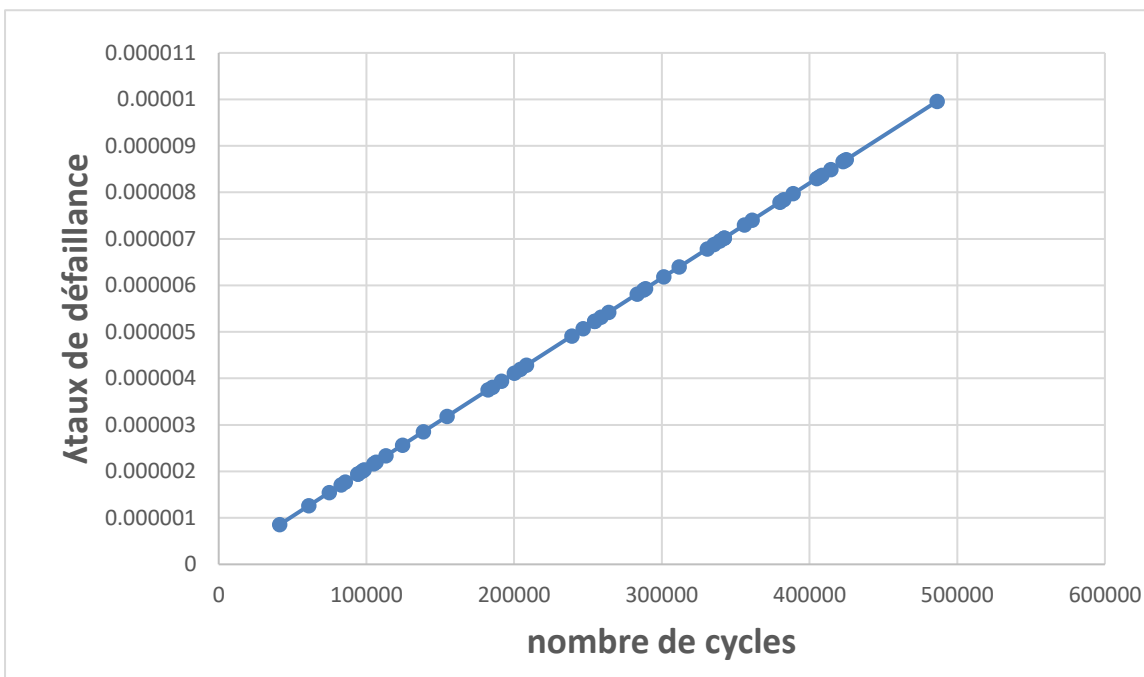


Figure 13. Fonction de taux de défaillance

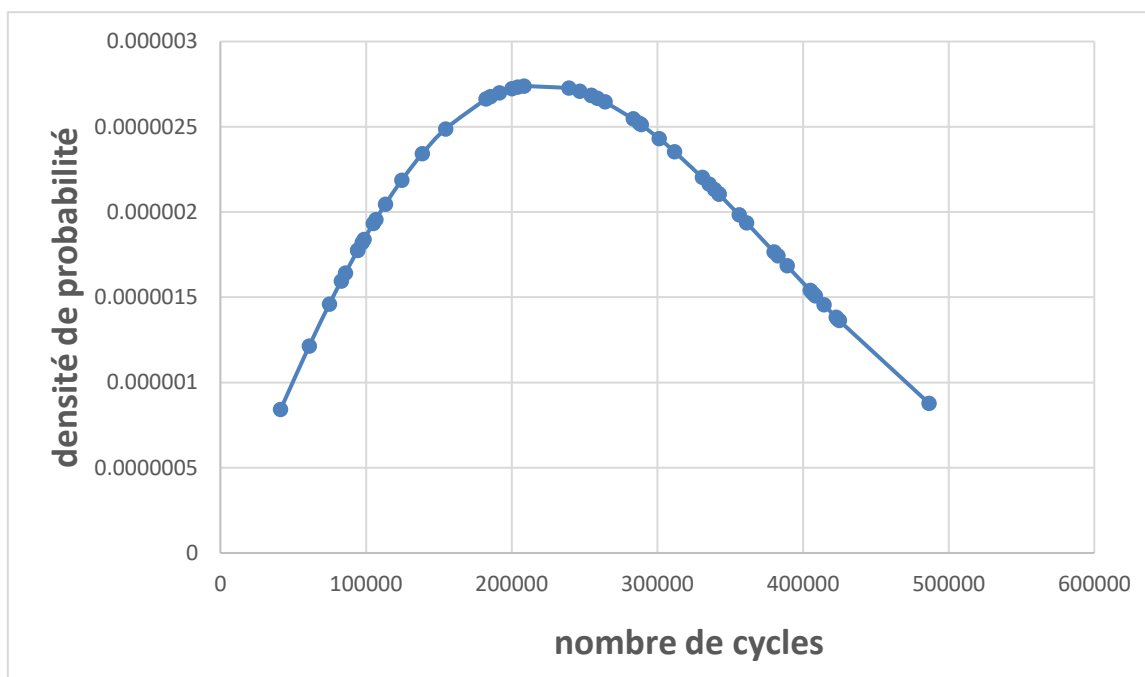


Figure 14. Fonction de la densité

CHAPITRE 4 : ETUDE EXPERIMENTALE

I.Introduction

L'industrie du transport de gaz, de pétrole et d'eau repose sur des pipelines en acier pour assurer un transfert sécurisé et efficace de ces ressources essentielles. La qualité et les propriétés du matériau utilisé dans la fabrication des pipelines revêtent une importance capitale pour garantir la fiabilité et la durabilité de ces infrastructures cruciales. Dans cette étude, nous nous concentrons sur le matériau **acier X70**, largement utilisé dans l'industrie des pipelines en raison de ses propriétés mécaniques exceptionnelles.

Nous avons réalisé une série d'essais mécaniques sur des éprouvettes de pipeline en acier X70 afin de caractériser les propriétés mécaniques et d'évaluer la résistance à la rupture de ce matériau dans des conditions représentatives de l'industrie. Ces essais ont été effectués au sein de l'entreprise **ALFAPIPE**, située dans l'état de Ghardaïa, connue pour son expertise dans la fabrication et les tests de pipelines.

II.Caractérisation du Matériau

II.1. Composition chimique (Essai d'Analyse Chimique)

L'une des premières étapes pour caractériser le matériau acier X70 est l'analyse chimique, qui permet de déterminer la composition précise de l'acier. Cette analyse est essentielle pour garantir la conformité du matériau aux spécifications requises pour les pipelines. Nous avons réalisé un essai d'analyse chimique pour déterminer les pourcentages en poids des différents composants de l'acier X70. Les résultats de cet essai sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Composant	Carbon e (C)	Silicium (Si)	Manganè se (Mn)	Phospho re (P)	Soufre (S)	Azote (N)
Pourcentage en poids	0.120	0.450	1.700	0.025	0.015	0.012
Composant	Vanadiu m (V)	Niobium (Nb)	Titane (Ti)	Cuivre (Cu)	Nickel (Ni)	Chrome (Cr)
Pourcentage en poids	0.10	0.06	0.060	0.250	0.30	0.30
Composant	Bore (B)	Calcium (Ca)	Molybdè ne (Mo)	Étain (Sn)	Nb+V+Ti	Cu+Cr+Ni +Mo
Pourcentage en poids	0.0005	0.006	0.10	0.010	0.150	0.500
Composant	CEpcm					
Pourcentage en poids	0.20					

Tableau 3. Composition chimique de l'acier X70

II.2. Les propriétés mécaniques de l'acier X70

2.1. Résistance à la traction (Rm) : L'acier X70 a généralement une résistance à la traction ultime d'environ **570 à 750 MPa**.

2.2. Limite d'élasticité (Re) : La limite d'élasticité de l'acier X70 est typiquement d'environ **485 à 620 MPa**.

2.3. Le pourcentage d'allongement après la rupture (A%) : l'acier X70 peuvent présenter un pourcentage d'allongement après rupture d'environ **A ≥ 18%**.

2.4. Dureté Vickers (HV 10) : L'acier X70 a généralement une dureté **250 HV10**,

Et entre metal de base et la soudure **60 HV 10**.

III. Résistance à la rupture

III.1. Essais de traction :

L'essai de traction est essentiel pour évaluer les propriétés mécaniques d'un matériau, telles que la limite d'élasticité, la résistance à la traction et l'allongement à la rupture. Dans cette étude, nous avons effectué des essais de traction sur deux éprouvettes de pipeline en acier conformément aux normes **ASTM A370**.

a) préparation de l'éprouvette :

Les éprouvettes de pipeline ont été préparées en suivant les spécifications des normes ASTM A370. Les dimensions des éprouvettes ont été mesurées avec précision et les surfaces ont été soigneusement préparées pour éliminer toute imperfection qui pourrait influencer les résultats des essais.

Les deux éprouvettes ont les mêmes dimensions, ils ne diffèrent que par leur épaisseur (**12.82mm et 20mm**).

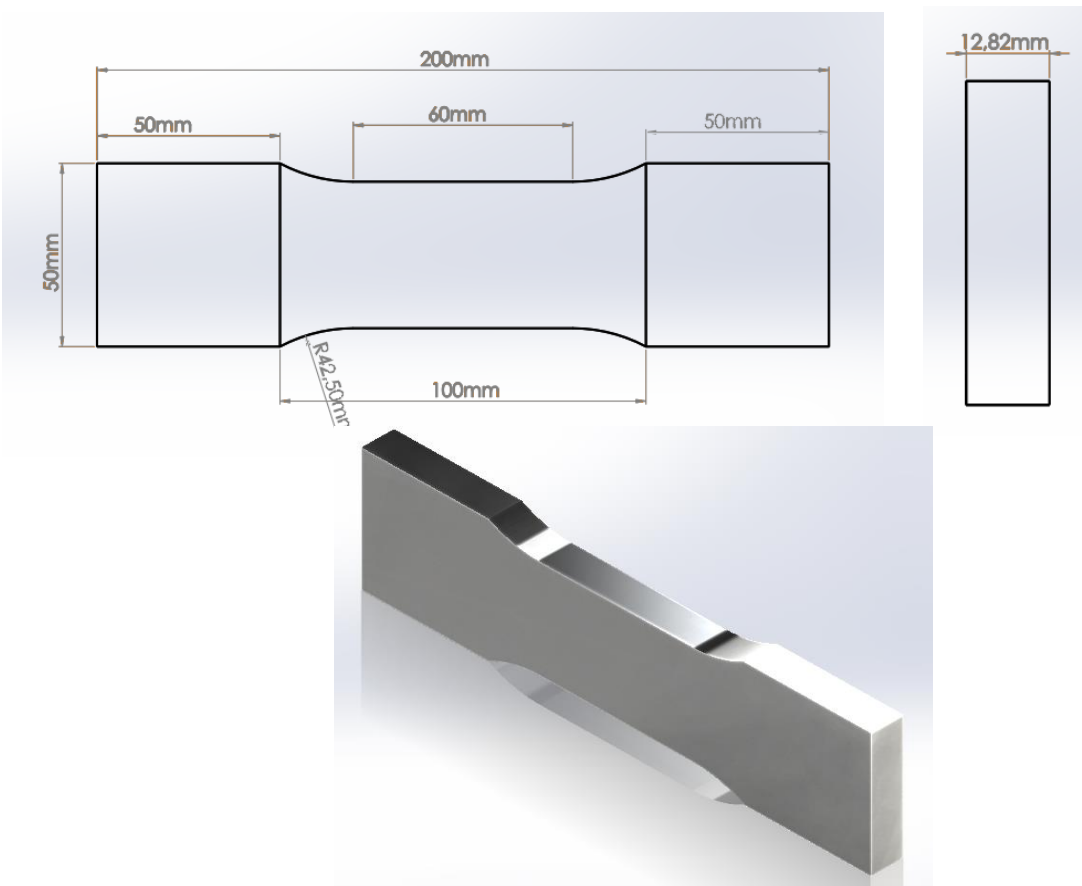


Figure15.Géométrie de l'éprouvette 1
(épaisseur 12.82mm)

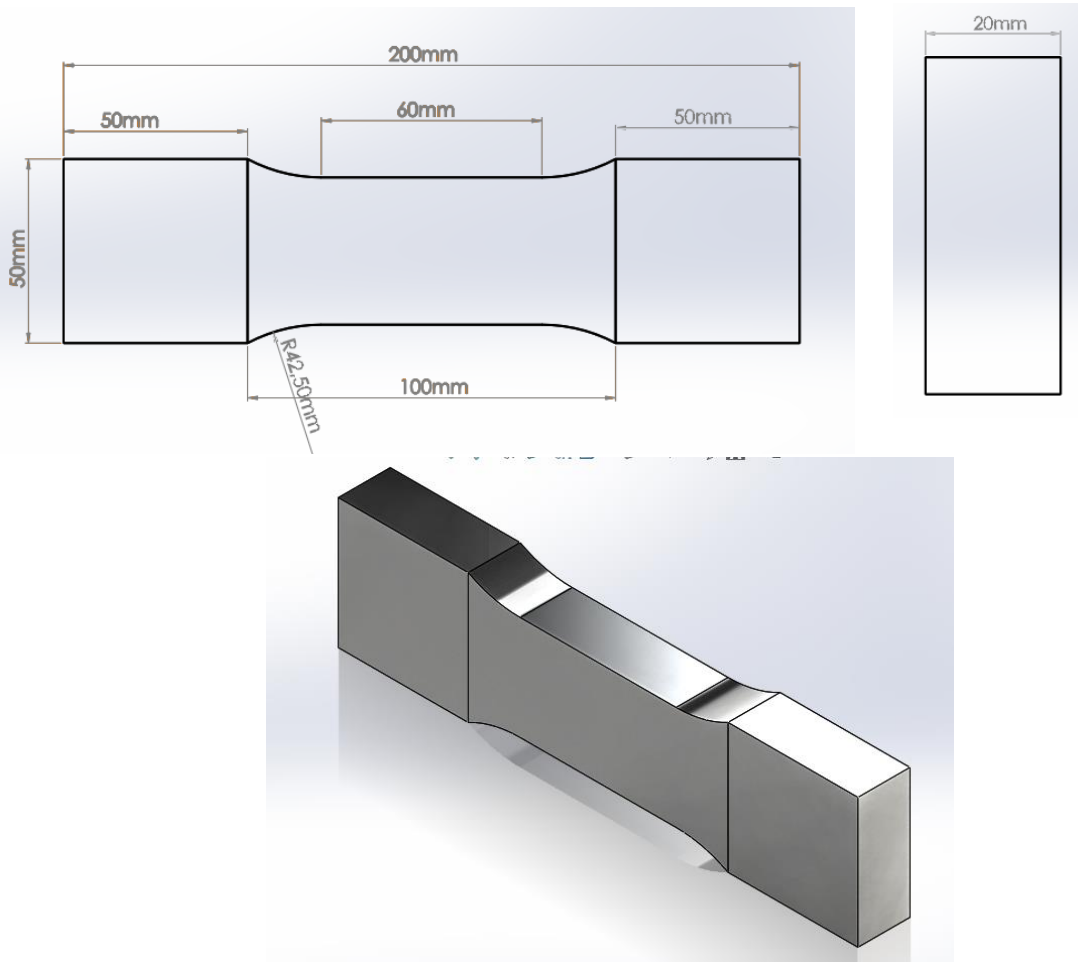


Figure16.Géométrie de l'éprouvette 2 (épaisseur 20mm)

b) Méthode de réalisation de l'essai :

L'essai de traction a été réalisé à l'aide d'une machine d'essai universelle conforme aux normes ASTM. Les éprouvettes ont été fixées dans la machine et une charge axiale croissante a été appliquée jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Pendant l'essai, les paramètres tels que la limite d'élasticité et la résistance à la traction ont été enregistrés. L'allongement à la rupture a été mesuré à l'aide d'un extensomètre.

- Essais de traction que nous avons fait sur Metalde base.
- La machine d'essai de traction utilisé **MOHR** de capacité Max 600 KN Les résultats sont donnés par le logiciel **TEXSPERT** sous forme :

✓ Tableau : les caractéristiques mécaniques de métal de base.

✓ La courbe rationnelle de traction pour le métal de base.

Essai de traction			
Essais	Éprouvette		
Traction	1 métal de base	MIN	MAX
$E_{0.5}$	Selon la norme API5L	485 MPa	635 MPa
R_m		570 MPa	760 MPa
$E_{0.5}/R$		0.79 %	0.90 %
A%		22%	-
Traction sur soudure	1 Cordon de soudure		
TS		570 MPa	760 MPa

Tableau 4.La norme API 5L PSL2

c) Résultats de l'essai de traction :

Éprouvette	Limite d'élasticité (Rt0.5) (MPa)	Résistance à la traction (Rm) (MPa)	Rapport de résistance (Rt0.5/Rm)	Allongement à la rupture (A50.8) (%)
1(épaisseur 12.82mm)	527	653	0.81	36.9
2(épaisseur 20mm)	523	630	0.83	38.9

Tableau 5.Résultats de l'essai de traction sur les éprouvettes de pipeline.

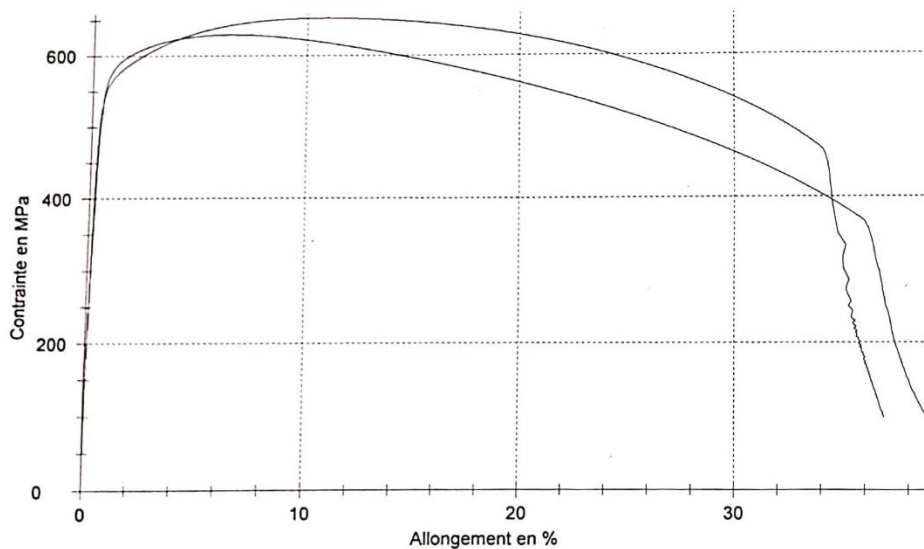


Figure 15..La courbe rationnelle de traction pour les deux éprouvettes.

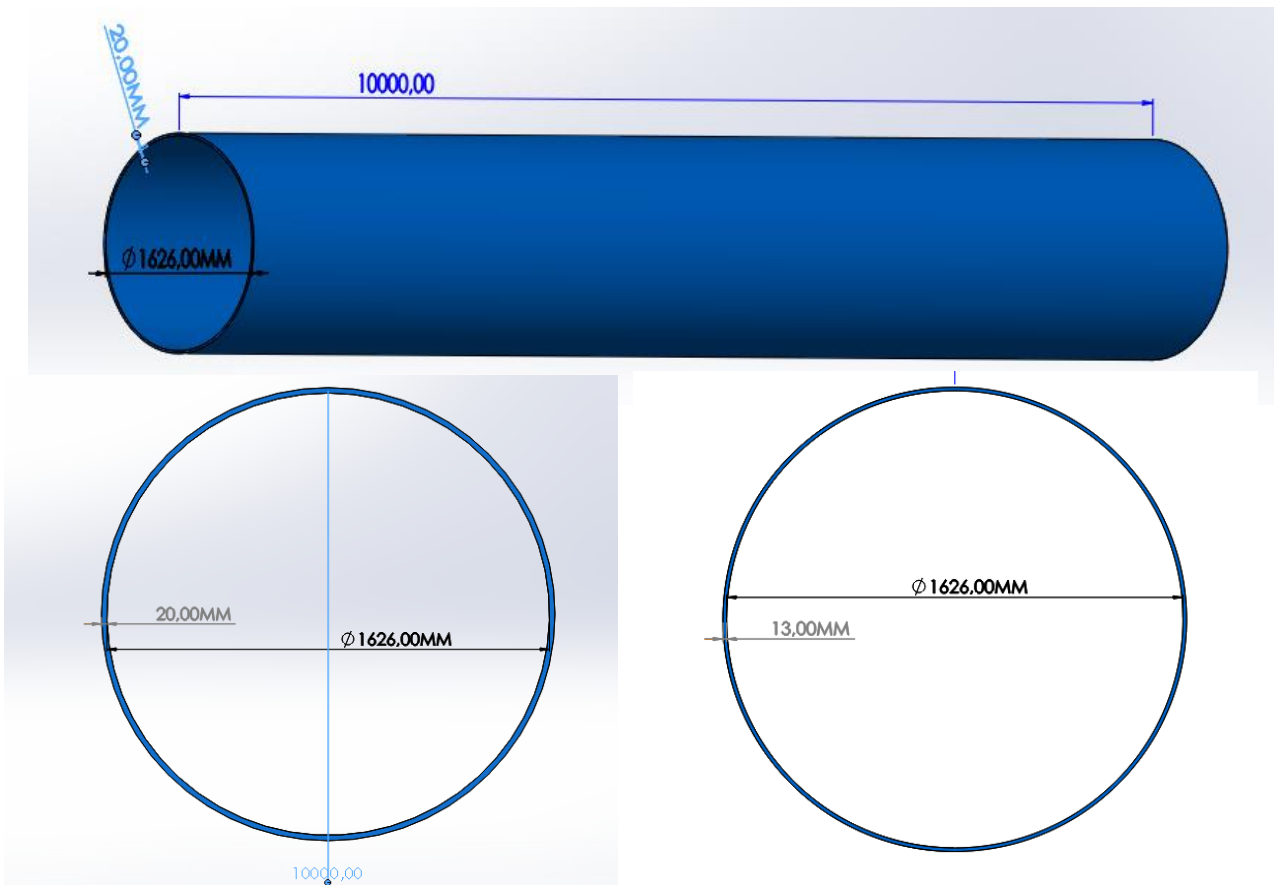
III.2. Essai de fatigue

a) Objectif de l'essai de fatigue :

L'objectif de l'essai de fatigue était d'évaluer la résistance à la fatigue du matériau **Acier X70** utilisé dans les pipelines. L'analyse de la résistance à la fatigue est essentielle pour garantir la durabilité et la fiabilité des pipelines soumis à des cycles de contrainte répétés.

b) Méthode de réalisation de l'essai (simulation SOLIDWORKS) :

L'essai de fatigue a été réalisé par simulation à l'aide du logiciel SOLIDWORKS. Nous avons modélisé deux tubes complets en acier destinés aux essais de fatigue dans l'environnement de simulation. Des charges cycliques ont été appliquées pour représenter les contraintes auxquelles ces tubes peuvent être soumis pendant leur durée de vie. La méthode de fatigue utilisée était la méthode de l'analyse de durée de vie sous contrainte (stress life). Dans ce qui suit, nous mentionnons les paramètres de simulation les plus importants dans logiciel :

➤ La géométrie de 2 tubes en (mm) (13 et 20) :

➤ Les propriétés de fatigue :

Study name	Fatigue 1
Analysis type	Fatigue(Constant Amplitude)
Event Interaction	Random
Computing alternating stress using	Stress intensity (P1-P3)
Shell face	Top Face
Mean stress correction	Goodman
Fatigue strength reduction factor	1

Tableau 6.Les propriétés de fatigue

➤ Mesh control :

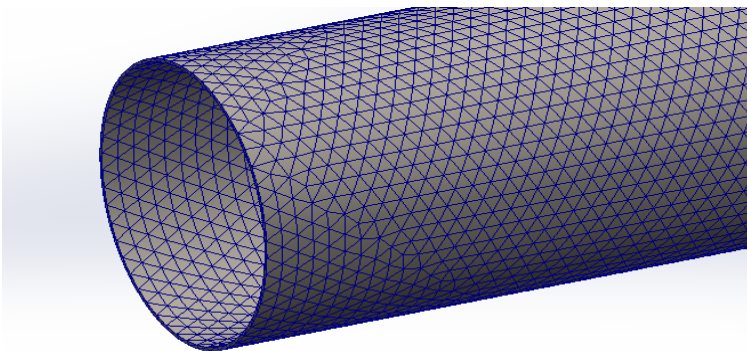


Figure 16.Mesh control

➤ Les conditions des charges :

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		<p>Entities: 1 face(s)</p> <p>Type: Apply normal force</p> <p>Value: 50 N</p>

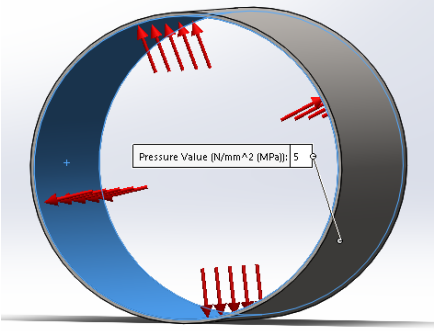
Load name	Load Image	Load Details
Pressure-1		<p>Entities: 1 face(s)</p> <p>Type: Normal to selected face</p> <p>Value: 5</p> <p>Units: N/mm² (MPa)</p> <p>Phase Angle: 0</p> <p>Units: deg</p>

Tableau 7.Les conditions des charges

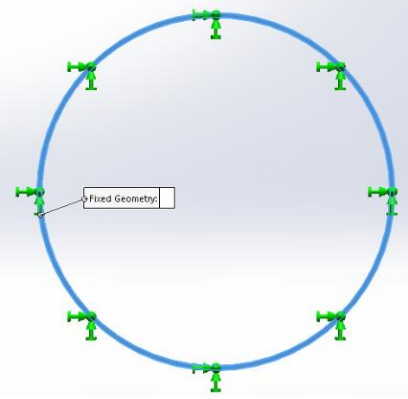
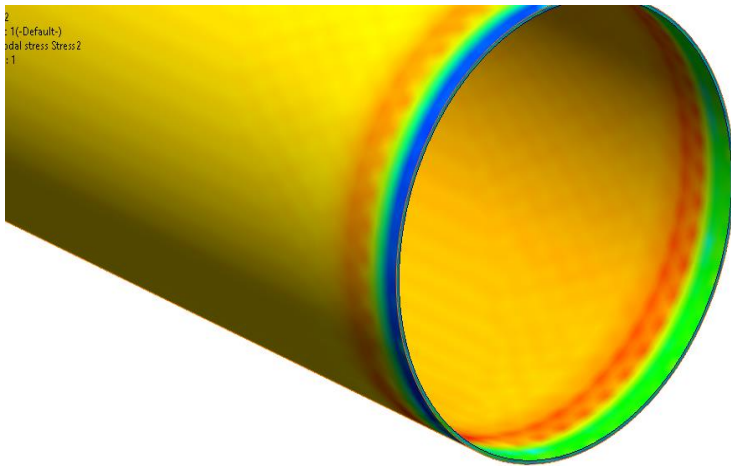
Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-1		<p>Entities: 2 face(s)</p> <p>Type: fixed Geometry</p>

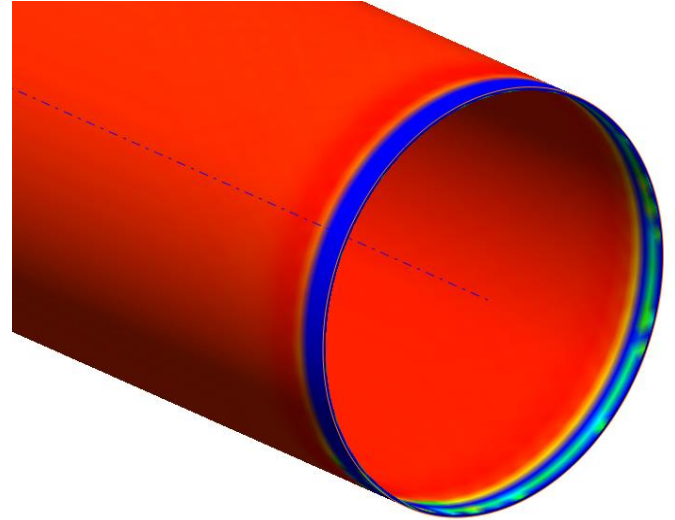
Figure 17.Fixe Géométrie

c) Résulta de l’essai de fatigue après exécuter la simulation :

➤ Pour le premier tube (épaisseur 13mm) :



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Figure 18. Résulta de Stress Amplitude (MPa)

Figure 19. Résulta de nombre de cycle

Stress Amplitude (MPa)	Cycle Life
503,32	1404,1
468,81	2327,1
434,3	3857
399,76	6392,7
365,28	10595
330,76	17561
296,25	29106
261,74	48240
227,23	79954
192,72	132520
158,21	219640
123,7	364030
86,194	603350
54,684	1000000

Tableau 8. Résulta numérique

➤ Pour tube 2 (épaisseur 20mm) :

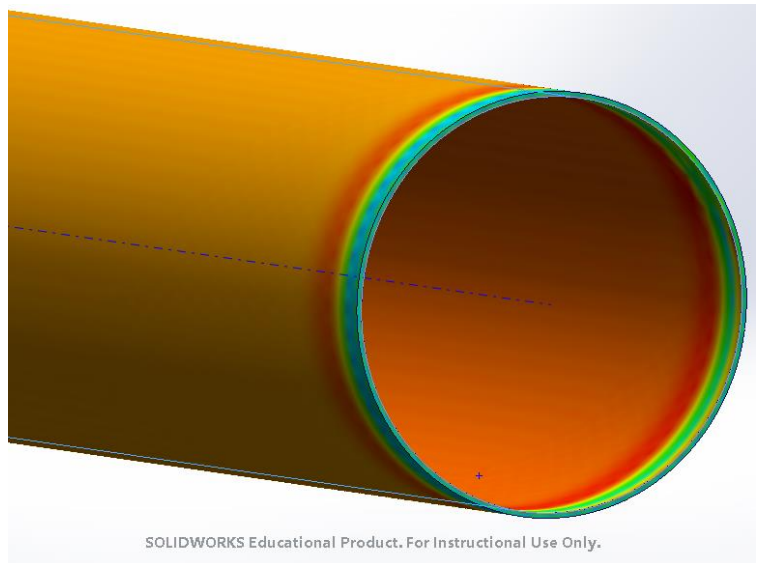
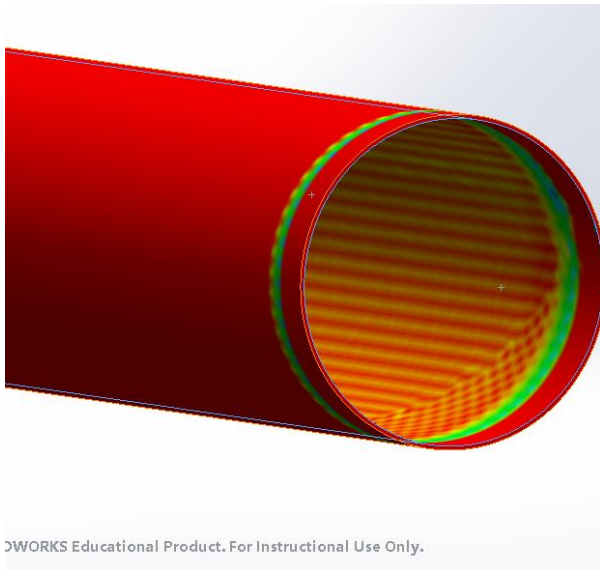


Figure 20..Résulta de nombre de cycle

Figure 21.Résulta de Stress Amplitude (MPa)

Stress Amplitude (MPa)	Cycle Life
368,58	4104,4
343,15	6077,7
317,71	8999,5
292,28	13326
266,85	19732
241,41	29219
215,98	43266
190,55	64066
165,11	94866
139,68	140470
114,24	208000
88,811	308000
63,377	456080
37,943	675330
12,51	1000000

Tableau 9.Résulta numérique

III.3. Courbe de Wöhler (courbe S-N) :

La courbe de Wöhler, également connue sous le nom de courbe de durée de vie en fatigue, est une représentation graphique de la relation entre l'amplitude de contrainte (ou de contrainte alternée) et la durée de vie en fatigue d'un matériau. Elle est largement utilisée pour évaluer la résistance à la fatigue des matériaux et prédire leur durée de vie sous des charges cycliques.

La courbe de Wöhler est généralement tracée en utilisant un axe horizontal pour représenter l'amplitude de contrainte et un axe vertical pour représenter la durée de vie en nombre de cycles. Les données expérimentales ou les résultats de simulations d'essais de fatigue sont utilisés pour tracer la courbe.

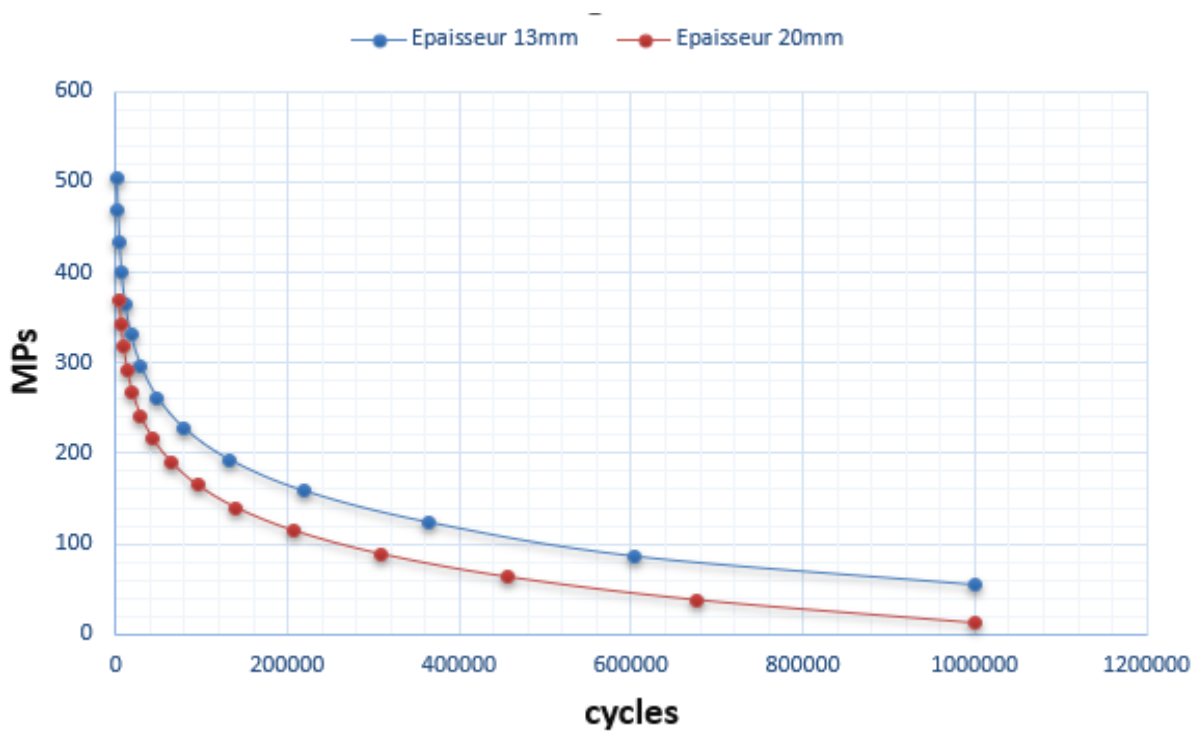


Figure 22. Courbe de Wöhler

IV. Discussion, analyse et interprétation des résultats :

Les résultats des essais de traction et de fatigue des deux tubes complets en acier X70 ont fourni des informations essentielles sur les caractéristiques mécaniques et la résistance à la fatigue de ce matériau.

L'essai de traction a permis de mesurer les propriétés mécaniques du matériau, notamment la limite d'élasticité $R_{t0.5}$, la résistance maximale R_m , le rapport $R_{t0.5}/R_m$ et l'allongement $A_{50.8}$. Pour l'éprouvette de 12,82 mm d'épaisseur, les résultats ont montré une limite d'élasticité $R_{t0.5}$ de 527 MPa, une résistance maximale R_m de 653 MPa, un rapport $R_{t0.5}/R_m$ de 0,81 % et un allongement $A_{50.8}$ de 36,9 %. Pour l'éprouvette de 20 mm d'épaisseur, les résultats ont montré une limite d'élasticité $R_{t0.5}$ de 523 MPa, une résistance maximale R_m de 630 MPa, un rapport $R_{t0.5}/R_m$ de 0,83 % et un allongement $A_{50.8}$ de 38,9 %.

Ces résultats indiquent que le matériau acier X70 présente de bonnes propriétés mécaniques, avec une résistance à la traction élevée et une ductilité adéquate, ce qui est crucial pour assurer la résistance et la fiabilité des pipelines utilisés dans le transport de gaz et de pétrole.

L'essai de fatigue, réalisé par simulation avec le logiciel **SOLIDWORKS**, a évalué la résistance du matériau à des charges cycliques. Les résultats sont présentés dans les tableaux 1 et 2. Pour le tube de 12,82 mm d'épaisseur, on observe que la durée de vie diminue progressivement avec l'augmentation de l'amplitude de contrainte. Les résultats montrent une relation inverse entre l'amplitude de contrainte et la durée de vie en fatigue. De même, pour le tube de 20 mm d'épaisseur, une diminution de la durée de vie est observée avec l'augmentation de l'amplitude de contrainte.

Ces résultats mettent en évidence la sensibilité du matériau acier X70 à la fatigue et soulignent l'importance de concevoir des pipelines avec des marges de sécurité adéquates pour éviter les défaillances prématurées dues à la fatigue.

Sur la base de ces résultats, il est recommandé d'optimiser la conception et la sélection des matériaux pour les pipelines afin d'améliorer leur résistance à la fatigue. Des études supplémentaires peuvent être entreprises pour évaluer l'effet de différentes variables, telles que les conditions environnementales et les traitements thermiques, sur les propriétés de fatigue du matériau.

Sur la base des résultats de l'essai de fatigue, il est possible d'estimer l'âge approximatif des tuyaux en fonction de leur durée de vie. Cependant, il convient de noter que cette estimation dépend de plusieurs facteurs, tels que les conditions d'utilisation réelles, l'environnement, les charges appliquées, etc.

Pour effectuer une estimation approximative de l'âge des tuyaux, nous pouvons utiliser la durée de vie correspondant à une certaine amplitude de contrainte. Par exemple, si nous considérons l'éprouvette de 12,82 mm d'épaisseur, nous pouvons prendre la valeur de stress amplitude de **500 MPa**, qui se situe entre les résultats fournis dans le tableau. Selon les résultats fournis, à cette amplitude de contrainte, la durée de vie est d'environ **20 000 cycles**.

Pour obtenir une estimation de l'âge en années, il est nécessaire de connaître la fréquence des cycles de chargement appliqués dans l'environnement réel. Supposons une fréquence de cycles de **100 par jour**, alors l'âge approximatif des tuyaux serait d'environ **200 jours (ou 0,55 an)**.

Cependant, il est important de souligner que cette estimation est basée sur des hypothèses simplifiées et des données limitées. Pour obtenir une estimation plus précise de l'âge des tuyaux, il est recommandé de réaliser des études spécifiques prenant en compte les conditions d'utilisation réelles et en utilisant des modèles de durée de vie plus sophistiqués.

Lorsque nous examinons les résultats des deux tableaux pour l'essai de fatigue, nous pouvons observer certaines différences en termes de durée de vie des échantillons en fonction de leur épaisseur. Voici quelques commentaires sur ces différences :

1. **Durée de vie** : Il est clair que les échantillons d'épaisseur différente présentent des durées de vie différentes. Les échantillons d'une épaisseur de 12,82 mm ont tendance à avoir une durée de vie plus courte par rapport aux échantillons d'une épaisseur de 20 mm. Cela indique que les échantillons plus minces sont potentiellement plus sensibles à la fatigue et ont une capacité réduite à résister aux cycles de chargement.
2. **Sensibilité à la contrainte** : Les échantillons plus minces présentent des amplitudes de contrainte plus élevées par rapport aux échantillons plus épais pour des cycles de vie similaires. Cela suggère que les échantillons plus minces subissent des contraintes plus élevées lorsqu'ils sont soumis aux mêmes conditions de chargement, ce qui peut conduire à une réduction de leur durée de vie.
3. **Épaisseur et résistance à la fatigue** : En général, les échantillons plus épais ont tendance à présenter une meilleure résistance à la fatigue par rapport aux échantillons plus minces. Cela est principalement dû à une plus grande section transversale, ce qui permet une meilleure distribution et absorption des contraintes, réduisant ainsi les risques de défaillance prématurée.

En conclusion, les résultats des essais de traction et de fatigue réalisés sur les échantillons de pipeline en acier montrent les caractéristiques mécaniques et la résistance du matériau acier X70. Voici les points importants à retenir :

1. **Résistance à la traction** : Les valeurs de la limite d'élasticité ($R_{t0.5}$) et de la limite de résistance (R_m) indiquent la capacité du matériau à résister à des contraintes de traction. Les échantillons ont démontré des valeurs élevées

pour ces paramètres, ce qui indique une bonne résistance structurelle du matériau.

2. **Résistance à la fatigue** : Les essais de fatigue ont permis de déterminer la durée de vie des échantillons soumis à des cycles de contrainte répétée. Les résultats montrent une relation inverse entre l'amplitude de contrainte et le nombre de cycles de vie, conformément à la courbe de Wöhler. Les échantillons plus minces (12,82 mm d'épaisseur) ont présenté une durée de vie plus courte par rapport aux échantillons plus épais (20 mm d'épaisseur), ce qui indique une plus grande sensibilité à la fatigue pour les épaisseurs réduites.
3. **Importance de l'épaisseur** : L'épaisseur des échantillons joue un rôle crucial dans leur capacité à résister à la fatigue. Les échantillons plus épais ont montré une meilleure résistance à la fatigue en raison de leur section transversale plus grande, qui permet une meilleure distribution des contraintes.
4. **Recommandations** : Sur la base de ces résultats, il est recommandé de prendre en compte l'épaisseur des pipelines lors de leur conception et de leur utilisation dans des environnements sujets à des cycles de contrainte répétée. Une épaisseur adéquate peut améliorer la résistance à la fatigue et prolonger la durée de vie du matériau.

En résumé, les essais mécaniques ont fourni des informations précieuses sur les propriétés du matériau acier X70 utilisé dans les pipelines. Ces résultats peuvent guider la sélection et l'utilisation appropriées des matériaux dans l'industrie du transport de gaz, de pétrole et d'eau, tout en mettant en évidence l'importance de l'épaisseur dans la résistance à la fatigue

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] André, D. (2020). **Résistance Des Matériaux : Polycopié de cours.** Repéré à https://www.unilim.fr/pages_perso/damien.andre/cours/meca/poly.pdf
- [2] Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2013). **Mechanics of materials.** Cengage Learning.
- [3] Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2019). **Ingénierie des matériaux : Propriétés, sélection et mise en œuvre.** De Boeck Supérieur.
- [4] Pham, T. H., & Nguyen, T. V. (2021). Fatigue life evaluation of high-pressure gas pipelines subjected to internal pressure and soil loads. *Engineering Failure Analysis*, 120, 105366.
- [5] Wang, X., Zhang, Z., & Lu, J. (2019). Fatigue life prediction of gas pipeline steel with consideration of pressure fluctuation. *Engineering Failure Analysis*, 104, 305–316.
- [6] Zhang, J., Yang, Y., & Yan, B. (2021). Fatigue behavior and crack growth of API X70 pipeline steel under high-frequency vibration. *International Journal of Fatigue*, 149, 106213.
- [7] Liu, Q., & Yan, S. (2021). Experimental and numerical investigations of cyclic mechanical behavior and fatigue properties of ACIER X70 pipeline steel with a longitudinal weld. *Journal of Constructional Steel Research*, 181, 106316.
- [8] Wikipédia. (s. d.). Fatigue (matériau). Dans Wikipédia. Repéré à [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(mat%C3%A9riau))
- [9] Material Properties. (s. d.). Qu'est-ce que la contrainte de fatigue mécanique ? Définition. Repéré à <https://material-properties.org/fr/quest-ce-que-la-contrainte-de-fatigue-mecanique-definition/>
- [10] Chaboche, J. L., & Kanouté, P. (2008). Concentration de contrainte, prévision de durée de vie en fatigue. *Techniques de l'Ingénieur.* <https://doi.org/10.1051/ti/200842197>
- [11] Stanzl-Tschegg, S. E., & Rüstümcü, Ö. (2018). Fatigue of Materials. In *Encyclopedia of Continuum Mechanics* (pp. 1-9). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53605-6_62-1

BIBLIOGRAPHIE

- [12] Fatemi, A., & Yang, L. (2018). Metal fatigue in engineering. John Wiley & Sons.
- [13] Wikipédia. (2023, 21 mars). Fatigue (matériau). Dans Wikipédia. Repéré à [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(mat%C3%A9riau))
- [14] G. Marquis, J.-Y. Buffière, "Microstructure and fatigue behavior of metallic alloys: A review," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 100, pp. 1-49, 2016.
- [15] D. Bathias, "Influence of Inclusions on the Fatigue Behaviour of Metallic Materials," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 23, no. 6, pp. 451-464, 2000.
- [16] X. Chen, X. Wang, H. Zhang, Y. Hou, "Effect of Surface Roughness on Fatigue Life of 42CrMo Steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 25, no. 3, pp. 1197-1203, 2016.
- [17] T. P. Philippidis, "Effect of environmental factors on the fatigue behavior of metals," *International Materials Reviews*, vol. 43, no. 6, pp. 195-229, 1998.
- [18] A. Fatemi, "Fatigue crack initiation in welded structures," *International Journal of Fatigue*, vol. 17, no. 4, pp. 267-284, 1995.
- [19] S. Suresh, "Fatigue of Materials," Cambridge University Press, 1998.
- [20] Han, K., & Park, J. (2012). Fatigue crack growth and fracture behavior of X65 pipeline steel in a high-pressure gas environment. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(8), 1469-1474.
- [21] Tan, Z., & Zhang, C. (2012). Fatigue crack growth analysis of submarine pipeline with free span in irregular sea conditions. *Procedia Engineering*, 29, 2539-2544.
- [22] Li, Y., Li, X., Li, Y., Wu, X., & Li, G. (2017). Fatigue damage in liquid pipelines. *Procedia Engineering*, 174, 618-625.
- [23] Zhang, X., Wang, Y., Li, H., Li, X., & Hu, Q. (2017). Fatigue life prediction of pipeline steel under service loading condition. *Procedia Engineering*, 207, 1948-1953.

BIBLIOGRAPHIE

- [24] Courbe de Wöhler. (2022, novembre 23). Wikipédia, l'encyclopédie libre. https://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe_de_W%C3%B6hler
- [25] B, SALAH-EDDINE.(2009) «prevision de la duree de vie des structures sollicitées en fatigue multiaxiale ». Université de mostaganem, Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur.
- [27] Garg, R. K. (2017). Mechanical Engineering (Objective Type). Khanna Publishers.
- [28] Sharma, A., Kumar, A., & Srivastava, A. (2020). Reliability Engineering and Safety Assessment. John Wiley & Sons.
- [29] Iung, B., & Bouyssou, D. (2005). Introduction à la fiabilité des systèmes mécaniques. Hermès Science Publications.
- [30] Ross, S. M. (2011). Introduction to probability models. Academic press.
- [31] Nelson, W. (1990). Applied life data analysis (Vol. 17). Wiley.
- [32] Papoulis, A., & Pillai, S. U. (2002). Probability, random variables and stochastic processes. Tata McGraw-Hill Education.
- [33] Meeker, W. Q., & Escobar, L. A. (1998). Statistical methods for reliability data. Wiley-Interscience.
- [34] Ayrıca, Z. F., & İnan, H. H. (2018). The Weibull distribution: a review. Journal of Statistical Distributions and Applications, 5(1), 1-16.
- [35] Nelson, W. (1982). Applied life data analysis. Wiley-Interscience.
- [36] Crowder, M. J. (2001). Classical competing risks. Chapman and Hall/CRC.
- [37] Lawless, J. F. (1982). Statistical models and methods for lifetime data. Wiley-Interscience.
- [38] Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons.
- [39] Lawless, J. F. (2011). Statistical models and methods for lifetime data. John Wiley & Sons.
- [40] Lawless, J. F. (2003). Statistical models and methods for lifetime data (2nd ed.). John Wiley & Sons.