

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara-Boumerdes
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbure

Option : Génie mécanique-Mécanique des chantiers pétroliers

Présenté par :

BENABBAS Yazid
GUERSAL Zineddine

THEME

**Etude et simulation des fissures semi-elliptiques dans les tiges de forage 5 ½ " G 105
dans les puits verticaux**

Soutenu publiquement le 23 / 06 / 2024

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Grade	Université/Affiliation
Président de jury	BENBRIK A.	Professeur	UMBB
Examinateur	SAHNOUNE K.	MCA	UMBB
Examinateur	BETTAYEB M.	MCB	UMBB
Encadreur	GACEB M.	Professeur	UMBB

Remerciement

Gloire à dieu qui a créé dirigé notre parcours et aidé pour cela nous disons EL-HAMDOULILLAH. Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de la rédaction de ce mémoire.

Nous voudrions dans un premier temps remercier, notre encadreur de mémoire Monsieur le Professeur **GACEB Mohamed** pour sa patience, son sérieux, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion. Nous remercions également toute l'équipe pédagogique de l'université de Boumerdes et les intervenants professionnels responsables de notre formation,

Nous tenons à remercier tous enseignants du département Transport et Equipements des Hydrocarbures

C'est aussi très gentil de remercier tous membres du chantier ENAFOR 47 en particulier **ing O.Younes** pour l'encadrement dans notre période de stage.

Ainsi que nos parents, pour leurs soutiens constants et leurs encouragements

Dédicace

إلى والدي العزيز، إلى من كل العرق جبينه ومن علمني أن النجاح لا يأتي إلا بالصبر والإصرار، إلى النور الذي أنار دربي والسراج الذي لا ينطفئ نوره بقلبي أبداً، إلى من بذل الغالي والنفيس واستمدت منه قوتي واعتزاني بذاتي.

إلى أمي العزيزة، إلى من جعل الجنة تحت أقدامها وسهلت لي الشدائد بدعائها، إلى الإنسانية العظيمة التي لطالما تمننت أن تفر عينها لرؤيتي في يوم كهذا.

إلى أخوي الكريمين، إلى من كانا لي عوناً وسنداً في كل خطواتي.

إلى أصدقائي الكرام، إلى كل من شاركني مشواري هذا.

إلى كل عائلتي.

إلى كل من لم يدخر يوماً جهداً لمساعدتي.

زين الدين

Je dédie ce travail à mes chers parents, à mon père, à ma mère, à mes frères et à tous mes amis de l'INH.

Yazid

Résumé

La garniture de forage est principale pour le forage de puits, mais elle subit des forces et contraintes pouvant causer des fissures et des ruptures, entraînant des interruptions coûteuses et des accidents. Comprendre ces le comportement de ces fissures permet de concevoir des tiges plus résistantes et de sécuriser les procédures de forage, améliorant ainsi l'efficacité et la rentabilité des opérations. Notre travail vise à déterminer les contraintes sur la garniture via le logiciel WellPlan, à simuler les fissures semi-elliptiques par ANSYS pour identifier les paramètres critiques de la durée de vie des tiges fissurées, et à estimer cette durée de vie en utilisant la loi de Paris.

Mots clés : garniture de forage, fissures, forces, contraintes, simulation WellPlan, fissures semi-elliptiques, simulation ANSYS, durée de vie, loi de Paris.

Abstract

The drill string is essential for well drilling, but it is subjected to forces and stresses that can cause cracks and fractures, leading to costly interruptions and accidents. Understanding the behavior of these cracks allows engineers to design more robust drill pipes and implement safer drilling procedures, thereby improving operational efficiency and profitability. Our work aims to determine the stresses on the drill string using WellPlan software, simulate semi-elliptical cracks with ANSYS to identify the critical parameters for the lifespan of cracked drill pipes, and estimate this lifespan using Paris' law.

Keywords: drill string, cracks, forces, stresses, WellPlan simulation, semi-elliptical cracks, ANSYS simulation, lifespan, Paris' law.

المخلص

تُعد سلسلة الحفر أساسية لحفر الآبار، لكنها تتعرض لقوى وإجهادات يمكن أن تسبب شقوقًا وكسورًا، مما يؤدي إلى انقطاعات مكلفة وحوادث. فهم سلوك هذه الشقوق يسمح للمهندسين بتصميم أنابيب حفر أكثر متانة وتطبيق إجراءات حفر أكثر أمانًا، مما يحسن من كفاءة العمليات ونجاعتها. يهدف هذا العمل إلى تحديد الإجهادات المطبقة على سلسلة الحفر باستخدام برنامج WellPlan، ومحاكاة الشقوق شبه الإهليلجية باستخدام برنامج ANSYS و تحديد عمر أنابيب الحفر باستخدام قانون Paris .

الكلمات الرئيسية: سلسلة الحفر، الشقوق، القوى، الإجهادات، محاكاة WellPlan، الشقوق شبه الإهليلجية، محاكاة ANSYS، العمر الافتراضي، قانون Paris.

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE.I. Le forage pétrolier en Algérie	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Présentation de l'entreprise d'accueil ENAFOR	2
I.2.1. Historique et statut d'ENAFOR.....	2
I.2.2. Certifications et équipements.....	2
I.2.3. Les activités et les missions	3
I.2.4. Organigramme l'ENAFOR.....	4
I.2.5. Stratégie de l'entreprise	5
I.2.5.1. Volet Production	5
I.2.5.2. Volet Management.....	5
I.3. Champ de Hassi Messaoud.....	5
I.3.1. Historique découverte du champ de Hassi Messaoud.....	5
I.3.2. Situation géographique	6
I.3.3. Situation géologique	6
I.3.4. Les différentes zones du champ de Hassi Messaoud	7
I.3.4.1. Le puits MDZ-802	7
I.4. Généralité sur l'appareil de forage.....	8
I.4.1. Le forage:.....	8
I.4.1.1. Forage par battage.....	8
I.4.1.2. Forage Rotary.....	8
I.4.2. Les fonctions et la classification des appareils de forage	9
I.4.3. Les équipements d'un appareil de forage	10
I.4.3.1. Fonction de rotation	10
I.4.3.2. Fonction de pompage.....	11
I.4.3.3. Fonction de levage	13
I.4.4. Le groupe des forces	15
I.4.5. Les équipements de sécurité	16
I.4.6. Matériel de manœuvre	16
I.5. Conclusion	16
CHAPITRE.II. La garniture de forage	
II.1. Introduction.....	17
II.2. La garniture de forage.....	17
II.2.1. La tige d'entraînement [Kelly]	18
II.2.2. Les tiges [drill pipes].....	19
II.2.2.1. Caractéristiques de tiges de forage.....	21
II.2.2.2. Classification et marquage des tiges de forage	23
II.2.3. Les tiges lourdes [HWDP : heavy weight drill pipes].....	24

II.2.4.	Les masse-tiges [drill collars]	24
II.2.4.1.	Types des masses tiges.....	25
II.2.5.	Les outils de forage (drilling bits).....	26
II.2.5.1.	Les outils diamantés:.....	26
II.2.5.2.	Les trépanes à molettes	27
II.2.6.	Stabilisateurs	27
II.2.7.	Les éléments accessoires de la garniture de forage.....	28
II.2.7.1.	Le jar	28
II.2.7.2.	Les Raccords et adaptateurs	28
II.2.7.3.	Les Outils de forage directionnel	29
II.2.7.4.	Moteurs de fond de trou (MFT)	29
II.2.7.5.	Outils de mesure de la trajectoire (MWD/LWD).....	29
II.2.7.6.	Les clapets anti-retours	29
II.2.7.7.	Amortisseurs de chocs.	29
II.3.	Conclusion	30

CHAPITRE.III. Calcul de la garniture de forage

III.1.	Introduction.....	31
III.2.	La poussée d'Archimède.....	31
III.2.1.	La flottabilité.....	31
III.2.2.	Conditions de flottabilité.....	32
III.3.	Résistance à l'effort axiale	33
III.3.1.	Le point neutre	33
III.3.2.	Position du point neutre.....	33
III.3.3.	Répartition des contraintes dans la garniture de forage	34
III.3.3.1.	Déformation élastique	37
III.3.3.2.	Déformation plastique.....	37
III.3.3.3.	Le coefficient de Poisson	38
III.3.3.4.	Le module d'élasticité	38
III.3.4.	Tension maximale applicable sur la tige.....	39
III.4.	Résistance à la torsion.....	39
III.5.	Résistance à l'éclatement	41
III.6.	Résistance à l'écrasement	42
III.6.1.	Combinaison de contraintes	45
III.6.1.1.	Combinaison de contraintes de la traction et de la torsion.....	45
III.6.1.2.	Combinaison de contraintes (traction, torsion et éclatement)	46
III.7.	Défaillance de train de tiges par flambage.....	46
III.7.1.1.	Cas classique du flambage	47
III.7.1.2.	Cas du flambage de la garniture de forage dans un puits	47

III.8.	Fatigue des tiges de forage.....	50
III.9.	Conclusion	52
 CHAPITRE.IV. Modélisation et simulation des fissures semi-elliptiques par ANSYS		
IV.1.	Introduction.....	53
IV.2.	Présentation de la zone d'étude	53
IV.3.	Les Fissures semi-elliptique.....	54
IV.3.1.	Les modes de rupture	54
IV.3.2.	Facteur d'intensité de contraintes.....	54
IV.4.	Analyse de répartition des contrainte par logiciel wellplan	55
IV.5.	La simulation des fissures par ANSYS	57
IV.5.1.	Définition des matériaux et des propriétés.....	57
IV.5.2.	Préparation du modèle géométrique.....	57
IV.5.3.	Maillage	58
IV.5.4.	Définition des conditions aux limites et des charges	58
IV.6.	Les résultats de la simulation	59
IV.6.1.	Les fissures transversales	59
IV.6.1.1.	L'augmentation de la profondeur de fissure a.....	59
IV.6.1.2.	L'effet de la demi longueur c.....	60
IV.6.1.3.	L'effet de la force de traction F_t	61
IV.6.1.4.	Effet de la forme et de la géométrie des fissures	63
IV.6.2.	Les fissure inclinées 45°	64
IV.6.2.1.	L'effet de la profondeur de fissure a.....	64
IV.6.2.2.	L'effet de la demi longueur de fissure c.....	65
IV.6.2.3.	L'effet de la force de traction F_t	66
IV.6.2.4.	Effet de la forme et de la géométrie des fissures	67
IV.6.3.	Les Fissures longitudinales	70
IV.6.3.1.	L'effet de la profondeur de fissure a.....	70
IV.6.3.2.	L'effet de la demi longueur de fissure c.....	70
IV.6.3.3.	L'effet de la force de traction F_t	71
IV.6.3.4.	Effet de la forme et de la géométrie des fissures	72
IV.7.	L'effet de l'angle d'inclinaison de fissure sur les facteurs d'intensité.....	73
IV.8.	L'effet de l'angle d'inclinaison de fissure sur la durée de vie de la tige.....	74
IV.9.	Calcul de durée de vie.....	74
IV.10.	Conclusion	77
Conclusion générale.....		79

Recommendations.....	81
Références.....	82

Liste des figures

Figure I-1: Situation géologique du champ de Hassi Messaoud	6
Figure I-2: Appareil de forage ENAFOR 47	9
Figure I-3: Equipements d'un appareil de forage	10
Figure I-4: Techniques de rotation	11
Figure I-5: Pompe à boue	12
Figure I-6: Circuit de la boue de forage	12
Figure I-7: Treuil de forage	13
Figure I-8: Mouflage	14
Figure I-9: Moufle mobile	14
Figure I-10: Moufle fixe	14
Figure I-11: Câble de forage	15
Figure I-13: Moteur Caterpillar	15
Figure II-1: Garniture de forage	18
Figure II-2: Tige de forage	19
Figure II-3: Protecteurs de filetage	20
Figure II-4: External upset EU	21
Figure II-5: Internal upset IU	21
Figure II-6: External and external upset IEU	21
Figure II-7: Tiges lourdes	24
Figure II-8: Masses tiges spiralées	25
Figure II-9: Trépan diamanté naturel et trépan diamanté à PDC	26
Figure II-10: Différents types des stabilisateurs	28
Figure III-1: Poussé d'Archimède	31
Figure III-2: Forces axiales exercées sur la garniture	33
Figure III-3: Puits vide, la garniture ne repose pas sur le fond	35
Figure III-4: Puits rempli de fluide de masse volumique ρ_f , la garniture ne repose pas sur le fond	35
Figure III-5: Puits vide, une partie de la garniture appuyée sur le fond avec une force F	36
Figure III-6: Puits plein de fluide de masse volumique ρ_f , une partie de la garniture appuyée sur le fond avec une force F	36
Figure III-7: Courbe de contrainte-déformation d'un métal ductile représente les différentes zones de déformations	37
Figure III-8: La déformation	38
Figure III-9: Essai de résistance à la torsion	39
Figure III-10: exemple d'une défaillance par éclatement	42
Figure III-11: Défaillance par écrasement	43
Figure III-12: Représentation schématique d'une courbe de Wöhler	51
Figure III-13: Wash-out	52
Figure III-14: Twist-off	52
Figure IV-1: Représentation géométrique d'une fissure semi-elliptique interne	54
Figure IV-2: Les trois modes élémentaires de fissuration	54
Figure IV-3: les contraintes de -traction-torsion-et de von mises agissant sur la garniture	56
Figure IV-4: Propriétés de matériau	57

Figure IV-5: Partie d'une tige de forage avec une fissure semi élliptique.....	57
Figure IV-6: Maillage utilisé	58
Figure IV-7 : Conditions aux limites des charges	58
Figure IV-8 : Les trois fissures simulé-transversale-longitudinale-inclinée 45°	59
Figure IV-9 : Variation de facteur d'intensité K_I en fonction de la profondeur de fissure a	60
Figure IV-10 : Variation du facteur d'intensité K_I en fonction de la demi-longueur de fissure c	61
Figure IV-11:Variation du facteur d'intensité K_I en fonction de force de traction	62
Figure IV-12:Variation de contrainte de von mises en fonction de la force de traction	62
Figure IV-13:Variation du facteur d'intensité K_I en fonction des rapports $a/2c$ et a/t	64
Figure IV-14:Variation des facteurs d'intensité en fonction de la profondeur de fissure	65
Figure IV-15:Variation des facteurs d'intensité en fonction de la demi longueur de fissure	66
Figure IV-16:Variation des facteurs d'intensité K_I , K_{II} , K_{III} en fonction de force de traction	67
Figure IV-17:Variation du facteur d'intensité K_I en fonction des rapports $a/2c$ et a/t	68
Figure IV-18:Variation du facteur d'intensité K_{II} en fonction des rapports $a/2c$ et a/t	69
Figure IV-19:Variation du facteur d'intensité K_{III} en fonction de rapport $a/2c$	69
Figure IV-20: Variation du facteur d'intensité K_I en fonction de force de traction	71
Figure IV-21:Variation du facteur d'intensité K_I en fonction des rapports $a/2c$ et a/t	72
Figure IV-22:Variation des facteurs d'intensité K_I , K_{II} , K_{III} en fonction d'angle d'inclinaison de fissure	73
Figure IV-23: Facteur de correction M_k	76
Figure IV-24: Facteur de forme Q	76
Figure IV-25: La durée de vie d'une tige de forage en fonction de l'angle d'inclinaison de fissure.....	77

Liste des tableaux

Tableau I-1:Capacité du parc appareil ENAFOR	3
Tableau I-2:Fiche technique de puits MDZ-802.....	7
Tableau I-3: Phases de puits MDZ-802	7
Tableau I-4:Classification des appareils de forage	9
Tableau II-1:Propriétés des aciers utilisés pour le corps des tiges de forage	21
Tableau II-2:Gammes API de longueur des tiges	22
Tableau II-3:Poids nominaux des Tiges de Forage (Drillpipes) conformes aux spécifications API	22
Tableau II-4:Marquage de classification et d'état des tool-joints	23
Tableau II-5:Pertes de résistance	23
Tableau II-6: Dimensions standards des masses-tiges habituellement utilisées.....	25
Tableau III-1:Les valeurs à utiliser dans la formule III-17	44
Tableau III-2::Les valeurs à utiliser dans la formule III-18.....	44
Tableau III-3:Combinaison de trois contraintes traction, torsion et éclatement	46
Tableau IV-1:Informations sur le forage.....	53
Tableau IV-2:Caractéristiques mécaniques des tiges de forage utilisés	53
Tableau IV-3: Résultats des forces et des contraintes agissant sur la garniture.....	55
Tableau IV-4: Résultats de la simulation en augmentant la profondeur de fissure a.....	60
Tableau IV-5: Résultats de la simulation en augmentant la demi longueur de fissure c.....	60
Tableau IV-6: Résultats de la simulation en augmentant la force de traction.....	62
Tableau IV-7: Résultats de la simulation expliquer "effet de la géométrie des fissures transversale.....	63
Tableau IV-8: Résultats de la simulation en augmentant la profondeur de fissure.....	65
Tableau IV-9: Résultats de la simulation en augmentant la demi longueur de fissure	65
Tableau IV-10: Résultats de la simulation en augmentant la force de traction.....	66
Tableau IV-11: Résultats de la simulation expliquer l'effet de la géométrie des fissures inclinées 45°	67
Tableau IV-12: Résultats de la simulation en augmentant la profondeur de fissure.....	70
Tableau IV-13: Résultats de la simulation en augmentant la demi longueur de fissure	70
Tableau IV-14: Résultats de la simulation en augmentant la force de traction.....	71
Tableau IV-15: Résultats de la simulation expliquer l'effet de la géométrie des fissures longitudinales	72
Tableau IV-16:Coefficients C et m et la ténacité K_{IC} proposés pour le grade G105 API	74
Tableau IV-17 :Les résultats de calcul.....	75

Liste des symboles

a : la profondeur de fissure en **m**

c : la demi longueur de fissure en **m**

K_I, K_{II}, K_{III} : les facteurs d'intensité selon le mode **I, II, III** en **MPa√m**

K_{IC} : la ténacité **MPa√m**

m : est un exposant empirique qui caractérise la sensibilité de la durée de vie en fatigue sans dimension

C : constante de la loi de Paris

T : la force de traction exercée sur la barre, en **N**

S : section de la barre, en **m²**

σ : contrainte exercée sur la barre, en **MPa**

E : Module d'élasticité longitudinal ou module de Young, en **MPa**

L : longueur de la barre, en **m**

ΔL : l'allongement, en **m**

T_{max} : tension maximale applicable sur la tige, en **N**

σ_{emin} : limite élastique minimale de l'acier utilisé, en **MPa**

S : Section minimale de la tige, en **m²**

ρ_f : Masse volumique, en kg/ **m³**

τ : Contrainte de torsion, en **MPa**

M : Moment du couple de torsion, en **N.m**

R : Rayon de la barre, en **m**

r_e : Rayon extérieur de la barre, en **m**

r_i : Rayon intérieur de la barre, en **m**

σ_{emin} : Limite élastique minimale de l'acier utilisé, en **MPa**

M_{max} : Moment du couple de torsion maximal, en **N.m**

$\Delta\theta$: Angle de rotation, en **radians**

L : Longueur de tiges soumise au couple M, en **m**

G : Module d'élasticité transversal, en **MPa** (pour l'acier, ce module est égal à 0.4 E, ce qui correspond à une valeur d'environ 78 000 MPa)

J : Moment d'inertie polaire de la tige, en **m⁴**

P_{tmax} : La pression intérieure maximale, en **MPa**

D : Diamètre nominal extérieur du corps de la tige, en **m**

F_c : Charge critique, en **N**

L : Longueur libre de flambage, qui dépend de la longueur réelle de la tige et du mode de fixation de ces fines, en **m**

I_a : Moment d'inertie de la section droite (perpendiculaire à l'axe longitudinal) de la tige, en **m⁴**

d_t : Diamètre intérieur de la tige, en **m**

F_{flsin} : Force à appliquer au revêtement pour produire le flambement sinusoïdal, en **N**

F_{flhel} : Force à appliquer au revêtement pour produire le flambement hélicoïdal, en **N**

P : Masse linéique dans l'air de l'élément de garnissage considéré, en **N/m**

k : Facteur de flottabilité

i : Inclinaison du puits mesurée par rapport à la verticale, en **degrés**

r : Jeu radial entre le trou et le scellement, en **m**

d_t : Diamètre du trou, en **m**

ρ_a : Masse volumique de l'acier, en **kg/m³**

d_f : Densité du fluide

C : Courbure maximale acceptable pour une tige, en ° / 100 ft.

σ_{fmax} : Contrainte de flexion maximale admissible pour la tige considérée, en **MPa**

d_e : Diamètre extérieur du corps des tiges, en **m**

Introduction Générale

Le forage joue un grand rôle dans l'industrie pétrolière en permettant l'exploration et la production des hydrocarbures enfouis sous terre. Toutefois, cette activité est complexe et risquée, impliquant l'utilisation d'une garniture de forage soumise à diverses forces et contraintes tout au long du processus. Ces forces et contraintes peuvent avoir un impact significatif sur la productivité et la rentabilité du forage. Les contraintes élevées sur le train de tiges peuvent entraîner plusieurs problèmes tels que la déformation excessive, la formation de fissures dans les différents composants de la garniture, la rupture prématurée et la baisse de l'efficacité opérationnelle. Identifier précisément les contraintes responsables de ces problèmes représente Un défi difficile à relever :

Nous avons réalisé une étude approfondie sur les différentes contraintes qui impactent la garniture de forage afin d'explorer ce sujet. L'étude des contraintes telles que le flambage, la traction, la torsion et d'autres sollicitations mécaniques vise à mieux comprendre leur influence sur les performances du forage et la résistance des tiges. Dans le cadre de cette recherche, nous avons également mené des simulations des fissures dans les tiges de forage pour étudier leur propagation, ajoutant ainsi une dimension importante à notre compréhension des défis rencontrés. L'objectif global est de renforcer la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des opérations de forage en identifiant les risques potentiels et en proposant des mesures préventives adéquates. Ces éléments seront approfondis dans les prochains chapitres :

- **Chapitre 1** : Dans ce chapitre, nous allons examiner le contexte de notre étude. Nous nous concentrerons sur l'activité de forage en Algérie, et nous ferons une brève présentation de l'Entreprise Nationale de Forage des Puits Pétroliers ENAFOR. Ensuite, nous aborderons les équipements de l'appareil de forage et ses rôles,
- **Chapitre 2** : Dans ce chapitre, nous avons pris le temps d'analyser en profondeur le rôle fondamental de la garniture de forage dans le processus global de forage. Nous avons exploré en détail chaque composant de cette garniture
- **Chapitre 3** : Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail les diverses limitations rencontrées lors de l'utilisation des tiges de forage, ainsi que les multiples contraintes auxquelles elles sont confrontées tout au long du processus de forage.
- **Chapitre 4** : Ce chapitre se focalise sur l'étude des fissures semi-elliptique dans une tige de forage, Cette étude vise à évaluer les risques potentiels liés à cette fissure et à mettre en place les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et la fiabilité du processus de forage.

CHAPITRE.I.Le forage pétrolier en Algérie

I.1. Introduction

Le pétrole est une huile minérale d'origine naturelle composée d'une multitude de composés organiques, essentiellement des hydrocarbures, piégée dans des formations géologiques particulières. Il permet, une fois raffiné, de produire divers carburants, comme l'essence ou les diesels, des gaz, butanes et propanes et divers combustibles. Il est classé dans les ressources énergétiques fossiles. Mais pour atteindre le gisement de pétrole nous devons effectuer le processus de forage.

Le forage est un ensemble d'opérations qui permettent, par le biais d'un procédé mécanique, de creuser un trou de diamètre défini généralement vertical ou horizontale. Plusieurs techniques de forages ont été développées en fonction du type d'ouvrage recherché et du contexte géologique. et plusieurs entreprises sont active dans la structure du forage en Algérie comme ENAFOR.

I.2. Présentation de l'entreprise d'accueil ENAFOR

L'entreprise nationale de forage, une entreprise pionnière dans le secteur des forages et services pétroliers. Fondée en 1981_ en tant que filiale de Sonatrach, ENAFOR a été créée dans le but de promouvoir l'industrie énergétique nationale en Algérie. Dotée de multiples bases, ateliers mécaniques, zones de stockage et installations de maintenance, l'entreprise dispose des moyens nécessaires pour mener à bien ses diverses missions. Forte d'une expertise de plus de 43 ans dans le domaine du forage pétrolier, ENAFOR s'est distinguée par son excellence, lui valant une reconnaissance tant nationale qu'internationale. En opérant pour le compte de Sonatrach et de ses partenaires étrangers, ENAFOR se concentre principalement sur le forage, le work-over, la maintenance pétrolière, ainsi que des services de soutien tels que le transport et l'hôtellerie. Ses actions s'inscrivent dans la stratégie globale de Sonatrach visant à contribuer activement au développement et à la préservation des réserves énergétiques pour les générations présentes et futures.

I.2.1. Historique et statut d'ENAFOR

Créée en 1961 en partenariat 51/49 entre Sonatrach et la société américaine SEDCO, l'entreprise portait alors le nom d'ALFOR. Après le rachat des parts de SEDCO par Sonatrach et la restructuration de cette dernière, ALFOR est devenue ENAFOR en 1981.

En 1989, ENAFOR est devenue une entreprise autonome sous forme de SPA, dont le capital est détenu par les Fonds de l'État. En 2006, la Société Holding Services Para Pétroliers de Sonatrach en est devenue l'actionnaire unique, après avoir racheté les 49% d'actions détenues par INDJAB[1].

I.2.2. Certifications et équipements

ENAFOR est certifiée ISO 9001 :2015 (Qualité), ISO 14001 :2015 (Environnement) et OHSAS 18001 :2007 (Santé - Sécurité) pour l'ensemble de ses activités et sites. L'entreprise dispose également d'une flotte de 52 appareils de forage pour assurer ses opérations.

Disposant de compétences techniques avérées, ENAFOR est aujourd'hui la référence nationale dans le forage et le work-over des puits de pétrole et de gaz.

I.2.3. Les activités et les missions

Les principales activités d'ENAFOR comprennent :

- a) Forage pétrolier : ENAFOR se spécialise dans le forage de puits d'exploration et de production de pétrole et de gaz. Cette activité englobe la préparation du site, le forage lui-même, et la cimentation du puits pour assurer sa stabilité et sa sécurité.
- b) Work-over : Cette activité implique des interventions sur des puits déjà forés pour optimiser leur production. Cela peut inclure le nettoyage, la réparation ou la rénovation des équipements de production afin d'améliorer l'écoulement du pétrole ou du gaz.
- c) Maintenance pétrolière : ENAFOR assure la maintenance régulière des équipements et des infrastructures pétrolières pour garantir leur bon fonctionnement et leur sécurité. Cela englobe la réparation et le remplacement des équipements défectueux, ainsi que la mise en place de mesures de sécurité et de prévention des risques.
- d) Services de soutien : En plus de ses activités principales, ENAFOR fournit des services de soutien tels que le transport du personnel et du matériel vers les sites de forage, ainsi que l'hébergement et la restauration du personnel travaillant sur les sites éloignés [1].

L'ENAFOR dispose actuellement de 52 appareils de type lourd et moyen répartis comme suit :

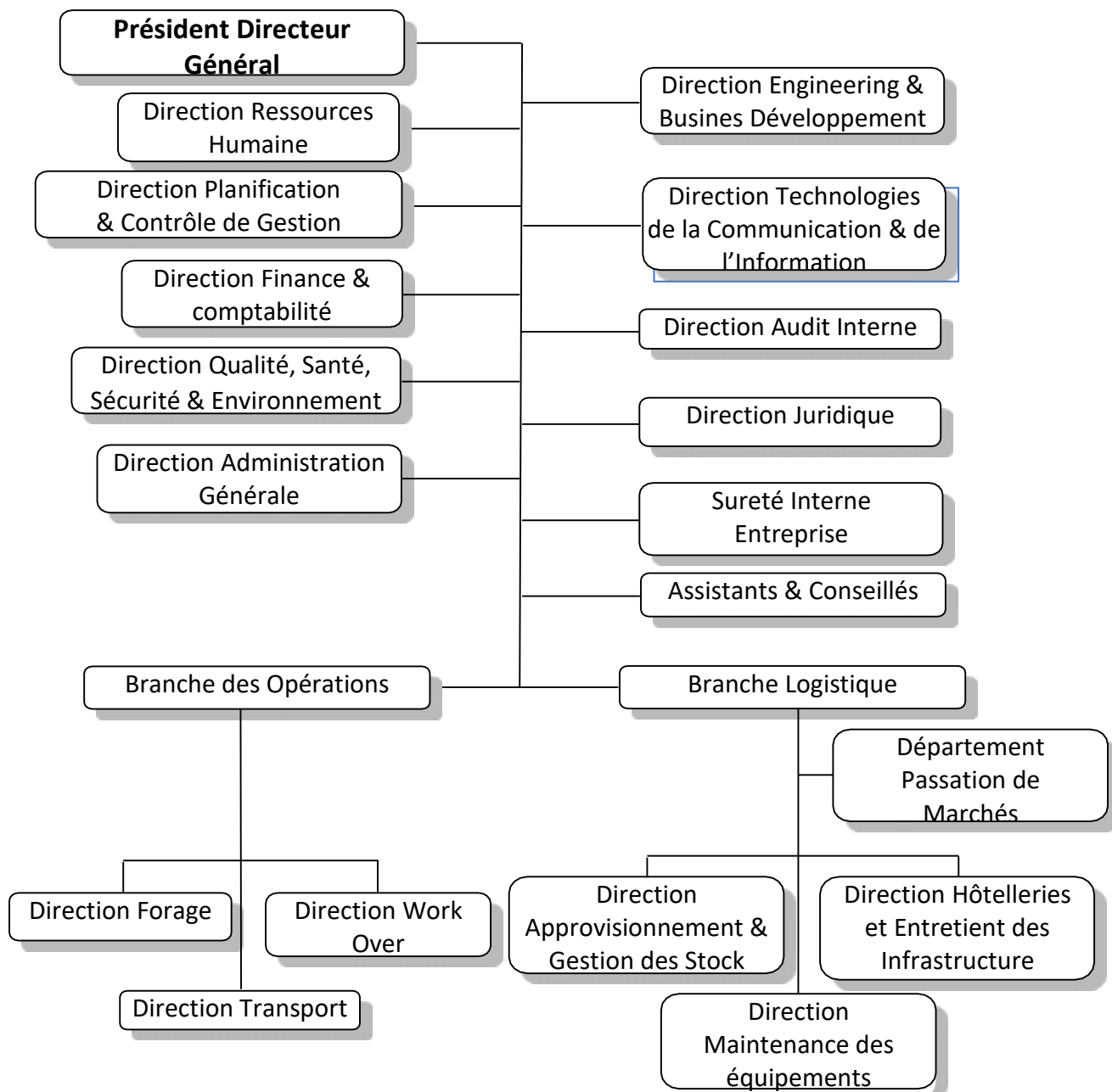
Tableau I-1: Capacité du parc appareil ENAFOR [1]

Type d'appareil	La puissance HP	Nombre
Drill MAS 800 GD	3000	1
National oil well D-2000 UE	2000	6
OIL WELL E-2000		5
National 1320 UE		2
Bentec DW E-2000		2
Drill MAS 7000 GD		5
Oil well 840-E	1500	10
National oil well D-1500 E		3
Bentec E-1500 DC		4
Bentec E-1500 AC		5
Oil well 840 SE		1
Card well k 1000	1000	1
National Oil well 760 E		2
Ideco 900	900	4

I.2.4. Organigramme l'ENAFOR

ENAFOR est actuellement organisée comme suit :

- Les Directions centrales (Direction Générale)
- La Branche Technique
- La Branche Logistique



I.2.5.Stratégie de l'entreprise

L'ENAFOR a inséré dans sa stratégie de développement une batterie de mesures qui touchent aussi bien le volet Production que le volet Management, et qui sont contenues dans le PMTE.

I.2.5.1. Volet Production

- Renforcement de la capacité et mise à niveau de l'outil de production.
- Acquisition de nouveaux appareils ;
- Renouvellement et modernisation du parc existant.

I.2.5.2. Volet Management

- Modernisation des outils de gestion.
- Obtention des certifications QHSE (Quality-Health-Sécurité-Environnement)
- Mise en place d'un système ERP supporté par un réseau VSAT (composé des modules Analytique, Budget, Gestion de projets, GMAO gestion de la maintenance par ordinateur, Gestion des Ressources Humaines, Gestion des Approvisionnement, Gestion des Stocks,).

A l'échelle internationale

Les efforts déployés par l'entreprise dans le cadre de l'exportation de ses services à l'étranger ont été couronnés de succès par

- La préqualification auprès de PDO (Petroleum développement Oman) pour l'ensemble des activités de forage et de Work-Over.
- La signature officielle, le 10 août 2005, du contrat de forage de 5 puits de développement Gaz à Mascate avec PDO (Oman) pour une durée estimée à une année et demi avec options de deux extensions d'une année chacune.
- La création d'une filiale dénommée LLC de droit Omanais, enregistrée à la chambre de commerce Omanaise (Mascate) le 28 août 2005.
- La prospection des opportunités du marché extérieur (Libye, Emirats Arabes Unis, Arabie Saoudite, Soudan).

I.3. Champ de Hassi Messaoud

Hassi Messaoud est une zone industrielle où ENAFOR exerce ses activités, notamment dans le domaine du forage et des services pétroliers.

I.3.1.Historique découverte du champ de Hassi Messaoud

Lorsque la sismique-réfraction a révélé que la structure de Hassi Messaoud est un vaste dôme structural, la société SN REPAL (société nationale de recherche pétrolière en Algérie) a été mise en évidence. Le premier puits MD1 a été mis en place le 16 janvier 1956, à proximité du puits

chamelier de Hassi Messaoud. Le 15 juin de la même année, ce puits a découvert des grès cambriens à une profondeur de 3338 mètres comme étant des sources d'huile.

En mai 1957, la société "CFPA" (compagnie française de pétrole d'Algérie) réalise un puits OM1 à environ 7 km au Nord-Ouest du puits MD1, ce forage confirmait l'existence d'huile dans les grès du cambrien. Par la suite, le champ de Hassi Messaoud fut divisé en deux concessions distinctes : C.F.P. A pour le champ Nord et SN REPAL pour le champ Sud. La mise en production avait commencé en 1958 avec 20 puits d'exploitation [2]

I.3.2.Situation géographique

Le champ de Hassi-Messaoud est situé à 850 Km au Sud-Est d'Alger, et à 300 Km de la frontière Algéro - tunisienne, il est considéré, comme étant le plus grand gisement de la province triasique. Sa localisation en coordonnées Lambert (Sud Algérie) [3]:

$$= [790.000 - 840.000] \text{ Est.} \quad Y = [110.000 - 150.000] \text{ Nord.}$$



Figure I-1: Situation géographique du champ de Hassi Messaoud [4]

I.3.3.Situation géologique

Géologiquement le champ de Hassi Messaoud est limité :

- A l'Ouest par la dépression d'Oued M'ya.
- Au Sud par le môle d'Amguid El Biod.
- Au Nord par la structure Djammâa-Tougourt.

- A l'Est par les hauts fonds de Dahar, Rhourde El Baguel et la dépression de Berkine

I.3.4. Les différentes zones du champ de Hassi Messaoud

L'évolution des pressions des puits en fonction de la production a permis de subdiviser le gisement de Hassi Messaoud en 25 zones dites de production, d'extension variable. Ces zones sont relativement indépendantes et correspondent à un ensemble de puits communiquant entre eux et non pas avec ceux des zones avoisinantes, et se comportant de la même manière du point de vue pression de gisement. Les puits d'une même zone drainent conjointement une quantité d'huile en place bien établie. Toutefois il est important de souligner que le facteur de pression ne peut être le seul critère de caractérisation des zones.

I.3.4.1. Le puits MDZ-802

Ce puits cible les gisements pétroliers du CAMBRIAN RI-(D5 in) jusqu'à la profondeur finale à 3441 m TVD 3997 MD. MDZ-802 suivra l'architecture de puits standard de SONATRACH pour le champ Hassi Messaoud.

Tableau I-2: fiche technique de puits MDZ-802

Le nom de puits	MDZ-802
La profondeur finale	3997 m
Type de puits	Producteur de pétrole
Classification de puits	Développement
Le champ	Hassi Messaoud
Le client	Sonatrach
L'appareil de forage	47
Entrepreneur en forage	ENAFOR
La pression de réservoir	430-450 kg/cm2.

L'architecteur de puits MDZ-802

Tableau I-3 : phases de puits MDZ-802

La phase (")	Tubage (")	Profondeur (m)
26	18-5/8	0- 478
16	13-3/8	478 – 2406
12 ¼	9-5/8	2406– 3326
8-1/2	7" liner	3326 - 3417
6	4-1/2" liner	3417 – 3997

I.4. Généralité sur l'appareil de forage

L'appareil de forage est un ensemble d'installations et d'équipements utilisés pour forer des puits pétroliers. Un appareil de forage doit accomplir dans les meilleures conditions techniques et de sécurité, la réalisation d'un puits reliant un gisement à la surface.

I.4.1. Le forage:

L'opération de forage des puits pétrolier consiste à créer un passage vertical ou incliné dans le sous-sol pour accéder aux réservoirs de pétrole ou de gaz naturel. On utilise des appareils de forage pour percer la terre ou la roche à des profondeurs importantes. Une fois le puits foré, des tubages en acier peuvent être installés pour maintenir sa stabilité. Ensuite, le puits est prêt à être utilisé pour extraire le pétrole ou le gaz naturel à la surface.

Généralement il existe deux types de procédés de forage le forage rotary et le forage par battage

I.4.1.1. Forage par battage

Le forage par battage peut être effectué sans circulation d'eau. Dans cette configuration, on utilise un câble ou des tiges pleines pour maintenir l'outil en place, tandis qu'un autre câble est utilisé pour manœuvrer la cuillère ou la benne preneuse afin de ramasser les déblais. Toutefois, ce système diffère de celui avec circulation, qui se rapproche davantage du forage rotatif et utilise des tiges creuses.

Le forage par battage présente des limites en termes de profondeur, généralement jusqu'à 1000 mètres au maximum. En l'absence de circulation, la sécurité n'est pas garantie, car il n'y a ni système de protection contre les fluides jaillissants ni de maintien des parois du puits.

Les vitesses d'avancement du forage par battage sont significativement plus lentes que celles du forage rotatif, surtout en profondeur où les roches compactées résistent davantage à la percussion. Ainsi, cette méthode tend à être progressivement abandonnée au profit du forage rotatif, offrant des capacités de forage plus profondes et des vitesses plus élevées, tout en assurant la sécurité du personnel, de l'environnement et du matériel.

I.4.1.2. Forage Rotary

Le forage rotary permet d'atteindre de grandes profondeurs dans de bonnes conditions techniques et de sécurité. Cette technique consiste à utiliser un outil de forage visse à l'extrémité basse d'un train de tiges (garniture de forage) et sur lequel sont appliquées une force et une rotation. La force, appelée poids sur l'outil (WOB) et la rotation, combinées, permettent de couper la roche. La rotation est appliquée le plus souvent en surface. Le poids est assuré par un ensemble de tiges lourdes (masses-tiges) qui constituent la partie Inférieure de la garniture. Les tiges permettent aussi d'acheminer sous pression du fluide de forage (la boue). Celle-ci refroidit l'outil et assure l'évacuation des débris de roche. Pour assurer la solidité à long terme du puits et le préserver contre les venues d'eau, des tubages sont descendus et cimentés à la paroi du puits.

I.4.2. Les fonctions et la classification des appareils de forage

L'objectif d'un appareil de forage est d'accomplir dans les meilleures conditions techniques et de sécurité, la réalisation d'un puits reliant un gisement à la surface de la terre. L'appareil de forage, ou plus globalement le chantier de forage (Rig) doit remplir les trois fonctions principales suivantes :

- La fonction de levage
- La fonction de pompage et de circulation
- La fonction de rotation



Figure I-2: Appareil de forage ENAFOR 47

On peut ainsi distinguer quatre catégories d'appareils de forage rotary

- Appareil léger
- Appareil moyen
- Appareil lourd
- Appareil ultra lourd

Deux caractéristiques relativement liées interviennent dans la classification des appareils de forage :

- La capacité ou profondeur de forage maximale ;
- La puissance au treuil

Tableau I-4 : Classification des appareils de forage

Les types d'appareils	Profondeur (m)	Puissance (HP)
Appareil léger	1500-2000	650
Appareil moyenne	3000	1300
Appareil lourd	6000	2000
Appareil ultra lourd	8000-10000	3000

La règle du pouce anglo-saxonne suivante donne d'une manière pragmatique : pour 110 pieds (33,5 mètres) de forage, il faut 10 HP de puissance au treuil.

I.4.3. Les équipements d'un appareil de forage

Il existe deux types de matériel dans les équipements d'un appareil de forage :

- Le matériel de surface : C'est l'ensemble de tous les équipements qui travaillent au-dessus de la surface et qui permettent d'assurer ces fonctions principales :
- Le matériel de fond : La garniture de forage qu'est la partie active non visible. Elle assure la liaison entre l'outil de forage et la surface.

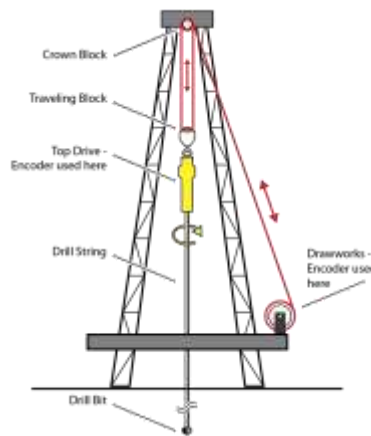


Figure I-3: Equipements d'un appareil de forage

I.4.3.1. Fonction de rotation

Il existe deux types de système de forage le premier est par table de rotation et le deuxième par entraînement supérieur (Top Drive) :

I.4.3.1.1. Forage par la table de rotation

Certaines installations de forage utilisent une tige, Kelly, et une table de rotation pour faire tourner la garniture de forage et l'outil (trépan). Ces installations comprennent la tête d'injection, le flexible d'injection, le Kelly et la table de rotation.

I.4.3.1.2. Forage par l'entraînement supérieur (le Top Drive)

Certaines installations utilisent un system top drive d'entraînement supérieur pour faire tourner la garniture de forage et l'outil (trépan). Un top drive moderne constitue un system intégré qui comprend le manuel de manutention des tiges, le moufle, tête d'injection et un ou plusieurs moteurs qui font tourner l'arbre d'entraînement. Tous en un seul corps qui est le système de forage Top drive, et qui est la nouvelle génération de l'équipement de forage pétrolier, en plus de ces

fonctions principales il maintient les tiges à l'aide du système de manutention des bras de levage, [6].

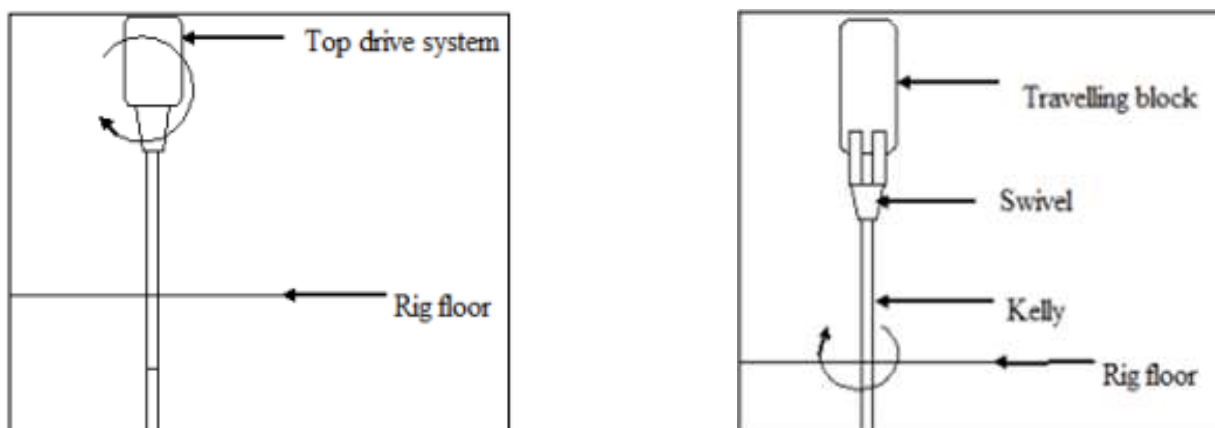


Figure I-4 :Techniques de rotation

I.4.3.2. Fonction de pompage

Les pompes à boue doivent assurer un débit compatible avec le rendement optimal du trépan utilisé. L'importance de la circulation de boue est telle dans le forage rotary qu'une installation de forage de quelque importance possède généralement deux pompes de même puissance, ce qui permet de réparer ou d'entretenir l'une d'elles pendant que l'autre est en service et d'avoir ainsi une sécurité à peu près totale quant au maintien de la circulation. Une pompe à boue est généralement entraînée par un moteur électrique ou à combustion interne auquel elle est reliée par une transmission qui se compose de :

a) La partie mécanique

- Le bâti,
- Couple d'engrenage,
- L'embrayage comprend : l'excentrique, les bielles, les crosses.

b) La partie hydraulique

- Corps de pompe,
- Chemises,
- Pistons et tiges de pistons,
- Clapets,
- Amortisseur de pulsations,
- Soupape de décharge.

Les pompes à boue sont caractérisées par les paramètres suivants :

- La puissance mécanique,
- La vitesse,
- La course.

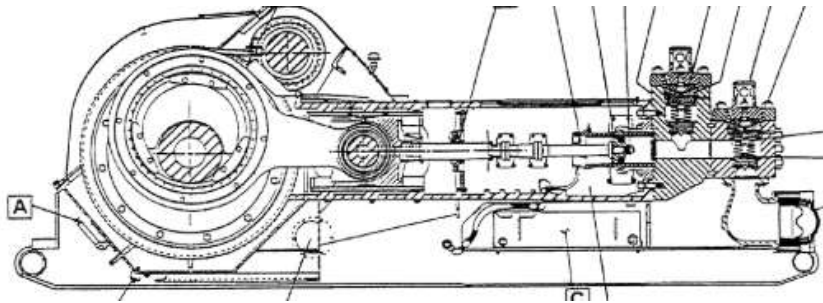


Figure I-5: Pompe à boue

I.4.3.2.1. Circuit de la boue de forage

Dans le cas de forage par table de rotation le départ de ce cycle, quand le foreur démarre les pompes à boue, ces pompes aspirent la boue des bassins par l'intermédiaire d'un tuyau flexible placé à la tête d'injection, cette dernière reliant la tige d'entraînement au moufle, on injecte la boue de forage à l'intérieur des tiges. Si on utilise le top drive pour tourner la garniture de forage le top drive jouera le rôle de la tête d'injection et la tige d'entraînement la boue de forage débouche de l'outil par des trous aménagés dans le corps même de l'outil. Elle permet également, en remontant, d'entraîner avec elle par l'espace compris entre l'extérieur des tiges et la paroi du trou les débris de roche broyée. Ces débris sont évacués en surface sur des tamis vibrants ; la boue ainsi libérée de ces débris revient vers des bassins à boue et sera de nouveau injectée à l'intérieur des tiges.

Il existe aussi des autres éléments auxiliaires de la fonction pompage :

- Les conduites,
- Les vannes,
- Le flexible d'injection,
- Les tamis vibrants, dégazeur, Agitateurs.

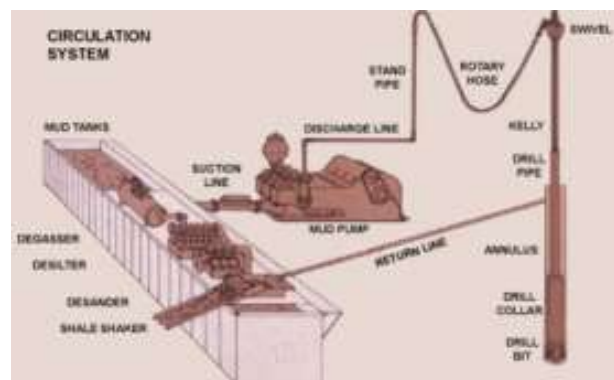


Figure I-6 : Circuit de la boue de forage [7]

I.4.3.3. Fonction de levage

Pour soulever la garniture de forage il faut utiliser un treuil de grande capacité, car la garniture de forage peut atteindre un poids supérieur à 150 tonnes ou plus

a) Les équipements de levage

Le treuil e forage C'est le cœur d'un appareil de forage. Sa capacité caractérise un puits et indique la classe de profondeur des forages que l'on pourra effectuer. Le treuil est divisé en différentes parties mécaniques :

- Le tambour de manœuvre,
- Boîte de vitesse,
- Le frein principal,
- Le frein auxiliaire,
- Le frein électromagnétique.

b) Structure de la tour de forage

Il existe trois grandes catégories de structures :

- Le derrick,
- Le mât ,
- Le mât haubané.



Figure I-7: Treuil de forage

I.4.3.3.1. Le mouflage

Le mouflage est l'enroulement du câble de forage entre les poulies des moufles fixe et mobile en plusieurs brins (jusqu'à 14 brins). Le mouflage permet de démultiplier le poids de la garniture de forage et diminuer la vitesse de son déplacement.

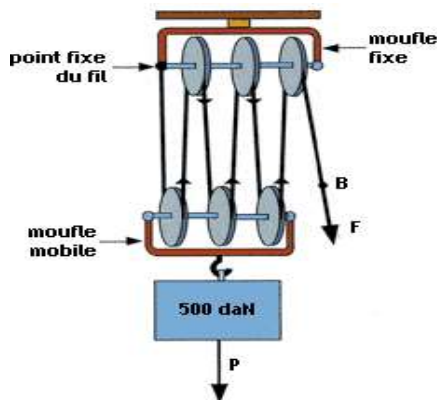


Figure I-8: Mouflage

Le système de mouflage comprend essentiellement le moufle fixe, le moufle mobile et le câble de forage.

- a) **Moufle fixe** : C'est l'ensemble des poulies sur lequel passe le câble. Il est supporté par la plate-forme supérieure de la tour de forage.
- b) **Moufle mobile et crochet** : En général, l'ensemble des poulies et du crochet sont assemblés d'une manière compacte. Le crochet comporte un amortisseur pour limiter les chocs à la reprise de la charge et faciliter le vissage des connexions. Aux deux oreilles latérales sont suspendues les bras de l'élévateur. [8]



Figure I-9: Moufle mobile [9]



Figure I-10: Moufle fixe [9]

c) Câble de forage

Les câbles utilisés sur l'installation de sondage sont des câbles en acier mais dont l'âme peut parfois être en chanvre. Autour de l'âme sont enroulés des torons, chacun de ces torons étant composés d'un certain nombre de fils d'acier [10].



Figure I-11: Câble de forage

I.4.4. Le groupe des forces

I.4.4.1.1. Le moteur Caterpillar

Pour accomplir les différentes tâches, dans les appareils de forage ont nécessité une force motrice, pour la rotation de l'outil de forage, le levage et la descente des tiges de forage, la circulation de la boue de forage, La force motrice sur les appareils de forage est généralement constituée d'un ensemble de génératrices ou d'alternateurs qui sont entraînés par des moteurs diesel (Caterpillar).



Figure I-12: Moteur Caterpillar

I.4.4.1.2. Le compresseur

Dans l'appareil de forage l'air est comprimé par un compresseur à vis pour alimenter et commander plusieurs types d'équipements, ce qui concerne, entre autres, les instruments de précision et de mesure et les vannes automatisées [11].

I.4.5. Les équipements de sécurité

Ils assurent la sécurité du puits en cas de venue. Les équipements de sécurité sont constitués de :

- La tête de puits,
- L'accumulateur de pression,
- Le BOP,
- Le manifold de duses.

I.4.6. Matériel de manœuvre

Pour les manœuvres de changement d'outils, de descente de tubage, ainsi que pour les ajouts de tiges en cours de forage, on utilise du matériel de plancher que l'on appelle matériel de manœuvre, ce sont :

- Les clés,
- Les cales ou coins de retenue,
- Les élévateurs,
- Les colliers de sécurité.

I.5. Conclusion

Le champ pétrolier de Hassi Messaoud est l'un des plus importants champs pétroliers en Algérie et en Afrique. Il est situé dans le bassin de l'Atlas saharien, dans la région de Ouargla. Ce champ a une importance majeure dans l'économie algérienne en raison de sa production significative de pétrole brut.

L'ENAFOR, ou Entreprise Nationale de Forage, est l'une des sociétés algériennes chargées des activités de forage et de workover (travaux de réparation ou de réaménagement de puits) dans les champs pétroliers. Elle opère dans plusieurs régions du pays, y compris à Hassi Messaoud.

L'appareil de forage est un ensemble sophistiqué d'équipements spécialisés utilisés dans l'industrie pétrolière pour explorer et exploiter les ressources souterraines. Il comprend plusieurs équipements pour pénétrer dans le sol et la roche. Ces composants travaillent ensemble de manière synchronisée pour permettre des opérations de forage efficaces et sûres, contribuant ainsi à l'extraction de pétrole et de gaz naturel.

CHAPITRE.II.La garniture de forage

II.1. Introduction

Dans le domaine du forage, la garniture de forage, également connue sous le nom de train de tiges, représente un ensemble complexe et essentiel d'équipements qui joue un rôle crucial dans l'industrie pétrolière. Elle est responsable de la transmission de la rotation et de la puissance nécessaires pour forer des puits profonds dans le sous-sol. La garniture de forage est composée d'une multitude de composants spécialisés qui garantissent la progression efficace et sécurisée d'un puits à travers les diverses formations géologiques. Depuis la surface du sol jusqu'aux profondeurs inaccessibles de la croûte terrestre, la garniture de forage assure un soutien crucial, une stabilité indispensable et des moyens de communication essentiels entre la surface et le fond du puits.

La conception, la fabrication et l'utilisation appropriées des tiges de forage sont d'une importance capitale pour assurer le succès et l'efficacité des projets de forage. Ce chapitre s'engage à offrir une exploration approfondie des divers aspects et des notions générales sur la garniture de forage, depuis sa composition jusqu'à son utilisation sur le terrain. Nous analyserons en détail les matériaux employés, les différentes formes de raccords et d'accessoires, ainsi que les aspects liés à la conception. En acquérant une compréhension approfondie de ces éléments, les experts du secteur seront mieux équipés pour sélectionner, manipuler et entretenir les tiges de forage de manière sécurisée et efficace, contribuant ainsi au succès global des opérations de forage.

II.2. La garniture de forage

Une garniture de forage, également appelée train de tiges ou train de forage, est un ensemble d'outils et d'équipements assemblés pour forer un trou dans le sol lors d'opérations de forage. Elle assure la liaison entre la surface et le fond du puits et a pour principale fonction de transmettre l'énergie nécessaire (mécanique et hydraulique) de la surface au fond du trou. La garniture de forage est constituée des tiges et des masses tiges, les tiges (drill pipe) supportent les masses-tiges (drill collar) qui exercent un poids sur l'outil, la garniture se met en rotation à partir de la table de rotation par l'intermédiaire d'une tige d'entraînement (Kelly), la boue circule à l'intérieur de la garniture pour arriver à l'outil afin d'évacuer les déblais à travers l'espace annulaire en dehors du puits. Une garniture de forage est constituée des principaux éléments suivants :

- Tige d'entraînement,
- L'outil de forage,
- Les tiges,
- Les tiges lourdes,
- Les masses tiges,
- Les Stabilisateurs,
- Autres équipements spéciaux.

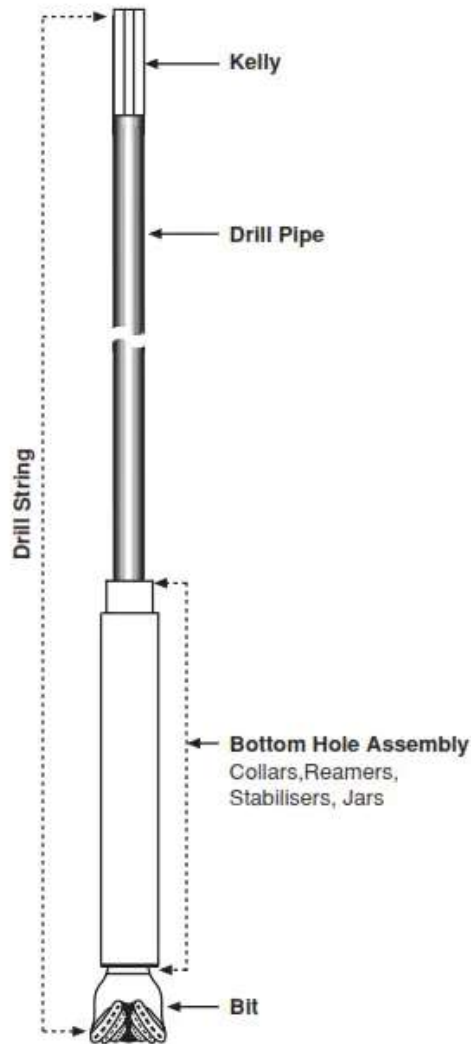


Figure II-1: Garniture de forage

II.2.1. La tige d'entraînement [Kelly]

Dans le forage rotatif, la tige d'entraînement, également connue sous le nom de tige carrée. Elle supporte la charge totale de garniture. La tige d'entraînement est généralement de section carrée ou hexagonale. La forme carrée offre une meilleure résistance à la torsion, tandis que la forme hexagonale facilite l'assemblage et le désassemblage. C'est la tige qui transmet le mouvement de rotation de la table de rotation au train de tiges. On utilise la tige carrée lorsqu'on travaille avec la table de rotation et on ne l'utilise pas lorsqu'on travaille avec le top drive.

Une vanne de sécurité, dite « upper kelly cock », est vissée sur la connexion supérieure afin de fermer l'intérieur de la garniture en cas d'éruption. Le même rôle est rempli par une vanne

inférieure manuelle dite « grey valve » qui permet également, lors d'un ajout de tige, d'empêcher la boue de s'écouler sur le sol. Le tubulaire le plus long de la garniture est la tige d'entraînement, mesurant entre 40 et 54 pieds. En réalité, il est nécessaire de pouvoir excaver un peu plus que la longueur d'une tige afin de réaliser un ajout [12].

II.2.2. Les tiges [drill pipes]

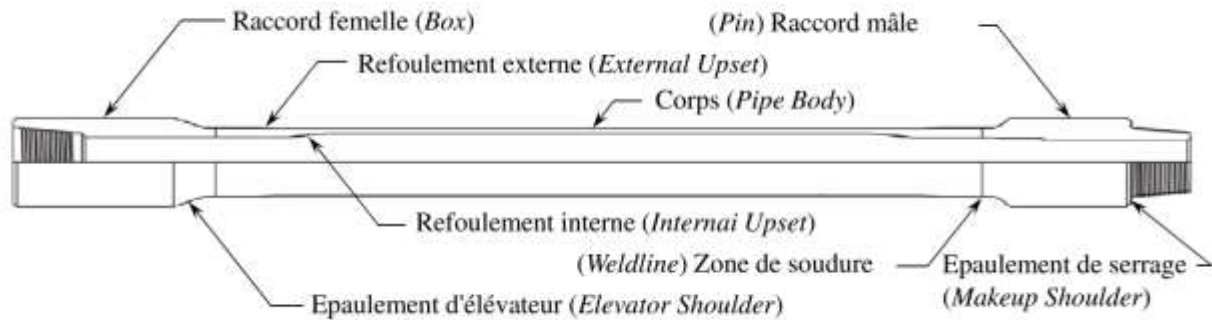


Figure II-2 : Tige de forage (drill pipe)

Les tiges de forage, éléments centraux du système de forage rotatif, sont de longs tubes creux en acier sans soudure, qui forment la majorité de la garniture (90 à 95%). Elles sont reliées par vissage et vont de la surface jusqu'au fond du puits. La profondeur du trou et les conditions de forage influencent leur diamètre et leur épaisseur.

Comme montre la figure II-2 l'élément central d'une tige de forage est un tube en acier long et creux, le corps, qui est conçu à partir d'alliages d'acier suffisamment résistants pour supporter les hautes pressions lors du forage. A chaque extrémité de ce tube, on observe des zones plus épaisses, semblables à des renforts, afin de renforcer les points de connexion. On nomme ces renforts « épaulements » (upsets en anglais) : à l'intérieur d'une extrémité et à l'extérieur de l'autre. Les raccords mâle et femelle se trouvent vissés sur ces extrémités renforcées. L'extrémité mâle, dite « tourillon » (pin en anglais), est filetée en extérieur. Les filetages de l'extrémité femelle, dite « boîte » (box en anglais), sont enroulés vers l'intérieur. Ces éléments sont solidement assemblés l'un dans l'autre afin de former une longue chaîne de plusieurs tiges de forage, constituant ainsi l'épine dorsale du train de forage. Il est essentiel de garantir la qualité de la soudure qui relie ces raccords au corps. Une soudure endommagée pourrait entraîner une panne importante lors du forage. Afin d'assurer une connexion impeccable, l'extrémité mâle présente un épaulement lisse juste au-dessus des filetages. L'épaulement de serrage, également connu sous le nom d'épaulement de serrage (makeup shoulder en anglais), oriente l'extrémité femelle afin de garantir un alignement précis lors du vissage. L'épaulement d'élévateur (elevator shoulder en anglais) est un autre épaulement situé sur le corps au-dessus du raccord femelle. Cette surface plane permet une utilisation sécurisée d'outils spécifiques tels que les "élévateurs" qui soulèvent et manipulent la tige de forage lors des opérations. Finalement, des bandes de couleur peintes sur le corps permettent de déterminer la catégorie et l'état d'usure de la tige de forage. Tous les membres de l'équipe de forage doivent être

informés des capacités et des limitations de la tige en suivant un système standardisé. La tige de forage (drillpipe) est composée essentiellement de :

- a) **Le corps (pipe body)** : le corps est la partie principale de la tige de forage, généralement cylindrique, constituée d'un tube en acier d'une longueur standard de 9 mètres. L'épaisseur de paroi du corps varie en fonction de la taille et de la classe de la tige de forage.
- b) **Les Raccords** : Les extrémités filetées d'une tige de forage permettent de les assembler entre elles et avec d'autres éléments du train de forage. Ces extrémités sont divisées en deux catégories :
 - a) **Raccord mâle (Pin)** : Il s'agit de la partie finale de la tige de forage équipée d'un filetage externe conique. Cet orifice est percé à l'intérieur du joint femelle de la tige de forage qui l'entoure. En général, l'extrémité mâle est plus épaisse que l'extrémité femelle afin d'augmenter la résistance.
 - b) **Raccord femelle (Box)** : Il s'agit du bout de la tige de forage équipée d'un filetage interne en forme de cône. Ce filetage accueille et se joint avec le filetage externe du raccord mâle de la tige de forage qui l'entoure. Le diamètre interne de l'extrémité femelle est un peu plus grand que le diamètre extérieur de l'extrémité mâle afin de faciliter l'assemblage.
- c) **Epaulement d'élévateur** : il est un élément essentiel des tiges de forage qui assure un levage sûr et efficace pendant les opérations de forage.
- d) **Epaulement de serrage** qui joue un rôle crucial dans le serrage et la connexion de la tige de forage au reste du train de forage.

Les protecteurs de filetage sont des capuchons vissés sur les extrémités des colliers de protection lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Ils protègent les filetages contre les dommages et la contamination lorsqu'ils sont stockés ou transportés.



Figure II-3: Protecteurs de filetage

Les tiges de forage sont vissées entre elles par l'intermédiaire de raccords filetés (les tool joints). En général, ils sont soudés par friction sur les "upsets" du tube. Il existe des «internal upset» (IU), «external upset» (EU), «internal et external upset» (IEU). Ce sont des surépaisseurs sur l'intérieur du tube (IU), sur l'extérieur du tube (EU) ou sur les deux (IEU). On utilise ces surépaisseurs pour souder les tool-joints ou raccords qui permettent de lier les tiges de forage les unes aux autres



Figure II-4: External upset EU



Figure II-5: Internal upset IU



Figure II-6: Internal and external upset IEU

II.2.2.1. Caractéristiques de tiges de forage

- a) **Le diamètre nominal** : C'est le diamètre extérieur du corps de la tige, exprimé en pouces. Les diamètres normalisés sont : 2 3/8", 2 7/8", 3 1/2", 4", 4 1/2", 5", 5 1/2"

Le diamètre intérieur n'est pas une cote directe : c'est une valeur obtenue à partir du poids nominal du corps de la tige.

- b) **Le grade** : La qualité de l'acier est indiquée par le grade, qui évalue sa résistance à la traction et à la torsion. L'API a établi les grades d'acier suivants : E75 - X95 - G105 - S135. La limite d'élasticité (Re), la résistance à la traction minimale (Rm,min) et la résistance à la traction moyenne (Rm,moy) sont des caractéristiques spécifiques de chaque grade. Ces propriétés sont sélectionnées à partir des tests de traction mécanique effectués sur divers échantillons. Le grade standard est le grade E. Si la résistance mécanique des tiges de ce niveau ne suffit plus, le forage se poursuit en ajoutant des tiges d'un grade supérieur (X, G ou S) [14].

Tableau II-1 : Propriétés des aciers utilisés pour le corps des tiges de forage [13]

Grade API	Limite d'élasticité (Re)				Résistance à la traction minimale des échantillons testés (Rm,min)		Résistance à la traction moyenne des échantillons testés (Rm,moy)	
	Minimum		Maximum					
	(kpsi)	(MPa)	(kpsi)	(MPa)	(kpsi)	(MPa)	(kpsi)	(MPa)
E75	75	517	105	724	100	689	123.0	847.5
X95	95	655	125	862	105	724	132.4	912.2
G105	105	724	135	931	115	793	144.0	992.2
S135	135	931	165	1138	145	1000	167.0	1150.6

- c) **La gamme** : Exprime la longueur des tiges. Les tiges de forage sont disponibles en trois gammes API de longueur comme montré dans le tableau II-2. La gamme 2 est la plus courante. Puisque les tiges individuelles ne sont pas de longueur uniforme en raison de leur processus de fabrication, chaque tige doit être mesurée sur le site de forage et sa longueur exacte enregistrée dans un cahier de tiges [15].

Tableau II-2 : Gammes API de longueur des tiges

Gamme	Longueur	
	(ft)	(m)
1	18-22	5.49-6.71
2	27-30	8.23-9.14
3	38-40	11.58-13.72

d) Poids nominal

Le poids nominal correspond au poids linéaire du corps de la tige (le poids des tool joints n'est pas inclus dans cette valeur). Il s'exprime en lb/ft.

Tableau II-3 : Poids Nominaux des Tiges de Forage (Drillpipes) Conformes aux Spécifications API

Taille de la tige (OD)	Poids nominal (lb/ft)	Poids à bout plat (lb/ft)	Nuance d'acier
2 3/8 pouces (60,3 mm)	6,65	6,26	E, X, G, S
2 7/8 pouces (73 mm)	10,4	9,72	E, X, G, S
3 1/2 pouces (88,9 mm)	9,5	8,81	E
3 1/2 pouces (88,9 mm)	13,3	12,31	E, X, G, S
3 1/2 pouces (88,9 mm)	15,5	14,63	E
4 pouces (101,6 mm)	14	12,93	E, X, G, S
4 1/2 pouces (114,3 mm)	13,75	12,24	E
4 1/2 pouces (114,3 mm)	16,6	14,98	E, X, G, S
4 1/2 pouces (114,3 mm)	20	18,69	E, X, G, S
5 pouces (127 mm)	16,25	14,87	E
5 pouces (127 mm)	19,5	17,93	E
5 pouces (127 mm)	25,6	24,03	E
5 1/2 pouces (139,7 mm)	19,2	16,87	E
5 1/2 pouces (139,7 mm)	21,9	19,81	E
5 1/2 pouces (139,7 mm)	24,7	22,54	E
6 5/8 pouces (168,3 mm)	25,2	22,19	E
6 5/8 pouces (168,3 mm)	27,7	24,22	E

Le poids à bout plat est le poids de la tige de forage sans tenir compte des connexions (filetages) à chaque extrémité. En d'autres termes, il s'agit du poids du corps principal de la tige, excluant les parties renforcées aux extrémités

II.2.2.2. Classification et marquage des tiges de forage

La classe d'une tige de forage définit son degré d'usure après utilisation, et donc la diminution de sa section transversale, ce qui entraîne une altération de ses caractéristiques mécaniques. L'API a établi un système de classification des tiges de forage basé sur leur état d'usure :

- a) **Classe 1** : ces tiges sont neuves et n'ont jamais été utilisées,
- b) **Classe Premium** : ces tiges sont considérées comme étant de qualité supérieure et offrent une performance accrue par rapport aux classes inférieures,
- c) **Classe 2** : ces tiges présentent un léger degré d'usure et peuvent encore être utilisées dans certaines conditions de forage,
- d) **Classe 3** : ces tiges sont modérément usées et leur utilisation est généralement limitée à des forages moins exigeants.

Le marquage des tiges de forage est un système standardisé utilisé pour identifier la classe de qualité et l'état de la tige (tableau II-4) . Ce marquage joue un rôle crucial dans la fiabilité des opérations de forage, en fournissant aux foreurs des informations essentielles sur les caractéristiques et les limitations de chaque tige. Le tableau II-5 montre les pertes de résistance

Tableau II-4 : Marquage de classification et d'état des tool-joints

Marquage de classification des tiges de forage et tool-joints	Marquage de l'état du tool-joints
Classe 1 Une bande blanche	
Premium deux bande blanche	Rebut ou
Classe 2 Une bande jaune	Réparation en atelier Une bande rouge
Classe 3 Une bande orange	Réparation sur site Une bande verte
Rebut Une bande rouge	

Tableau II-5 : Pertes de résistance

Type de contrainte	Caractéristique des tiges	Classe I	Classe Premium	Classe II
Résistance en tension 10^3 daN	3 ½''-13.30 Grade E	120.8	94.4	81.6
	5 – 19.50 Grade E	176	138.6	120.3
Résistance en torsion daN.m	3 ½''-13.30 Grade E	2520	1950	1680
	5 – 19.50 Grade E	5580	4380	3790
Pression d'éclatement MPa	3 ½''-13.30 Grade E	95.1	87	76.1
	5 – 19.50 Grade E	65.5	59.9	52.4

II.2.3. Les tiges lourdes [HWDP : heavy weight drill pipes]

Dans l'industrie du forage, l'utilisation de tiges lourdes a été largement adoptée. En général, la HWDP est constituée de tubes à paroi épaisse avec un renflement au milieu, appelé patin d'usure central, et de raccords d'outil spéciaux, jusqu'à deux fois plus longs qu'une tige de forage normale. Ils sont fréquemment employés dans le fond de la tige de forage où la contrainte est élevée. Cette concentration de stress est causée par différents éléments, tels que :

- La forte différence de section entre la tige de forage et les colliers de forage,
- La différence de rigidité entre la tige de forage et les colliers de forage,
- Le rebond causé par le trépan pendant le perçage.

Contrairement à la tige de forage standard, la HWDP peut être utilisée en compression, similaire aux colliers de forage, sauf dans les trous verticaux de grand diamètre.



Figure II-7: Tiges lourdes

II.2.4. Les masse-tiges [drill collars]

Les masses-tiges de forage sont des pièces tubulaires à paroi épaisse usinées à partir de barres d'acier solides, généralement en acier au carbone ordinaire, mais parfois en alliage de nickel-cuivre non magnétique ou d'autres alliages de première qualité non magnétiques. Ils sont souvent en fonte ou en acier, ajoutées aux tiges de forage pour augmenter leur poids, alourdir la colonne de forage et améliorer la transmission de l'énergie de rotation du moteur de surface vers le trépan. Le rôle des masses tiges de forage, également appelées "drill collars" en anglais, est multiple et crucial dans le procédé de forage rotatif [16] :

- **Appliquer un poids sur le trépan (Weight on Bit - WOB) :** Le poids important des masses tiges exerce une charge sur le trépan, permettant ainsi de le forcer à pénétrer la roche lors du forage.
- **Acheminer la boue de forage :** Les masses tiges possèdent un passage intérieur qui permet au fluide de forage de circuler depuis la surface jusqu'au trépan. Ce fluide joue

un rôle essentiel en refroidissant et lubrifiant le trépan et le trou foré, tout en évacuant les débris rocheux créés par le forage.

II.2.4.1.Types des masses tiges

- a) **Masses-tiges lisses** : Elles ont un diamètre extérieur constant sur toute leur longueur. C'est la forme la plus simple et couramment utilisée.
- b) **Masses-tiges spiralées** : Elles sont conçues avec des rainures en spirale. Ces rainures permettent de réduire le risque de coincement par pression différentielle dans les formations poreuses perméables. L'usinage de trois plats en spirale maintient la circulation du fluide de forage autour du corps de la masse-tige.
- c) **Masses-tiges carrées** : Ces masses-tiges sont très rigides et produisent un bon guidage dans le trou car elles sont utilisées avec un jeu de 1/32" entre le trou foré et les coins de la masse-tige.

Tableau II-6: Dimensions standards des masses-tiges habituellement utilisées

Diamètre extérieur (pouce)	Diamètre intérieur (pouce)	Masse linéaire Kg/m	longueur (m)	Masse totale Kg	Diamètre de forage (pouce)
11 ¼	3	467.6	9.114	4276	/
9 ½	3	323.2	9.114	2955	de 24 à 12 ¼
8	2 13/16	223.1	9.114	2040	9 7/8
7 ¾	2 13/16	207.4	9.114	1896	9 7/8
6 ¾	2 13/16	149.8	9.114	1370	de 8 ¾ à 8 ½
7 ¾	2 ¼	69.6	9.114	636	de 6 ¾ à 6



Figure II-8:Masses tiges spiralées

II.2.5. Les outils de forage (drilling bits)

L'outil de forage (le trépan) : il est situé à l'extrémité inférieure de la garniture de forage, responsable de la fragmentation de la roche et de l'avancement du trou. Il existe différents types de trépan, adaptés aux différentes formations géologiques et aux vitesses de forage souhaitées. Le choix d'un trépan de forage est une décision cruciale qui repose sur une analyse approfondie des caractéristiques géologiques du sous-sol. En sélectionnant le type de trépan adapté à la formation à traverser, on optimise les performances de forage, la durée de vie des outils et la sécurité de l'opération. Selon le mode d'attaque du fond du puits on distingue deux grandes familles des outils de forage :

- Les trépan diamantés,
- Les trépan à molettes.

II.2.5.1. Les outils diamantés:

Ils sont de trois types :

- À diamants naturels,
- À taillants PDC ou diamants polycristallins,
- À taillants TSP ou diamants polycristallins thermostables.

La différence entre ces trois types réside dans la nature des éléments de coupe qui détruisent la roche de manière mécanique différente : le diamant naturel s'abrasif et agit comme une macro meule, tandis que les diamants polycristallins cisailent la roche en découpant des copeaux comme un outil de tournage des métaux. L'ensemble de ces outils de forage sont monoblocs, ce qui leur confère une certaine résistance.



Figure II-9: Trépan diamanté naturel et trépan diamanté à PDC

II.2.5.2. Les trépanes à molettes

Dans le cadre du forage rotatif, les trépan à molettes, ou trépan à rouleaux, sont des outils de forage spécifiques destinés à briser la roche en la faisant éclater plutôt que de la couper ou de la percussionner. Ils servent fréquemment à creuser des puits dans des roches dures et abrasives comme le granit, le basalte et les roches consolidées.

II.2.6. Stabilisateurs

Il s'agit d'une composante essentielle de la garniture de fond de trou BHA (Bottom hole assembly) qui représente la partie inférieure de la garniture de forage. Leur diamètre est presque identique à celui de l'outil. Il fait partie de la garniture, notamment au niveau des masse-tiges, afin de maintenir et de contrôler la trajectoire de l'outil, ce qui est indispensable pour assurer la stabilité de la garniture de forage dans le puits, en évitant sa flexion et sa déviation. La forme et la rigidité de ces structures diffèrent en fonction des terrains, des abrasivités et des appuis plus ou moins longs désirés. Il semble qu'une BHA ne puisse contenir plus de trois stabilisateurs en raison des frottements considérables qu'ils produisent dans le puits.

Ils ont pour fonction de centrer la tige dans le trou et de réguler le comportement directionnel de la garniture en fonction de leur nombre et de leur position. Les stabilisateurs jouent encore ce rôle même si les nouveaux systèmes de contrôle de la direction du forage deviennent de plus en plus sophistiqués.

Différents types de stabilisateurs de train de tige de forage existent, tels que les stabilisateurs complets, les stabilisateurs à manchon amovible et les stabilisateurs à lames soudées. Le stabilisateur intégral est constitué d'une seule pièce d'acier, le stabilisateur à manchon amovible est constitué de lames sur un manchon vissé sur le corps, le stabilisateur à lames soudées est constitué de lames soudées sur le corps. Chaque catégorie comporte ses propres bénéfices et inconvénients, et la décision dépend des conditions de forage particulières et de la disponibilité des équipements de réparation disponibles.

Les stabilisateurs de train de tige de forage remplissent plusieurs fonctions, notamment la réduction de la déviation de la trajectoire, la réduction des vibrations et le contrôle du diamètre du trou, ce qui permet des opérations de forage plus fluides. Ils sont utilisés dans les applications de forage directionnel et de trou droit, et leur construction tout-en-un les rend fiables et économiques pour le forage dans diverses formations.

De manière technique, le choix des stabilisateurs repose sur divers éléments techniques liés à l'opération de forage notamment le type d'application de forage, les conditions de forage et les besoins spécifiques de l'opération de forage. Le choix des stabilisateurs dépend également des performances requises, de la capacité à résister aux conditions de forage difficiles et abrasives, des conditions de forage spécifiques et des besoins spécifiques de l'opération de forage, tels que la zone de contournement requise et la pression de la semelle.



Figure II-10 : Différents types des stabilisateurs

II.2.7. Les éléments accessoires de la garniture de forage

II.2.7.1. Le jar

Ce dispositif est conçu pour stocker de l'énergie potentielle lorsqu'il est activé et la libérer brusquement lorsque la force de traction atteint un seuil spécifique. Lorsque l'outil de forage devient coincé ou rencontre une obstruction, une force de traction est appliquée sur la garniture de forage pour activer le jar. Cette force déclenche la libération de l'énergie stockée dans le jar, ce qui crée un impact puissant et soudain. Cet impact peut aider à briser les obstructions, à libérer l'outil coincé ou à surmonter les conditions difficiles du forage.

II.2.7.2. Les Raccords et adaptateurs

Les raccords et les adaptateurs sont des éléments qui permettent de connecter les différents éléments de la garniture de forage et de s'adapter aux variations de taille et de filetage.

- a) **Raccords de tige** : Ces raccords sont utilisés pour relier deux tiges de forage de longueurs différentes. Ils sont souvent filetés à chaque extrémité pour permettre une connexion sécurisée et étanche.
- b) **Adaptateurs de tige** : Ces adaptateurs sont utilisés pour relier des tiges de forage de types différents, par exemple pour passer d'un type de filetage à un autre.

- c) **Adaptateurs de trépan** : Ils permettent de fixer le trépan à la garniture de forage. Ces adaptateurs peuvent varier en fonction du type de trépan utilisé et du système de fixation requis.
- d) **Adaptateurs de stabilisateur** : Ils sont utilisés pour fixer les stabilisateurs à la garniture de forage.
- e) **Adaptateurs de changement de taille** : Lorsque des variations de diamètre de tige ou de taille d'outil sont nécessaires, des adaptateurs spéciaux peuvent être utilisés pour permettre une transition en douceur entre les différentes tailles.

II.2.7.3. Les Outils de forage directionnel

Ils sont des outils spéciaux qui sont utilisés pour contrôler et orienter la direction du trou de forage.

II.2.7.4. Moteurs de fond de trou (MFT)

Les moteurs de fond de trou sont des outils rotatifs montés à l'extrémité inférieure de la garniture de forage. Ils utilisent la rotation de la garniture pour générer une force de torsion qui permet de dévier la trajectoire du trou de forage dans une direction souhaitée. Les MFT peuvent être de différents types, tels que les moteurs à turbine ou à moteur à boue, en fonction des conditions du sous-sol et des besoins du projet.

II.2.7.5. Outils de mesure de la trajectoire (MWD/LWD)

Les outils de mesure de la trajectoire sont utilisés pour surveiller en temps réel la direction et l'inclinaison du trou de forage pendant les opérations de forage. Ces outils peuvent inclure des systèmes de télémétrie de fond de trou (MWD) et des outils de diagraphie de fond de trou (LWD) qui fournissent des données géologiques et opérationnelles essentielles pour orienter le forage dans la direction souhaitée tout en évitant les obstacles et en optimisant le rendement.

II.2.7.6. Les clapets anti-retours

Dans une garniture de forage assurent que le fluide de forage circule dans une seule direction, empêchant son reflux. Ils maintiennent la pression de fond, évitent les éruptions de boue et protègent les équipements. Les types incluent les clapets à bille, à soupape et à disque, souvent situés dans le système de circulation de la boue. En résumé, les clapets anti-retours sont vitaux pour la sécurité et l'efficacité du forage.

II.2.7.7. Amortisseurs de chocs : Ils réduisent les chocs et les vibrations pendant le forage, ce qui peut prolonger la durée de vie des équipements et améliorer l'efficacité du forage.

II.3. Conclusion

La garniture de forage, un ensemble d'éléments essentiels dans l'appareil de forage est conçue pour garantir la rotation de l'outil de forage au fond du puits. Composée de divers éléments spécialisés, elle assure la transmission efficace du couple de rotation et de la poussée de forage depuis la surface jusqu'au point de forage. Les tiges de forage, servent de lien principal entre la surface et le fond du puits, tandis que les subs agissent comme des connecteurs robustes entre les différentes parties de la garniture. Les stabilisateurs, montés le long des tiges, maintiennent la trajectoire du trou de forage, Ensemble, ces composants forment une configuration stratégique qui optimise les opérations de forage, permettant ainsi d'atteindre les objectifs de production de manière sûre et efficace.

CHAPITRE.III. Calcul de la garniture de forage

III.1. Introduction

La garniture de forage est soumise à différentes forces telles que la tension, la compression, la torsion, la flexion, ainsi que la pression d'écrasement et la pression d'éclatement. Ces forces peuvent être constantes ou variables, se répétant plusieurs fois (charges cycliques) ou s'appliquant sur une courte période (charges d'impact). Par conséquent, décrire l'état de stress d'une tige de forage est une tâche complexe en raison de la diversité et de la variabilité de ces forces.

III.2. La poussée d'Archimède

La poussée d'Archimède est la force particulière que subit un corps plongé complètement ou en partie dans un fluide (liquide ou gaz) soumis à un champ de gravité. On parle aussi du principe d'Archimède et on le présente de la façon suivante assez fréquemment : « Tout corps plongé dans un fluide au repos, entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre, subit une force verticale, dirigée de bas en haut égale et opposée au poids du volume de fluide déplacé ; cette force est appelée (poussée d'Archimède) [17].

Dans notre cas d'étude le fluide est la boue de forage et le corps est la garniture de forage qu'est généralement toujours immergée dans la boue au cours du forage.



Figure III-1: Poussée d'Archimède

III.2.1. La flottabilité

La flottabilité est une force résultante de la poussée de fluide subie par le volume immergé d'un corps, opposée au poids total de ce même corps. (Si elle est positive, le corps surnage ; si elle est négative, le corps s'enfonce.

III.2.2. Conditions de flottabilité

Un corps flotte si la valeur de son poids est égale ou inférieure à la valeur de la force de la poussée d'Archimède. Un corps coule si la valeur de son poids est supérieure à la valeur de la poussée d'Archimède.

Le facteur de flottabilité k est défini par :

$$K = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_a} \quad (III-1)$$

K : coefficient de flottabilité,

ρ_f : Masse volumique du fluide dans le puits en Kg/m^3 ,

ρ_a : Masse volumique de l'acier en Kg/m^3 .

Nous avons pour une garniture en acier :

$$K = 1 - \frac{d_f}{7.85}$$

d_f : densité de la boue,

7.85 : densité de l'acier.

III.3. Résistance à l'effort axiale

La connaissance des efforts axiaux sur la garniture de forage est essentielle pour comprendre son comportement pendant le processus de forage. Les efforts axiaux sur la garniture de forage se divisent en deux catégories principales :

- a) **Effort de traction** : Il s'agit de la force exercée dans le sens de l'axe du trou de forage, tirant la garniture vers le haut. Cette force se produit lorsque la tige de forage est soumise à une charge ascendante, comme lors de l'extraction de la garniture du trou.
- b) **Effort de compression** : À l'inverse, l'effort de compression est la force appliquée dans la direction opposée à l'axe du trou de forage, poussant la garniture vers le bas. Il se produit lorsque la tige de forage est soumise à une charge descendante, comme lors de la pénétration du trépan dans la formation rocheuse.

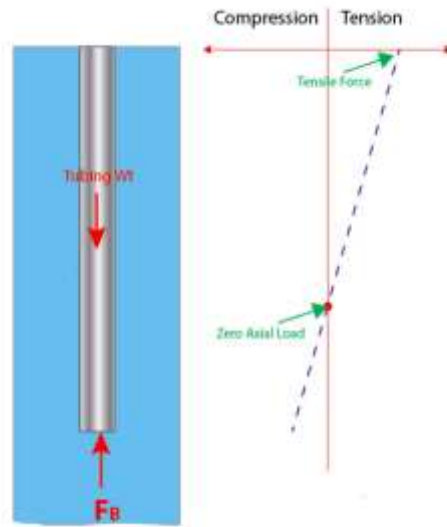


Figure III-2 : Forces axiales exercées sur la garniture

III.3.1. Le point neutre

En prenant en compte le train de tiges "suspendu" dans le vide, il est possible de récupérer une partie du poids en fond de trou (WOB : "Weight on Bit"). Dans ce cas, la partie supérieure du train de tiges est représentée.

La partie supérieure est soumise à une tension interne tandis que la partie inférieure est soumise à une compression interne. La transition entre les efforts internes de compression et de tension est effectuée à un certain point le long du train de tiges. On définit ce point comme le point de tension et de compression neutre.

Les tiges sont soumises à une pression hydrostatique en présence d'une boue de forage.

En abordant les véritables tensions, les efforts internes réels au point neutre sont inexistants. En revanche, en prenant en compte l'idée des efforts internes apparents, les contraintes apparentes à ce sujet sont prises en compte.

La pression hydrostatique à la profondeur du point neutre est égale à la pression hydrostatique ambiante [18].

III.3.2. Position du point neutre

On peut calculer la hauteur du point neutre qui est définie à partir de l'extrémité inférieure de la garniture en m par la relation suivante :

$$H_n = \frac{F}{P_m - (\rho_e S_e - \rho_i S_i) \cdot g} \quad (III-2)$$

H_n : Hauteur du point neutre

F : Force appliquée sur le fond en N

P_m : poids moyen au mètre dans l'air du tubulaire sous le point neutre en N/m

ρ_i : masse volumique du fluide à l'intérieur du tubulaire en kg/m^3

ρ_e : masse volumique du fluide à l'extérieur du tubulaire en kg/m^3

S_i : section intérieure du tubulaire en m^2

S_e : section extérieure du tubulaire en m^2

g : accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2)

III.3.3. Répartition des contraintes dans la garniture de forage

La répartition des contraintes dans une garniture en absence de fluide, n'est pas la même lorsque cette garniture est plongée dans un fluide. Quatre configurations peuvent se présenter :

- a) La garniture est suspendue dans un puits vide. Chaque élément de la garniture est en état de tension.
- b)) La garniture est fixée dans un puits contenant un fluide de forage de masse volumique ρ_f . La partie inférieure de la garniture est en compression en raison de la poussée d'Archimède qui exerce une pression sur la surface. Cependant, cette partie ne présente aucun risque de flambage car la contrainte axiale est toujours inférieure en valeur absolue à la pression hydrostatique. La poussée d'Archimède tend à provoquer une flexion du tubulaire dirigée vers le haut lorsque la garniture s'éloigne de la verticale. Cependant, le poids du tube, qui dépasse cette poussée (étant donné que la densité de l'acier est plus élevée que celle du fluide environnant), le ramène à une position verticale.
- c) Une partie de la garniture repose sur la partie inférieure du puits qui est vide. La partie inférieure en compression présente un risque de flambage.
- d) Le fond du puits est rempli de fluide de masse volumique ρ_f , ce qui entraîne une partie de la garniture. La partie inférieure de la garniture présente un risque de flambage car la pression hydrostatique est inférieure en absolu à la contrainte axiale [19].

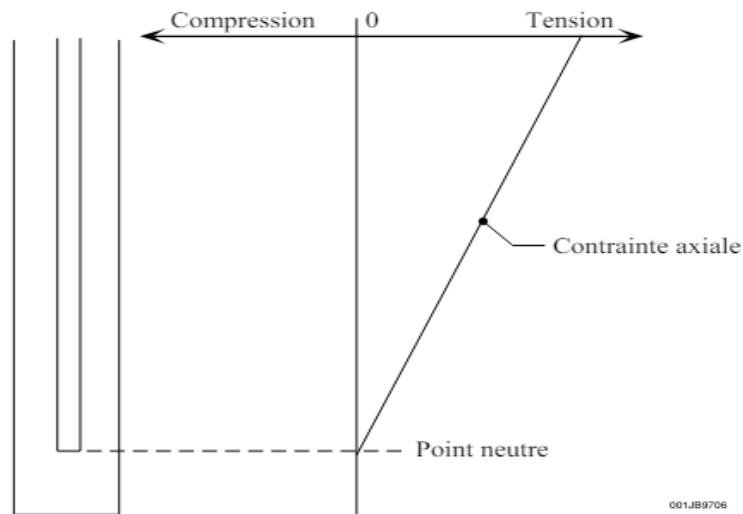


Figure III-2: Puits vide, la garniture ne repose pas sur le fond

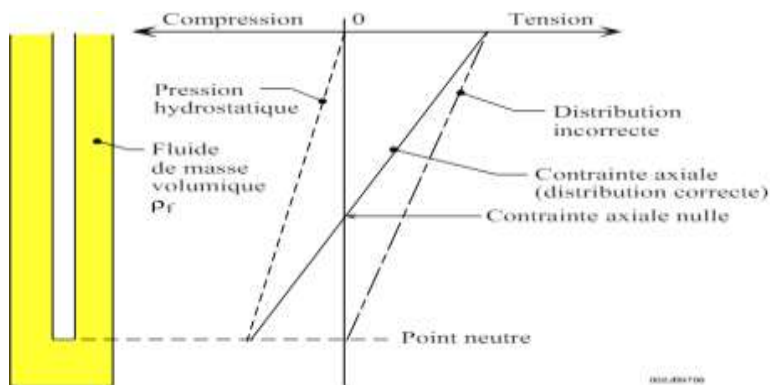


Figure III-3: Puits rempli de fluide de masse volumique ρ_f , la garniture ne repose pas sur le fond.

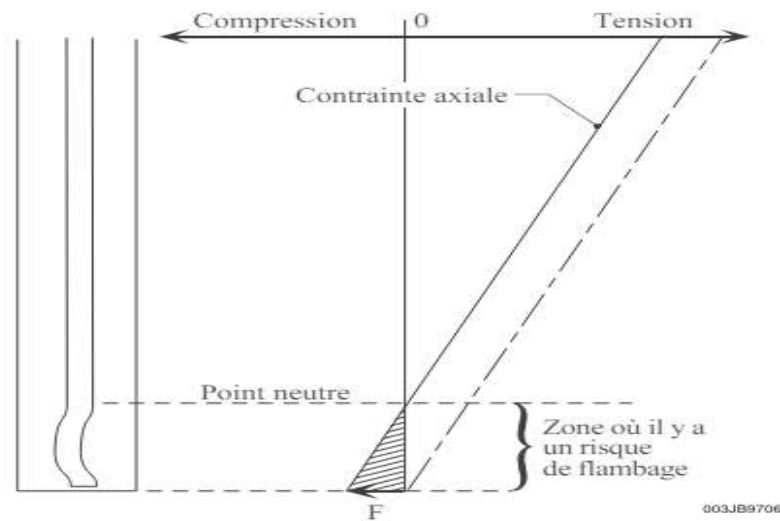


Figure III-4: Puits vide, une partie de la garniture appuie sur le fond avec une force F .

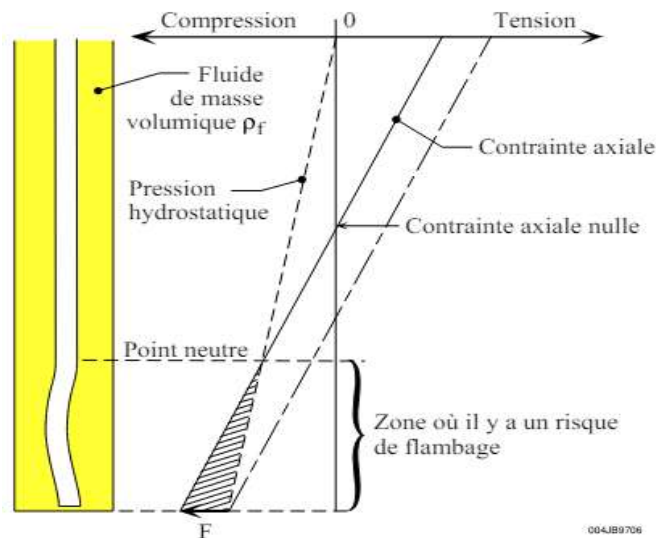


Figure III-5: Puits plein de fluide de masse volumique ρ_f , une partie de la garniture appuie sur le fond avec une force F .

Il est très important de contrôler attentivement les forces appliquées sur les tiges de forage pendant leur utilisation et de mettre en place des mesures préventives pour s'assurer qu'elles ne dépassent pas les limites de sécurité, évitant ainsi les risques de rupture.

Lorsque l'on exerce une traction T sur une barre de section S la contrainte de traction σ produite dans la tige est :

$$\sigma = \frac{T}{S} \quad (III-3)$$

L'allongement :

$$\Delta L = L \cdot \frac{\sigma}{E} \quad (III-4)$$

III.3.3.1. Déformation élastique

Lorsqu'une force est appliquée à un matériau, celui-ci se déforme. Si cette déformation est proportionnelle à la force appliquée et que le matériau reprend sa forme initiale dès que la force est supprimée, on parle de déformation élastique. Sur le diagramme contrainte-déformation, la déformation élastique correspond à la partie rectiligne de la courbe. En d'autres termes, tant que la force appliquée (contrainte) reste dans cette zone, la déformation du matériau est réversible.

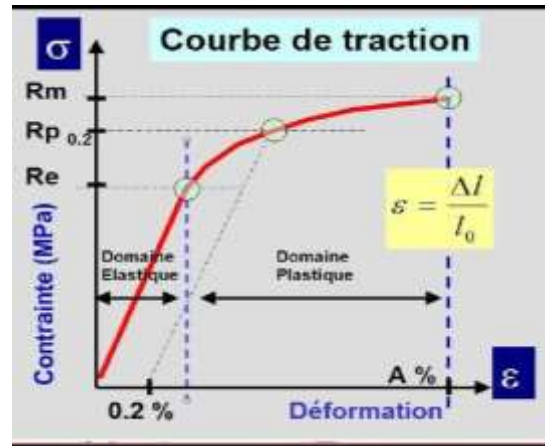


Figure III-6: Courbe de contrainte-déformation d'un métal ductile représente les différentes zones de déformations

III.3.3.2. Déformation plastique

Contrairement à la déformation élastique, la déformation plastique est permanente ou irréversible. Cela signifie que le matériau ne reprend pas sa forme initiale même après la suppression de la force appliquée. Cette déformation s'accompagne d'un déplacement permanent des atomes du matériau.

Pour illustrer la déformation plastique, prenons l'exemple d'une pâte à modeler. Si vous la pliez en deux, elle conserve cette forme même après que vous avez cessé de la plier. La déformation de la pâte à modeler est plastique.

Sur le diagramme contrainte-déformation, la déformation plastique correspond à la partie non rectiligne de la courbe. En d'autres termes, si la force appliquée dépasse un certain seuil (limite élastique), la déformation du matériau devient irréversible.

L'allongement relatif ϵ est sans unité. Il est donné par :

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (III-5)$$

D'autre part, l'allongement unitaire ϵ est proportionnel à l'effort de traction par unité de surface ce qui traduit par :

$$\frac{N}{S} = E \times \frac{\Delta L}{L_0} \Leftrightarrow \sigma = E \times \epsilon \text{ (loi de Hooke)}$$

$$\Delta L = \frac{N \times L}{E \times S} \Leftrightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Par convention :

- Allongements relatifs ε et contraintes de traction σ : positifs (+)
- Raccourcissements relatifs ε et contraintes de compression σ : négatifs (-)

III.3.3.3. Le coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson est le rapport entre la déformation de contraction transversale et la déformation d'extension longitudinale dans la direction de la force d'étirement. La déformation compressive est considérée négative. La déformation en traction est considérée positive.

La formule de calcul du coefficient de Poisson (ν) est :

$$\nu = - \frac{\text{déformation latérale}}{\text{déformation longitudinale}} \quad (III-6)$$

Considérons une barre cylindrique ayant un rayon initial r et une longueur L et soumise à l'effort normal N . Cet effort allonge la barre de ΔL (δ) et contracte son rayon de Δr (δ'). Les déformations dans le sens longitudinal ou axial et dans le sens latéral ou radial sont respectivement :

$$\varepsilon_{\text{long}} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\delta}{L} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{\text{lat}} = \frac{\Delta r}{r}$$

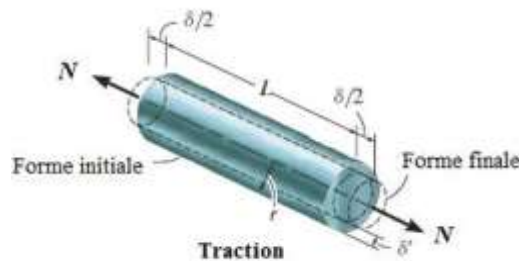


Figure III-7: La déformation

III.3.3.4. Le module d'élasticité

Le module d'élasticité E , ou module de Young, est une mesure de la rigidité d'un matériau face à une déformation élastique. Il s'agit de la pente de la partie rectiligne de la courbe contrainte-déformation, qui représente la relation proportionnelle entre la force appliquée (contrainte) et la déformation du matériau.

III.3.4. Tension maximale applicable sur la tige

Afin d'éviter toute déformation d'une tige d'un grade spécifique, il est impératif que la contrainte maximale de traction exercée sur les tiges de forage reste en dessous ou égale à la limite élastique minimale de l'acier utilisé pour les tiges. Par conséquent, la traction maximale applicable sur une tige peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$T_{max} = \sigma_{emin} \cdot S \quad (III-7)$$

T_{max} : Tension maximale applicable sur la tige, en N,

σ_{emin} : Limite élastique minimale de l'acier utilisé, en Pa,

S : Section minimale de la tige, en m^2 .

Le formulaire du foreur fournit les valeurs de la traction maximale en fonction du grade d'acier, des dimensions nominales des tiges, du poids nominal et de l'usure des tiges. Afin d'assurer que les tiges de forage fonctionnent dans la plage élastique et pour minimiser le risque de déformation permanente, il est conseillé d'appliquer un facteur de sécurité et d'opter pour des valeurs de contrainte axiale inférieures à la limite d'élasticité maximale recommandée par l'API.

De plus, pour assurer une utilisation sécuritaire des tiges de forage, l'API recommande de maintenir une limite de contrainte axiale inférieure à 90% de la limite d'élasticité maximale pour les puits droits, et à 80% pour les puits déviés. Il est donc essentiel de suivre ces recommandations afin de garantir la sécurité et la fiabilité des opérations de forage et d'éviter les défaillances des tiges de forage.

III.4. Résistance à la torsion

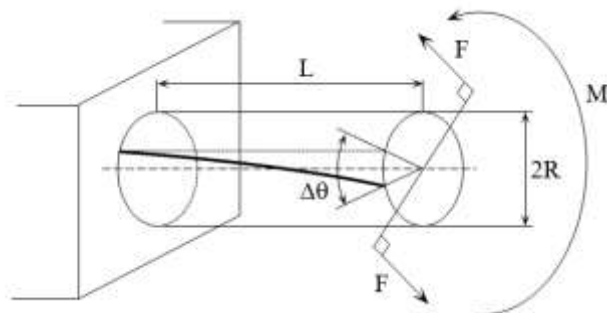


Figure III-8: Essai de résistance à la torsion

Pendant le processus de forage, les tiges de forage subissent des couples de torsion pour transmettre la puissance rotative du moteur de forage vers l'outil de coupe pour pénétrer dans le sol ou la roche.

La résistance à la torsion d'une connexion de tige de forage est une caractéristique cruciale pour assurer la stabilité et l'efficacité du processus de forage. Cette résistance est principalement déterminée par la conception et la qualité de la connexion entre les tiges de forage.

Une connexion robuste doit être capable de résister aux couples de torsion générés pendant le forage sans se déformer ni se rompre. Plusieurs facteurs influent sur la résistance à la torsion d'une connexion de tige de forage : la conception de la connexion, le matériau, le traitement thermique, la tolérance de fabrication.

Lorsque l'on exerce un couple de torsion M sur une barre métallique de rayon R la contrainte de torsion τ exercée sur cette barre est :

$$\tau = \frac{M}{\frac{J}{R}} \quad (III-8)$$

τ : Contrainte de torsion, en MPa.

M : Moment du couple de torsion, en N.m, (avec $M = 2 F.R.$)

r : Rayon de la barre, en m

J : Moment d'inertie polaire de la barre, en m^4

Pour une barre creuse comme les tiges de forage, le moment d'inertie polaire est :

$$J = \frac{\pi}{2} (r_e^4 - r_i^4) \quad (III-9)$$

r_e : Rayon extérieur de la barre, en m

r_i : Rayon intérieur de la barre, en m

La contrainte de torsion est maximale sur la surface extérieure de la tige de forage est :

$$\tau = \frac{M}{\frac{J}{r_e}} \quad (III-10)$$

$$\frac{J}{r_e} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r_e^4 - r_i^4}{r_e} \quad \text{S'appelle module polaire de section transversale}$$

En général, on s'assure que l'effort maximale de torsion reste en-dessous de la limite d'élasticité. Différentes idées sur le cisaillement nous donnent des ratios S_{min} / T_{max} entre 1.33 et 2. L'API a opté pour $\sqrt{3}$ comme référence

$S_{\min}$: l'effort minimal de cisaillement.

$T_{\max}$: l'effort maximal de torsion.

Avec cette valeur, on peut calculer le couple de torsion maximal appliqué sur une tige.

$$M_{\max} = 0.577 \cdot \sigma_{\min} \cdot \left(\frac{J}{Re} \right) \quad (III-11)$$

Le formulaire fourni aux foreurs indique la valeur maximale de torsion en fonction du grade et de l'usure de la classe. Pour éviter toute déformation permanente des tiges, il est conseillé d'appliquer un facteur de sécurité et de maintenir les valeurs de couple de torsion en-dessous de la limite maximale fournie par l'API.

En optant pour une valeur de couple de torsion inférieure à 90 % de la limite maximale recommandée par l'API, on garantit que les tiges fonctionnent dans une plage élastique avec une marge de sécurité suffisante pour éviter toute déformation permanente. Cette approche contribue à prolonger la durée de vie des tiges et à minimiser le risque de défaillance prématurée. Le couple maximal qu'une tige de forage peut supporter dépend du couple de serrage de la connexion, qui est généralement inférieur à la limite de torsion admissible. Par conséquent, le corps des tiges est déjà soumis à un couple de torsion inférieur à la limite maximale recommandée.

La valeur de la déformation angulaire en fonction du couple M appliqué sur une longueur L de tige est donnée par la relation suivant :

$$\Delta\theta = \frac{L \cdot M}{GJ} \quad (III-12)$$

Si l'on exprime la déformation angulaire en nombre de tours, la relation précédente s'écrit :

$$N = \frac{\Delta\theta}{2\pi} = \frac{L \cdot M}{2 \cdot \pi^3 \cdot G \cdot (re^4 - ri^4)} \quad (III-13)$$

N : Nombre de tours.

III.5. Résistance à l'éclatement

La rupture par éclatement est une forme de défaillance potentiellement dangereuse qui peut survenir lors du forage. Elle se produit lorsque la pression exercée sur la roche dépasse sa résistance à la compression, la roche peut se fissurer ou éclater de manière soudaine et violente. Cela peut entraîner des dommages à la garniture de forage.



Figure III-9: Exemple d'une défaillance par éclatement d'un tubage[28]

La formule de Barlow est utilisée par l'API pour déterminer la pression intérieure maximale P_{imax} afin que la contrainte interne à la paroi du tube ne dépasse pas la limite élastique. Pour les tiges de classe I, la formule est :

$$P_{imax} = 0.875 \cdot \left(\frac{2 \cdot \sigma_{emin} \cdot e}{D} \right) \quad (III-14)$$

e : Épaisseur nominale du corps de la tige (voir Formulaire du foreur - caractéristiques géométriques des tiges de forage).

Le facteur **0.875** provient d'une tolérance à la fabrication de 12.5 % sur l'épaisseur des tiges neuves.

D : Diamètre nominal extérieur du corps de la tige.

Pour les autres classes, la formule est :

$$P_{imax} = \left(\frac{2 \cdot \sigma_{emin} \cdot e}{D} \right) \quad (III-15)$$

e : sera diminué de 20 % pour les tiges de classe S, de 30 % pour celles de classe II. Dans les deux formules précédentes, **D** et **e** sont exprimés en **m**, **P_{imax}** et **σ_{emin}** en **MPa**.

III.6. Résistance à l'écrasement

Lorsque la paroi de la tige de forage est soumise à une pression externe élevée, elle peut céder et se déformer, ce qui entraîne un écrasement. Ce phénomène survient généralement lorsque la pression exercée par la boue de forage dans l'espace annulaire dépasse la pression interne de la tige

de forage. En conséquence, la paroi de la tige se déforme plastiquement et se plie sous la pression externe.

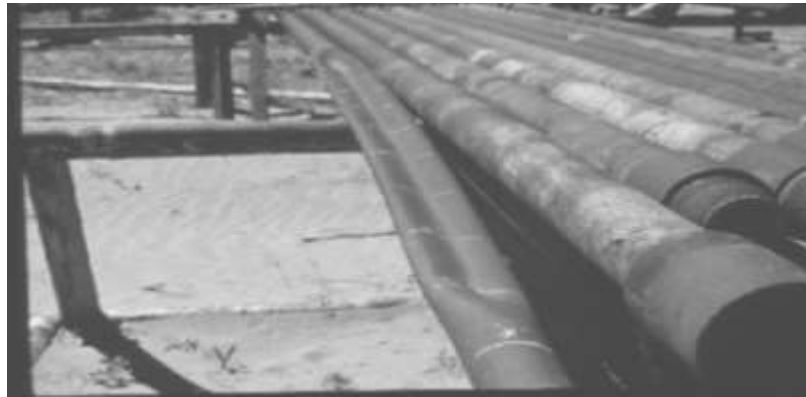


Figure III-10: Défaillance par écrasement

La limite nominale de la pression d'écrasement représente la pression maximale que la tige de forage peut supporter avant que sa paroi ne subisse une déformation permanente. Il est crucial de respecter cette limite lors de l'utilisation des tiges de forage afin d'éviter tout risque de défaillance par écrasement.

L'API utilise différentes formules pour calculer la pression externe maximale qu'un tube peut supporter en fonction du rapport entre son diamètre nominal **D** et son épaisseur nominale **e**.

La première formule est :

$$P_{emax} = 2 \cdot \sigma_{emin} \cdot \left(\frac{\frac{D}{e} - 1}{\left(\frac{D}{2}\right)^2} \right) \quad (III-16)$$

Cette formule s'applique lorsque le rapport **D / e** est :

- Inférieur ou égal à 13,67 pour les tiges de grade E,
- Inférieur ou égal à 12,83 pour les tiges de nuance X 95
- Inférieur ou égal à 12,56 pour les tiges de grade G 105
- Inférieur ou égal à 11,90 pour les tiges de grade S 135

La seconde formule est :

$$P_{emax} = \sigma_{emin} \cdot \left(\frac{A'}{D/e} - B' \right) \cdot C \quad (III-17)$$

Les valeurs de **A'**, **B'**, **C** et du rapport **D / e** sont données dans le tableau suivant :

Tableau III-1: Les valeurs à utiliser dans la formule III-17

Grade	A'	B'	C	D/e
E	3.060	0.0642	1805	de 13.67 à 23.09
X95	3.125	0.0745	2405	de 12.83 à 21.21
G105	3.162	0.0795	2700	de 12.56 à 20.66
S135	3.280	0.0945	3600	de 11.90 à 19.14

La troisième formule :

$$P_{emax} = \sigma_{emin} \cdot \left(\frac{A'}{D/e} - B' \right) \quad (III-18)$$

Les valeurs de **A'**, **B'** et **D / e** sont données dans le tableau suivant :

Tableau III-2 : Les valeurs à utiliser dans la formule III-18

Grade	A'	B'	D/e
E	1.985	0.0417	de 23.09 à 32.05
X95	2.047	0.0490	de 21.21 à 28.25
G105	2.052	0.0515	de 20.66 à 26.88
S135	2.129	0.0613	de 19.14 à 23.42

La dernière formule: $P_{emax} = \frac{46.95 \cdot 10^6}{(D/e) \cdot [(D/e) - 1]^2}$ (III-19)

Cette formule s'applique lorsque le rapport **D / e** est :

- Supérieur ou égal à **32,05** pour les tiges de grade **E**,
- Supérieur ou égal à **28,25** pour les tiges de nuance **X 95**
- Supérieur ou égal à **26,88** pour les tiges de grade **G 105**
- Supérieur ou égal à **23,42** pour les tiges de grade **S 135**

III.6.1. Combinaison de contraintes

III.6.1.1. Combinaison de contraintes de la traction et de la torsion

Lorsque la tige de forage est soumise à un couple de torsion associé à une charge axiale (traction) qui dépasse les valeurs limites spécifiées, cela peut entraîner une défaillance de la tige. Cette défaillance peut se manifester sous la forme d'une surface de rupture ou des fissures

L'API utilise le critère de Von Mises pour évaluer la résistance à la rupture par fatigue des tiges de forage dans leur plage élastique. Ce critère se fonde sur l'énergie de déformation des tiges de forage et tient compte des effets des trois principales composantes de contrainte (traction, compression et cisaillement).

Dans la configuration d'effort de traction et torsion, la relation suivante est utilisée

$$\sigma^2 + 3\tau^2 \geq \sigma_{emin}^2 \quad (III-20)$$

σ_{emin} : Limite élastique minimale de l'acier utilisé, en Pa,

σ : Contrainte de traction, en Pa,

τ : Contrainte de torsion, en Pa.

Nous retrouvons les deux critères cités précédemment :

- Pour la traction pure, $\tau = 0$
- Pour la torsion pure, $\sigma = 0$

III.6.1.2. Combinaison de contraintes (traction, torsion et éclatement)

Tableau III-3: Combinaison de trois contraintes traction, torsion et éclatement

		ÉCRASEMENT										ÉCLATEMENT										
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
C O M P R E S S I O N T R A C T I O N	100	0	30	40	45	49	50	49	45	40	30	0										
	90	30	43	52	57	60	62	62	60	57	52	43	30									
	80	40	52	60	65	69	71	72	71	69	65	60	52	40	17							
	70	45	57	65	71	75	78	79	79	78	75	71	65	57	45	26						
	60	49	60	69	75	80	83	84	85	84	83	80	75	69	60	49	30					
	50	50	62	71	78	83	86	88	90	90	88	86	83	78	71	62	50	30				
	40	49	62	72	79	84	88	91	93	93	93	91	88	84	79	72	62	49	26			
	30	45	60	71	79	85	90	93	95	96	96	95	93	90	85	79	71	60	45	17		
	20	40	57	69	78	84	90	93	96	98	98	98	96	93	90	84	78	69	57	40		
	10	30	52	65	75	83	88	93	96	98	99	99	98	96	93	88	83	75	65	52	30	
	0	0	43	60	71	80	86	91	95	98	99	100	99	98	95	91	86	80	71	60	43	0
	10		30	52	65	75	83	88	93	96	98	99	99	98	96	93	88	83	75	65	52	30
	20			40	57	69	78	84	90	93	96	98	98	98	96	93	90	84	78	69	57	40
	30			17	45	60	71	79	85	90	93	95	96	96	95	93	90	85	79	71	60	45
	40				26	49	62	72	79	84	88	91	93	93	93	91	88	84	79	72	62	49
	50					30	50	62	71	78	83	86	88	90	90	88	86	83	78	71	62	50
	60						30	49	60	69	75	80	83	84	85	84	83	80	75	69	60	49
	70							26	45	57	65	71	75	78	79	79	78	75	71	65	57	45
	80								17	40	52	60	65	69	71	72	71	69	65	60	52	40
	90									30	43	52	57	60	62	62	60	57	52	43	30	
	100											0	30	40	45	49	50	49	45	40	30	0

Données Vallourec

Pendant qu'on fore, la torsion, la traction et la pression à l'intérieur de la garniture de forage interagissent. On dispose de peu de données sur des combinaisons de ces contraintes. Le tableau montre les valeurs de torsion en fonction des autres contraintes (données Vallourec).

III.7. Défaillance de train de tiges par flambage

Le flambage est un phénomène mécanique qui se produit lorsqu'un élément structural, tel qu'une colonne, une tige ou une poutre, subit une charge de compression axiale excessive. Lorsque cette charge dépasse un certain seuil critique, l'élément peut fléchir latéralement de manière imprévisible, perdant ainsi sa capacité à supporter la charge de manière stable. Le flambage peut entraîner des déformations permanentes ou même la défaillance catastrophique de la structure. En général, le flambage se produit lorsque la force de compression est appliquée dans le plan de faiblesse ou de moindre résistance de l'élément structural.

Le flambement de la garniture de forage est un phénomène qui se produit lorsqu'une colonne de tiges de forage ou de tubes subit une charge axiale excessive, ce qui entraîne des déformations latérales ou des flexions non uniformes le long de sa longueur. Ce phénomène peut se produire dans divers contextes, notamment dans les puits de forage fortement inclinés ou dans des conditions où la colonne de forage est soumise à des forces de compression importantes [21].

III.7.1.1. Cas classique du flambage

Imaginons une barre verticale sans soutiens latéraux sur laquelle une force de compression F est appliquée le long de son axe longitudinal. Lorsque F atteint une valeur critique F_{fl} , la barre, qui était initialement droite, fléchit brusquement. Elle adopte alors une nouvelle position d'équilibre en fonction de la valeur de F , ce qui est appelé flambage. La barre fléchit dans la direction où elle est la moins résistante à la flexion, c'est-à-dire celle ayant le moment d'inertie le plus faible.

Si la force appliquée, F , reste en dessous de F_{fl} , la tige de forage ne présente pas de déformation notable. Lorsque F se situe entre F_{fl} et F_{cr} , la limite élastique du matériau n'est pas dépassée, ce qui signifie que la tige fléchit mais peut retrouver sa forme d'origine une fois que la force est retirée. Cependant, si F dépasse F_{cr} , la limite élastique est dépassée, entraînant une déformation permanente de la tige (même après le retrait de la force). Lorsque F continue d'augmenter et atteint F_{rp} , la tige se rompt.

La formule d'Euler permet de calculer la charge critique F_{cr} , nous avons

$$F = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_a}{L^2} \quad (III-21)$$

L : Longueur libre de flambage, qui dépend de la longueur réelle de la tige et du mode de fixation de ses extrémités, en m ,

I_a : Moment d'inertie de la section droite (perpendiculaire à l'axe longitudinal) de la tige, en m^4 .

III.7.1.2. Cas du flambage de la garniture de forage dans un puits

Dans un puits, la situation diffère du cas standard, car la garniture peut se reposer sur les parois du puits. La force de compression, F , appliquée à un élément de la garniture de forage, dépend du diamètre du puits et de son inclinaison.

Le flambage de la garniture de forage peut entraîner plusieurs problèmes, notamment :

- Des changements dans l'angle d'attaque de l'outil, ce qui rend difficile le contrôle de la trajectoire.
- Des frottements importants dans le puits.
- Une réduction ou même une suppression du poids sur l'outil.
- Une augmentation de l'usure des tubulaires (garniture et tubages).

Il est essentiel de déterminer la valeur de **F** qui provoque le flambage de la garniture de forage pour éviter ces problèmes. Cette valeur dépend de plusieurs facteurs, tels que le diamètre du puits, son inclinaison et la rigidité de la garniture.

Lorsqu'un train de tiges est exposé à des charges de compression croissantes, il passe par plusieurs étapes de configuration. La première étape, connue sous le nom de flambage sinusoïdal, survient à une certaine valeur de force de compression **F_{flsin}**. À ce stade, le train de tiges commence à se déformer de manière instable. Lorsque la force axiale devient inférieure à **F_{flsin}**, le train de tiges reprend sa forme initiale, entraînant une colonne de forage prenant une forme d'onde sinusoïdale, en s'enroulant d'avant en arrière le long du puits de forage.

Au cours de cette première étape, les frottements des trains de tiges contre la paroi du puits varient légèrement, car les forces de contact entre les tiges et le puits demeurent pratiquement inchangées. Cependant, à mesure que la charge de compression augmente, le train de tiges peut subir d'autres étapes de déformation.

Si les charges de compression sur le train de tiges sont augmentées, cela peut entraîner une deuxième phase de déformation appelée flambage hélicoïdal. Cette phase survient lorsque la force de compression atteint **F_{flhel}**, ce qui entraîne une montée en spirale du train de forage le long des parois du puits. Pendant cette phase, l'augmentation de la surface de contact entre le train de tiges et la paroi du puits accroît considérablement le frottement. Pour maintenir le même poids sur l'outil, une charge axiale supplémentaire doit être appliquée sur le train de tiges, augmentant ainsi le frottement.

Si les charges de compression continuent d'augmenter, la charge axiale peut être appliquée radialement sur les parois du puits, ce qui peut entraîner le blocage du train de tiges et l'incapacité de transmettre le poids sur l'outil (phénomène de blocage). Cela peut entraîner des arrêts coûteux et des retards dans les opérations de forage. Par conséquent, il est crucial de surveiller attentivement la charge de compression sur le train de tiges et d'ajuster les paramètres de forage si nécessaire pour éviter les déformations et les défaillances associées [22] .

Dans une analyse du flambage du coiled tubing, J. Wu a établi les relations suivantes :

Pour la garniture située dans la section verticale du puits :

$$F_{flsin} = 2.55 (E \cdot I_a \cdot K^2 \cdot P^2)^{1/3} \quad (III-18)$$

$$F_{flhel} = 5.55 (E \cdot I_a \cdot K^2 \cdot P^2)^{1/3} \quad (III-23)$$

Pour la garniture se présentant dans la partie inclinée du puits :

$$F = 2 \left(\frac{E \cdot I_a \cdot K \cdot P \cdot \sin i}{r} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{K \cdot P \cdot \cos i}{2} \right) \left(\frac{r \cdot \pi^4 \cdot E \cdot I}{K \cdot P \cdot \sin a} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{III-24})$$

Le terme $\left(\frac{K \cdot P \cdot \cos i}{2} \right) \left(\frac{r \cdot \pi^4 \cdot E \cdot I}{K \cdot P \cdot \sin a} \right)^{\frac{1}{4}}$ Est négligeable. En ne tenant pas compte de ce terme, la relation devient :

$$F_{flsin} = 2 \left(\frac{E \cdot I_a \cdot K \cdot P \cdot \sin i}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{III-25})$$

La force produisant le flambage hélicoïdal est donnée par :

$$F_{flhel} = 2(2\sqrt{2} - 1) \left(\frac{E \cdot I_a \cdot K \cdot P \cdot \sin i}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{III-26})$$

$$F_{flhel} = 2(2\sqrt{2} - 1) \left(\frac{E \cdot I_a \cdot K \cdot P}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{III-27})$$

Pour la garniture se trouvant dans la partie horizontale du puits :

$$F_{flsin} = 2 \left(\frac{E \cdot I_a \cdot K \cdot P}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{III-28})$$

F_{flsin}: Force à appliquer sur la garniture pour produire le flambement sinusoïdal, en N

F_{flhel}: Force à appliquer sur la garniture pour produire le flambement hélicoïdal, en N

I_a : Moment d'inertie de la section, en **m⁴**

P : Masse linéique dans l'air de l'élément de garnissage considéré, en N/m

k : Facteur de flottabilité, **i** : Inclinaison du puits mesurée par rapport à la verticale, en **degrés**

r : Jeu radial entre le trou et le scellement, en **m**

$$r = \frac{D_t - D_e}{2} \quad (\text{III-29})$$

D_t : Diamètre du trou, en m

D_e : Diamètre extérieur du joint, en m

III.8. Fatigue des tiges de forage

Lorsque les différentes parties du train de tiges sont utilisées pendant un certain temps et subissent des contraintes répétées, cela peut causer des dommages aux tiges de forage en raison de la fatigue. En gros, ces dommages surviennent principalement lorsque le train de tiges est en rotation tout en étant courbé dans une direction spécifique. La quantité de contrainte subie est directement liée à la courbure du train de tiges, ce qu'on appelle aussi le "dog-leg". Habituellement, ces courbures sont intentionnelles, contrôlées par le système de forage pour suivre la trajectoire requise pour le forage. Cependant, parfois, des courbures non intentionnelles peuvent se produire lors du passage à travers des formations rocheuses variées.

Les divers facteurs à l'origine de la fatigue des tiges de forage :

Lorsque la tige de forage tourne dans une partie courbée du puits, formant une courbure (ou "dog-leg"), cela crée une charge cyclique de flexion qui peut progressivement endommager la tige à cause de la fatigue. Pour évaluer la durabilité de la tige dans de telles conditions, on peut se référer à la courbe S-N spécifique au train de tiges, afin de déterminer sa durée de vie sous une contrainte de flexion donnée. Il est crucial de maintenir la contrainte de flexion induite par la courbure en dessous des limites de résistance à la fatigue pour garantir une rotation continue et sans limite de la tige [23].

De plus, les tiges de forage sont sujettes à des charges de tension élevées près de la surface du puits. Il est donc essentiel de tenir compte de cet effet axial lors de l'analyse de la fatigue. Il devient ainsi primordial de surveiller la contrainte de flexion sur la tige lorsqu'elle tourne dans une section courbée du puits, et d'adopter des mesures pour réduire cette contrainte si nécessaire. Des options telles que l'utilisation de tiges de plus grande taille ou de matériaux plus robustes peuvent contribuer à réduire la contrainte de flexion et à prolonger la durée de vie de la tige.

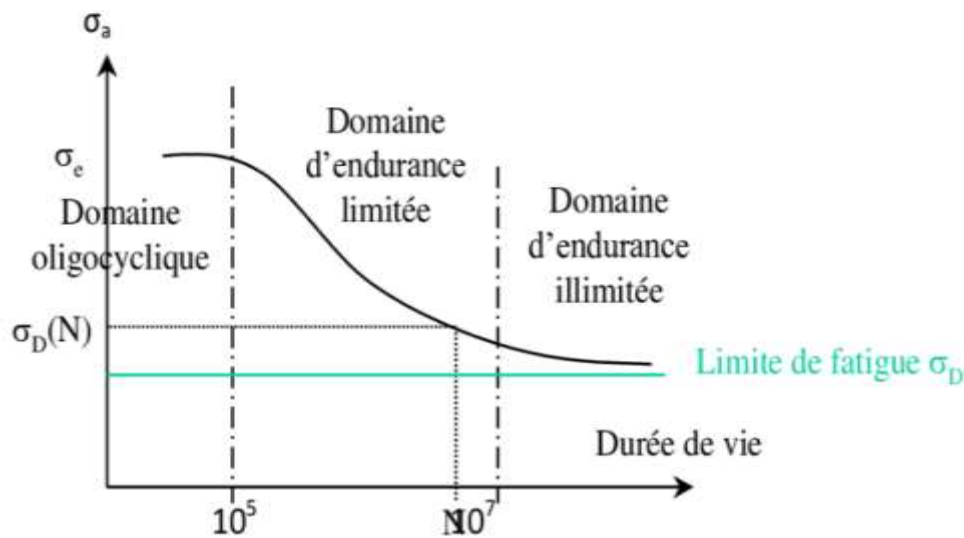


Figure III-12: Représentation schématique d'une courbe de Wöhler

Si l'on applique un poids excessif sur le train de tiges, cela peut causer des dégâts considérables aux tiges de forage. Une surcharge peut les faire fléchir, c'est-à-dire se courber et plier sous la pression. De plus, lorsque la tige est fléchie ou comprimée pendant la rotation, cela crée une charge cyclique de flexion, susceptible d'entraîner des dommages de fatigue. Ces dommages s'accumulent avec le temps et peuvent conduire à des ruptures imprévues des tiges de forage.

En dehors du risque de flambage, les vibrations peuvent aussi endommager les tiges de forage en provoquant des contraintes de flexion répétées. La force des vibrations peut être bien plus élevée que celle induite par la courbure du puits, et il est important de noter que ces deux facteurs peuvent se combiner pour causer des dommages encore plus graves aux tiges.

Les impacts intenses créés par les vibrations peuvent mener à des défaillances de fatigue, telles que les ruptures par torsion ou par érosion, qui sont des types de ruptures des tiges de forage. Malheureusement, les méthodes classiques d'analyse de fatigue, basées sur la courbe S-N, ne s'appliquent pas aux défaillances causées par les vibrations. Ainsi, pour prévenir ces échecs, il est crucial de réduire les vibrations lors du forage, en utilisant des outils adaptés et en ajustant la vitesse de rotation et le poids sur le train de tiges.

Les fissures de fatigue ont tendance à se former en surface des tiges, là où les contraintes de flexion sont les plus fortes, surtout lorsqu'elles sont exposées à des charges cycliques répétées. Des imperfections telles que la corrosion ou les entailles peuvent également servir de points faibles, favorisant l'apparition et la propagation de ces fissures. De plus, les fissures de fatigue peuvent aussi se former à l'intérieur des tiges en raison de la concentration de contraintes, particulièrement si des défauts existent dans la structure interne de la tige.

Lorsqu'une tige de forage, déjà affaiblie ou usée, est soumise à des charges cycliques, cela peut conduire à l'apparition de fissures. Ces fissures ont tendance à se propager à travers l'épaisseur de la garniture. Lorsqu'une fissure atteint la paroi du puits de forage, le fluide de forage sous haute pression peut s'infiltrer dans la fissure et commencer à l'éroder. Si ce processus d'érosion se poursuit, il peut élargir la fissure, créant ainsi un trou ou un élargissement localisé, ce qu'on appelle un "washout". Par conséquent, la présence de Wash out dans une tige de forage peut accroître le risque de rupture par fatigue en affaiblissant la résistance et l'intégrité de la tige [24]

Quand une fissure se forme dans la paroi d'un puits de forage et que l'érosion corrosive la fragilise davantage, la section restante pourrait ne plus être assez solide pour supporter les charges habituelles. Si la charge augmente et dépasse la capacité de cette section résiduelle, la garniture peut se rompre, un phénomène appelé "twist-off"



Figure III-13: Twist-off



Figure III-14 Wash-out

III.9. Conclusion

La garniture de forage est exposée à une diversité de contraintes mécaniques pendant son utilisation. Elle doit résister à la traction due au poids de la colonne de forage, à la torsion lors de la rotation de la tête de forage, à l'éclatement causé par la pression interne du fluide de forage, à l'écrasement sous des forces externes, à la défaillance par fatigue due aux charges cycliques et à la possibilité de flambage sous compression axiale. Ces défis exigent une conception robuste et des matériaux appropriés pour garantir la fiabilité et la sécurité de la garniture tout au long du processus de forage.

CHAPITRE.IV. Modélisation et simulation des fissures semi- elliptiques par ANSYS

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude de cas en utilisant le logiciel Ansys, qui est essentiel dans l'industrie du forage pour simuler et analyser les fissures potentielles dans les tiges de forage. Il permet une modélisation précise des matériaux et des charges subies pendant le forage, évaluant ainsi la durabilité des tiges et identifiant les zones à risque de fissuration.

Avant d'entrer dans les détails de la simulation des fissures avec Ansys, nous avons utilisé le logiciel Wellplan pour déterminer avec précision les forces réellement appliquées sur la garniture. Cette étape préliminaire était essentielle pour garantir l'exactitude des données entrées dans la simulation ultérieure. Wellplan offre une interface conviviale pour la modélisation du processus de forage, permettant une analyse approfondie des contraintes et des charges sur la garniture.

Une fois les forces déterminées par Wellplan, nous les avons ensuite intégrées dans notre simulation Ansys pour étudier la propagation des fissures. Cette approche intégrée nous a permis de comprendre plus précisément comment les forces réelles affectent le comportement des matériaux de la garniture et influencent le développement des fissures.

IV.2. Présentation de la zone d'étude

Cette étude s'appuie sur les données extraites du forage du trou de 8 pouces de diamètre du puits MDZ-802. Cependant, la simulation se concentre spécifiquement sur une tige située dans la partie supérieure de la garniture (16").

Tableau IV-1: Informations sur le forage

La densité de la boue sg	1.45
Types de BHA	Directional BHA
Le poids sur l'outils	10 tonnes
Types d'outil	KH813PX - New

Tableau IV-2 : Caractéristiques mécaniques des tiges de forage utilisés

Phase	Tige de forage 5 ½ "
Grade	G105
Limite d'élasticité (MPa)	724
Résistance à la traction (MPa)	931
Module d'Young (MPa)	206896
La limite de fatigue ou endurance (MPa)	137,89

IV.3. Les Fissures semi-elliptique

Les fissures semi-elliptiques dans les tiges de forage sont des problèmes sérieux dans l'industrie pétrolière et gazière, résultant souvent de contraintes mécaniques élevées pendant le forage.

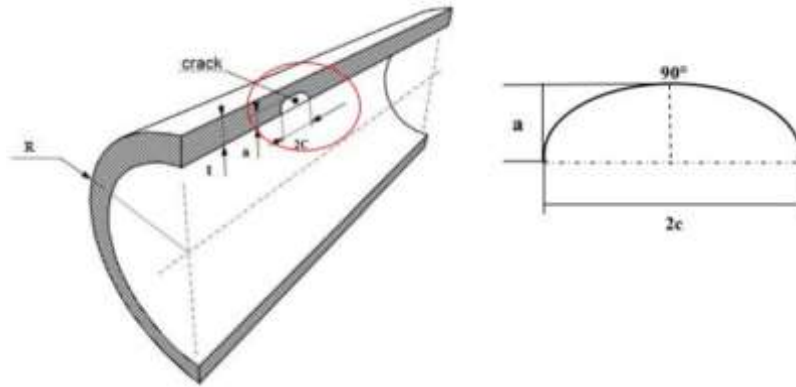


Figure IV-1: Représentation géométrique d'une fissure semi-elliptique interne

IV.3.1. Les modes de rupture

La mécanique de la rupture est essentielle pour comprendre et gérer les fissures, notamment dans le contexte des tiges de forage. Elle permet de prédire la propagation des fissures et les risques de rupture, en évaluant les propriétés des matériaux et les contraintes environnementales.

La mécanique de la rupture considère trois modes élémentaires de fissuration, connus sous le nom de modes I, II et III, qui décrivent les différentes configurations de chargement et de propagation des fissures

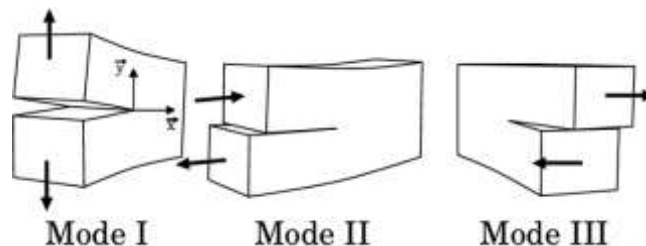


Figure IV-2: Les trois modes élémentaires de fissuration

IV.3.2. Facteur d'intensité de contraintes

Le facteur d'intensité des contraintes (FIC) K est le seul paramètre significatif, qui permet de connaître l'état de contrainte et de déformation en toute pointe de fissure. Irwin montre que le champ de contraintes, au voisinage de la pointe de la fissure, est décrit par un paramètre appelé "facteur d'intensité de contrainte", noté K . La rupture survient lorsque K atteint une valeur

critique K_c caractéristique du matériau et appelée "ténacité". Le facteur d'intensité de contrainte s'exprime en mode I sous la forme :

$$K_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$$

Où :

a : est la longueur initiale de la fissure,

σ : est la contrainte uniforme appliquée,

α : est un facteur géométrique (Coefficient de correction).

Irwin a postulé que la condition $K \geq K_{IC}$ représentait un critère de rupture

Les coefficients KI, KII et KIII exprimés en $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ sont les facteurs d'intensité de contrainte (FIC) respectivement associés aux modes I, II et III

IV.4. Analyse de répartition des contraintes par logiciel wellplan

Les données suivantes ont été obtenues à partir de la simulation de la garniture par WellPlan, qui est un logiciel utilisé dans l'industrie pétrolière et gazière pour la planification et l'analyse des opérations de forage, afin d'examiner le processus de forage L'objectif de cette étude est d'analyser comment les différentes contraintes sont réparties le long du train de tiges pendant l'opération de forage, nous pourrions repérer les zones du train de tiges subissant des contraintes élevées

IV.4.1.1.1. Les résultats de simulation de la garniture dans une partie de la phase 16 pouces

Tableau IV-3 : Résultats des forces et des contraintes agissant sur la garniture

Measure Depth (m)	Component Type	internal pressure (psi)	external pressure (psi)	axial force (tonne)	axial force Buoy. (E. tension)	Moment de torsion ft-(lbf)	Torsional Stress (psi)	axial stress (psi)	von meses stress (psi)
478,21	Drill Pipe	692,65	692,65	123,82	125,78	11 256,7	14 443,1	65 717,1	71 063,1
505,28	Drill Pipe	731,85	731,85	122,91	124,98	11 254,1	14 439,7	65 234,0	70 645,7
532,35	Drill Pipe	771,06	771,06	122	124,18	11 251,5	14 436,4	64 750,9	70 228,7
559,42	Drill Pipe	810,26	810,26	121,09	123,38	11 248,9	14 433,1	64 267,8	69 812,1
586,49	Drill Pipe	849,47	849,47	120,18	122,58	11 246,4	14 429,8	63 784,7	69 395,7
613,56	Drill Pipe	888,68	888,68	119,27	121,78	11 243,8	14 426,5	63 301,6	68 979,8
640,63	Drill Pipe	927,88	927,88	118,36	120,98	11 241,2	14 423,2	62 818,5	68 564,1
667,7	Drill Pipe	967,09	967,09	117,45	120,18	11 238,6	14 419,9	62 335,4	68 148,9
694,76	Drill Pipe	1 006,30	1 006,30	116,54	119,38	11 236,1	14 416,6	61 852,3	67 734,0
721,83	Drill Pipe	1 045,50	1 045,50	115,63	118,58	11 233,5	14 413,3	61 369,2	67 319,4
748,9	Drill Pipe	1 084,71	1 084,71	114,72	117,78	11 231,0	14 410,0	60 886,1	66 905,3
775,97	Drill Pipe	1 123,92	1 123,92	113,81	116,98	11 228,4	14 406,8	60 403,0	66 491,5

803,04	Drill Pipe	1 163,12	1 163,12	112,9	116,18	11 225,9	14 403,5	59 919,9	66 078,2
830,11	Drill Pipe	1 202,33	1 202,33	111,99	115,38	11 223,3	14 400,2	59 436,8	65 665,2
857,18	Drill Pipe	1 241,54	1 241,54	111,08	114,58	11 220,8	14 397,0	58 953,7	65 252,7
884,25	Drill Pipe	1 280,74	1 280,74	110,17	113,78	11 218,3	14 393,7	58 470,6	64 840,5
911,31	Drill Pipe	1 319,95	1 319,95	109,26	112,98	11 215,7	14 390,5	57 987,5	64 428,8
938,38	Drill Pipe	1 359,16	1 359,16	108,35	112,18	11 213,2	14 387,2	57 504,4	64 017,5
965,45	Drill Pipe	1 398,36	1 398,36	107,44	111,38	11 210,7	14 384,0	57 021,3	63 606,7
992,52	Drill Pipe	1 437,57	1 437,57	106,53	110,59	11 208,2	14 380,8	56 538,2	63 196,3
1 019,59	Drill Pipe	1 476,78	1 476,78	105,62	109,79	11 205,6	14 377,6	56 055,1	62 786,4

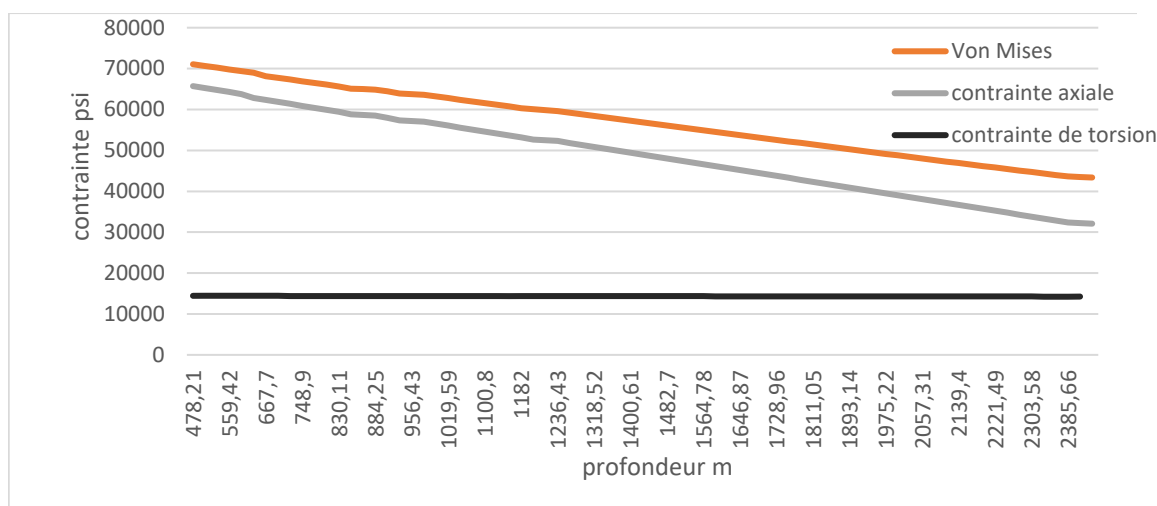


Figure IV-3: les contraintes de -traction-torsion-et de Von Mises agissant sur la garniture

Interprétation :

Le graphe illustre la distribution et la variation des contraintes exercées sur les tiges de forage en fonction de la profondeur du puits.

La contrainte de torsion sur les tiges reste généralement constante pendant le forage en raison, des conditions de forage contrôlées telles que la vitesse de rotation des tiges, le diamètre du trou de forage et la densité du fluide de forage,

La contrainte de traction est diminuée à mesure que la profondeur du puits de forage augmente, la contrainte axiale sur les tiges de forage diminue. Cela est principalement dû à la réduction du poids suspendu grâce à la pression hydrostatique exercée par la colonne de fluide de forage. L'effet de flottabilité accru à des profondeurs plus importantes contribue également à cette diminution. De plus, la répartition de la charge sur une plus grande longueur de tige réduit la contrainte axiale par unité de longueur

La contrainte de Von Mises est maximale dans la partie supérieure des tiges pendant le forage en raison de plusieurs facteurs mécaniques. Tout d'abord, dans la partie supérieure des tiges, la charge est généralement la plus importante car c'est là que le poids des tiges accumulées est

maximal. En conséquence, les contraintes dans cette zone sont influencées par le poids des tiges empilées au-dessus.

IV.5. La simulation des fissures par ANSYS

La simulation d'une fissure dans ANSYS implique plusieurs étapes pour modéliser avec précision le comportement de la fissure et son interaction avec la structure environnante.

IV.5.1. Définition des matériaux et des propriétés

Définition des propriétés matérielles appropriées aux composants de la tige, y compris les propriétés élastiques, plastiques.

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7800	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and...		
6	Young's Modulus	2.1E+11	Pa	
7	Poisson's Ratio	0.3		
8	Bulk Modulus	1.75E+11	Pa	
9	Shear Modulus	8.0769E+10	Pa	
10	Tensile Yield Strength	1.05E+05	psi	

Figure IV-4 Propriétés de matériau

IV.5.2. Préparation du modèle géométrique

Création de la géométrie de la structure dans le logiciel ANSYS. Garantir que la géométrie est correctement dimensionnée et que les détails importants de la fissure sont inclus.

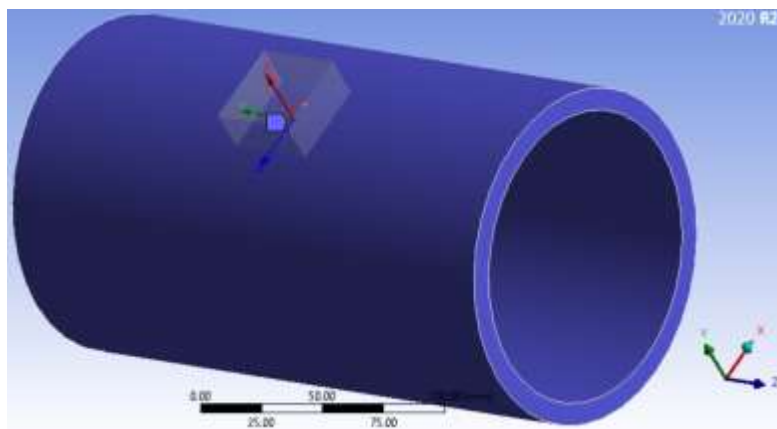


Figure IV-5: Partie d'une tige de forage avec une fissure semi élliptique

IV.5.3. Maillage

- Génération d'un maillage de la géométrie, en tenant compte des contraintes, des zones de charge et des zones de la fissure.
- Garantir que le maillage est suffisamment fin autour de la fissure pour capturer avec précision le comportement de la contrainte.

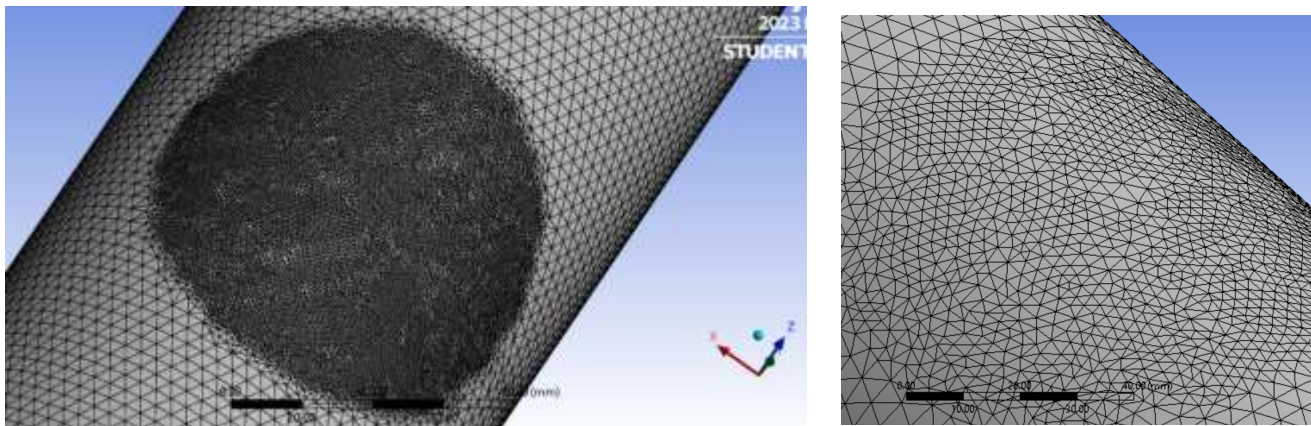
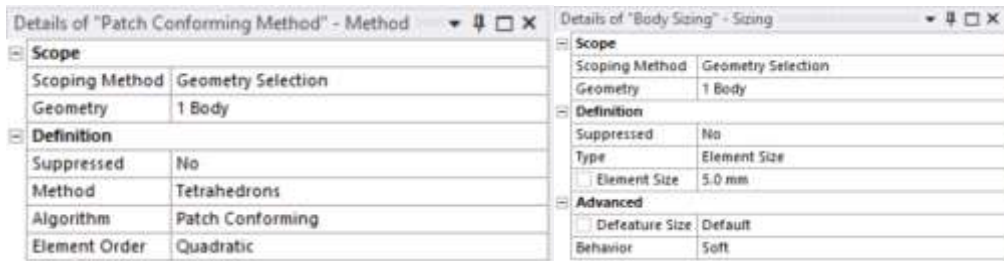


Figure IV-6 Maillage utilisé

IV.5.4. Définition des conditions aux limites et des charges

Application des conditions aux limites, telles que les fixations, les forces externes et les moments, pour représenter les conditions de charge réelles.

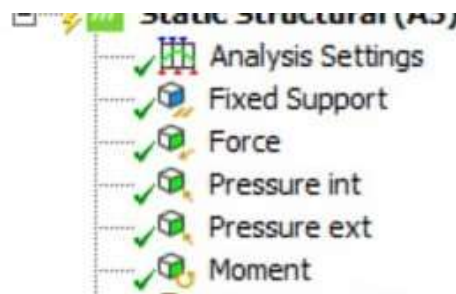


Figure IV-7 : Conditions aux limites des charges

Le point critique de notre simulation :

- La force de traction : **1214478 N**
- Moment de torsion : **15261,08 N.m**
- Pression extérieure = la pression intérieure : **4775653,64 Pa**

Notre étude est basée sur la simulation de trois types de fissures longitudinales, transversales, et inclinées



Figure IV-8 Les trois fissures simulées : transversale-longitudinale-inclinée 45°

IV.6. Les résultats de la simulation

IV.6.1. Les fissures transversales

IV.6.1.1. L'augmentation de la profondeur de fissure a

$c = 10 \text{ mm}$, $F_t = 1214478 \text{ N}$, $M_t = 15261,08 \text{ N.m}$, $P_e = P_i = 4775653,64 \text{ Pa}$

Pi : pression intérieure,

Pe : pression extérieure,

Ft : la force de traction,

Mt : moment de torsion.

Tableau IV-4: Résultats de la simulation en augmentant la profondeur de fissure a

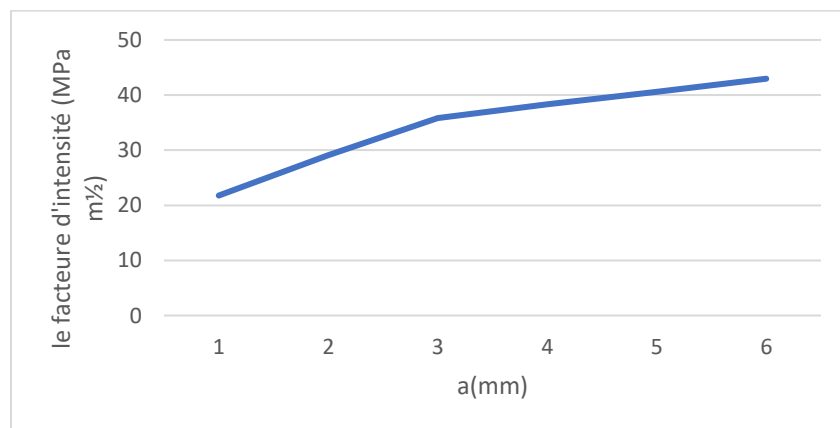
a (mm)	K_I	K_{II}	K_{III}	VM (MPa)
1	21,77007	0,224041	0,0489647	4284,1
2	29,1056	0,1071285	0,0920476	4433,1
3	35,83493	0,2184786	0,088724	3458,1
4	38,33313	0,0771564	0,1484594	3022,5
5	40,57835	0,1000861	0,1455533	3375
6	42,96587	0,58468	0,1732517	3331,9

IV.6.1.2. L'effet de la demi longueur c

$a=6$ mm , $F_t=1214478$ N , $M_t=15261,08$ N.m, $P_e=P_i=4775653,64$ Pa

Tableau IV-5: Résultats de la simulation en augmentant la demi longueur de fissure c

c (mm)	K_I	K_{II}	K_{III}	VM (MPa)
1,5	22,83765	0,0351993	0,1043457	1776,2
3	29,92716	0,0595678	0,0898624	1913,7
4,5	33,76996	0,0674862	0,0745191	2417,3
6	36,27449	0,070152	0,2616374	2694
7,5	38,22877	0,114797	0,1971617	2957,7
9	40,43288	0,1253116	0,1371322	3168,8

Figure IV-9 : Variation de facteur d'intensité K_I en fonction de la profondeur de fissure a

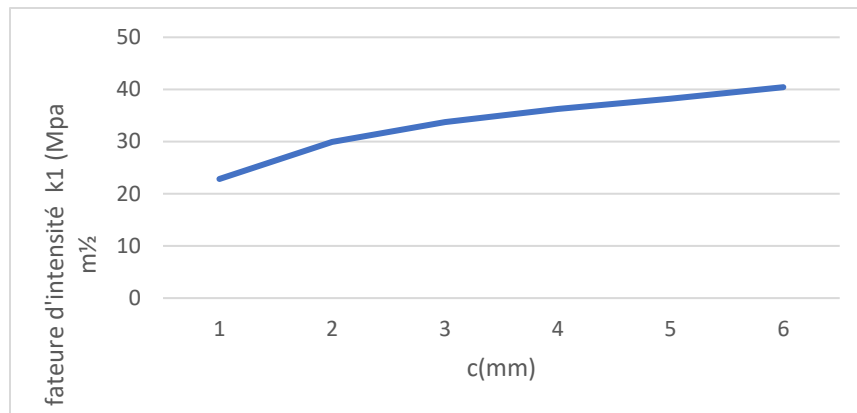


Figure IV-10 : Variation du facteur d'intensité K_I en fonction de la demi-longueur de fissure c

Interprétations

La figure IV-9 montre que le facteur d'intensité de contrainte K_I (mode d'ouverture) augmente de façon non linéaire avec la profondeur a de la fissure. Une fissure plus profonde entraîne un K_I plus élevé, favorisant ainsi sa propagation instable. Les facteurs d'intensité K_{II} et K_{III} indiquent que la fissure est principalement soumise à un état de tension. La propagation de la fissure se déroule principalement dans une seule direction,

La figure IV-10 indique que K_I augmente également de manière non linéaire avec la demi-longueur c de la fissure. Une fissure plus longue conduit à une valeur de K_I plus importante, ce qui accroît le risque d'ouverture et de propagation incontrôlée.

On constate que l'augmentation de K_I semble plus prononcée lorsque la longueur de la fissure augmente, plutôt que sa profondeur. Cela suggère que la longueur a un impact plus significatif sur le facteur d'intensité de contrainte K_I .

Nous avons trouvé aussi que l'augmentation de la demi-longueur c de la fissure entraîne une augmentation de la contrainte de Von Mises en raison d'une concentration de contrainte accrue à la pointe de la fissure, et des effets de la propagation de la fissure sur la tige de forage, on remarque aussi une diminution de contrainte de von Mises lorsque la profondeur de la fissure augmente. Cette diminution de contrainte de von Mises avec la profondeur de fissure est un phénomène courant en mécanique de la rupture et s'explique par les effets géométriques liés à l'émoussement de la pointe au fur et à mesure que la fissure se propage en profondeur.

IV.6.1.3. L'effet de la force de traction F_t

Avec $a=6\text{mm}$ et $c=10\text{mm}$

Tableau IV-6 : Résultats de la simulation en augmentant la force de traction

$F_t \text{ (N)} \times 10^6$	K_I	K_{II}	K_{III}	VM (MPa)
1,1	38,91499	0,0526108	0,1567889	3018,3
1,15	40,6827	0,0550869	0,1639799	3155,3
1,2	42,45358	0,0575629	0,1711709	3292,3
1,25	45,989	0,0625151	0,1855498	3566,3
1,3	47,75988	0,064988	0,1927408	3703,3
1,35	49,52759	0,067464	0,1999318	3840,3

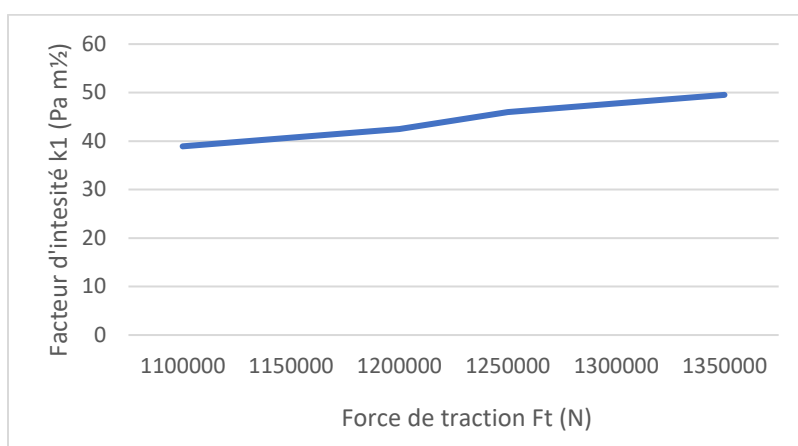
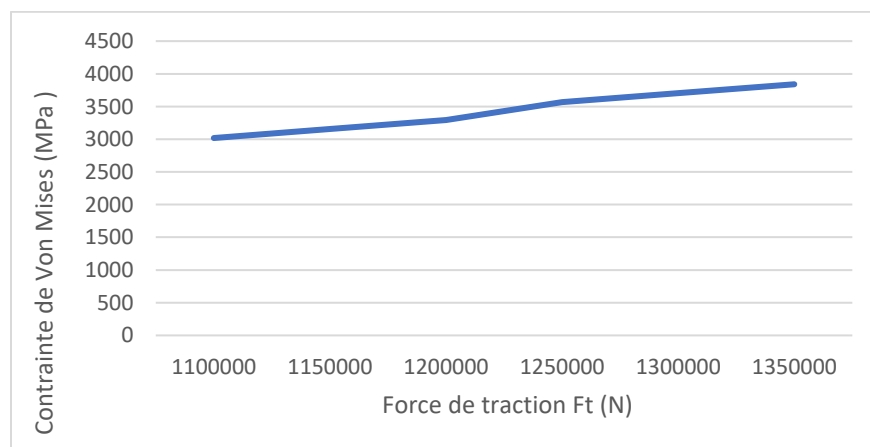
Figure IV-11: Variation du facteur d'intensité K_I en fonction de force de traction pour $a=6\text{mm}$ et $c=10\text{mm}$ 

Figure IV-12 : Variation de la contrainte de Von Mises en fonction de la force de traction

Interprétations

Les graphiques des figures IV-11 et IV-12 représentent les résultats d'une simulation numérique d'une fissure transversale dans une tige de forage soumise à une force de traction.

La figure IV-11 montre que lorsque la force de traction F_t augmente, le facteur de concentration de contrainte K_I au niveau de la fissure augmente de manière quasi-linéaire. Cela signifie que plus la force de traction est élevée, plus les contraintes sont concentrées au niveau de la fissure, fragilisant ainsi la tige.

La figure IV-12 indique que lorsque la force de traction F_t augmente, la contrainte de von Mises, qui représente la sollicitation mécanique globale de la tige, croît de façon non-linéaire. Cela se traduit par une sollicitation mécanique de plus en plus importante de la tige dans son ensemble.

Les facteurs K_{II} et K_{III} restent stables avec de faibles valeurs, cela suggère une absence de contraintes significatives en cisaillement, une stabilité géométrique de la fissure ou une dominance du mode de contrainte de traction, ainsi qu'un faible niveau de chargement en cisaillement.

IV.6.1.4 Effet de la forme et de la géométrie des fissures

Le rapport $a/2c$ est utilisé pour évaluer la forme de la fissure par rapport à sa profondeur, ce qui peut avoir des implications sur la manière dont elle interagit avec les contraintes appliquées et sur sa propagation éventuelle.

Avec $F_t = 1214478 \text{ N}$

Tableau IV-7 : Résultats de simulation expliquer l'effet de la géométrie des fissures transversale

a/t %	a(mm)	c(mm)	a/2c %	K_I	K_{II}	K_{III}	VM (MPa)
15	1,375	2,751	25	18,91453	0,0360753	0,0485346	1422,2
		1,375	50	15,86799	0,0227956	0,0424536	1349,2
		0,917	75	14,97338	0,0187748	0,036167	1219,9
30	2,751	5,502	25	27,71325	0,0515325	0,0859159	1958,2
		2,751	50	22,66563	0,0308724	0,1015534	1826,9
		1,834	75	21,21193	0,1264753	0,0835252	1712,8
45	4,126	8,252	25	35,68947	0,0922816	0,1139305	2640,6
		4,126	50	28,42065	0,0576546	0,1023313	2195,8
		2,751	75	26,39838	0,0383173	0,1244989	2033,1
60	5,502	11,003	25	44,01574	0,1102939	0,1379164	3555,7
		5,502	50	34,18422	0,0738297	0,2318487	2377,4
		3,668	75	28,69	2,2833	4,5075	2281,7

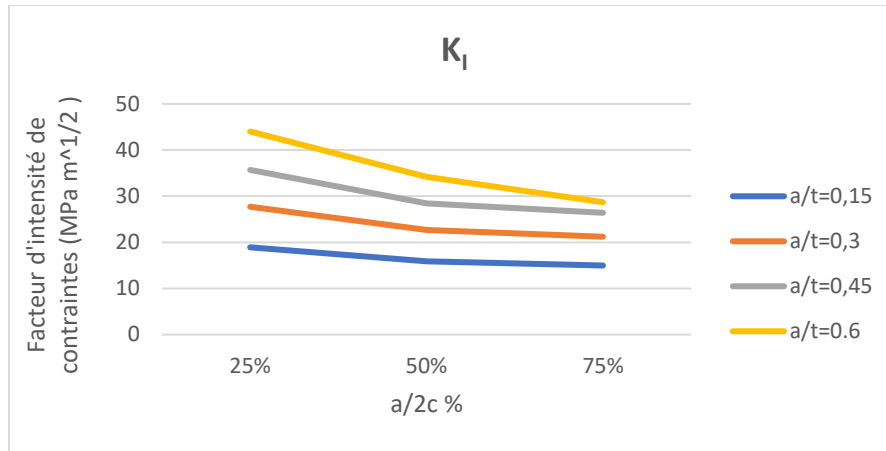


Figure IV-13 : Variation de facteur d'intensité K_I en fonction des rapports $a/2c$ et a/t

Interprétation :

D'après les résultats, on remarque que les valeurs de K_{II} et K_{III} sont faibles, tandis que les valeurs de K_I sont élevées.

On observe que lorsque le rapport $a/2c$ augmente, c'est-à-dire lorsque la profondeur de la fissure a devenu plus importante par rapport à sa longueur $2c$, le facteur K_I diminue.

Plus précisément :

Pour un rapport $a/2c$ de 25%, le facteur K_I est le plus élevé, quel que soit le rapport a/t (rapport entre la profondeur de la fissure et l'épaisseur de la tige).

Lorsque le rapport $a/2c$ passe de 25% à 50%, le facteur K_I diminue de manière significative.

Entre 50% et 75% de $a/2c$, la diminution du facteur K_I est moins marquée.

Cela signifie que plus la fissure est profonde par rapport à sa longueur, moins l'intensité des contraintes au niveau de la pointe de la fissure est élevée. Autrement dit, une fissure plus allongée mais moins profonde concentrera davantage les contraintes qu'une fissure plus courte mais plus profonde.

IV.6.2. Les fissure inclinées 45°

IV.6.2.1. L'effet de la profondeur de fissure a

$c=10\text{ mm}$, $F_t=1214478\text{ N}$, $M_t=15261,08\text{ N.m}$, $P_e=P_i=4775653,64\text{ Pa}$

Tableau IV-8 : Résultats de simulation en augmentant la profondeur de fissure

a (mm)	K _I	K _{II}	K _{III}	VM (MPa)
1	10,08893	4,5663289	9,1257009	2691,5
2	14,16416	9,4963198	12,39771	2072,7
3	16,98238	11,692205	14,370338	2508,5
4	18,85192	13,743575	15,709879	2628,2
5	19,94006	15,698179	16,539977	2855,7
6	21,32324	17,368178	17,185398	3044,4

IV.6.2.2. L'effet de la demi longueur de fissure c

a = 10 mm , Ft = 1214478 N , Mt = 15261,08 N.m, Pe = Pi = 4775653,64 Pa

Tableau IV-9 : Résultats de simulation en augmentant la demi longueur de fissure

c (mm)	K _I	K _{II}	K _{III}	VM (MPa)
1,5	11,35732	10,82732	3,923122	1652,4
3	15,01734	14,35105	7,320673	2300,3
4,5	17,14745	15,53785	10,2521	2679,7
6	18,57269	16,53176	12,69813	3015
7,5	19,85151	17,01274	14,6736	3103
9	20,62722	17,04468	16,33095	3212,7

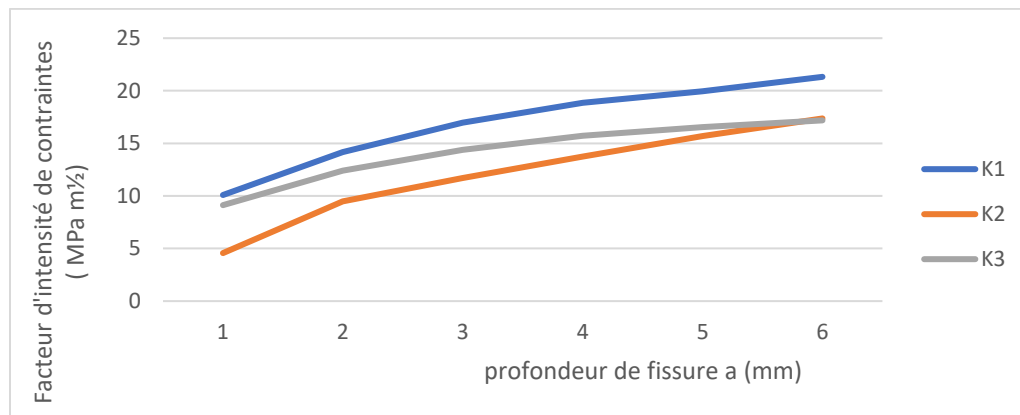


Figure IV-14 : Variation des facteurs d'intensité en fonction de la profondeur de fissure

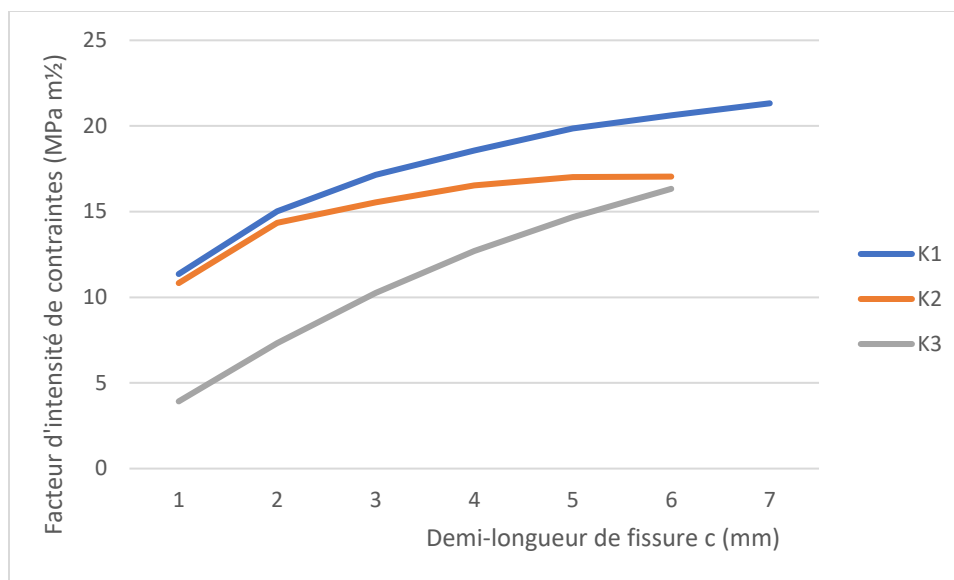


Figure IV-15 : Variation des facteurs d'intensité en fonction de la demi longueur de fissure

Interprétations

Le graphe IV-14 montre que lorsque la profondeur de la fissure (a) augmente, les facteurs d'intensité des contraintes K_I, K_{II} et K_{III} augmentent de manière significative. Le facteur K_I, qui représente le mode d'ouverture de la fissure, est de loin le plus élevé. Cela indique que plus la fissure est profonde, plus les contraintes se concentrent à sa pointe, fragilisant ainsi la structure.

Le graphe IV-15 illustre que quand la demi-longueur de la fissure (c) augmente, les facteurs d'intensité K_I, K_{II} et K_{III} croissent également. Comme précédemment, le facteur K_I prédomine et connaît la plus forte augmentation. Cela signifie que plus la fissure s'allonge, plus les contraintes se concentrent à sa pointe, accentuant les risques de propagation de la fissure.

IV.6.2.3. L'effet de la force de traction Ft

a=6 mm et c=10 mm

Tableau IV-10: Résultats de simulation en augmentant la force de traction

Ft (N) × 10 ⁶	K _I	K _{II}	K _{III}	VM (MPa)
1,1	19,2861	15,75605	15,58845	2759,6
1,15	20,17596	16,46029	16,28605	2884
1,20	21,06583	17,16453	16,98333	3008,3
1,25	21,95569	17,86877	17,68093	3132,7
1,3	22,84556	18,57269	18,37853	3257,1
1,35	23,73542	19,27693	19,07581	3381,5
1,4	24,62529	19,98117	19,77341	3505,9

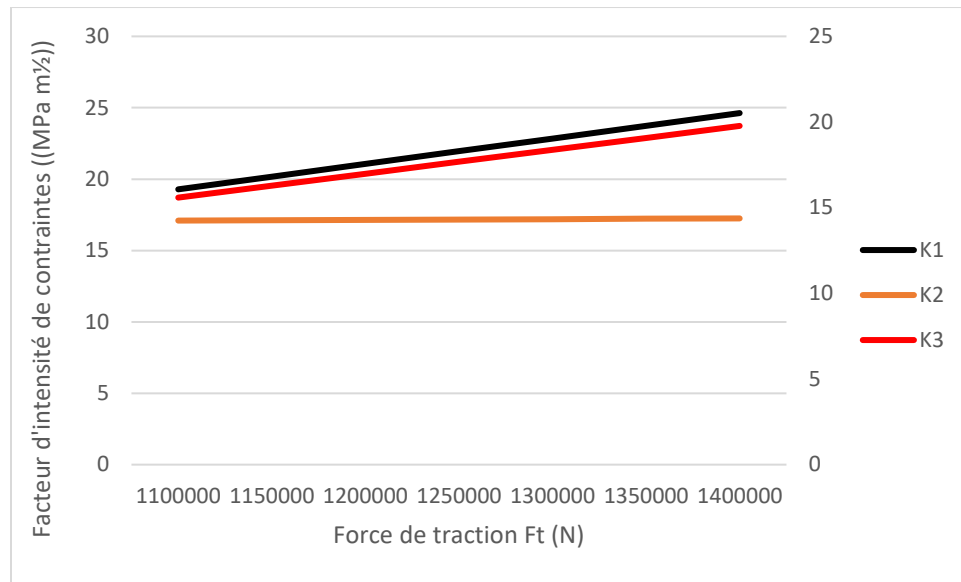


Figure IV-16 : Variation des facteurs d'intensité K_I , K_{II} , K_{III} en fonction de la force de traction

Interprétations

Le Graphe IV-16 illustre la variation des facteurs d'intensité des contraintes K_I , K_{II} et K_{III} en fonction de la force de traction appliquée à une fissure inclinée à 45 degrés. On observe que lorsque la force de traction F_t augmente, tous ces facteurs d'intensité augmentent de manière significative. Cependant, le facteur K_I , qui représente le mode d'ouverture de la fissure, est de loin le plus élevé et l'écart avec les facteurs K_{II} et K_{III} s'accroît à mesure que la force de traction croît. Cela indique que le mode d'ouverture de la fissure (mode I) est prédominant et que les contraintes se concentrent de façon critique à la pointe de la fissure, fragilisant grandement la structure et favorisant potentiellement la propagation de la fissure.

IV.6.2.4. Effet de la forme et de la géométrie des fissures

Avec $F_t = 1214478 \text{ N}$

Tableau IV-11 : Résultats de simulation expliquant l'effet de la géométrie des fissures inclinées 45°

a/t %	a(mm)	c(mm)	a/2c %	K_I	K_{II}	K_{III}	VM (MPa)
15	1,375	2,751	25	8,122943	7,043657	7,447796	1255,4
		1,375	50	7,099313	7,064212	5,319267	1211,7
		0,917	75	6,657859	6,502275	3,983837	972,31
30	2,751	5,502	25	12,33099	10,18317	10,67111	1815,7
		2,751	50	10,29385	10,41117	7,529699	1778,4
		1,834	75	9,564625	9,407144	5,610197	1610,2
45	4,126	8,252	25	15,81044	12,67378	13,36885	2274,5
		4,126	50	14,2761	13,42197	10,28246	2407,4

		2,751	75	13,21484	12,91632	7,628679	2235
60	5,502	11,003	25	21,31723	16,8094	17,62084	3313,9
		5,502	50	17,48297	15,70672	12,01476	2592,1
		3,668	75	15,6596	14,64641	8,867659	2418,1
75	6,877	13,754	25	16,69398	15,61659	8,427154	2575,4
		6,877	50	20,63355	17,7622	13,9077	3160,7
		4,585	75	18,09139	16,97732	10,13731	2803,9
90	8,252	16,504	25	17,01938	15,7982	18,1458	2901,2
		8,252	50	23,98714	19,78542	16,6301	3228,2
		5,502	75	20,39511	17,97692	11,74343	3074,6

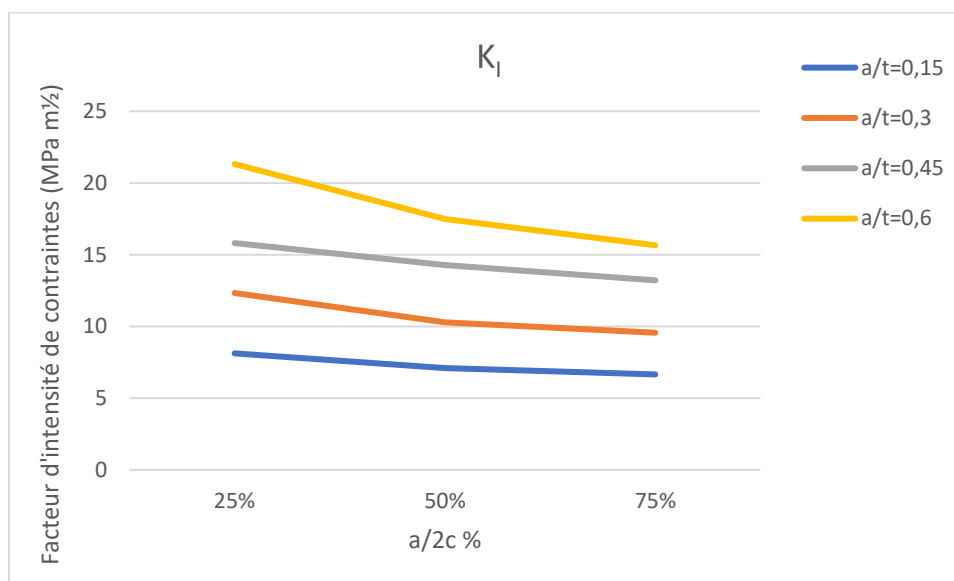


Figure IV-17: Variation du facteur d'intensité K_I en fonction des rapports $a/2c$ et a/t

Interprétation

Le graphe IV-17 montre la variation du facteur d'intensité des contraintes K_I en fonction du rapport entre la profondeur de la fissure (a) et sa demi-longueur (c), dans le cas d'une fissure inclinée à 45 degrés dans une tige de forage. On observe que lorsque le rapport $a/2c$ augmente, c'est-à-dire que la fissure devient plus profonde par rapport à sa longueur, le facteur K_I diminue de manière significative. Cet effet est d'autant plus marqué que le rapport entre la profondeur de la fissure et l'épaisseur de la tige (a/t) est élevé. Ainsi, plus la fissure inclinée à 45 degrés est profonde et étroite, plus le facteur K_I sera important, indiquant une concentration critique des contraintes à la pointe de la fissure. Ces résultats soulignent l'influence déterminante de la géométrie de la fissure inclinée sur l'intégrité structurelle de la tige de forage.

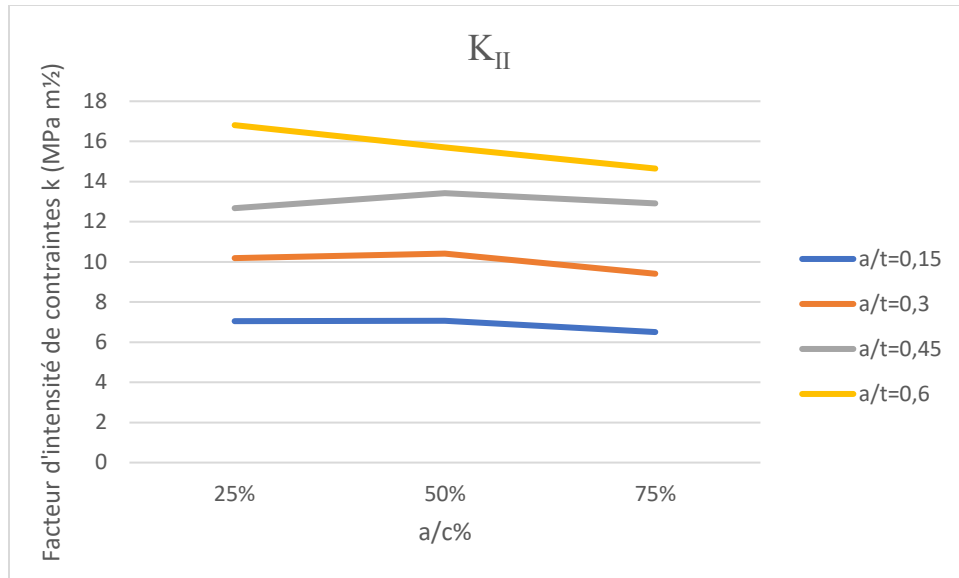


Figure IV-18 : Variation du facteur d'intensité K_{II} en fonction des rapports $a/2c$ et a/t

Interprétations

Le Graphe IV-18 illustre la variation du facteur d'intensité des contraintes K_{II} en fonction du rapport entre la profondeur de la fissure inclinée à 45 degrés (a) et sa demi-longueur (c), dans une tige de forage. On observe que lorsque le rapport $a/2c$ augmente, c'est-à-dire que la fissure devient plus profonde par rapport à sa longueur, le facteur K_{II} diminue de manière significative. Cet effet est d'autant plus prononcé que le rapport entre la profondeur de la fissure et l'épaisseur de la tige (a/t) est élevé. Ainsi, plus la fissure inclinée à 45 degrés est profonde et étroite, plus le facteur K_{II} sera important, indiquant une concentration critique des contraintes de cisaillement à la pointe de la fissure.

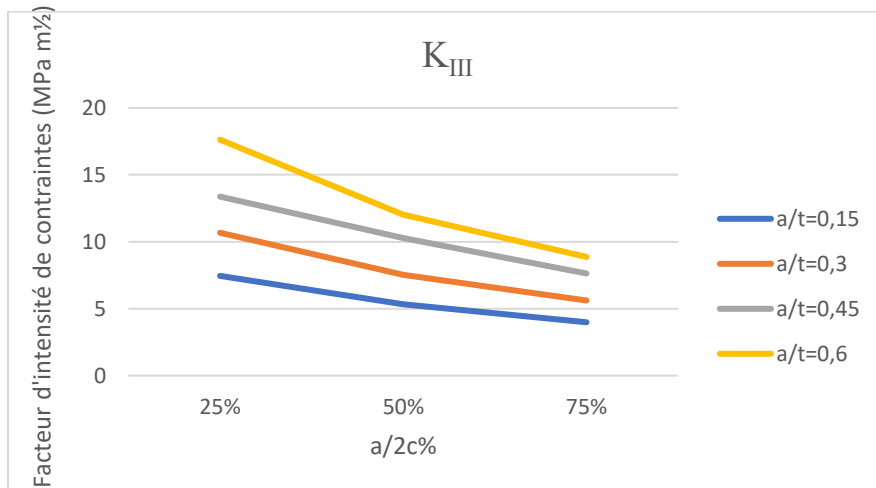


Figure IV-19 : Variation du facteur d'intensité K_{III} en fonction des facteurs $a/2c$ et a/t

Interprétations

Le graphe IV-19 illustre la variation du facteur d'intensité des contraintes K_{III} en fonction du rapport entre la profondeur de la fissure inclinée à 45 degrés (a) et sa demi-longueur (c), dans une tige de forage. On observe que lorsque le rapport $a/2c$ augmente, c'est-à-dire que la fissure devient plus profonde par rapport à sa longueur, le facteur K_{III} diminue de manière significative. Cet effet est d'autant plus prononcé que le rapport entre la profondeur de la fissure et l'épaisseur de la tige (a/t) est élevé. Ainsi, plus la fissure inclinée à 45 degrés est profonde et étroite, plus le facteur K_{III} sera important, indiquant une concentration critique des contraintes de torsion à la pointe de la fissure.

IV.6.3. Les Fissures longitudinales

IV.6.3.1. L'effet de la profondeur de fissure a

$F_t=1214478$ N et $c=10$ mm

Tableau IV-12: Résultats de simulation en augmentant la profondeur de fissure

a (mm)	K_I	K_{II}	K_{III}	VM (MPa)
1	0,101098	0,0031235	0,0023361	404,58
2	0,202819	0,001169	0,0036837	404,58
3	0,304372	0,00215	0,0039509	404,58
4	0,39851	0,0030352	0,0044487	404,58
5	0,481741	0,0033536	0,0044294	404,58
6	0,54758	0,0054173	0,0048879	404,58

IV.6.3.2. L'effet de la demi longueur de fissure c

$F_t=1214478$ N et $a=10$ mm

Tableau IV-13: résultats de simulation en augmentant la demi longueur de fissure

c (mm)	K_I	K_{II}	K_{III}	VM (MPa)
1,5	0,149715	0,002183	0,001675	404,58
3	0,266811	0,002855	0,003639	404,58
4,5	0,360784	0,003472	0,002639	404,58
6	0,436711	0,00346	0,004776	404,58
7,5	0,498375	0,004088	0,003775	404,58

9	0,532085	0,003736	0,004678	404,58
---	----------	----------	----------	--------

Interprétations

D'après les résultats les valeurs des facteurs d'intensité sont très réduites ce qui signifie qu'il y a pas le risque de rupture des tiges dans ce cas des fissure longitudinales.

La contrainte de von Mises demeure constante malgré l'augmentation de a et c , ceci s'explique par le fait que la fissure longitudinale n'altère pas la section transversale de la pièce, maintenant ainsi la distribution des contraintes globalement constante

IV.6.3.3. L'effet de la force de traction F_t

$F_t = 1214478 \text{ N}$ et $a = 6 \text{ mm}$ et $c = 10 \text{ mm}$

Tableau IV-14 : Résultats de simulation en augmentant la force de traction

$F_t \text{ (N)} \times 10^6$	K_I	K_{II}	K_{III}	VM (MPa)
1,10	0,692128	0,0059707	0,005368	369,27
1,15	0,691653	0,0059726	0,0053632	385,56
1,20	0,691179	0,0059742	0,0053585	401,86
1,25	0,690705	0,0059758	0,0053541	418,16
1,30	0,690199	0,0059777	0,0053493	434,47
1,35	0,689724	0,0059792	0,0053446	450,81
1,40	0,68925	0,0059811	0,0053401	467,16

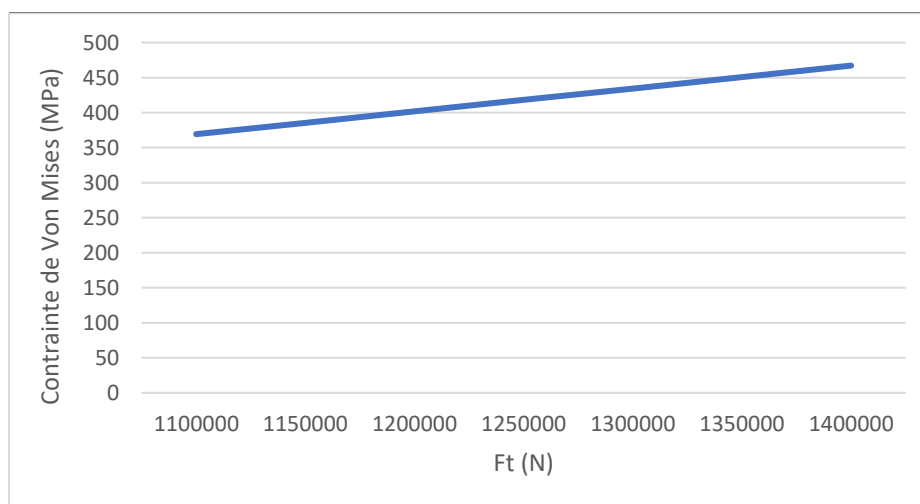


Figure IV-20: Variation du facteur d'intensité K_I en fonction de force de traction

Interprétations

Lorsque **a** et **c** sont maintenus constants et que la force axiale de traction est augmentée, nous avons observé une augmentation de la contrainte de von Mises. Parallèlement, les valeurs de K_I , K_{II} , et K_{III} restent presque constantes avec des valeurs faibles, bien que K_I soit significativement plus élevé que K_{II} et K_{III} . Cette constance relative de K_I , K_{II} , et K_{III} indique que les modes de fissuration, bien que maintenus stables, révèlent une prédominance du mode I, caractérisé par l'ouverture de la fissure.

IV.6.3.4. Effet de la forme et de la géométrie des fissures

Avec **Ft =1214478 N**

Tableau IV-15 :Résultats de simulation expliquer l'effet de la géométrie des fissures longitudinales

a/t %	a(mm)	c(mm)	a/2c	K_I	K_{II}	K_{III}	VM (MPa)
15	1,375	2,751	25	0,181312	0,001912	0,0012752	404,58
		1,375	50	0,201203	0,0015	0,001363	404,58
		0,917	75	0,175829	0,001721	0,001418	404,58
30	2,751	5,502	25	0,255423	0,002845	0,0020728	404,58
		2,751	50	0,286262	0,002233	0,002514	404,58
		1,834	75	0,221745	0,002028	0,0017595	404,58
45	4,126	8,252	25	0,41214	0,003722	0,0038567	404,58
		4,126	50	0,354871	0,002994	0,0284921	404,58
		2,751	75	0,273312	0,002922	0,0020109	404,58
60%	5,502	11,003	25	0,524369	0,00422	0,0052598	404,58
		5,502	50	0,415808	0,003002	0,0033764	404,58
		3,668	75	0,316639	0,003085	0,0027181	404,57

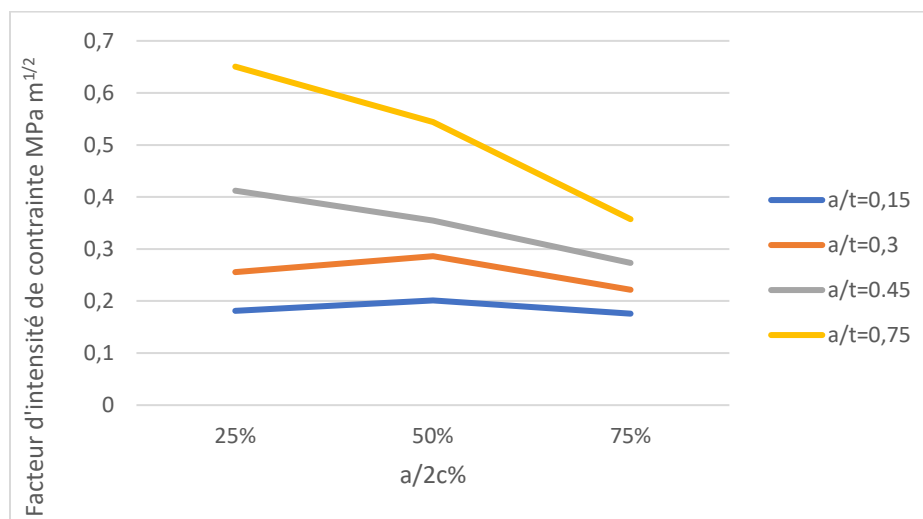


Figure IV-21: Variation du facteur d'intensité de contrainte K_I en fonction des rapports $a/2c$ et a/t

Interprétations

Le figure IV-21 montre que lorsque le rapport $a/2c$ augmente, c'est-à-dire que la fissure longitudinale devient plus profonde par rapport à sa longueur, les valeurs du facteur d'intensité des contraintes K_I diminuent de façon significative. Cet effet est d'autant plus marqué que le rapport a/t (où t est l'épaisseur de la tige) est élevé.

Ainsi, plus la fissure longitudinale est profonde et étendue, plus les valeurs de K_I sont faibles. Cela indique que la concentration des contraintes de traction à la pointe de la fissure diminue lorsque ses dimensions augmentent.

Ce comportement est caractéristique des fissures longitudinales, où l'agrandissement de la fissure a pour effet de "diluer" les contraintes, plutôt que de les intensifier. Cela montre que dans le cas d'une telle fissure, son extension n'aggrave pas nécessairement les conditions de fonctionnement de la tige de forage.

IV.7. L'effet de l'angle d'inclinaison de fissure sur les facteurs d'intensité

Résultats de la simulation lorsque l'angle de la fissure est varié entre 0° et 180°

$a=6\text{mm}$ et $c=10\text{mm}$ et $F_t=1214478\text{ N}$

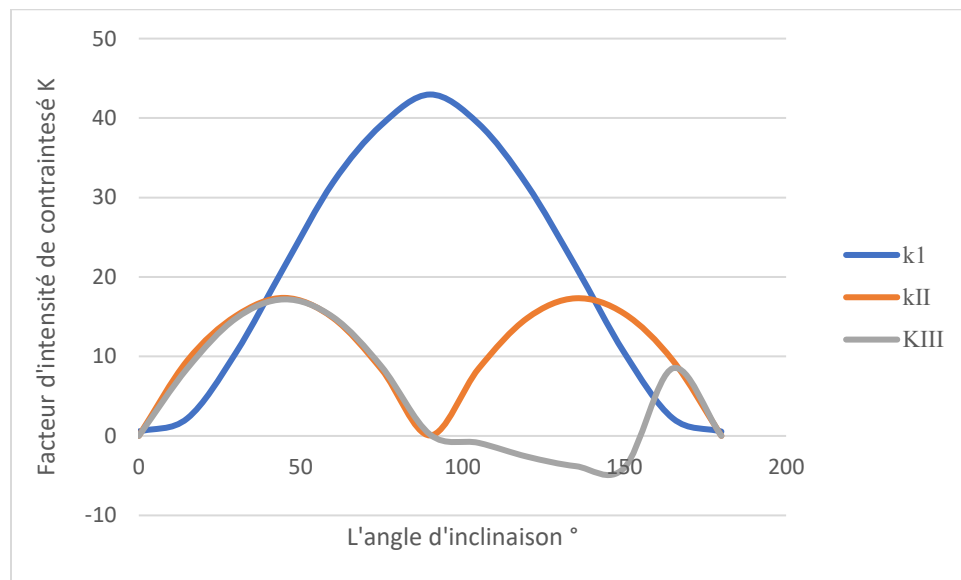


Figure IV-22 : Variation des facteurs d'intensité K_I , K_{II} , K_{III} en fonction d'angle d'inclinaison de fissure

Interprétations

La figure IV-22 montre la variation du facteur d'intensité de contrainte K_I , lié au mode d'ouverture, en fonction de l'angle d'inclinaison d'une fissure. À 0° et 180° , K_I présente des valeurs minimales proches de zéro. Cela correspond à des fissures longitudinales où le mode d'ouverture est négligeable.

K_I augmente progressivement à mesure que l'angle s'écarte de 0° et 180° , atteignant un maximum à 90° . Ce maximum à 90° indique que le mode d'ouverture est prédominant pour une fissure orientée à cet angle (transversalement par rapport à l'axe).

La symétrie de la courbe reflète la périodicité du problème tous les 180° liée à l'orientation de la fissure.

Ainsi, nous interprétons que pour une fissure transversale, c'est-à-dire à un angle d'inclinaison de 90° , la sollicitation en mode d'ouverture représentée par K_I est maximale. À l'inverse, pour des fissures longitudinales à $0^\circ/180^\circ$, ce mode d'ouverture est négligeable.

Cette tendance est cohérente avec les principes théoriques de la mécanique de la rupture concernant les différents modes de sollicitation en pointe de fissure en fonction de leur orientation.

IV.8. L'effet de l'angle d'inclinaison de fissure sur la durée de vie de la tige

IV.8.1. Loi de propagation de fissures

La loi de Paris est une loi empirique utilisée pour modéliser la propagation de fissures dans les matériaux, en particulier dans les matériaux métalliques soumis à des charges de fatigue. Elle est souvent exprimée sous la forme suivante

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m$$

da/dN : est la vitesse de propagation de la fissure par cycle,

C et m sont deux constantes caractéristiques du matériau déterminées par ajustement des résultats d'essai

ΔK : est la variation d'intensité de contrainte en fond de fissure.

Tableau IV-16: Coefficients C et m pour le grade G105 da/dN en inch/cycle et Δk en ksi inch^{1/2}

Grade G105	C	m	$K_{IC}(\text{MPa m}^{1/2})$
105	1.6×10^{-9}	2.52	90

IV.9. Calcul de durée de vie

$a = 10 \text{ mm}$ $c = 10 \text{ mm}$, $F_t = 1214478 \text{ N}$.

Tableau IV-17 : Les résultats de calcul

Angle	k _I max	k _I min	Δk ksi inch ^{1/2}	N
0	0,54758	-0,59701	1,045797	64819405
15	2,210748	0,977909	1,126433	53754527
30	10,46967	9,149418	1,2063	45231885
45	21,32324	18,55688	2,527595	7012763
60	31,89157	27,75341	3,780993	2541824
75	39,15532	34,18738	4,539155	1603744
90	42,96587	36,56225	5,850916	845878,6
105	39,28498	34,22533	4,622946	1531499
120	31,56459	27,71642	3,51604	3052507
135	21,31407	18,59451	2,484834	7320873
150	10,4684	9,108941	1,242128	42015860
165	2,210748	0,977909	1,126433	53754527
180	0,54758	-0,59701	1,045797	64819405

La méthode de calcul

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m$$

$$da = dN \cdot C \cdot \Delta K^m$$

$$dn = da \cdot \frac{1}{C \cdot \Delta K^m}$$

$$\int dN = \int_a^{ac} da \cdot \frac{1}{C \cdot \Delta K^m}$$

Calcul de la valeur critique de la profondeur :

On a $K_{IC} = 90 \text{ MPa}\sqrt{m}$

$$K_{IC} = \alpha \sigma \sqrt{\pi a_c}$$

$$\alpha = \frac{1,12 \cdot M \cdot M_k}{\sqrt{Q}}$$

$$a/2c = 6 / (2 \times 10) = 0,3$$

$$a/t = 6/9,169 = 0,65$$

$$\frac{\sigma_{vm}}{\sigma_e} = \frac{489,96}{724} = 0,7$$

En reportant ces valeurs sur les figures IV-23 et IV-24 on obtient $Q=1,84$ et $M_k=1,12$

$$M=0,4+1,2(a/t) = 0,4+1,2(6/9,169) = 1,185$$

$$\alpha = \frac{1,12.M.M_k}{\sqrt{Q}} = 1,095$$

$$a_c = \left(\frac{K_{IC}}{\alpha \cdot \sigma \sqrt{\pi}} \right)^2 = \left(\frac{90}{489,96 \times 1,095 \times \sqrt{\pi}} \right)^2 = 8,95 \text{ mm} = 0,3523 \text{ inch}$$

$$\text{avec } a = 6 \text{ mm} = 0,2362 \text{ inch}$$

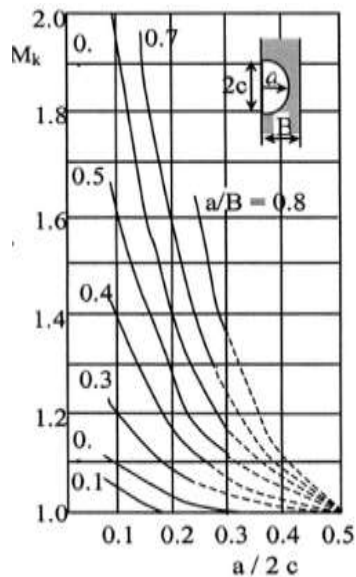


Figure IV-23 :Facteur de correction M_k [25]

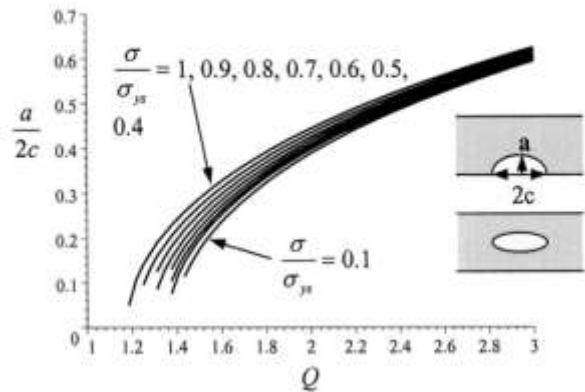


Figure IV-24 :Facteur de forme Q [25]

Si l'angle = 0°

$$\Delta K = K_{\text{Imax}} - K_{\text{Imin}} = 1,144586 \text{ MPa}\sqrt{m} = 1,045796782 \text{ ksi.inch}^{1/2}$$

$$N = \int_{0,2362}^{0,3523} \frac{1}{1,6 \times 10^{-9} \times 0,405183^{2,52}} da = 6,48 \times 10^7 \text{ cycles}$$

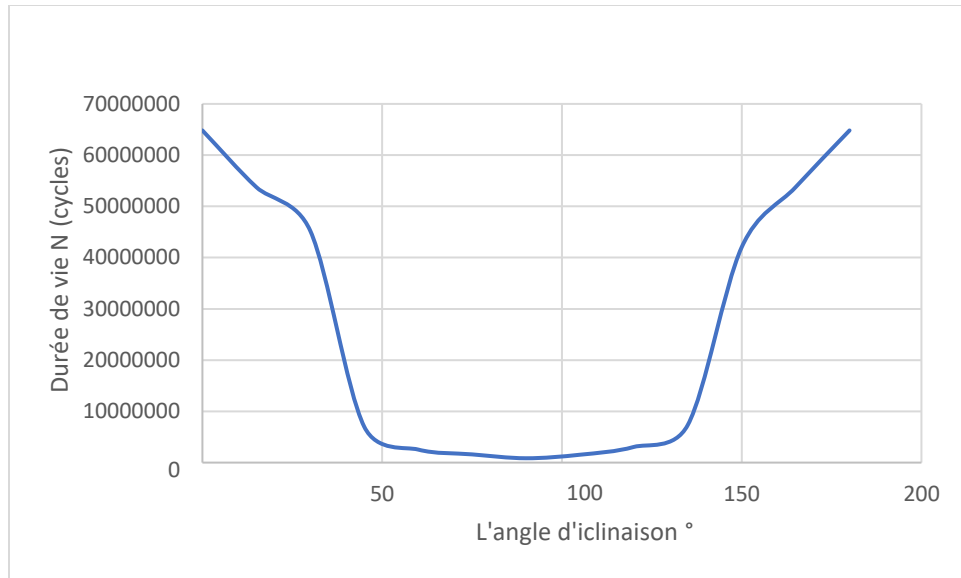


Figure IV-25 : La durée de vie en fonction de l'angle d'inclinaison de fissure

Interprétations

D'après le graphe IV-15, montre que la durée de vie d'une tige de forage est fortement impactée par l'angle d'inclinaison de la fissure présente.

Lorsque l'angle est proche de 0° ou 180° , ce qui correspond à une fissure longitudinale parallèle à l'axe de la tige, la durée de vie est maximale. Cela indique que les fissures longitudinales sont les moins critiques pour la durée de vie de la tige.

En revanche, lorsque l'angle d'inclinaison augmente et se rapproche de 90° , ce qui représente une fissure transversale perpendiculaire à l'axe, nous observons une chute drastique de la durée de vie de la tige de forage.

Le point le plus bas de la courbe se situe aux alentours de 90° , correspondant à la durée de vie minimale pour une fissure parfaitement transversale.

Nous pouvons donc en conclure que les fissures transversales, avec un angle proche de 90° , sont extrêmement dommageables et réduisent fortement la durée de vie de la tige de forage comparée aux fissures longitudinales à 0° et 180° .

IV.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le logiciel Well Plan pour simuler la garniture de forage et ANSYS pour modéliser des fissures artificielles dans les tiges de forage. Trois types de fissures ont été étudiés : longitudinales, transversales et inclinées. Les fissures longitudinales sont alignées

avec l'axe de la tige, les fissures transversales sont perpendiculaires à cet axe, et les fissures inclinées forment un angle avec l'axe.

Les résultats de nos simulations ont révélé que les fissures transversales se propagent plus rapidement par rapport aux fissures longitudinales et inclinées. Cette propagation rapide des fissures transversales est due aux forces de traction, et de torsion plus intense auxquelles elles sont soumises. En effet, les fissures transversales, étant perpendiculaires à l'axe de la tige de forage, subissent des contraintes mécaniques plus élevées qui augmentent la concentration de contrainte au niveau de la fissure. Cela favorise leur croissance rapide et compromet l'intégrité structurelle de la tige de forage, rendant ces fissures particulièrement dangereuses. En revanche, les fissures longitudinales, alignées avec l'axe de la tige, se propagent plus lentement en raison des forces moins intenses, ce qui les rend moins dangereuses. Les fissures inclinées ont une propagation intermédiaire, influencée par leur angle d'inclinaison et les forces appliquées.

La géométrie de la fissure aussi joue un rôle dans la vitesse et la direction de la propagation les fissures.

Ces conclusions sont essentielles pour la conception et l'entretien des équipements de forage. Elles indiquent que les tiges de forage doivent être particulièrement surveillées pour détecter l'apparition de fissures transversales. Une meilleure compréhension de la propagation des fissures permet d'améliorer la durabilité et la sécurité des opérations de forage.

Conclusion générale

La garniture de forage, comprenant les tiges et les autres composants essentiels, joue un rôle essentiel dans les opérations de forage en transférant la puissance de rotation et la force de poussée de la surface jusqu'à l'outil de forage situé au fond du puits. La conception, la qualité et l'entretien approprié de la garniture sont des facteurs déterminants pour la réussite et la sécurité des opérations de forage. En cas de défaillance des tiges de forage, qui représentent 90 % de la garniture, pendant le forage, plusieurs problèmes et risques potentiels peuvent survenir. Tout d'abord, un arrêt de forage et une perte de production peuvent se produire, nécessitant des réparations coûteuses et entraînant des retards dans le projet. De plus, la partie cassée des tiges peut rester coincée dans le puits, ce qui non seulement complique son retrait mais peut également compromettre la suite des opérations de forage. En outre, une rupture inattendue des tiges de forage représente un risque sérieux pour la sécurité des opérateurs sur le site de forage. Cette situation peut entraîner des blessures graves, voire mortelles, mettant en danger la vie et la santé des opérateurs. Il est donc impératif de mettre en place des mesures de prévention et d'inspection régulières pour minimiser les risques liés aux tiges de forage et assurer la sécurité de tous les acteurs impliqués dans les opérations de forage.

La présence de fissures constitue toujours l'un des problèmes majeurs pouvant entraîner la rupture des tiges de forage, c'est pourquoi il est crucial d'effectuer un travail spécifique pour prévenir ces incidents et assurer la sécurité des opérations de forage. Les fissures dans les tiges de forage peuvent résulter de divers facteurs tels que des contraintes excessives, des conditions de forage difficiles, des défauts de fabrication ou une usure excessive. Ces fissures peuvent compromettre l'intégrité structurelle des tiges, les rendant vulnérables à une défaillance soudaine qui peut causer des interruptions coûteuses du forage, des risques pour la sécurité des opérateurs et des impacts négatifs sur l'environnement. Pour prévenir les fissures et réduire les risques de rupture des tiges de forage, il est essentiel de mettre en place des pratiques de maintenance préventive régulières, de suivre des procédures d'inspection détaillées et d'utiliser des techniques de contrôle non destructif pour détecter les fissures et les défauts potentiels. De plus, l'utilisation de tiges de forage de haute qualité, conçues pour résister à des conditions de forage rigoureuses, peut contribuer à minimiser les risques de fissuration et de défaillance.

En investissant dans la prévention des fissures, dans leur contrôle et en mettant en œuvre des mesures préventives efficaces, les opérateurs de forage peuvent non seulement garantir la continuité et l'efficacité de leurs opérations, mais aussi assurer la sécurité des personnes, réduire les coûts liés aux réparations et préserver l'environnement. La gestion proactive des risques liés aux fissures dans les tiges de forage est donc essentielle pour garantir le succès et la durabilité des projets de forage.

L'analyse des contraintes appliquées sur la garniture de forage avec le logiciel WellPlan nous permet de déterminer les zones critiques où les contraintes sont élevées ou la possibilité de formation de fissures est importante.

L'étude des fissures semi-elliptiques dans les tiges de forage 5 ½ '' grade 105 avec le logiciel Ansys nous permet d'identifier l'influence des contraintes et des charges agissant sur ces tiges pendant l'opération de forage (pression intérieure et extérieure de la colonne de fluide de forage,

le moment de rotation et la force de traction), les dimensions et la géométrie de ces fissures (la profondeur a et la demi-longueur c , le rapport a/t et $a/2c$ ainsi que l'angle d'inclinaison par rapport à l'axe des tiges), sur les valeurs des facteurs d'intensité de contrainte K et la valeur de la contrainte de Von Mises. En utilisant la loi de Paris, il est également possible d'estimer la durée de vie restante des tiges de forage en fonction de l'évolution des fissures détectées.

Les résultats de simulation fournissent des informations importantes pour classer les positions et les formes géométrique des fissures en fonction de leur degré de dangerosité, où celles qui présentent une propagation lente sont considérées comme moins dangereuses. Les fissures longitudinales sont caractérisées par des valeurs de facteur d'intensité de contrainte K relativement plus faibles que les fissures situées dans d'autres positions, et elles présentent une longue durée de vie restante cela suggère que l'on peut poursuivre l'utilisation de ces tiges pour des considérations économiques. En revanche, les fissures transversales sont les plus dangereuses car elles se propagent plus rapidement et ont une durée de vie plus courte que les fissures longitudinales. Continuer à les utiliser pourrait entraîner des accidents graves.

Recommandations

Surveillance et Inspection Régulières : Mettre en place un programme de surveillance et d'inspection régulière des tiges de forage, en utilisant des techniques non destructives telles que l'ultrason ou la radiographie pour détecter précocement les fissures, en particulier les fissures transversales.

La classification des fissures détectées : cette étape peut être réalisée selon plusieurs critères, notamment la taille (ouverture), la position (localisation) et le degré d'inclinaison

Réparation Préventive : Développer des méthodes de réparation préventives pour traiter les petites fissures avant qu'elles ne s'aggravent. L'utilisation de techniques de soudage spécialisées ou de colmatage peut prolonger la durée de vie des tiges.

Techniques de Réparation Innovantes : Explorer des techniques de réparation innovantes telles que les traitements thermiques ou les revêtements protecteurs pour renforcer les zones endommagées.

Réduction des Contraintes : Ajuster les paramètres opérationnels pour réduire les forces de traction et de torsion appliquées sur les tiges de forage. Cela peut inclure la modification des vitesses de rotation et des charges appliquées.

Matériaux Résistants : Utiliser des matériaux plus résistants aux forces de traction et de torsion pour la fabrication des tiges de forage. Les alliages à haute résistance et les matériaux composites peuvent offrir une meilleure durabilité.

Optimisation de la Conception : Revoir la conception des tiges de forage pour minimiser les concentrations de contraintes. Par exemple, l'ajout de renforts ou de modifications géométriques peut réduire la propagation des fissures transversales.

Références

- [1] BENKHELIFA Abdelhadi, MOHAMMEDI Morad, Fiabilité des équipements de DTM, Analyse fonctionnelle, et implications organisationnelles de la fonction maintenance de transport. Mémoire de Master université Kasdi Merbah – Ouargla 2010 – 2011
- [2] M. Moussaw et S. Bralla, (1993) ‘‘géologie du champ de Hassi Messaoud, SH/DG’’, Hassi Messaoud. [Livre]
- [3] Etude de l’extension du champ pétrolier de Hassi Messaoud : Melle FARES Ryma
- [4] Mémoire : Etude d’un système de vaporisation de GPL au niveau de l’unitéTERKIA sid ali GPL2 /CIS-HMD
- [5] https://www.researchgate.net/figure/Classification-des-appareils-de-forage-4_fig1_358659774
- [6] Description et étude des indicateurs de maintenance de top drive TDS-11-DERDOURI Ali
- [7] <https://www.osha.gov/etools/oil-and-gas/drilling/mud-system>
- [8] Jean-Paul Nguyen. ‘‘Techniques D'exploitation Pétrolière le Forage’’.1993
- [9] Hassi Messaoud’’, Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaid Tlemcen, 2013/2014
- [10] NEGADI Ali ‘‘La Maintenance des Equipements de Forage (cas TP127
- [11] <https://www.ceccato.com/fr/updates/choosing-air-compressor-in-industry-production>
- [12] [techniques d’exploitation pétrolière le forage - Jean-Paul NGUYEN
- [13] [*Modélisation de la fatigue des systèmes de forage de puits à trajectoire complexe, Ngoc Ha Dao*]
- [14] Garniture de forage, ENSPM formation industrie – IFP Training
- [15] . [*Modélisation de la fatigue des systèmes de forage de puits à trajectoire complexe, Ngoc Ha Dao*]
- [16] [drill collar | [Energy Glossary \(slb.com\)](http://www.slb.com)].
- [17]https://ww2.acpoitiers.fr/math/sites/math/IMG/pdf/_confinement__maths__la_poussee_d_a_rchimedee_.pdf
- [18] Document Sonatrach Conception du train de tiges DIVISION FORAGE DRMD SERVICE INGENIERIE Cellule Forage Horizontal Version juin 2001
- [19] ENSPM Formation Industrie, Garniture de forage, IFP Training, 2005
- [20] <https://www.drillingformulas.com/burst-internal-yield-pressure-property-of-tubular/>
- [21] [https://www.itterbeek.org/uploads/documents/RMChap8\(Flambement\).pdf](https://www.itterbeek.org/uploads/documents/RMChap8(Flambement).pdf)

[22] . ENSPM Formation Industrie, Garniture de forage, IFP Training, 2005. J. Azar et G. Robello Samuel, Drilling Engineering, PennWell, 2007, p. p 333 _336./

[23] J. Azar et G. Robello Samuel, Drilling Engineering, PennWell, 2007, p. p 333 _336./ L. BELKACEM, Evaluation et moyens d'amélioration de la réserve mécanique et de la durée de vie du tubage destinés aux puits de forage profonds, Thèse de Doctorat, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2022.

[24] . L. BELKACEM, Evaluation et moyens d'amélioration de la réserve mécanique et de la durée de vie du tubage destinés aux puits de forage profonds, Thèse de Doctorat, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2022

[25] livre fracture machanics NESTOR PEREZ p 54-55