

Université KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables et des Sciences
de la Terre et de l'Univers

Département : Forage et Mécanique des chantiers pétroliers



Mémoire

MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Forage .

Présenté Par : BELMAHI OTHMANE , BENYAHIA ATIF , FRIEKH DJABER

Thème

Optimisation de la position d'un stabilisateur
d'un train de tiges de forage

Soutenu publiquement le : 08/06 /2024

Devant le jury:

M	Gharbi youcef	.....	Président	UKMO	
M.	Hadjab riadh	.	.....	Examineur	UKMO
M	ZIARI SABER		.....	Encadreur	UKMO

Année Universitaire: 2023/2024

Remerciement

Nous remercions tout d'abord, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements pour sa collaboration son soutien moral, à notre encadreur Mr: **ZIARI SABER** , pour nous avoir suivies durant la préparation de ce travail et pour son aide si précieuse, ces nombreux conseils et suggestions.*

Les collègues de de notre spécialité à leur soutien que dieu les aide dans leur vie professionnelle, Nos familles respectueuses à leur soutien matériel et moral, et l'atmosphère qui nous ont présenté.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

❖ A mes très chers parents qui m'ont
Aidés et m'ont encouragé durant toutes
mes études.

❖ A mes chers frères et ma chère sœur,
❖ A tout ma famille,
❖ A tous mes amis, surtout

Benyahia Atif et Friekh Djaber

et avec lesquels j'ai partagé
mes meilleurs moments...

BELMAHI OTHMANE ...

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

❖ A mes très chers parents qui m'ont
Aidés et m'ont encouragé durant toutes
mes études.

❖ A mes chers frères et ma chère sœur,
❖ A tout ma famille,
❖ A tous mes amis, surtout

Belmahi Othmane et Benyahia Atif

et avec lesquels j'ai partagé
mes meilleurs moments...

FRIEKH DJABER ...

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

❖ A mes très chers parents qui m'ont
aidés et m'ont encouragé durant toutes
mes études.

❖ A mes chers frères et ma chère soeur,
❖ A toute ma famille,
❖ A tous mes amis, surtout

Belmahi Othmane, Friekh Djaber et Badache Iyad

et avec lesquels j'ai partagé
mes meilleurs moments...

BENYAHIA ATIF ...

Résumé :

Ce travail a pour but vise à fournir une vue d'ensemble sur le processus de forage pétrolier et l'importance de l'utilisation de stabilisateurs pour améliorer l'efficacité et la stabilité des opérations de forage. Il commence par comprendre les défis techniques auxquels font face les opérations de forage, comme les vibrations qui affectent la colonne de forage et causent la fatigue des matériaux et des outils, entraînant une augmentation des coûts et une diminution de l'efficacité des opérations. Pour relever ces défis, des techniques d'optimisation telles que les modèles d'éléments finis (FEM), les algorithmes de modélisation de la surface de réponse (RSM) et les modèles gaussiens sont utilisés, permettant une analyse précise des performances dynamiques de la colonne de forage et des recommandations pour améliorer la configuration des outils de fond de trou (BHA). Les stabilisateurs jouent un rôle crucial en réduisant les vibrations et en assurant la stabilité mécanique, ce qui minimise les déviations indésirables et augmente la durabilité des outils. Les stabilisateurs sont conçus avec des aciers haute résistance et des revêtements résistants à l'usure, ainsi que des connexions robustes, garantissant une stabilité optimale pendant les opérations de forage. Ces améliorations sont renforcées par l'utilisation de la méthode d'optimisation par essaim de particules (PSO), qui exploite l'interaction entre les particules virtuelles pour rechercher les solutions optimales et éviter les pièges des minima locaux, conduisant à de meilleures performances et à une réduction des vibrations.

Abstract :

This work aims to provide an overview of the oil drilling process and the importance of using stabilizers to enhance the efficiency and stability of drilling operations. It begins by addressing the technical challenges faced during drilling operations, such as vibrations affecting the drill string, causing material and tool fatigue, leading to increased costs and reduced operational efficiency. To tackle these challenges, optimization techniques such as finite element models (FEM), response surface modeling (RSM), and Gaussian models are utilized, allowing precise analysis of the dynamic performance of the drill string and recommendations for improving bottom hole assembly (BHA) configurations. Stabilizers play a crucial role in reducing vibrations and ensuring mechanical stability, minimizing unwanted deviations and increasing tool durability. Stabilizers are designed with high-strength steel and wear-resistant coatings, along with robust connections, ensuring optimal stability during drilling operations. These improvements are further enhanced by the use of Particle Swarm Optimization (PSO), which leverages the interaction between virtual particles to search for optimal solutions and avoid local minima traps, leading to better performance and reduced vibrations.

ملخص :

يهدف هذا العمل إلى تقديم نظرة شاملة حول عملية الحفر البترولي وأهمية استخدام المثبتات لتحسين كفاءة واستقرار عمليات الحفر. تبدأ هذه النظرة بفهم التحديات الفنية التي تواجه عمليات الحفر، مثل الاهتزازات التي تؤثر على عمود الحفر وتسبب إجهاد المواد والأدوات، مما يؤدي إلى زيادة التكاليف وتقليل كفاءة العمليات. لمواجهة هذه التحديات، يتم استخدام تقنيات التحسين مثل نماذج العناصر المحدودة (FEM) وخوارزميات نمذجة استجابة السطح (RSM) والنماذج الغاوسية، التي تتيح تحليلًا دقيقًا للأداء الديناميكي لعمود الحفر وتقديم توصيات لتحسين تكوين أدوات الحفر (BHA). يلعب المثبتون دورًا حيويًا في تقليل الاهتزازات وتحقيق الاستقرار الميكانيكي، مما يقلل من الانحرافات غير المرغوبة ويزيد من متانة الأدوات. تتميز المثبتات بتصميماتها المصنوعة من الفولاذ عالي القوة والمزودة بطبقات مقاومة للتآكل واتصالات قوية، مما يضمن استقرارًا أكبر خلال عمليات الحفر. يتم تعزيز هذه التحسينات باستخدام طريقة تحسين سرب الجسيمات (PSO)، التي تستغل التفاعل بين الجسيمات الافتراضية للبحث عن الحلول المثلى وتجنب الوقوع في الفخاخ المحلية، مما يؤدي إلى أداء أفضل وتقليل الاهتزازات.

Table des matières:

Remerciement

DEDICACE

Résumé

Table des matières

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

Introduction Générale

Chapitre I:Généralité sur le forage pétrolier

I.1	Introduction :	1
I.2	Définition :.....	2
I.3	Types de puits :.....	2
I.3.1	Puits d'exploration :.....	2
I.3.2	Puits de développement :.....	2
I.4	Description et caractéristique de l'appareil de forage :	2
I.4.1	Classification des appareils de forage :.....	3
I.5	Les équipements de forage pétrolier :.....	4
I.5.1	Un système hydraulique:.....	4
I.5.2	Un générateur d'énergie :.....	5
I.5.3	Un système de rotation :.....	5
I.5.4	Un dispositif de levage :.....	5
I.5.5	Système de sécurité :.....	6
I.6	Les équipements de fonds :	7
I.6.1	La garniture de forage :.....	7
I.6.2	Le train de tiges (Drill Pipes, DP):.....	8
I.6.3	Assemblage de fonds (Bottom Hole Assembly):	9
I.6.4	Outil de forage (drill bit)	10
I.6.5	Les appareils de mesures (MWD) :.....	11
I.6.6	Les raccords :	11
I.6.7	Les stabilisateurs :	11
I.7	Stabilisation en trou vertical :.....	13
I.7.1	la garniture packed hole :	14
I.7.2	la garniture pendulaire:.....	14
I.7.3	la garniture lisse (sans stabilisateur):	14

I.8	Stabilisation en forage dirigé :.....	15
I.9	Conclusion :.....	15

Chapitre II : Instabilité de la garniture de forage

II.1	Introduction :	17
II.2	Vibrations du train de tige:	17
II.2.1	Vibrations laterals:	18
II.2.2	Vibrations Axials:	19
II.2.3	Les vibrations de torsion:	19
II.3	Les Consequences des vibrations:	20
II.3.1	Endommagement des outils de forage:	20
II.3.2	Dégradation des composants de l'ensemble de forage:	21
II.3.3	L'affaiblissement de la qualité du trou :	21
II.4	Frottements garniture-puits et flambage :.....	22
II.4.1	Frottements :.....	22
II.5	Point neutre :.....	23
II.6	Augmentation de l'effet de frottement en raison du flambage :	24
II.7	Flambage :	25
II.7.1	Définition de phénomène:	25
II.7.2	Flambage en forage pétrolier:	26
II.8	Conséquences sur les opérations de forage :	26
II.8.1	Transfert inefficace du poids à l'outil :.....	26
II.8.2	Perturbation de l'avancement du forage :	26
II.8.3	Perte d'intégrité de la structure :.....	27
II.9	Conclusion:.....	28

Chapitre III:Amélioration de la stabilité du train de tiges par le choix de la position du stabilisateur

III.1	Introduction :.....	29
III.2	Évaluation du seuil de stabilité en flambage :	29
III.2.1	Étude de Cas :.....	29
III.3	Optimisation de la position du stabilisateur :.....	38
III.3.1	Algorithme à essaim de particules (PSO) :	38
III.3.2	Résultat et discussion :.....	47
Conclusion générale:.....		
La Bibliographie :.....		

LISTE DES FIGURES:

Chapitre I:

Figure I-1: Installation offshore [18]	Figure I-2: Installation onshore [19].....	1
Figure I-3: Système de battage [20]		1
Figure I-4: L'appareil de forage [4]		3
Figure I-5: Classification des appareils de forage [6]		3
Figure I-6: Système d'hydraulique [7]		4
Figure I-7: Les moteurs diesel électrique[19]		5
Figure I-8: Top drive [18]	Figure I-9: La Table de rotation[19].....	5
Figure I-10: Treuil de forage [11]		6
Figure I-11: BOP [18]		7
Figure I-12: La garniture de forage [13]		7
Figure I-13: Tiges de forage [21]		8
Figure I-14: Composants de la partie inférieure de la garniture [20].....		9
Figure I-15: Les masses tiges [22]		9
Figure I-16: Les types de masse tiges [15].....		10
Figure I-17: Les deux types d'outil de forage : outil à trois cônes (a), outil PDC (b) [15].....		11
Figure I-18: Les Formes des lames des stabilisateurs [16]		12
Figure I-19: Les différents types de stabilisateurs [16].....		13
Figure I-20: Types de garnitures [17]		14

Chapitre II:

Figure II-1: Modes de Vibration, (gauche: Axial, milieu: Torsion, droite: Latéral)[24]	18
Figure II-2: Rupture d'une Tige de Forage[23]	18
Figure II-3: Gauche: Outil Neuf, Droite: Outil Ayant Subi des Vibrations Sévères [23].....	19
Figure II-4: Le Phénomène du Stick-Slip [25].....	20
Figure II-5: Endommagement de l'outil [26].....	21
Figure II-6: Endommagement des éléments de la garniture de forage [26].....	21
Figure II-7: Image de dégradation de la qualité du trou de puits (DSI) [26]	22
Figure II-8: Frottements tige-puits dans un puits dévié [27].....	22
Figure II-9: Zone de Traction (au-dessus du Point Neutre) et Zone de Compression	24
Figure II-10: Diagramme des relations possibles entre le torque & drag, le flambage et Les forces de contact [27]	25
Figure II-11: Flambage dans un puits horizontal [28]	26
Figure II-12: Flambages de tubulaires observés sur chantier[27]	27

Chapitre III:

Figure III. 1: Hauteur critique du point neutre et force sur l'outil (WOB) pour diverses positions d'un stabilisateur le long du collier de forage	31
Figure III. 2: Résultats après l'application RSM sur Minitab16	32
Figure III. 3: Résultats de la Régression Non Linéaire par la Méthode du Gaussien Modifié appliquée sur Minitab16.....	37
Figure III. 4: Résidus en Fonction de l'Ordre des Observations pour la Réponse WOB (kn) .	38

Figure III. 5: Organigramme de principe de PSO.....	40
Figure III. 6: Code MATLAB pour l'Optimisation des Paramètres d'un Modèle RSM Utilisant l'Algorithme PSO	42
Figure III. 7: Comparaison du Modèle RSM Optimisé avec les Données Réelles	43
Figure III. 8: Résultat de Code MATLAB pour l'Optimisation des Paramètres d'un Modèle Gaussien Utilisant l'Algorithme PSO.....	44
Figure III. 9: Résultat de Code MATLAB pour l'Optimisation des Paramètres d'un Modèle Gaussien Utilisant l'Algorithme PSO.....	45
Figure III. 10: Comparaison du Modèle Gaussien Optimisé avec les Données Réelles.....	45

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau III. 1:Les principales différences entre Régression Non Linéaire (GaussienneModifiée) ET Régression par Surface de Réponse (RSM)	30
Tableau III. 2:Les paramétrés [X s(m)] et les réponses [Hcr(m) WOB(kn)].....	31
Tableau III. 3 :Estimations linéaires des coefficients	33
Tableau III. 4 :Statistiques résumées	33
Tableau III. 5 :Les resultates d'analyse anova	34
Tableau III. 6:Observations InhabitTableau	34
Tableau III. 7:Coefficients de Régression Estimés en Unités Non Codées	35
Tableau III. 8:Prédictions des Réponses pour de Nouveaux Points de Conception avec Intervalles de Confiance et de Prédiction.....	35

LISTE DES SYMBOLES :

BHA	Assemblage de fond « Buttom Hole Assembly »
ROP	Vitesse de progression « Rate Of Penetration »
WOB	Le Poids sur l'outil « Weight On Bit »
BOP	Bloc Obturateur de Puits « Blow Out Preventer »
RSM	Modèle de Réponse de Surface
PSO	Optimisation par essaim particulière
DP	Drill pipe
HWDP	Heavy weight
PDC	Poly diamant cristallin
Hcr	Hauteur critique
Xs	Position des stabilisateur
T&D	Torque & Drag
CSC	Capture et de stockage du carbone

Introduction générale

Introduction générale:

L'industrie pétrolière, moteur essentiel de l'économie mondiale, repose sur des processus complexes et hautement spécialisés pour accéder aux ressources enfouies sous terre. Parmi ces processus, le forage pétrolier occupe une place centrale, permettant l'exploration et l'extraction du précieux pétrole et du gaz naturel. Dans cette introduction, nous explorerons l'essence du forage pétrolier et l'importance cruciale des stabilisateurs dans ce domaine. Le forage pétrolier est bien plus qu'une simple opération de creusement de trous dans le sol. C'est un processus méticuleux et hautement technique qui nécessite l'utilisation de technologies de pointe et une expertise spécialisée pour accéder aux réserves souterraines de manière efficace et sûre. À travers le forage, les compagnies pétrolières explorent les profondeurs de la Terre à la recherche de gisements riches en hydrocarbures, ouvrant ainsi la voie à la production énergétique.

Les opérations de forage sont confrontées à des défis complexes, notamment ceux liés aux vibrations de la colonne de forage, qui peuvent entraîner une fatigue des matériaux, des dommages aux outils et une augmentation des coûts opérationnels. Pour atténuer ces vibrations, l'optimisation des ensembles de fond de trou (BHA) est devenue cruciale. Une approche prometteuse consiste à utiliser des simulations par éléments finis (FEM) et des algorithmes d'optimisation pour concevoir des BHA qui réduisent efficacement les vibrations. En plus de ces méthodes, la modélisation de surface de réponse (RSM) et la modélisation par fonction gaussienne offrent des outils puissants pour analyser et optimiser les performances de forage. Ces méthodes permettent d'analyser en profondeur le comportement dynamique de la colonne de forage et de proposer des configurations de BHA optimisées pour minimiser les vibrations. De plus, l'utilisation de capteurs de vibrations en temps réel peut aider à ajuster les paramètres de forage en fonction des conditions en cours, améliorant ainsi la réactivité et l'efficacité des opérations de forage.

Les stabilisateurs de forage jouent un rôle central dans l'optimisation des performances de forage. Ces composants, intégrés à l'ensemble inférieur de trou (BHA), stabilisent mécaniquement le trou de forage, réduisant les déviations involontaires et minimisant les vibrations de la colonne de forage. Les stabilisateurs sont généralement fabriqués en acier allié de haute résistance et présentent des configurations de lames droites ou spiralées, revêtues d'une couche résistante à l'usure pour une durabilité accrue. Leur conception inclut des connexions robustes PIN x BOX qui garantissent une fixation sécurisée dans la colonne de forage, assurant ainsi une stabilité optimale pendant les opérations.

En résumé, l'optimisation des BHA et l'utilisation de stabilisateurs de forage performants sont des éléments clés pour maximiser l'efficacité des opérations de forage. En combinant une analyse approfondie du comportement dynamique avec des technologies de pointe, les entreprises peuvent réduire les temps d'arrêt, améliorer la qualité des trous forés et minimiser les risques opérationnels, ce qui contribue à accroître la rentabilité et le succès global des projets de forage dans une variété de conditions géologiques. L'exploration de la méthode PSO (Particle Swarm Optimization) dans l'optimisation des stabilisateurs de forage représente une avancée majeure dans l'industrie pétrolière. En se concentrant spécifiquement sur le PSO, cette approche permet d'explorer de manière exhaustive l'espace de recherche pour trouver la configuration optimale des stabilisateurs. Grâce à son mécanisme d'interaction entre les particules virtuelles, le PSO permet une recherche efficace des solutions les plus prometteuses, tout en évitant les pièges des minima locaux. Cette méthode offre ainsi une

approche systématique et efficace pour améliorer la performance des stabilisateurs, en minimisant les vibrations, en réduisant le flambage et en assurant la stabilité du trou de forage.

En se concentrant sur l'exploration du PSO, nous pouvons exploiter pleinement son potentiel pour répondre aux besoins croissants de performance et de rentabilité dans l'industrie pétrolière, ouvrant ainsi la voie à une exploration pétrolière plus efficace et durable.

Dans ce mémoire, nous avons exploré l'application de la méthode d'optimisation par essais de particules (PSO) pour améliorer les performances des stabilisateurs de forage pétrolier. Le contenu de ce document est structuré en trois chapitres distincts :

Dans le premier chapitre, nous aborderons en premier lieu une vue d'ensemble générale sur le forage pétrolier.

Le deuxième chapitre se concentrera sur l'instabilité de la garniture de forage, en particulier les problèmes de flambage et de vibrations, et leur incidence sur la stabilité de la chaîne de forage.

Enfin, le dernier chapitre sera consacré à l'amélioration de la stabilité du train de tige par le choix de la position des stabilisateurs, en mettant l'accent sur l'optimisation de leur emplacement pour maximiser l'efficacité et la sécurité du processus de forage.

CHAPITRE I :
Généralité sur le forage
pétrolier

I. Généralité sur le forage pétrolier

I.1 Introduction :

L'exploration pétrolière ou gazière, que ce soit en mer (offshore) ou sur terre (onshore), requiert un processus de forage pour accéder aux réservoirs d'hydrocarbures. Pour ce faire, il faut connecter les réservoirs à la surface via des canaux reliés à des systèmes de pompage. En août 1859, le colonel Edwin Drake a réalisé son premier forage de pétrole, à une profondeur de vingt-trois mètres près de Titusville en Pennsylvanie (États-Unis). Il a utilisé le système de forage par battage, une méthode qui implique de soulever un outil lourd (trépan) et de le laisser retomber sur le terrain à traverser. La hauteur et la fréquence de chute varient selon la dureté des formations.

Face à des terrains plus difficiles, les foreurs ont adopté la technique du forage rotatif. Les premiers essais de cette méthode semblent avoir été réalisés sur le champ de Corsicana au Texas. En 1901, J.F. Lucas a utilisé un appareil de forage rotatif pour creuser le premier puits dans le champ de Spindle Top près de Beaumont au Texas. [1]



Figure I-1: Installation offshore [18]



Figure I-2: Installation onshore [19]



Figure I-3: Système de battage [20]

I.2 Définition :

On appelle "forage pétrolier", l'ensemble des opérations permettant d'atteindre les roches poreuses et perméables du sous-sol, susceptibles de contenir des hydrocarbures liquides ou gazeux. L'implantation d'un forage pétrolier est décidée à la suite des études géologiques et géophysiques. Ceci nous permet de nous faire une idée de la constitution de sous-sol et des possibilités de gisements, sans pour autant préciser la présence d'hydrocarbures. L'opération de forage peut alors confirmer les hypothèses faites et mettre en évidence la nature des fluides contenus dans les roches. [2]

I.3 Types de puits :

Le forage d'exploration et le forage de développement sont deux phases distinctes du processus d'exploitation pétrolière ou gazière.

I.3.1 Puits d'exploration :

Cette phase consiste à rechercher de nouveaux gisements d'hydrocarbures. Les puits de forage d'exploration sont généralement situés dans des zones où la présence d'hydrocarbures est suspectée mais non confirmée. L'objectif principal du forage d'exploration est de déterminer si un gisement commercialement viable existe dans la région. Les puits de forage d'exploration sont souvent forés à des profondeurs variables et dans des directions différentes pour tester différentes formations géologiques. Si le forage d'exploration réussit, il peut être suivi par le forage de développement.

I.3.2 Puits de développement :

Une fois qu'un gisement d'hydrocarbures commercialisable est découvert lors de la phase d'exploration, la phase de développement commence. Le forage de développement vise à exploiter efficacement le gisement découvert en forant des puits supplémentaires et en mettant en place les infrastructures nécessaires à l'extraction et au transport des hydrocarbures. Les puits de forage de développement sont généralement situés stratégiquement pour maximiser la récupération des hydrocarbures et sont conçus pour une exploitation à long terme.

I.4 Description et caractéristique de l'appareil de forage :

L'emplacement optimal pour les installations de forage est déterminé par la topographie du terrain et les données issues de l'exploration, comme les études sismiques. En général, ces installations sont placées au-dessus du gisement, alignées avec l'épaisseur maximale de la zone supposée contenir des hydrocarbures. Les équipements de forage comprennent plusieurs modules, tels que le système hydraulique (pompe et bac à boue), le système d'alimentation (moteurs), les obturateurs, la table de rotation, les réserves de tiges de forage, et le système de suspension qui supporte le derrick. [5]

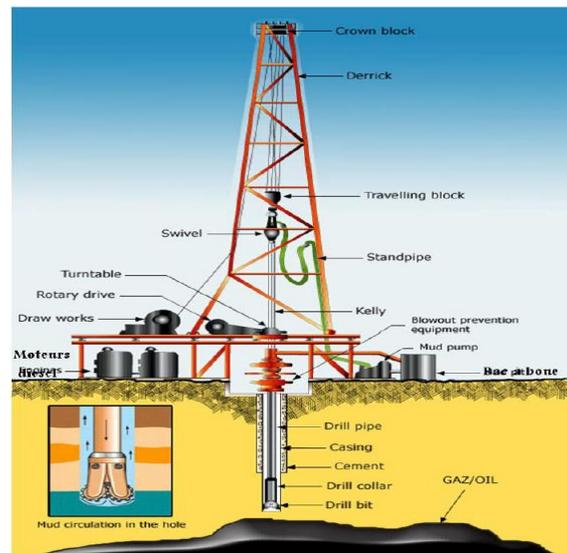


Figure I-4: L'appareil de forage [4]

I.4.1 Classification des appareils de forage :

La classification des appareils de forage se fait en première approche par la capacité de profondeur de forage maximale .

Les appareils de forage peuvent être classés comme suit :

Appareil léger (2000 m)

Appareil moyen (3500m)

Appareil lourd (6000m)

Appareil ultra lourd (10000m) [6]

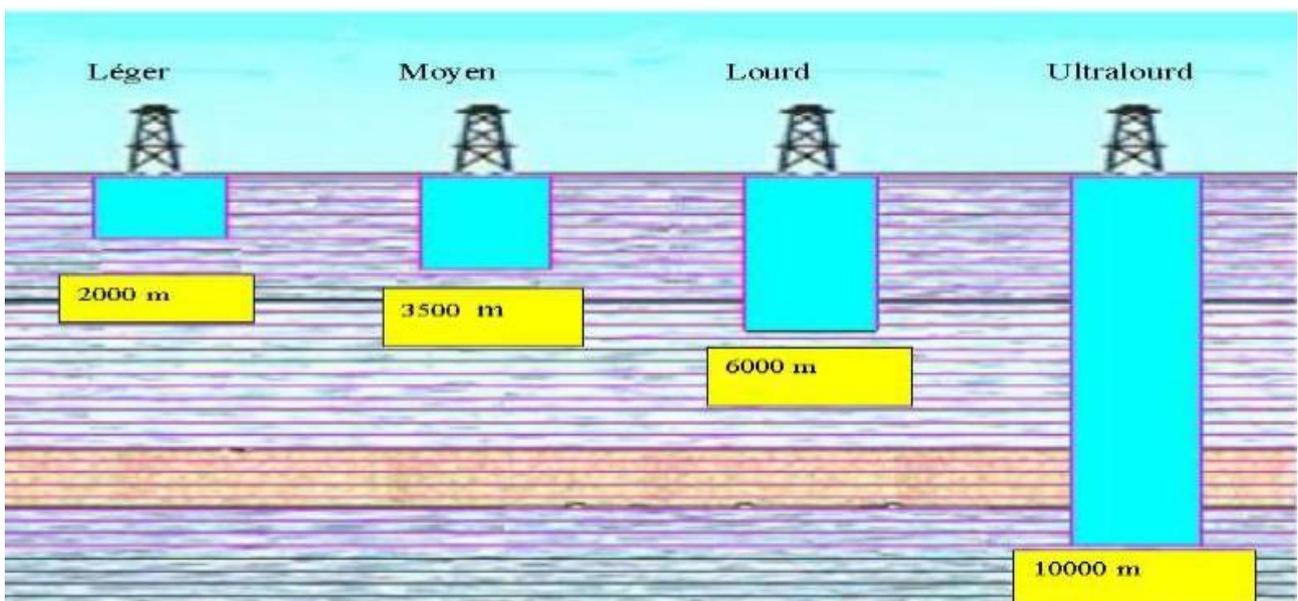


Figure I-5: Classification des appareils de forage [6]

I.5 Les équipements de forage pétrolier :

I.5.1 Un système hydraulique:

Le terme "circulation" se réfère au fluide de forage utilisé dans les opérations de forage. Le système de circulation fait circuler le fluide de forage en circuit fermé, depuis les réservoirs de stockage en surface jusqu'à l'outil situé au fond du puits, puis de nouveau vers la surface. Les objectifs principaux de ce circuit de boue incluent la lubrification de l'interface de coupe, le refroidissement de l'outil et le nettoyage du trou.

Pour réaliser une opération de forage, le fluide doit atteindre le fond du puits en passant par l'intérieur des tiges de forage, circuler autour du trépan, puis remonter à la surface à travers l'espace annulaire entre la colonne de tiges et les parois du puits, ou le tubage qui les recouvre. [7]

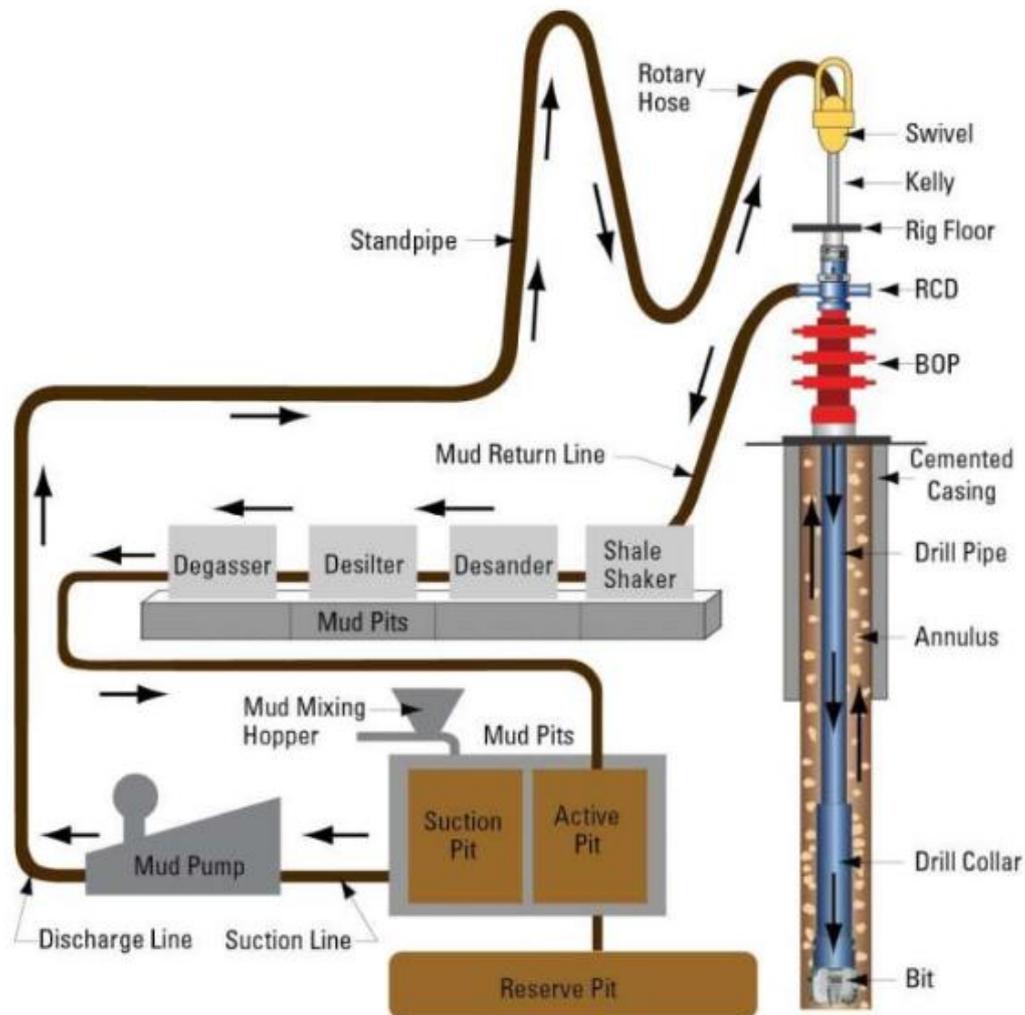


Figure I-6: Système d'hydraulique [7]

I.5.2 Un générateur d'énergie :

L'énergie, générée par des moteurs diesel, est transmise sous forme électrique ou mécanique aux divers composants de l'installation tels que la pompe à boue, le treuil et la table de rotation. [8]



Figure I-7: Les moteurs diesel électrique[19]

I.5.3 Un système de rotation :

Il se compose d'une table de rotation, d'une tige carrée (Kelly) et d'une tête d'injection, qui peut être équipée d'un moteur (To Drive). [9]



Figure I-8: Top drive [18]



Figure I-9: La Table de rotation[19]

I.5.4 Un dispositif de levage :

ce système de suspension est de gérer les déplacements verticaux lors du forage et de contrôler le poids exercé sur l'outil. Il comprend un derrick de plus de 80 mètres de haut, un crochet et un treuil motorisé pour lever l'équipement de forage et le tubage. De plus, le treuil actionne un arbre

secondaire pour visser et dévisser les tiges et les tubages. Le treuil doit pouvoir manipuler des charges lourdes à des vitesses élevées. Le derrick est la structure la plus élevée de la plateforme, soutenant la tige qui porte le trépan et s'allonge pendant le forage. [10]



Figure I-10: Treuil de forage [11]

I.5.5 Système de sécurité :

Le Bloc Obturateur de Puits (BOP) est utilisé à plusieurs étapes de la vie d'un puits : pendant le forage, la complétion, les interventions sur le puits, et lors des procédures de fermeture définitive du puits. Un BOP est un dispositif (en résumé, un assemblage d'obturateurs) monté durant les travaux et spécifique au puits en question, en particulier en ce qui concerne la pression potentielle à laquelle il peut être exposé.

Ce dispositif sert de principal organe de sécurité lors des opérations de forage ou d'intervention lourde, et possède deux fonctions de sécurité principales. Ces fonctions sont :

1. Assurer la fermeture du puits en cas de flux incontrôlé
2. Permettre la reprise de contrôle du puits ; c'est ce qu'on appelle la procédure de contrôle des flux. [12]



Figure I-11: BOP [18]

I.6 Les équipements de fonds :

I.6.1 La garniture de forage :

La garniture de forage, un élément crucial de l'opération de forage, se compose de deux parties principales : la partie haute, constituée de tiges également appelées drill-pipes, et la partie basse, connue sous le nom d'assemblage de fond (Bottom Hole Assembly). Cette dernière comprend divers composants tels que les stabilisateurs, les moteurs de fond, les outils de mesure et de contrôle, et les outils de forage directionnel. La fonction principale de la garniture de forage est de permettre la liaison entre l'outil de forage et la surface, mais elle joue également plusieurs autres rôles cruciaux tout au long du processus de forage.

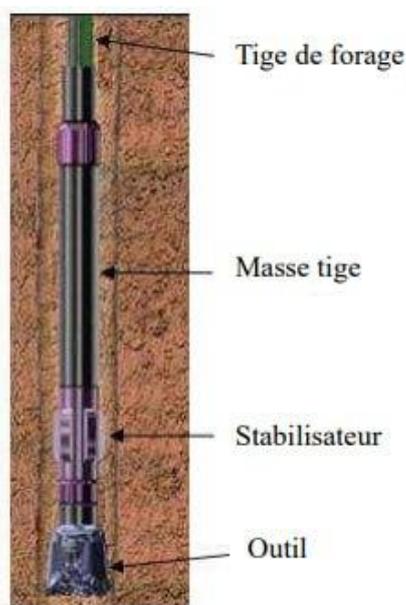


Figure I-12: La garniture de forage [13]

Premièrement, elle assure la rotation de l'outil de forage, ce qui est essentiel pour briser la roche et faciliter la progression du trou de forage. De plus, elle joue un rôle essentiel dans le guidage et le contrôle de la trajectoire de l'outil, permettant ainsi de forer dans des directions spécifiques selon les besoins du projet. En outre, la garniture de forage exerce une pression ou un poids sur l'outil, ce qui contribue à maintenir sa stabilité et à favoriser un forage efficace. Enfin, elle permet la circulation du fluide de forage, qui remplit plusieurs fonctions telles que le transport des débris de forage à la surface, le refroidissement et la lubrification de l'outil, et le maintien de la pression dans le puits pour éviter les éruptions de gaz ou de liquides indésirables. En résumé, la garniture de forage est un élément multifonctionnel et indispensable de l'équipement de forage, garantissant le succès et l'efficacité des opérations de forage. [13]

En général, la garniture est constituée des éléments suivants :

I.6.2 Le train de tiges (Drill Pipes, DP):

C'est la section la plus longue de la garniture, composée de nombreux tubes d'acier fins qui relient l'outil de forage à la surface. Leur fonction est de transmettre le mouvement rotatif à l'outil et de supporter en partie les masses-tiges. Les extrémités des tiges, équipées de renflements nommés tool-joints (TJ), permettent l'assemblage des tiges et servent de points d'appui contre la paroi du puits. Normalement, le train de tiges est maintenu en tension pour prévenir le flambage, ce qui pourrait engendrer des forces de contact élevées avec la paroi du puits. Dans certains cas, comme le forage dirigé ou horizontal, on utilise des tiges lourdes (Heavy Weight Drill Pipe, HWDP) placées juste après les masses-tiges pour diminuer le risque de flambage. [14]



Figure I-13: Tiges de forage [21]

I.6.3 Assemblage de fonds (Bottom Hole Assembly):

Assemblage de fonds (Bottom Hole Assembly): De longueur entre 200 et 300 mètres, il est constitué de tubes d'acier appelés les masses-tiges (drill-collar), de stabilisateurs et de l'outil de fond. [20]

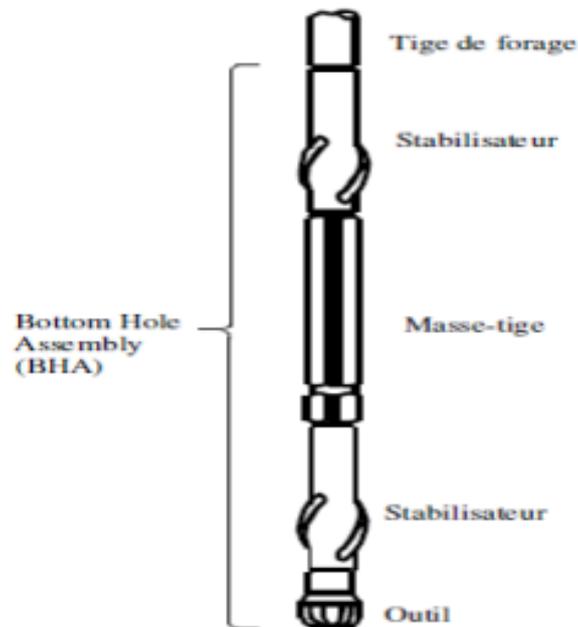


Figure I-14: Composants de la partie inférieure de la garniture [20]

I.6.3.1 Les masses-tiges (Drill Collars, DC) :

Ce sont des tubes d'acier lourds qui exercent une pression sur l'outil de forage. Durant le forage, ces masses-tiges sont généralement en compression, assurant ainsi une force descendante adéquate. [14]



Figure I-15: Les masses tiges [22]

I.6.3.1.1 La masse-tige lisse :

Est généralement un tube lisse à paroi épaisse, avec une épaisseur environ 4 à 8 fois supérieure à celle des tubes de forage. Elle est usinée sous une forme cylindrique uniforme et fabriquée en acier allié brut. [15]

I.6.3.1.2 La masse-tige en spirale :

Est utilisée pour éviter les blocages lors du forage à travers des formations très poreuses. Le blocage peut se produire lorsqu'une pression de boue excessive est appliquée ou lors du forage de puits à forte déviation. Une méthode pour minimiser le risque de blocage consiste à réduire la zone de contact entre les masses-tiges et le puits de forage. Pour ce faire, des rainures en spirale sont découpées sur les masses-tiges. [15]

I.6.3.1.3 Les masses-tiges non magnétiques :

Ce type de masse-tige est utilisé pour isoler les instruments de mesure des distorsions magnétiques causées par l'acier constituant le train de tiges, ce qui peut affecter le fonctionnement des instruments de direction. [15]



Figure I-16: Les types de masse tiges [15]

I.6.4 Outil de forage (drill bit)

Le forage rotatif est la méthode dominante dans l'industrie pétrolière et géothermique pour creuser des puits afin d'explorer et d'extraire des hydrocarbures comme le pétrole brut et le gaz naturel. Les outils de forage sont généralement classés en deux catégories en fonction de leur mécanisme de coupe : les trépan à molettes et les trépan à molettes fixes.

Les trépan à molettes créent le trou en fracturant la roche à l'aide d'éléments de coupe en forme de "dents" sur plusieurs cônes qui roulent le long du mur du trou pendant la rotation de l'outil. Les trépan à molettes fixes utilisent des lames équipées d'éléments de coupe extrêmement durs, souvent en diamant naturel ou synthétique, pour éliminer les matériaux par raclage ou meulage pendant la rotation de l'outil. [15]



Figure I-17: Les deux types d'outil de forage : outil à trois cônes (a), outil PDC (b) [15]

I.6.4.1 Les trépan à molettes:

Utilisent généralement trois cônes pour loger les éléments de coupe, comme illustré dans la Figure(I.17)(a). Ce type d'outil peut être classé en deux catégories en fonction du matériau des "dents" : en acier ou en carbure de tungstène. Les dents en acier sont directement usinées dans l'acier du cône lui-même. En revanche, les dents en carbure de tungstène extrêmement dur sont fixées aux cônes par soudage. Les cônes tournent sur des roulements à rouleaux ou sur des paliers de tourillon, équipés de systèmes de lubrification à la graisse à compensation de pression. [15]

I.6.4.2 Le trépan à molettes fixes:

Est largement préféré dans le forage rotatif en raison de sa simplicité mécanique par rapport au trépan à molettes. Les éléments de coupe restent fixes par rapport au trépan, éliminant ainsi le besoin de roulements ou de lubrification. Le type d'élément de coupe le plus couramment utilisé est le diamant polycristallin (PDC), qui consiste en un cylindre de carbure de tungstène fritté avec une surface plane revêtue de diamant synthétique. Ces éléments de coupe sont disposés le long des lames du trépan. La surface revêtue de diamant est positionnée de manière à faire face à la direction de rotation du trépan, assurant ainsi une couverture complète du fond du trou de forage, comme illustré dans la Figure(I.17) (b). [15]

I.6.5 Les appareils de mesures (MWD) :

Ce sont des appareils embarqués avec la garniture afin de mesurer l'évolution des certains paramètres comme l'inclinaison et l'azimut en fonction de la profondeur foré. [14]

I.6.6 Les raccords :

Ce sont des pièces mécaniques servant à raccorder les différents composants de la garniture (PDM/DC, DC/HWDP, HWDP/DP,..etc). Elles sont généralement de petite taille afin de ne pas encombrer la garniture. [14]

I.6.7 Les stabilisateurs :

Le forage vertical, contrairement au forage dirigé, consiste en un forage implanté à la verticale de son objectif, avec une déviation maximale admissible limitée pour atteindre la cible. Ce type de forage est couramment utilisé dans la plupart des opérations d'exploration. Naturellement, un outil de forage n'a pas tendance à rester parfaitement vertical. Pour contrôler et limiter la déviation d'un puits, des stabilisateurs sont intégrés dans la garniture de forage. Le nombre, la taille et la position de ces stabilisateurs sont soigneusement sélectionnés pour répondre efficacement aux défis

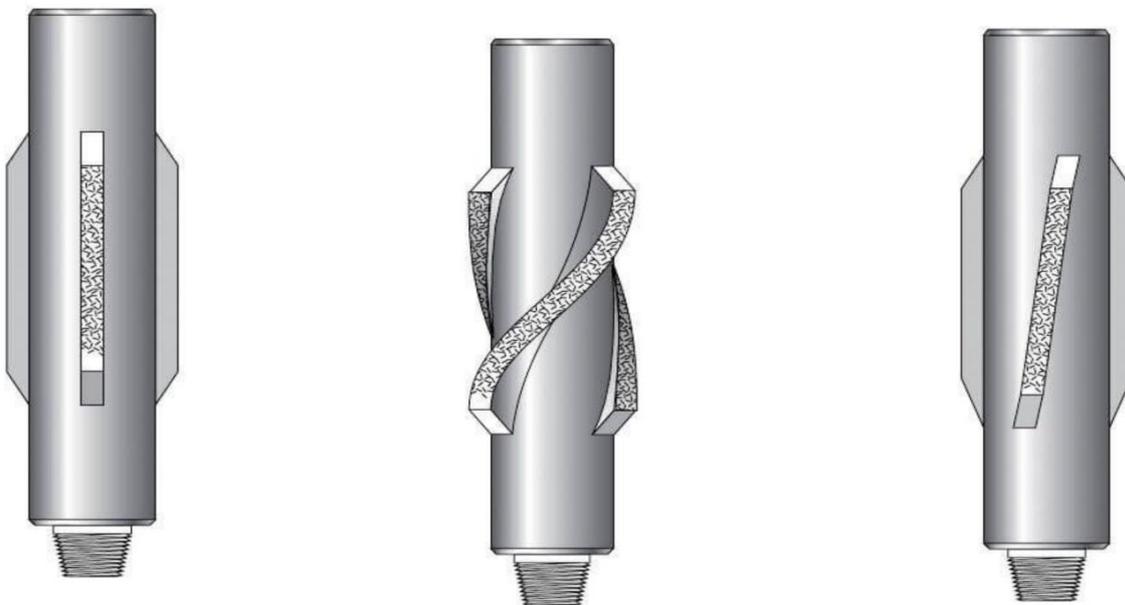
rencontrés.

Un stabilisateur est une pièce qui se compose d'un corps cylindrique muni de trois lames disposées à sa périphérie. Lorsqu'il est en fonctionnement dans le puits, ces lames prennent appui sur les parois, ce qui permet d'assurer un meilleur guidage et un meilleur centrage de la garniture de forage. Cette configuration garantit que le forage reste aussi vertical que possible, facilitant ainsi l'atteinte de la cible visée. [16]

I.6.7.1 Forme des lames des stabilisateurs:

Ces lames peuvent être:

1. droites et verticales.
2. droites et obliques.
3. hélicoïdales. [16]



1. droites et verticales

2. droites et obliques

3. Hélicoïdales

Figure I-18: Les Formes des lames des stabilisateurs [16]

I.6.7.2 Les différents types de stabilisateurs :

Il existe de nombreux types de stabilisateurs dont l'efficacité dépend de la nature des terrains plus ou moins tendres sur lesquels les lames doivent prendre appui et de la surface de contact de ces lames avec les parois. Les constructeurs proposent toute une gamme de stabilisateurs essentiellement par la forme des lames et leur mode d'assemblage sur le corps: ces lames peuvent être droites et verticales, droites et obliques ou hélicoïdes, fraisées (intégral blades), soit soudées elles peuvent être soit directement (welded), soit solidaires d'une chemise amovible (interchangeable sleeve). Les surfaces extérieures peuvent être soit rechargées avec un alliage au carbure de tungstène, soit munies de pastilles (inserts) de carbures de tungstène, soit dans certains cas comporter des patins d'usure vissés. [16]



A lames fraisées

[Intégral]

A lames soudées

[Welded]

A chemise non rotative

Figure I-19: Les différents types de stabilisateurs [16]

Il existe également:

- Des stabilisateurs à chemise en caoutchouc non rotative utilisés dans les terrains durs
- Des stabilisateurs à surfaces de contact importantes utilisés en stabilisateur d'outil (near bit),
- Des stabilisateurs sous dimensionnés utilisés en forage dirigé, présentant un recouvrement maximal des lames.
- Des stabilisateurs sous-dimensionnés utilisés en forage dirigé, présentant un recouvrement maximal des lames

Ils doivent être peu agressifs que possible afin d'éviter l'érosion des parois. Les stabilisateurs utilisés présentent donc en général de grandes surfaces de contact [recouvrement ou élargissement des lames]. [16]

I.7 Stabilisation en trou vertical :

Le but d'une bonne stabilisation en trou vertical est de :

- maintenir un angle de déviation le plus faible possible,
- permettre un certain poids sur l'outil,
- garantir un diamètre correct du trou,
- éviter le collage par pression différentielle des masse-tiges.

Trois types de garnitures sont utilisés :

I.7.1 la garniture packed hole :

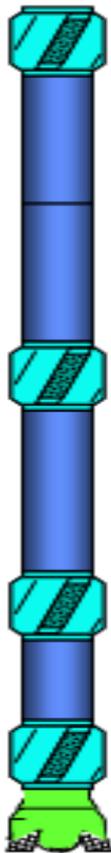
(Figure(I.20)(a)) : comporte un stabilisateur sur l'outil, un deuxième à environ 3 m au-dessus (masse-tige courte) et deux ou trois autres intégrés dans le train de masse-tiges. C'est une garniture très rigide permettant de forer avec des poids élevés et des inclinaisons ou des risques d'augmentation de la déviation réduits. [17]

I.7.2 la garniture pendulaire:

(Figure(I.20)(b)) : comporte un seul stabilisateur situé à deux ou trois masse-tiges au-dessus de l'outil. Cette garniture est plus souple et permet, en choisissant judicieusement la position du stabilisateur au-dessus de l'outil, de combattre la tendance à la déviation ou même de diminuer l'inclinaison. Des modèles de simulation de comportement de la garniture permettent d'optimiser le positionnement des stabilisateurs et d'améliorer l'efficacité du contrôle de la déviation. [17]

I.7.3 la garniture lisse (sans stabilisateur):

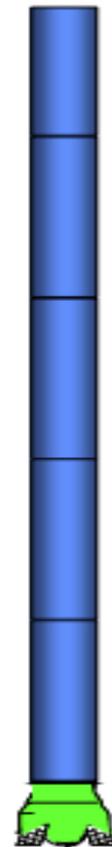
(Figure(I.20)(c)) : elle n'est utilisée que dans le cas de reforage à l'intérieur des tubages, car son emploi dans des puits avec tendance de déviation nécessite un poids sur l'outil limité, au détriment de l'avancement, et crée un trou en hélice mal calibré, donc des risques de reforage et de coincement.[17]



Garniture packed hole(a)



Garniture pendulaire(b)



Garniture lisse(c)

Figure I-20: Types de garnitures [17]

I.8 Stabilisation en forage dirigé :

Dans le cas du forage dirigé, les stabilisateurs en plus de leur rôle de centrage et de guidage supportent le poids de la garniture. Puisqu'on ne dispose pas de stabilisateurs non rotatifs mécaniquement satisfaisants, on choisira en forage dirigé des stabilisateurs qui soient aussi peu agressifs que possible, afin d'éviter l'érosion des parois. Les stabilisateurs utilisés présentent donc en général de grandes surfaces de contact (recouvrement ou élargissement des lames). La position des stabilisateurs dans le train de masse-tiges ainsi que leurs diamètres est prépondérant. Il existe toute une série d'assemblages de fond choisis en fonction du résultat que l'on veut obtenir, c'est à dire :

- soit augmenter l'angle de déviation (build up),
 - soit le maintenir (lock up),
 - soit le diminuer (drop off).
- Les modèles de simulations permettent d'aider à définir les assemblages de fond les mieux adapt [17]

I.9 Conclusion :

Le forage pétrolier est une activité complexe et controversée qui joue un rôle crucial dans l'économie mondiale tout en posant des défis environnementaux et sociaux significatifs.

Le forage pétrolier est essentiel pour satisfaire la demande énergétique mondiale. Le pétrole et ses dérivés sont utilisés non seulement comme combustibles, mais aussi comme matières premières pour de nombreux produits chimiques et industriels. Les revenus générés par l'extraction de pétrole contribuent de manière substantielle aux économies de nombreux pays, créant des emplois et soutenant des infrastructures

Cependant, le forage pétrolier comporte de nombreux risques environnementaux. Les déversements de pétrole, les fuites de méthane et d'autres accidents peuvent avoir des effets dévastateurs sur les écosystèmes marins et terrestres. De plus, l'extraction et la combustion de pétrole contribuent de manière significative aux émissions de gaz à effet de serre, exacerbant le changement climatique.

Les opérations de forage peuvent également entraîner des conséquences sociales, notamment la perturbation des communautés locales et des conflits d'usage des terres. Les questions de souveraineté énergétique et de contrôle des ressources naturelles peuvent entraîner des tensions géopolitiques.

Face à ces défis, il y a une pression croissante pour développer des technologies de forage plus propres et plus sûres, ainsi que pour investir dans des énergies alternatives renouvelables comme le solaire, l'éolien et l'hydroélectricité. Les progrès dans les techniques de capture et de stockage du carbone (CSC) offrent également des solutions potentielles pour réduire l'impact environnemental du secteur pétrolier

En somme, bien que le forage pétrolier reste indispensable pour l'économie mondiale actuelle, il est crucial de gérer et de minimiser ses impacts négatifs. La transition vers des sources d'énergie

plus durables est impérative pour garantir un avenir énergétique viable, tout en continuant à satisfaire les besoins énergétiques mondiaux. Une approche équilibrée, combinant innovation technologique, régulation stricte et développement des énergies renouvelables, est nécessaire pour relever les défis posés par le forage pétrolier.

CHAPITRE II :
**Instabilité de la garniture
de forage**

II. Instabilité de la garniture de forage

II.1 Introduction :

Dans l'industrie du forage pétrolier, les problèmes de vibration et de flambage sont des défis techniques majeurs qui affectent la stabilité et la performance des opérations de forage. Les vibrations peuvent être causées par divers facteurs tels que la résistance au frottement, les variations de densité du fluide de forage, ou même les caractéristiques géologiques du terrain. Elles se manifestent sous différentes formes : les vibrations axiales se produisent dans le sens de la longueur de la tige de forage, les vibrations latérales se produisent latéralement, et les vibrations de torsion impliquent une rotation autour de l'axe de la tige.

Ces vibrations peuvent entraîner des dommages aux équipements de forage, tels que les forets et les tiges, ainsi qu'une usure prématurée des composants, ce qui réduit l'efficacité globale du processus de forage et augmente les coûts de maintenance. De plus, les vibrations peuvent également affecter la qualité du trou de forage, entraînant des problèmes tels que des trous déviés ou élargis, ce qui peut compromettre la productivité et la sécurité de l'opération.

Le flambage, quant à lui, se produit lorsque les tiges de forage sont soumises à des charges compressives élevées, provoquant leur déformation latérale. Cela peut compromettre la stabilité de l'ensemble de la structure de forage et entraîner des accidents graves, voire des effondrements, mettant en danger la vie des travailleurs sur le site et entraînant des retards coûteux dans les opérations.

Pour relever ces défis, l'industrie du forage pétrolier investit dans des technologies avancées telles que les systèmes de contrôle des vibrations, les outils de modélisation et de simulation, ainsi que les matériaux de tige de forage plus résistants. De plus, des pratiques opérationnelles sûres et des procédures de maintenance préventive sont mises en œuvre pour minimiser les risques associés aux vibrations et au flambage. En fin de compte, l'objectif est d'assurer la stabilité, l'efficacité et la sécurité des opérations de forage pétrolier, tout en minimisant les impacts environnementaux et en optimisant les coûts.

II.2 Vibrations du train de tige:

Les vibrations du train de tige lors des opérations de forage pétrolier sont un phénomène complexe et crucial à comprendre pour garantir l'efficacité et la sécurité des opérations. La nature flexible et élancée du train de tige, combinée à des sollicitations irrégulières dans un environnement dynamique, conduit à un mouvement de rotation non uniforme. Ces vibrations peuvent être décomposées en trois modes principaux : axial, de torsion et latéral. Alors que ces modes peuvent se produire simultanément, ils peuvent également interagir de manière complexe, rendant difficile leur identification et leur caractérisation individuelle. Le phénomène est particulièrement critique au niveau du BHA (Bottom Hole Assembly), où les vibrations sont souvent les plus sévères. Ces vibrations excessives entraînent une fatigue accélérée des composants, réduisant la durée de vie de l'équipement et augmentant les risques opérationnels. De plus, les vibrations entraînent une réduction de la vitesse de forage, augmentant ainsi les coûts de l'opération et prolongeant la durée du forage. Par conséquent, la gestion efficace des

vibrations du train de tige est essentielle pour maximiser la productivité et minimiser les risques lors des opérations de forage pétrolier. [23]

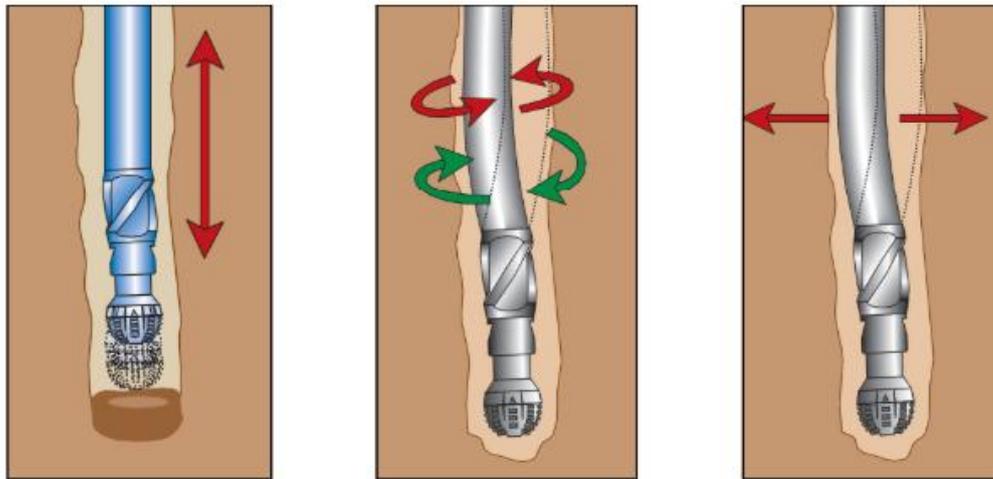


Figure II-1: Modes de Vibration, (gauche: Axial, milieu: Torsion, droite: Latéral)[24]

II.2.1 Vibrations latéral:

Les vibrations latérales ont été identifiées plus tardivement que les vibrations axiales et de torsion. Contrairement à ces dernières, les vibrations latérales ne se propagent pas à la surface et sont rapidement amorties. Elles demeurent généralement localisées au niveau de la partie inférieure du système de forage, c'est-à-dire au niveau de la BHA. La détection de ces vibrations est devenue possible grâce au développement des mesures d'accélération au fond du trou pendant le forage, ces vibrations résultent du désalignement de la garniture par rapport à l'axe de forage, de son interaction avec les parois du puits et des variations du poids sur l'outil.

Les vibrations latérales sont plus préjudiciables à la garniture de forage que les vibrations axiales et de torsion. En effet, ces vibrations sont responsables de la fatigue des tiges (voir Figure(II.2)) et de l'usure de l'outil (voir Figure(II.3)). Les chocs répétés entre la garniture et la paroi du puits peuvent entraîner une expansion du trou dans certaines zones et sont responsables de l'irrégularité du diamètre de forage .[23]



Figure II-2: Rupture d'une Tige de Forage[23]



Figure II-3: Gauche: Outil Neuf, Droite: Outil Ayant Subi des Vibrations Sévères [23]

II.2.2 Vibrations Axial:

Les vibrations axiales sont généralement les premières à être observées, car ce mode de vibration se propage facilement vers la surface. Elles sont principalement causées par les irrégularités des roches percées et les effets de la pompe à boue et du moteur situé au fond du trou (couplage et résonances). Ces vibrations sont à l'origine des fluctuations du poids sur l'outil, ce qui affecte le taux de pénétration de l'outil dans la roche (ROP) et peut entraîner des interruptions dans le processus de forage .[23]

Le phénomène du "bit bounce" est une forme grave de vibrations axiales. Ces vibrations peuvent se propager jusqu'à la surface et entraîner des phénomènes de résonance sur l'installation en surface. Le "bit bounce" se produit lorsque l'outil entre en contact de manière intermittente avec le fond du trou. Ce phénomène est plus susceptible de se produire avec les outils de type tricône. Il est considéré comme un mode de vibrations forcées qui peut être contrôlé en modifiant la fréquence d'excitation, c'est-à-dire en ajustant la vitesse de rotation . [23]

II.2.3 Les vibrations de torsion:

Pendant le forage, on observe souvent des variations du couple de torsion en surface. De plus, même si la vitesse de rotation reste constante en surface, des mesures effectuées au fond du trou révèlent des fluctuations de la vitesse de rotation de l'outil de forage. Ces observations mettent en évidence l'existence de vibrations de torsion au niveau de la garniture . L'interaction entre la garniture et la formation rocheuse est la principale cause de ces vibrations. Les vibrations de torsion sont aussi préjudiciables que les vibrations axiales car elles entraînent l'usure des tiges, endommagent les raccords de tiges et l'outil de forage .[23]

II.2.3.1 Phénomène de stick-slip:

Le stick-slip est une vibration de torsion qui provoque des arrêts cycliques de l'outil pendant des périodes pouvant représenter jusqu'à 50 % du temps de forage. L'outil ne redémarrera que lorsque le couple au fond dépassera le couple de frottement (outil/roche). Ce phénomène se développe surtout lors de l'utilisation des outils PDC, qui consomment plus de couple que les outils tri-cônes.

La figure(II.4) illustre l'impact du phénomène stick-slip sur les vitesses de rotation du trépan et de la table de rotation. La courbe noire montre la vitesse de la table de rotation (en surface) qui varie entre 45 et 65 tr/min, tandis que la courbe grise montre la vitesse de rotation du trépan (en bas du trou). Pendant le stick-slip, le trépan peut parfois s'arrêter complètement alors que, simultanément, la table de rotation continue de tourner à une vitesse moyenne d'environ 55 tr/min, provoquant des fluctuations de torsion dans le train de tiges. Ce phénomène entraîne non seulement une défaillance du trépan en raison de la fatigue prématurée du train de tiges, mais aussi une usure accélérée de l'outil à cause de ses vitesses élevées.[25]

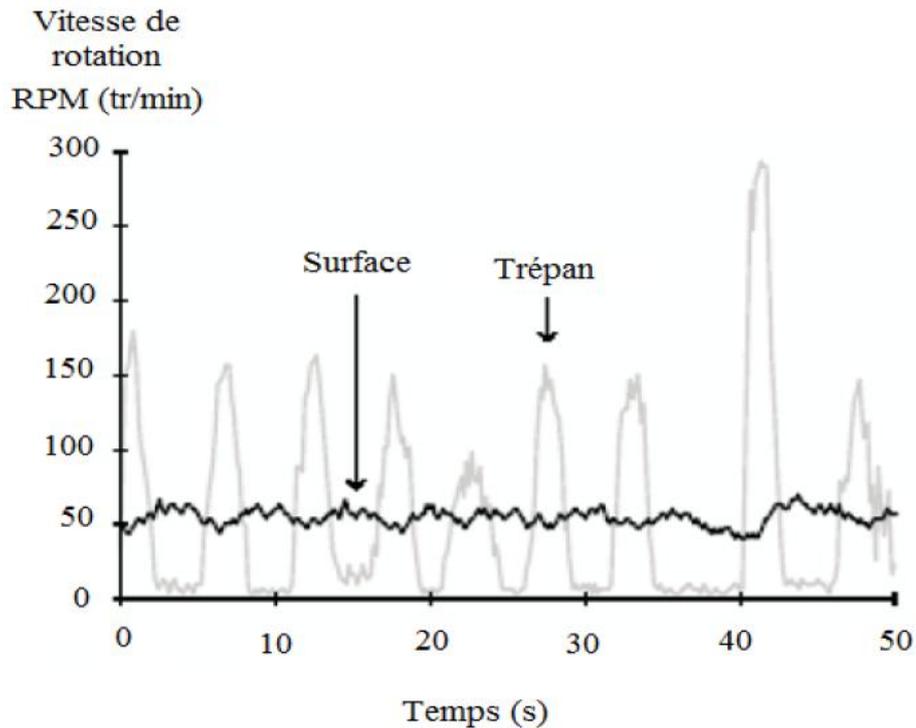


Figure II-4: Le Phénomène du Stick-Slip [25]

II.3 Les Conséquences des vibrations:

II.3.1 Endommagement des outils de forage:

L'outil de forage est souvent considéré comme l'élément le plus crucial et le plus coûteux de l'ensemble de la garniture de forage. Sa structure en coupe diamantée le rend particulièrement

Vulnérable aux phénomènes vibratoires intenses rencontrés lors de la destruction de la roche. L'avènement des outils PDC, bien que plus coûteux et fragiles que les outils tricônes, a amplifié cet impact, surtout dans les gros diamètres.



Figure II-5: Endommagement de l'outil [26]

II.3.2 Dégradation des composants de l'ensemble de forage:

Les vibrations sont souvent responsables de l'usure excessive des stabilisateurs. Elles peuvent également endommager les moteurs de fond dans les cas où leur utilisation était envisagée pour améliorer les performances de forage. Même les outils de mesure des vibrations placés au fond du trou lors du forage n'ont pas réussi à résister à l'intensité de ces vibrations



Figure II-6: Endommagement des éléments de la garniture de forage [26]

II.3.3 L'affaiblissement de la qualité du trou :

Les vibrations intenses entraînent la formation de cavités dans les formations géologiques traversées. Les enregistrements de quelques puits forés ont révélé une tolérance acceptable à cette formation de cavités. Cette situation est souvent associée à des vitesses d'avancement faibles. De plus, une quantité excessive de ciment est requise pour sceller l'espace autour du puits, ce qui affecte inévitablement la qualité de la cimentation. [26]

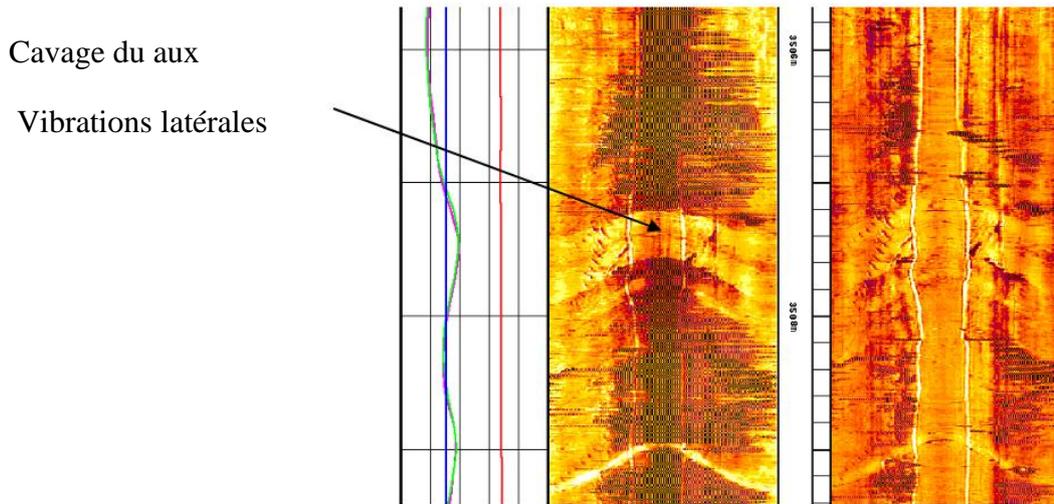


Figure II-7: Image de dégradation de la qualité du trou de puits (DSI) [26]

II.4 Frottements garniture-puits et flambage :

II.4.1 Frottements :

Il est inévitable que la garniture de forage en mouvement à l'intérieur d'un puits de forage fortement dévié entre en contact avec sa paroi. Par conséquent, il est crucial de disposer de méthodes permettant d'estimer les frottements anticipés dans ces trajectoires complexes.

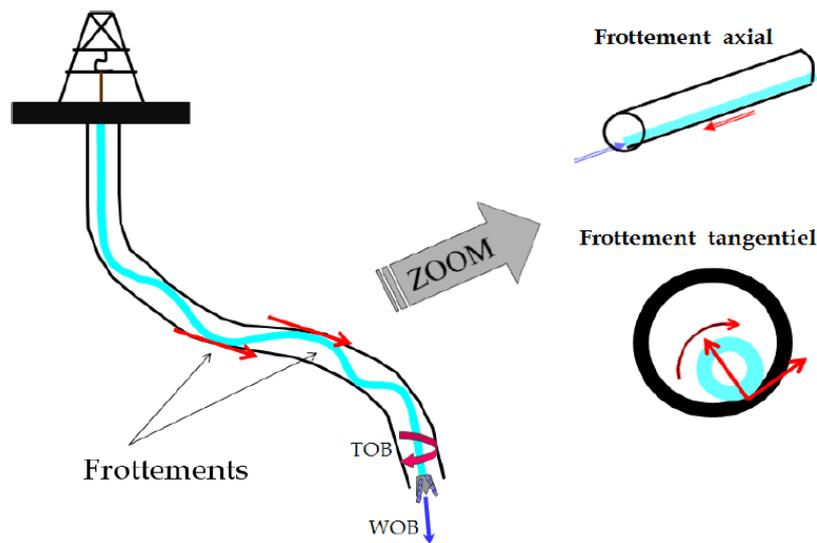


Figure II-8: Frottements tige-puits dans un puits dévié [27]

Les modèles de prédiction des pertes par frottement, connus dans l'industrie sous le nom de "torque & drag" (T&D), offrent deux fonctionnalités principales :

1. Calculer les moments et les forces le long de la tige (notamment en surface) en fonction d'un

coefficient de frottement entre la tige et la paroi du puits.

2. Effectuer le calcul inverse, c'est-à-dire estimer un coefficient de frottement moyen à partir des données de couple et de tension en surface.

Ces calculs de "torque & drag" sont extrêmement utiles pour les foreurs, car ils leur permettent de prédire l'évolution du couple et de la tension en surface en fonction de la configuration d'un train de tiges et d'un ensemble de fond de trou (BHA) ou de tubage pour une profondeur donnée. Ils permettent ainsi de prévoir :

- Le moment où, en descente sans rotation, le poids au crochet ne sera plus suffisant pour abaisser les tiges ou le tubage et qu'il sera nécessaire de les pousser.
- Le moment où, en remontée sans rotation, la tension en surface dépassera la capacité du treuil ou la limite élastique des tiges.
- Le moment où le couple excédera la capacité de couple du système de forage ou la limite de torsion des tiges.

Grâce à ces méthodes de calcul T&D, il est possible de définir et de concevoir une trajectoire minimisant les frottements entre la garniture de forage et le puits.[27]

II.5 Point neutre :

Comprendre le concept du point neutre dans la conception des structures tubulaires est essentiel pour garantir leur intégrité et leur performance. La variété des définitions proposées reflète la complexité des contraintes auxquelles ces structures sont soumises dans des environnements divers, tels que les forages pétroliers.

Dans un contexte où la tubulaire est soumise à des forces de traction et de compression, le point neutre est défini comme le point où la contrainte axiale change de signe, passant d'un état de compression à un état de tension. Cette définition met en évidence l'équilibre délicat entre les forces internes et externes agissant sur la structure.

Une autre perspective, avancée par A. Lubinsky, considère le point neutre comme celui qui divise la garniture en deux parties équilibrées : le poids de la partie supérieure est suspendu à l'élévateur, tandis que le poids de la partie inférieure est égal à la force appliquée sur le fond. Cette vision met en lumière l'importance de l'équilibre des forces pour prévenir les défaillances structurales.

Une troisième définition lie le point neutre à un équilibre entre les contraintes axiale, radiale et tangentielle. Ce point représente l'endroit où ces contraintes sont égales, soulignant ainsi l'importance de considérer l'ensemble des forces agissant sur la tubulaire.

Enfin, une définition supplémentaire lie le point neutre à la pression hydrostatique, illustrant l'impact des conditions environnementales sur la distribution des contraintes dans la structure. Dans un fluide comme la boue de forage, cette définition peut conduire à placer le point neutre à une hauteur différente par rapport aux autres formulations, en raison de l'effet de flottabilité et de

la répartition inégale des forces.

En résumé, le point neutre est un concept multifacette qui nécessite une compréhension approfondie des contraintes et des forces en jeu dans les structures tubulaires. Choisir la bonne définition du point neutre est crucial pour assurer la sécurité et la fiabilité des opérations dans des environnements complexes comme les sites de forage pétrolier.

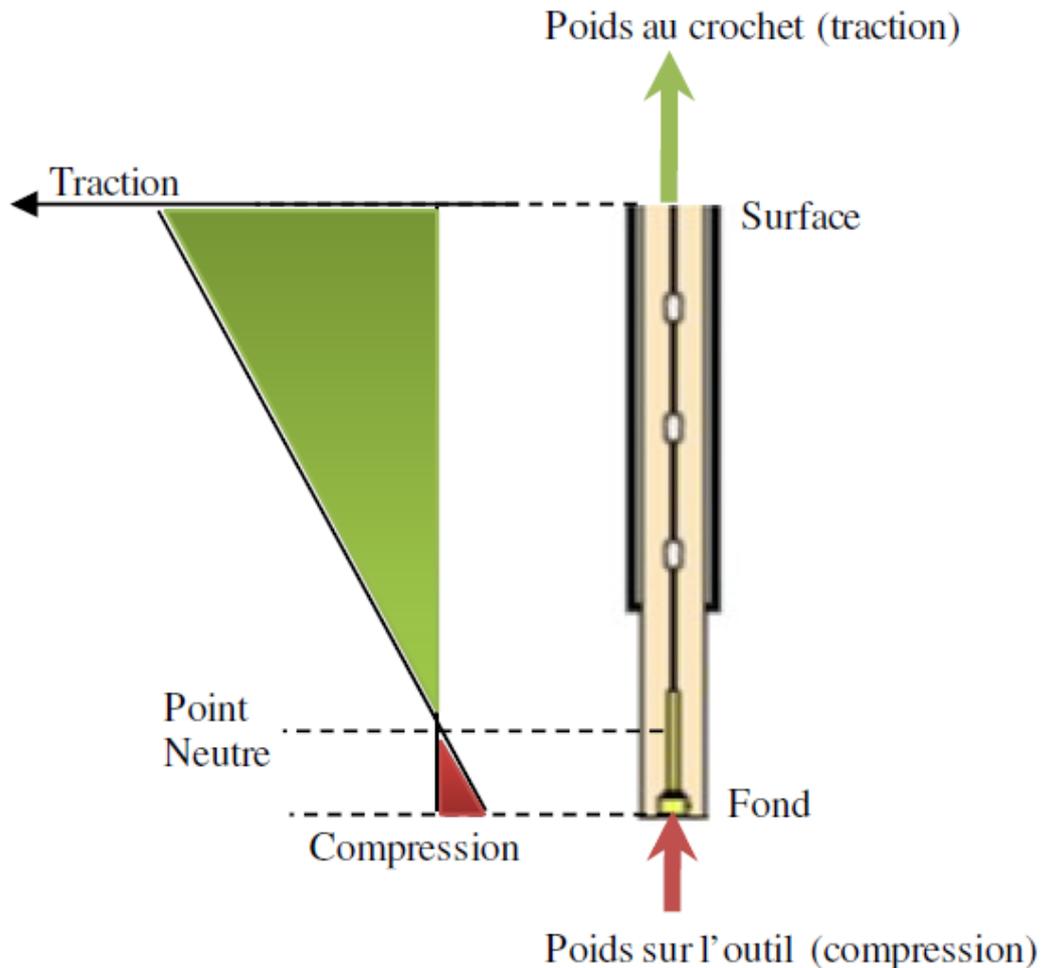


Figure II-9: Zone de Traction (au-dessus du Point Neutre) et Zone de Compression[33]

II.6 Augmentation de l'effet de frottement en raison du flambage :

Lorsqu'on évalue la transmission de la force axiale dans des conditions de flambage, le défi principal réside dans la quantification des frottements et des forces de contact engendrées. La simultanéité du calcul de ces frottements avec le flambage se révèle extrêmement complexe, d'autant plus que ces phénomènes ne peuvent être observés ni contrôlés directement. Cette dynamique est schématiquement représentée dans le diagramme des interactions entre ces deux mécanismes (Fig10).

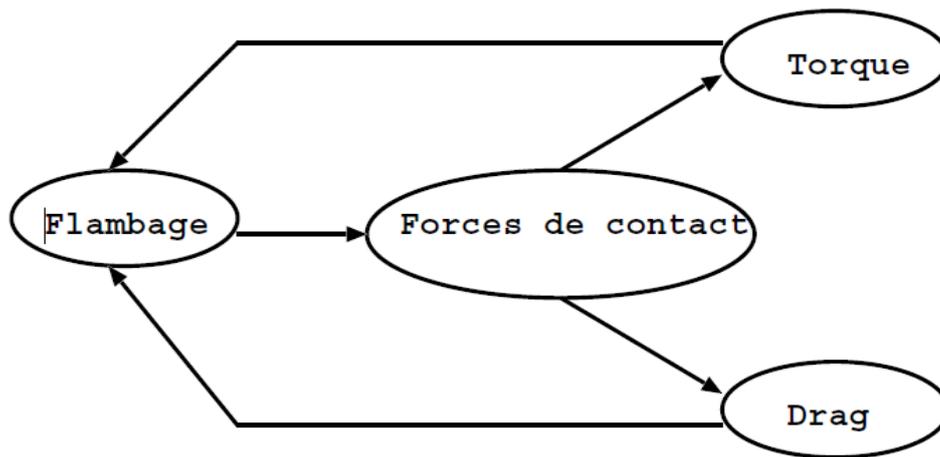


Figure II-10: Diagramme des relations possibles entre le torque & drag, le flambage et Les forces de contact [27]

La corrélation entre le flambage, les forces de contact et le "torque & drag" n'est pas complètement établie, que ce soit sur le plan théorique ou expérimental. Lorsqu'un élément est en situation de flambage, des forces de contact supplémentaires sont induites car ce phénomène oblige la garniture à rester en contact avec la paroi. L'augmentation de ces forces de contact due au flambage entraînera à son tour une augmentation du "torque" et du "drag". Les frottements et le couple dépendent de la force de support latéral de la garniture contre la paroi du puits. De manière similaire, l'augmentation du "drag" et donc de la compression dans la garniture conduit à une intensification du flambage. En outre, le couple peut influencer le flambage en réduisant la force de compression nécessaire pour que la garniture fléchisse.[27]

II.7 Flambage :

II.7.1 Définition de phénomène:

Le flambage est un phénomène complexe difficile à définir de manière précise. Il se manifeste par une déformation soudaine sous charge dans diverses structures telles que des poutres, des plaques ou des coques, avant que des seuils de sécurité ou esthétiques ne soient dépassés. Il survient généralement lorsque l'une des dimensions de la structure est significativement plus petite par rapport aux autres, ce qui induit une instabilité. Cette instabilité se traduit souvent par un changement brusque du comportement de la structure, accompagné d'une altération de sa géométrie, se manifestant par des plis ou des ondulations. L'étude du flambage vise à prédire la forme de ces déformations ainsi que les forces qui y conduisent.

Un exemple courant de flambage est celui de "la canne de Charlot". Lorsqu'elle est soumise à une compression axiale, sa déformation n'est plus simplement un tassement, mais sa géométrie devient instable latéralement.

Il est donc crucial de comprendre l'évolution du flambage dans une structure donnée. Pour ce faire, nous pouvons distinguer deux notions clés : le point limite et la bifurcation. Lorsqu'une structure est soumise à une charge F entraînant un déplacement caractéristique d , elle traverse initialement une série d'états d'équilibre stables appelée chemin d'équilibre fondamental ou branche primaire (OA) sous l'effet d'une charge croissante. [27]

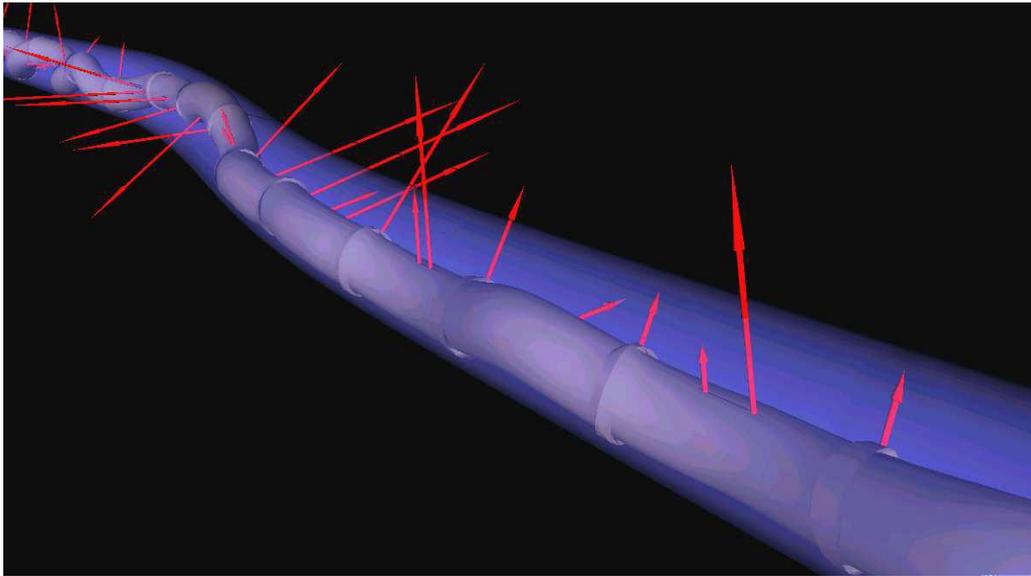


Figure II-11: Flambage dans un puits horizontal [28]

II.7.2 Flambage en forage pétrolier:

Dans le domaine du flambage et du post-flambage, les études ont souvent porté sur des poutres ou des plaques en contact avec une surface plane. Cependant, dans notre cas, nous nous intéressons davantage au comportement des longs tubes minces en acier utilisés dans les forages pétroliers. Le train de tiges de forage peut être considéré comme une structure très élancée, avec un rapport longueur sur diamètre pouvant dépasser 500, ce qui peut déclencher des phénomènes d'instabilité. Les frottements associés aux géométries complexes des puits exacerbent ces phénomènes.

Lorsqu'une certaine intensité de force de compression est atteinte dans la structure de forage, le flambage peut se développer, ce qui peut affecter l'ensemble de l'opération de forage. Le flambage peut se manifester dans des parties isolées des tiges de forage, mais il peut également avoir un impact sur l'ensemble des opérations de forage.[27]

II.8 Conséquences sur les opérations de forage :

Les conséquences du flambage sur les opérations de forage sont multiples et peuvent être classées comme suit :

II.8.1 Transfert inefficace du poids à l'outil :

- Les problèmes de frottement sont accentués, ce qui peut entraîner une résistance supplémentaire lors du mouvement de la garniture.
- Risque de coincement des tiges, ce qui peut entraîner des arrêts de forage et nécessiter des opérations de récupération
- Génération de tortuosité du trou foré, ce qui peut rendre le forage plus difficile et moins précis.

II.8.2 Perturbation de l'avancement du forage :

- Déformation excessive des tiges, pouvant entraîner des déviations fortuites et incontrôlées de

la tête de forage, ce qui peut compromettre la trajectoire prévue du puits.

- Réduction de la vitesse d'avancement du forage en raison de la résistance accrue rencontrée par la garniture.
- Sous-estimation des profondeurs atteintes, car le flambage peut fausser les mesures de profondeur.
- Perturbation au niveau des appareils de mesure, ce qui peut compromettre la précision des données recueillies pendant le forage.
- Propagation des phénomènes de vibration de torsion, ce qui peut endommager la garniture et réduire la qualité du forage.
- Comportement dynamique violent dans la garniture, ce qui peut entraîner des contraintes excessives et des risques d'endommagement du matériel.

II.8.3 Perte d'intégrité de la structure :

- La fatigue des tiges qui peut entraîner leur rupture, compromettant ainsi la sécurité et l'efficacité des opérations de forage
- L'usure abrasive prématurée des tiges, ce qui peut réduire leur durée de vie et nécessiter un remplacement fréquent.
- L'usure du casing pouvant entraîner la perte de stabilité du puits, ce qui peut conduire à des problèmes de sécurité et de performance.
- L'affaiblissement du casing voire sa rupture, ce qui peut entraîner des fuites de fluide de forage ou de production et des risques environnementaux.
- L'usure voire la rupture des centreurs lors des manœuvres par les sabots du casing, ce qui peut entraîner des retards et des coûts supplémentaires pour réparer ou remplacer les équipements endommagés.

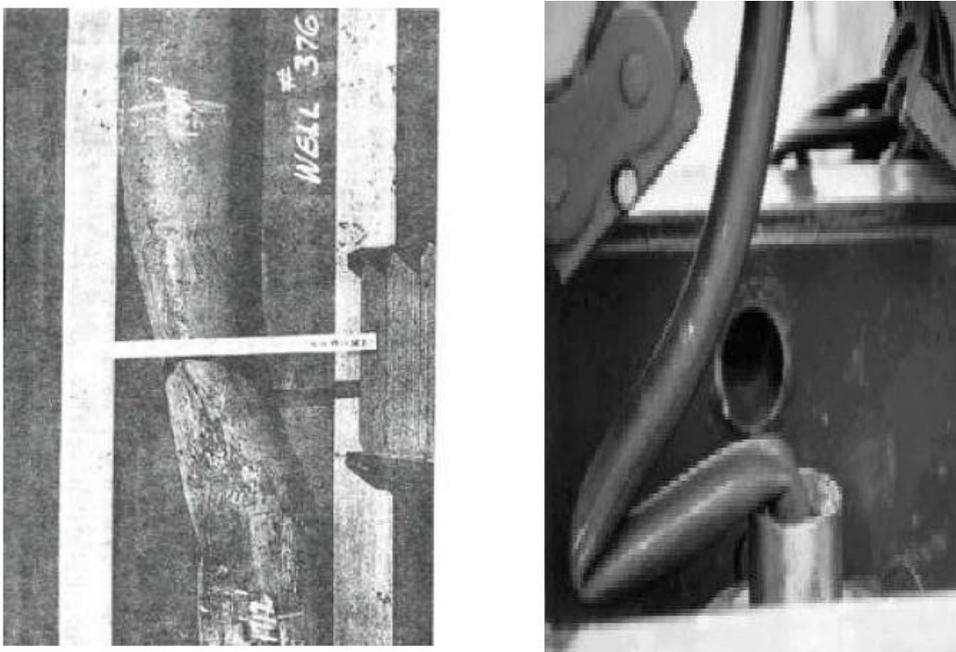


Figure II-12: Flambages de tubulaires observés sur chantier[27]

II.9 Conclusion:

La compréhension et la gestion des phénomènes d'instabilité de la garniture de forage, notamment les vibrations et le flambage, sont cruciales pour garantir la sécurité, l'efficacité et la rentabilité des opérations de forage pétrolier. Ces phénomènes peuvent avoir des conséquences graves, allant de l'usure prématurée des équipements à des accidents potentiellement mortels, en passant par des retards dans les opérations et des dommages environnementaux.

Les vibrations, qu'elles soient axiales, latérales ou de torsion, sont générées par divers facteurs et peuvent entraîner des dommages aux équipements ainsi qu'une dégradation de la qualité du trou de forage, affectant ainsi la productivité et la sécurité. Le phénomène du "stick-slip", par

Exemple, peut causer des arrêts de forage et une usure accélérée des outils, augmentant ainsi les coûts opérationnels.

Le flambage, quant à lui, peut compromettre l'intégrité de toute la structure de forage, entraînant des problèmes tels que des déviations incontrôlées du puits et des ruptures d'équipement. La compréhension du point neutre et ses implications dans la conception des structures tubulaires est essentielle pour prévenir les défaillances structurales dues au flambage.

Pour minimiser ces risques, l'industrie du forage investit dans des technologies avancées telles que les systèmes de contrôle des vibrations, les outils de modélisation et de simulation et l'optimisation, ainsi que dans des matériaux de tige de forage plus résistants. De plus, des pratiques opérationnelles sûres et des procédures de maintenance préventive sont mises en œuvre pour minimiser les impacts des vibrations et du flambage.

En fin de compte, une approche intégrée, combinant la technologie, les bonnes pratiques opérationnelles et la gestion des risques, est nécessaire pour assurer la stabilité, l'efficacité et la sécurité des opérations de forage pétrolier, tout en minimisant les impacts environnementaux et en optimisant les coûts.

CHAPITRE III :

**Amélioration de la stabilité
du train de tiges par le
choix de la position du
stabilisateur**

III. Amélioration de la stabilité du train de tiges par le choix de la position du stabilisateur

III.1 Introduction :

Dans l'industrie du forage pétrolier, l'efficacité et la sécurité des opérations dépendent fortement de la stabilité des colonnes de forage. Les vibrations excessives et le flambage des colonnes peuvent entraîner des coûts supplémentaires, des interruptions d'opérations et même des accidents. La stabilité mécanique des colonnes de forage est donc un facteur crucial qui doit être maîtrisé pour garantir des performances optimales et une sécurité accrue.

Les colonnes de forage sont soumises à des forces et des contraintes variées au cours des opérations de forage. Ces forces peuvent provoquer des déformations et des mouvements indésirables, notamment des vibrations et des flambages. Les stabilisateurs jouent un rôle essentiel en contrôlant ces mouvements, en maintenant la colonne en position et en réduisant les vibrations.

Ce chapitre est consacré à l'évaluation du poids sur l'outil critique pour prévenir le flambage. Ainsi que le choix de la position optimale du stabilisateur pour assurer cette charge sans flambage.[29]

III.2 Évaluation du seuil de stabilité en flambage :

Dans l'industrie du forage pétrolier, la stabilité mécanique et le contrôle du flambage des colonnes de forage sont essentiels pour garantir des opérations efficaces et sécuritaires. Les performances des colonnes de forage sont fortement influencées par des facteurs tels que les positions des stabilisateurs et le poids sur l'outil de forage (WOB).

Ce travail vise à évaluer la position du stabilisateur afin d'assurer le poids maximal sur l'outil avant flambage de la colonne de forage. Deux méthodologies seront utilisées pour cette analyse : la méthode des Surfaces de Réponse (RSM) et le modèle gaussien.

Ce travail repose sur les résultats Mahyari , pour analyser les données réelles des colonnes de forage. Dans son travail, il a utilisé la méthode de l'énergie potentielle, convertissant un système continu en un système à degrés de liberté multiples (MDOF) à travers la méthode de sommation des modes pour déterminer l'équilibre et la stabilité du système.[29]

III.2.1 Étude de Cas :

Cette partie repose sur les résultats Mahyari , pour analyser les données réelles des colonnes de forage. Dans son travail, il a utilisé la méthode de l'énergie potentielle, convertissant un système continu en un système à degrés de liberté multiples (MDOF) à travers la méthode de sommation des modes pour déterminer l'équilibre et la stabilité du système.

➤ Modèle de Réponse de Surface (RSM) :

Le modèle RSM est une technique statistique qui utilise des équations polynomiales pour modéliser les relations entre les variables indépendantes et la variable de réponse. Tout en explorant la surface de réponse dans un espace multidimensionnel. En utilisant des plans

d'expériences soigneusement conçus, le RSM permet de créer un modèle mathématique qui décrit la relation entre les variables d'entrée et la variable de réponse, généralement sous forme d'une fonction polynomiale. Ce modèle est ensuite utilisé pour prédire la réponse dans différentes conditions expérimentales et pour identifier les conditions optimales qui maximisent ou minimisent la réponse.

Il est particulièrement utile pour les problèmes d'optimisation où les interactions entre plusieurs variables doivent être prises en compte. Ce modèle permettra de déterminer les combinaisons optimales des positions des stabilisateurs en fonction des données disponibles.

➤ **Modèle Gaussien Modifié :**

Le modèle gaussien modifié est basé sur l'équation de la distribution gaussienne, ajustée pour modéliser les données spécifiques. Ce modèle est adapté pour analyser des phénomènes présentant une variation non linéaire, typique des systèmes de forage où les forces et les réponses peuvent varier de manière complexe.

Tableau III. 1: Les principales différences entre Régression Non Linéaire (Gaussienne Modifiée) ET Régression par Surface de Réponse (RSM)

Critères	Régression Non Linéaire (Gaussienne Modifiée)	Régression par Surface de Réponse (RSM)
Principe de Base	Utilisation de la fonction Gaussienne modifiée pour ajuster les données non linéaires.	Utilisation de modèles Polynomiaux pour explorer les relations entre les variables.
Complexité de Modèle	Modèle potentiellement plus complexe nécessitant une bonne Compréhension des fonctions gaussiennes.	Modèles généralement plus simples et intuitifs basés sur des polynômes de bas degré.
Précision de l'ajustement	Haute précision pour les données où la relation est naturellement gaussienne.	Bonne précision pour des relations approximativement linéaires ou quadratiques.
Robustesse	Peut être sensible aux variations et au bruit des données.	Généralement plus robuste face aux variations des données et au bruit.
Facilité d'Interprétation	Moins intuitive en raison de la complexité de la fonction Gaussienne modifiée.	Plus facile à interpréter grâce aux coefficients des polynômes.
Application Pratique	Utilisé pour des phénomènes avec des distributions proches de Gaussiennes modifiées.	Idéal pour l'optimisation de procédés et la modélisation de surfaces de réponse.
Exigences en Données	Peut nécessiter plus de données pour un ajustement précis.	Peut être appliqué efficacement Avec un nombre limité de données.
Calcul et Temps de Traitement	Peut-être plus gourmand en ressources informatiques et en temps.	Généralement moins exigeant en termes de calcul et de temps de traitement.
Exemples d'Applications	Modélisation de phénomènes naturels avec des distributions gaussiennes modifiées.	Optimisation de procédés industriels, conception d'expériences (DOE).

Ce tableau met en évidence les principales différences entre ces deux approches de régression non linéaire. Chaque méthode a ses propres avantages et inconvénients, et le choix entre elles dépendra des caractéristiques spécifiques des données à modéliser et des objectifs de l'analyse.

Pour l'application spécifique mentionnée par Mahyari, il serait essentiel de considérer les caractéristiques des données et l'objectif final de la modélisation pour choisir l'approche la plus appropriée.

Dans cette étude, nous utiliserons le graphe de Mahyari (Figure III. 1) comme outil d'analyse et d'évaluation des données concernant la détermination de la configuration optimale des stabilisateurs et du poids de l'outil de forage.

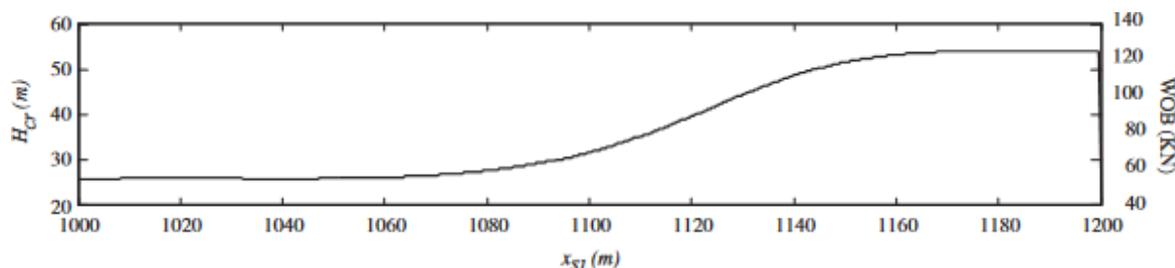


Figure III. 1: Hauteur critique du point neutre et force sur l'outil (WOB) pour diverses positions d'un stabilisateur le long du collier de forage[29]

Tableau III. 2: Les paramètres [X_s (m)] et les réponses [H_{cr} (m) WOB(kn)] [29]

X_s (m)	H_{cr} (m)	WOB(kn)
1000	26	51
1010	26	51
1020	27	52
1030	27	52
1040	26	51
1050	26	51
1060	27	52
1070	28	53
1080	30	55
1090	32	59
1100	35	65
1110	36	70
1120	40	80
1130	42	90
1140	48	99
1150	50	105
1160	52	108
1170	55	110
1180	55	110
1190	55	110
1200	30	70

➤ Le traitement du cas en utilisant le modèle RSM :

1. Application du modèle RSM :

Tout d'abord, nous appliquons le modèle de Surface de Réponse (RSM) à nos données. Cela implique de définir un plan d'expériences pour collecter des données à différentes valeurs de la variable Xs (position du stabilisateur) et de la réponse WOB (poids sur l'outil de forage).

2. Collecte et Préparation des Données :

- Données Requises : Positions des stabilisateurs (Xs) et valeurs de WOB (WOB).
- Organisation : Créer une feuille de calcul avec les colonnes pour Xs et WOB.

Analyse RSM

- Dans Minitab, utiliser Stat > DOE > Réponse Surface >Analyse réponse surface désigne
- Définir une conception de surface de réponse personnalisée Xs(m)
- Analyser la conception de la surface de réponse WOB

3. Résultat :

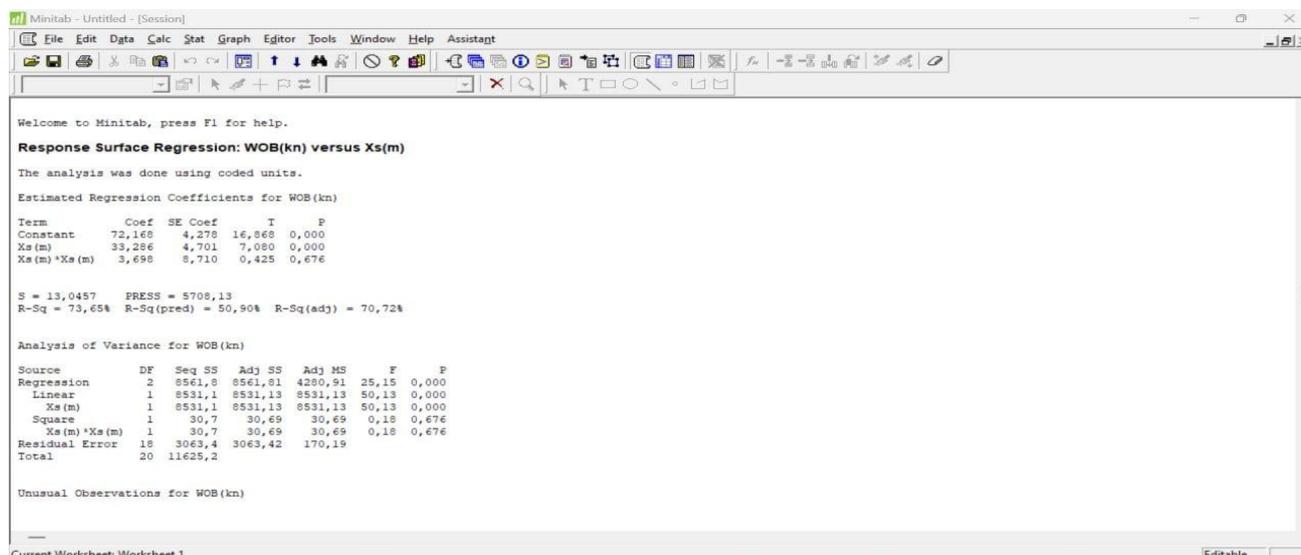


Figure III. 2: Résultats après l'application RSM sur Minitab16[30]

4. Résultats et discussions :

Les résultats de l'analyse de la surface de réponse (RSM) que nous avons obtenus comportent plusieurs sections principales. Examinons chaque section et expliquons ce qu'elle signifie.

✓ **Coefficients de Régression Estimés (Estimated Régression Coefficients)**

Tableau III. 3 :Estimations linéaires des coefficients[30]

Terme	Coef	SE Coef	T-value	P-value
Constant	72,168	4,278	16,868	0,000
$X_s(m)$	33,286	4,701	7,080	0,000
$X_s(m)*X_s(m)$	3,698	8,710	0,425	0,676

✓ **Interprétation :**

- Constant : Valeur du WOB lorsque toutes les autres variables sont nulles.
- $X_s(m)$: Effet direct de la position du stabilisateur sur le WOB.
- $X_s(m)*X_s(m)$: Effet non linéaire de la position du stabilisateur sur le WOB.

Les valeurs de P très petites (inférieures à 0,05) signifient que la variable a un effet significatif sur la réponse. Ici, nous voyons que $X_s(m)$ a un effet significatif (P-value = 0,000), tandis que $X_s(m)*X_s(m)$ n'a pas d'effet significatif (P-value = 0,676).

5. Statistiques Résumées (Summary Statistics) :

Tableau III. 4 :Statistiques résumées[30]

Statistique	Valeur
S	13,0457
PRESS	5708,13
R-Sq	73,65%
R-Sq(pred)	50,90%
R-Sq(adj)	70,72%

✓ **Interprétation :**

- S : Erreur standard de la régression. Plus la valeur est faible, meilleur est le modèle.
- R-Sq (Coefficient de Détermination) : Pourcentage de la variance de la réponse expliqué par le modèle. Une valeur de 73,65% signifie que le modèle explique 73,65% de la variance du WOB.
- R-Sq(pred) : Capacité du modèle à prédire de nouvelles données. Une valeur de 50,90%

montre une capacité prédictive moyenne.

- R-Sq(adj) : Coefficient de détermination ajusté, prenant en compte le nombre de variables dans le modèle. Une valeur de 70,72% signifie que le modèle s'ajuste bien aux données.

6. Analyse de Variance (ANOVA) :

Tableau III. 5 : Les résultats d'analyse ANOVA [30]

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Régression	2	8561,8	8561,81	4280,91	25,15	0,000
Linéaire	1	8531,1	8531,13	8531,13	50,13	0,000
Quadratique	1	30,7	30,69	30,69	0,18	0,676
Erreur	18	3063,4	3063,42	170,19		
Total	20	11625,2				

✓ **Interprétation :**

- Régression : Indique que la régression totale est significative (P-value = 0,000).
- Linéaire : La variable linéaire $X_s(m)$ a un effet significatif (P-value = 0,000).
- Quadratique : La variable quadratique $X_s(m)*X_s(m)$ n'a pas d'effet significatif (P-value = 0,676).

✓ **Observations Inhabituelles :**

Tableau III. 6: Observations Inhabit [30]

Obs	StdOrder	WOB(kn)	Fit	SE Fit	Résidu	Résidu Stand.
21	21	70,000	109,152	7,787	-39,152	-3,74 R

✓ **Interprétation :**

- Cette observation indique une valeur résiduelle élevée (Resid) ce qui signifie qu'il y a une grande différence entre la valeur réelle et la valeur prédite du WOB. Cette valeur est considérée comme une observation inhabituelle.

7. Coefficients de Régression Estimés en Unités Non Codées :

Tableau III. 7:Coefficients de Régression Estimés en Unités Non Codées[30]

Terme	Coef
Constant	153,540
$X(m)$	-0,480807
$X(m)*Xs(m)$	0,000369848

✓ **Interprétation:**

Ces valeurs montrent l'effet des variables sur la réponse en unités d'origine.

Donc l'équation est

$$W_{(kn)} = 153,540 - 048807X_{S(m)} - 0,0003698448X_{S(m)}^2$$

8. Réponse Prédite pour les Nouveaux Points de Conception :

Tableau III. 8:Prédictions des Réponses pour de Nouveaux Points de Conception avec Intervalles de Confiance et de Prédiction[30]

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	42,580	7,78705	(26,2205; 58,940)	(10,6611; 74,500)
...
21	109,152	7,78705	(92,7919; 125,512)	(77,2325; 141,071)

✓ **Interprétation:**

- Fit : Valeur prédite du WOB.
- SE Fit : Erreur standard de la prédiction.
- 95% CI : Intervalle de confiance à 95% pour la valeur prédite.
- 95% PI : Intervalle de prédiction à 95% pour la valeur prédite.

➤ **Conclusion :**

Cette analyse RSM montre que la variable (m) a un effet significatif sur le WOB, tandis que l'effet quadratique n'est pas significatif. Le modèle explique 73,65% de la variance du WOB, ce qui indique qu'il s'agit d'un bon modèle, bien qu'il puisse nécessiter des améliorations pour prédire les nouvelles données avec une précision accrue.

➤ **Le traitement du cas en utilisant la Méthode du Gaussien Modifié :**

Le modèle du Gaussien modifié est une forme particulière de la régression non linéaire qui utilise une fonction gaussienne modifiée pour ajuster les données. La fonction gaussienne est couramment utilisée pour représenter des distributions de données en forme de cloche et est définie par la formule :

$$y = a \times \left(\frac{-(x - b)^2}{(2 \times c^2)} \right) + d$$

1 Paramètres de la Fonction Gaussienne Modifiée :

- *a* : L'amplitude de la courbe. Ce paramètre détermine la hauteur maximale de la courbe.
- *b* : La position du pic de la courbe. Ce paramètre représente la valeur de *x* à laquelle la courbe atteint son maximum.
- *c* : L'écart-type, qui détermine la largeur de la courbe. Un *c* plus grand signifie une courbe plus large et plus aplatie.
- *d*: Le décalage vertical, qui ajuste la position verticale de la courbe sur le graphique.

2 Utilité de la Méthode du Gaussien Modifié :

Cette méthode est particulièrement utile pour les situations où les données présentent une forme de pic ou de cloche, ce qui est courant dans de nombreux domaines scientifiques et industriels. Par exemple, elle peut être utilisée pour :

Modéliser la distribution de probabilité des résultats d'une expérience.

Analyser des données de capteurs où les mesures présentent des pics de concentration.

3 Étapes Générales de la Régression Non Linéaire par la Méthode du Gaussien Modifié:

✓ **Collection des données :**

Recueillir les valeurs de la variable dépendante *y* et de la ou des variables indépendantes *x*.

✓ **Choix du modèle:**

Définir la fonction gaussienne modifiée appropriée à utiliser pour l'ajustement.

✓ **Initialisation des paramètres:**

Fournir des valeurs initiales pour les paramètres *a*, *b*, *c*, et *D*.

✓ **Ajustement du modèle :**

Utiliser un logiciel de régression non linéaire pour ajuster la fonction gaussienne modifiée aux données. Les méthodes courantes incluent l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

✓ **Application :**

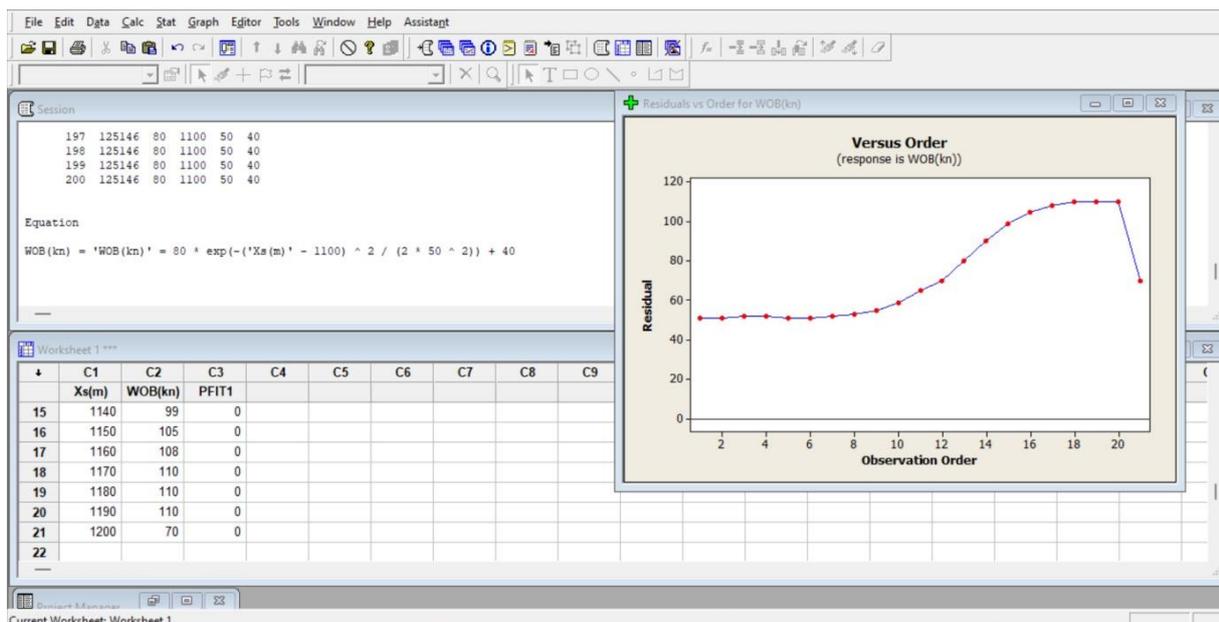


Figure III. 3: Résultats de la Régression Non Linéaire par la Méthode du Gaussien Modifié appliquée sur Minitab16 [30]

✓ **Explication des Résultats de l'Analyse régression non linéaire (Gaussien Modifié) :**

Après examen de la courbe de Mahyari, les données suivantes ont été extraites :

$$A = 80 \quad B = 1100 \quad C = 50 \quad D = 40$$

Suite à une analyse de régression linéaire, les données suivantes ont été obtenues, ainsi que l'équation associé

$$WOB_{(kn)} = 80 \times \left(\frac{-\left(X_{S(m)} - 1100\right)^2}{\left(2 \times 50^2\right)} \right) + 40$$

Après avoir appliqué les données extraites du graphique de Mahyari, le diagramme ci-dessous a été généré à l'aide de MiniTab.[30]

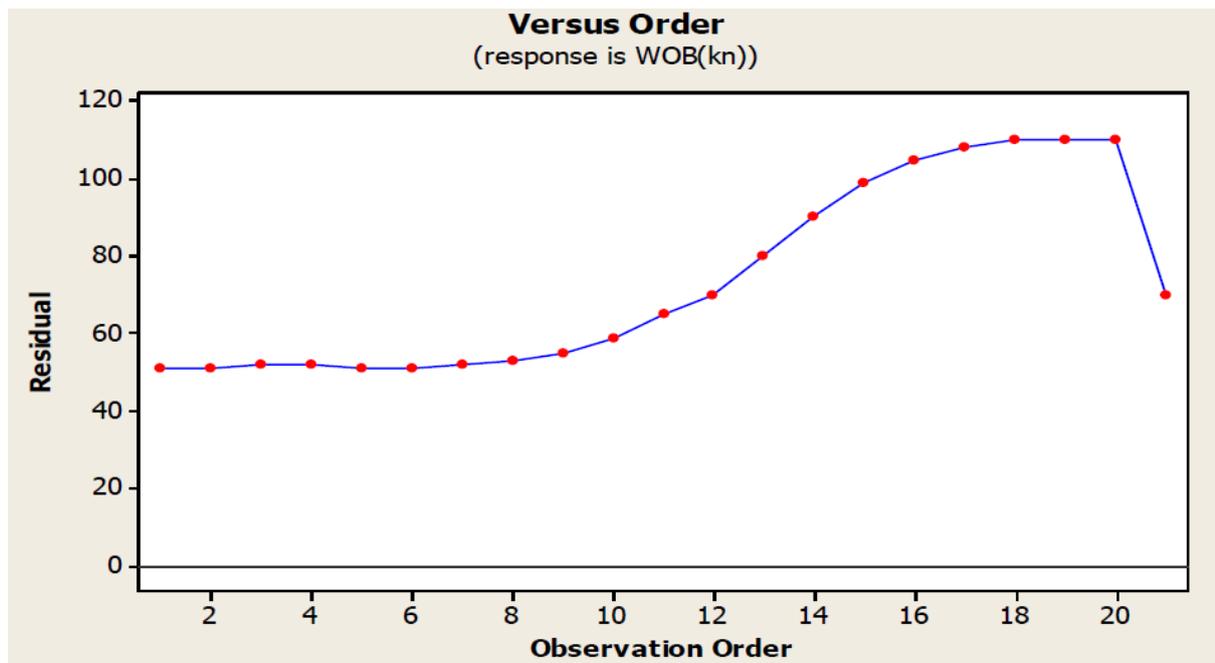


Figure III. 4: Résidus en Fonction de l'Ordre des Observations pour la Réponse WOB (kn)[30]

Après avoir utilisé la régression non linéaire avec la fonction gaussienne, nous avons abouti à un résultat indiquant une similitude significative entre la courbe de Mahyari et celle obtenue après la régression non linéaire à l'aide de Minitab. Nous pouvons en conclure que le modèle gaussien convient approximativement pour représenter les données avec le même degré de concordance que la courbe de Mahyari, démontrant ainsi l'efficacité de ce modèle dans l'analyse des données et la prédiction du comportement.

❖ Conclusion :

En conclusion, les résultats obtenus après l'application des données extraites du graphique de Mahyari et l'analyse effectuée à l'aide de Minitab montrent une forte similitude entre la courbe initiale et celle générée par la régression non linéaire utilisant la fonction gaussienne. Cette correspondance significative confirme que le modèle gaussien est approprié pour représenter les données étudiées. L'efficacité de ce modèle dans l'analyse des données et la prédiction du comportement observé démontre sa robustesse et sa fiabilité. Ces résultats valident l'approche utilisée et suggèrent que la modélisation gaussienne peut être un outil précieux pour des analyses similaires à l'avenir .

III.3 Optimisation de la position du stabilisateur :

III.3.1 Algorithme à essaim de particules (PSO) :

L'optimisation par essaim particulaire (PSO) est une méthode évolutive qui cherche à trouver la meilleure solution à un problème en utilisant un groupe de solutions potentielles. Créée par Russel Eberhart et James Kennedy en 1995, cette technique s'inspire du comportement social des animaux en groupe, comme les poissons en bancs ou les oiseaux en vols groupés. Même si chaque animal a une intelligence limitée et ne connaît que sa position locale dans le groupe, ensemble ils peuvent se déplacer de manière complexe et coordonnée. De la même manière, les

solutions en PSO évoluent collectivement pour atteindre l'optimum global.

L'information locale et la mémoire de chaque individu sont utilisées pour décider de son déplacement. Des règles simples, telles que « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « aller à la même vitesse », suffisent pour maintenir la cohésion de l'essaim, et permettent la mise en oeuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs.

➤ **Principe de fonctionnement de l'algorithme PSO :**

L'algorithme PSO (Optimisation par essaim particulaire) optimise une fonction objective en déplaçant un ensemble de particules dans l'espace de recherche. Voici les étapes et principes clés:

✓ **Initialisation :**

Les particules sont réparties aléatoirement dans l'espace de recherche.

Chaque particule reçoit une vitesse initiale aléatoire.

✓ **Évaluation :**

Chaque particule évalue la qualité de sa position actuelle en fonction de la fonction objectif.

Elle mémorise sa meilleure position atteinte jusqu'à présent.

✓ **Interaction :**

Chaque particule interroge certaines de ses voisines pour connaître leurs meilleures positions.

✓ **Mise à jour :**

Chaque particule choisit la meilleure position parmi celles connues par elle et ses voisines.

Elle ajuste sa vitesse en fonction de :

Sa vitesse actuelle.

Sa meilleure position atteinte.

La meilleure position atteinte par ses voisines.

La vitesse est modifiée avec un facteur aléatoire limité pour favoriser l'exploration.

✓ **Déplacement :**

La particule se déplace en fonction de la nouvelle vitesse calculée. Les décisions de mouvement sont basées sur des informations locales et sont formalisées par des équations de mouvement. Une analyse mathématique existe pour déterminer les conditions de convergence et le choix optimal des paramètres, ce qui distingue l'algorithme PSO de nombreuses autres heuristiques purement expérimentales.

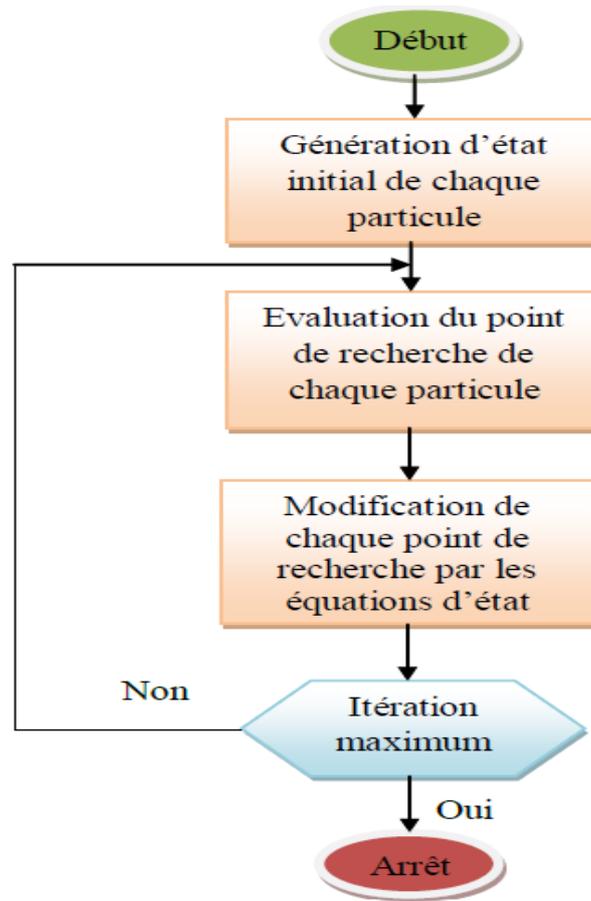


Figure III. 5: Organigramme de principe de PSO.[31]

L'algorithme PSO (Particle Swarm Optimisation) se base sur la modélisation des particules dans un espace de recherche multidimensionnel. Chaque particule i est caractérisée par sa position x_i et sa vitesse v_i . La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point. Les particules mémorisent leur meilleure position atteinte P_{best_i} et la meilleure position atteinte par le groupe G_{best} .

✓ **Les étapes principales :**

1 Initialisation :

Les particules sont distribuées aléatoirement dans l'espace de recherche.

Chaque particule reçoit une vitesse initiale aléatoire.

2 Mise à jour à chaque itération :

La nouvelle vitesse de la particule v^{t+1} est calculée à l'aide de l'équation :

$$v_i^{t+1} = wV_i^t + c_1r_1(P_{best_i} - (G_{best_i}^t - X_i^t)X_i^t) + c_2r_2$$

La nouvelle position de la particule est calculée à l'aide de l'équation :

$$v_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}$$

3 Les composantes principales :

- **Composante inertielle** wV_i^t :

Contrôle l'influence de la direction de mouvement actuelle sur le mouvement futur.

- **Composante cognitive** $c_2r_2(P_{best_i}^t - X_i^t)$:

Contrôle la capacité de la particule à tirer parti de sa propre expérience.

- **Composante sociale** $c_2r_2(P_{best_i}^t - X_i^t)$:

Contrôle la capacité de la particule à tirer parti des expériences de ses voisins.

4 Choix des paramètres :

Les valeurs appropriées pour c_1 et c_2 varient entre 1 et 2, la valeur 2 étant souvent la plus utilisée.

Le coefficient d'inertie w varie dynamiquement pour améliorer l'exploration et la convergence .

$$w = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} \right) \times k$$

5 Objectif :

Trouver un équilibre entre l'exploration locale (mouvement réduit, $w < 1$) et l'exploration globale (mouvement étendu, $w > 1$).

La mise à jour continue des positions et vitesses des particules aide à atteindre la solution optimale en tirant parti des expériences individuelles et collectives des particules

6 Application

- ✓ **Définition de l'équation et de l'objectif :**

Nous devons définir l'équation que nous souhaitons optimiser, ainsi que l'objectif que nous souhaitons atteindre, comme minimiser l'erreur ou maximiser les performances.

- ✓ **Identification des paramètres et des limites :**

Nous devons identifier les paramètres à optimiser et définir les limites inférieures et supérieures de chaque paramètre. Ces paramètres peuvent inclure les coefficients de l'équation ou d'autres constantes ajustables.

- ✓ **Exécution de l'algorithme PSO dans MATLAB :**

Nous utilisons la fonction PSO disponible dans MATLAB pour optimiser l'équation. Cela implique de définir le nombre de particules et d'itérations, ainsi que de spécifier la fonction à optimiser et les limites de chaque paramètre. L'algorithme itère ensuite pour optimiser jusqu'à ce que les conditions d'arrêt spécifiées soient remplies.

Ces étapes nous permettent d'utiliser efficacement et précisément l'algorithme PSO pour optimiser des équations dans MATLAB.

➤ **Optimisation de la fonction obtenue à partir du programme RSM :**

La méthode d'écriture de l'équation et des différentes données dans le programme MATLAB est illustrée dans l'image suivante :

```

1 % البيانات:
2 positions = [1000, 1010, 1020, 1030, 1040, 1050, 1060, 1070, 1080, 1090, 1100, 1110, 1120, 1130, 1140, 1150, 1160, 1170, 1180, 1190, 1200]';
3 wob = [51, 51, 52, 52, 51, 51, 52, 53, 55, 60, 65, 70, 80, 90, 99, 105, 108, 110, 110, 110, 70]';
4 % الدالة المراد تحسينها
5 modelFunction = @(params, Xs) params(1) + params(2) * Xs + params(3) * Xs.^2;
6 % القيم الأولية للمعاملات [a, b, c]
7 initialParams = [153.540, -0.480807, 0.000369848];
8 % دالة الخطأ (الفرق بين القيم الفعلية والمتوقعة)
9 errorFunction = @(params) sum((wob - modelFunction(params, positions)).^2);
10 % تحسين المعاملات باستخدام خوارزمية PSO
11 options = optimoptions('particleswarm', 'Display', 'iter');
12 lb = [-Inf, -Inf, -Inf]; % الحد الأدنى للمعاملات [a, b, c]
13 ub = [Inf, Inf, Inf]; % الحد الأعلى للمعاملات [a, b, c]
14 [optimizedParams, ~] = particleswarm(errorFunction, 3, lb, ub, options);
15 % حساب قيمة الارتباط
16 WOB_predicted = modelFunction(optimizedParams, positions);
17 mean_actual = mean(wob);
18 SS_tot = sum((wob - mean_actual).^2);
19 SS_res = sum((wob - WOB_predicted).^2);
20 R_squared = 1 - (SS_res / SS_tot);
21 % عرض النتائج
22 disp('Optimized Parameters:');
23 disp(['a = ', num2str(optimizedParams(1))]);
24 disp(['b = ', num2str(optimizedParams(2))]);
25 disp(['c = ', num2str(optimizedParams(3))]);
26 disp(['R^2 = ', num2str(R_squared)]);
27 % رسم البيانات والنموذج المحسن
28 figure;
29 plot(positions, wob, 'ro', positions, WOB_predicted, 'b-', 'LineWidth', 2);
30 xlabel('Position (m)');
31 ylabel('WOB (kN)');
32 title('Optimized Model vs Actual Data');
33 legend('Actual Data', 'Optimized Model');

```

Figure III. 6: Code MATLAB pour l'Optimisation des Paramètres d'un Modèle RSM Utilisant l'Algorithme PSO[32]

✓ **Résultats :**

Après avoir appliqué toutes les étapes mentionnées précédemment dans le programme MATLAB, les résultats suivants ont été obtenus.

```

Command Window
130      3930      3349      4.189e+10      0
131      3960      3349      3.423e+10      0
132      3990      3349      7.315e+10      0
133      4020      3349      1.254e+11      0
134      4050      3349      1.875e+11      0
135      4080      3349      6.147e+11      0
136      4110      3349      7.065e+11      0
137      4140      3349      1.452e+12      0
138      4170      3349      2.196e+12      0
139      4200      3349      7.153e+11      0
140      4230      3349      2.096e+12      0

Optimization ended: relative change in the objective value
over the last OPTIONS.MaxStallIterations iterations is less than OPTIONS.FunctionTolerance.
Optimized Parameters:
a = 945.0549
b = -1.9729
c = 0.0010704
R^2 = 0.7112
Optimal Point:
Optimal Position = 1170
Max WOB = 110
Optimal Point:
Optimal Position = 1170
Max WOB = 110
fx >>

```

Figure III. 7: Résultat de Code MATLAB pour l'Optimisation des Paramètres d'un Modèle Gaussien Utilisant l'Algorithme PSO[32]

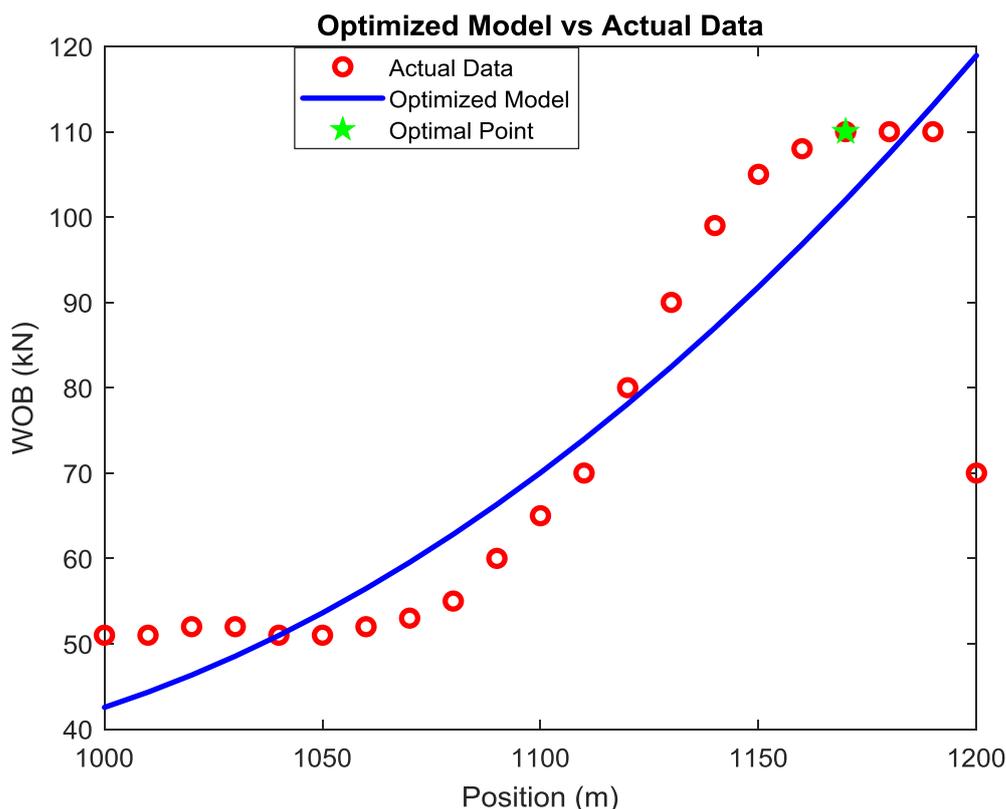


Figure III. 8: Comparaison du Modèle RSM Optimisé avec les Données Réelles[32]

1 Détails de l'optimisation du modèle :

✓ Fin de l'optimisation :

L'optimisation s'est terminée lorsque le changement relatif dans la valeur de l'objectif au cours des dernières itérations était inférieur à la tolérance définie (OPTIONS.FunctionTolerance). Cela signifie que le modèle a atteint un état stable où les changements dans les paramètres n'amélioreraient plus significativement le résultat.

✓ Paramètres optimisés:

$$a = 945.0549$$

$$b = -1.9729$$

$$c = 0.0010704$$

Ce sont les paramètres que l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) a trouvés pour obtenir la meilleure correspondance entre le modèle et les données réelles de WOB (Weight on Bit).

✓ Coefficient de détermination (R2):

$$(R^2 = 0.7112)$$

Cette valeur exprime la qualité de l'ajustement du modèle aux données réelles. Une valeur proche de 1 indique un bon modèle, tandis qu'une valeur plus faible signifie que le modèle n'explique

pas bien les données. Dans ce cas, (R^2) est de 0.7112, ce qui signifie que le modèle explique environ 71,12 % de la variation des données réelles.

✓ **Détermination du meilleur WOB :**

Point optimal:

Position optimale: 1170

Valeur maximale de WOB: 110

Cela signifie que la valeur maximale du WOB se produit à la position 1170 et est égale à 110.

2 Interprétation des résultats :

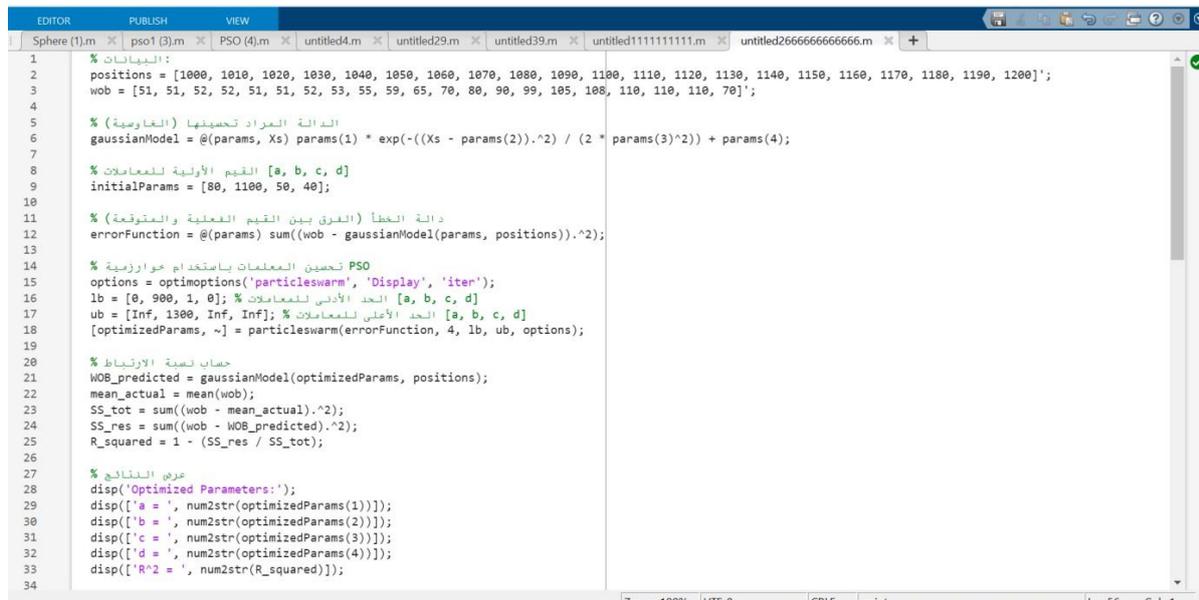
En utilisant le modèle quadratique optimisé, il a été trouvé que la position 1170 est celle qui donne la plus grande valeur de WOB .

Les paramètres optimisés du modèle indiquent la forme générale de la courbe quadratique qui a été ajustée aux données.

Le coefficient de détermination (R^2) donne une idée de la précision du modèle pour représenter les données réelles, et avec une valeur de 0.7112, on peut dire que le modèle explique une grande partie de la variation, mais n'est pas parfait.

➤ **Optimisation de la fonction Gaussien modifiée :**

La méthode d'écriture de l'équation et des différentes données dans le programme MATLAB est illustrée dans l'image suivante.



```
1 % البيانات :
2 positions = [1000, 1010, 1020, 1030, 1040, 1050, 1060, 1070, 1080, 1090, 1100, 1110, 1120, 1130, 1140, 1150, 1160, 1170, 1180, 1190, 1200]';
3 wob = [51, 51, 52, 52, 51, 51, 52, 53, 55, 59, 65, 70, 80, 90, 99, 105, 108, 110, 110, 110, 70]';
4
5 % الدالة المراد تحسينها (الغاوسية)
6 gaussianModel = @(params, Xs) params(1) * exp(-((Xs - params(2)).^2) / (2 * params(3)^2)) + params(4);
7
8 % القيم الأولية للمعاملات [a, b, c, d]
9 initialParams = [80, 1100, 50, 40];
10
11 % دالة الخطأ (الفرق بين القيم الفعلية والمتوقعة)
12 errorFunction = @(params) sum((wob - gaussianModel(params, positions)).^2);
13
14 % تحسين المعاملات باستخدام خوارزمية PSO
15 options = optimoptions('particleswarm', 'Display', 'iter');
16 lb = [0, 900, 1, 0]; % الحد الأدنى للمعاملات [a, b, c, d]
17 ub = [Inf, 1300, Inf, Inf]; % الحد الأعلى للمعاملات [a, b, c, d]
18 [optimizedParams, ~] = particleswarm(errorFunction, 4, lb, ub, options);
19
20 % حساب نسبة الارتباط
21 WOB_predicted = gaussianModel(optimizedParams, positions);
22 mean_actual = mean(wob);
23 SS_tot = sum((wob - mean_actual).^2);
24 SS_res = sum((wob - WOB_predicted).^2);
25 R_squared = 1 - (SS_res / SS_tot);
26
27 % عرض النتائج
28 disp('Optimized Parameters:');
29 disp(['a = ', num2str(optimizedParams(1))]);
30 disp(['b = ', num2str(optimizedParams(2))]);
31 disp(['c = ', num2str(optimizedParams(3))]);
32 disp(['d = ', num2str(optimizedParams(4))]);
33 disp(['R^2 = ', num2str(R_squared)]);
34
```

Figure III. 9: Résultat de Code MATLAB pour l'Optimisation des Paramètres d'un Modèle Gaussien Utilisant l'Algorithme PSO[32]

✓ Résultats :

Après avoir appliqué toutes les étapes mentionnées précédemment dans le programme MATLAB, les résultats suivants ont été obtenus.

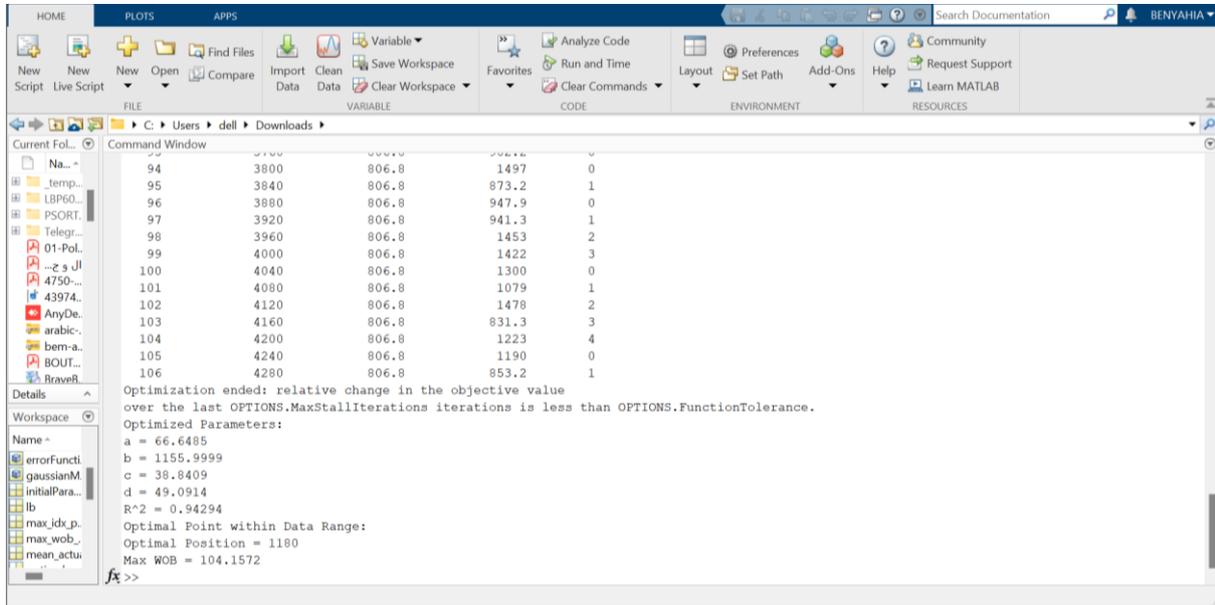


Figure III. 10:Résultat de Code MATLAB pour l'Optimisation des Paramètres d'un Modèle Gaussien Utilisant l'Algorithme PSO[32]

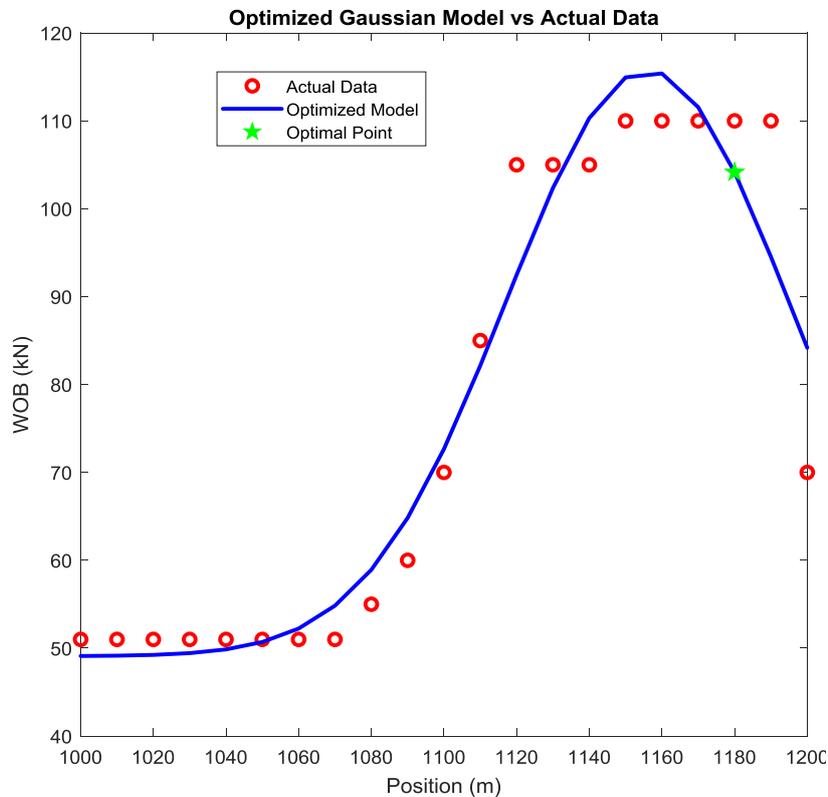


Figure III. 11: Comparaison du Modèle Gaussien Optimisé avec les Données Réelles[32]

1 Détails de l'optimisation du modèle :

Les résultats obtenus indiquent que le processus d'optimisation des paramètres à l'aide de l'algorithme PSO (Optimisation par Essaim Particulaire) s'est terminé avec succès, et les valeurs optimales des quatre paramètres de la fonction gaussienne ont été trouvées pour mieux s'adapter aux données d'entrée. Voici une explication détaillée de ces résultats :

✓ Valeurs optimales des paramètres :

a = 66.6485 : Cette valeur représente l'amplitude maximale de la fonction gaussienne.

b = 1155.9999 : Cette valeur représente le centre (milieu) de la fonction gaussienne, c'est-à-dire la position où la valeur WOB prévue est maximale.

c = 38.8409 : Cette valeur représente la largeur de la fonction gaussienne (écart-type), qui détermine la dispersion des données autour du centre.

d = 49.0914 : Cette valeur représente la ligne de base (l'ordonnée à l'origine) de la fonction gaussienne, soit le décalage vertical de la fonction.

✓ Coefficient de détermination R^2 :

$R^2 = 0.94294$: Cette valeur représente le coefficient de détermination, qui est un indicateur de la qualité du modèle optimisé. Un R^2 proche de 1 indique que le modèle explique environ 94,294 % de la variance des données réelles. Cela signifie que le modèle convient bien aux données.

✓ Point optimal dans la plage des données :

Position optimale = 1180 : Il s'agit du point optimal trouvé dans la plage des valeurs réelles de WOB, qui donne la plus grande valeur de WOB prévue par le modèle.

Max WOB = 104.1572 : Il s'agit de la plus grande valeur prévue de WOB à la position optimale 1180.

✓ Graphique :

Le graphique montre les données réelles (en rouge) par rapport aux valeurs prévues par le modèle optimisé (en bleu). Le point optimal (en vert) représente la position où la valeur prévue de WOB est maximale dans la plage des valeurs réelles.

En résumé, le modèle optimisé donne une interprétation précise des données et identifie la position optimale pour obtenir la plus grande valeur de WOB prévue.

2 Explication des résultats :

Le modèle gaussien optimisé avec les valeurs optimales (a, b, c, d) fournit une représentation précise de la relation entre les positions (positions) et WOB. Les résultats montrent que le modèle offre un bon ajustement aux données réelles, avec un coefficient de détermination élevé (0.94294). Le point optimal 1180 indique que la plus grande valeur de WOB prévue par le

modèle se trouve à cette position, et sa valeur est de 104.1572, ce qui est dans la plage des valeurs réelles de WOB dans les données d'entrée.

III.3.2 Résultat et discussion :

Les deux ensembles de résultats représentent des analyses d'optimisation de modèle, chacun avec ses propres paramètres et méthodes spécifiques. Voici les différences et les points forts de chaque analyse :

✓ Analyse 1 : Optimisation du modèle quadratique

Paramètres : Le modèle quadratique optimisé est caractérisé par trois paramètres (a, b, c).

Méthode : L'optimisation est réalisée à l'aide de l'algorithme PSO (Optimisation par Essaim Particulaire).

✓ Résultats :

Coefficient de détermination (R^2) : 0.7112, indiquant une explication de 71,12 % de la variance des données.

Point optimal : Position 1170, avec une valeur maximale de WOB de 110.

✓ Analyse 2 : Optimisation du modèle gaussien

Paramètres : Le modèle gaussien optimisé est caractérisé par quatre paramètres (a, b, c, d).

Méthode : L'optimisation est également réalisée à l'aide de l'algorithme PSO.

✓ Résultats :

Coefficient de détermination (R^2) : 0.94294, indiquant une explication de 94,294 % de la variance des données.

Point optimal : Position 1180, avec une valeur maximale de WOB de 104.1572.

L'analyse 2 avec le modèle gaussien semble offrir une meilleure adéquation aux données, avec un coefficient de détermination (R^2) plus élevé, ce qui indique une meilleure capacité du modèle à expliquer la variance des données réelles. De plus, le point optimal dans l'analyse 2 a une valeur de WOB légèrement inférieure à celui de l'analyse 1, mais il se situe dans la plage des données réelles.

En résumé, l'optimisation du modèle gaussien semble être plus appropriée dans ce cas, offrant une meilleure représentation des données et identifiant une position optimale pour obtenir la plus grande valeur de WOB prévue .

Conclusion générale:

L'optimisation des paramètres d'un modèle gaussien à l'aide de l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire (PSO) et de la Méthode du Gaussien Modifié a démontré son efficacité dans cette étude. Les résultats montrent que l'utilisation combinée de ces méthodes permet d'obtenir un modèle précis et fiable pour prédire le poids sur l'outil (WOB) dans les opérations de forage.

En appliquant le modèle de Surface de Réponse (RSM), nous avons pu définir un plan d'expériences systématique et analyser l'effet des différentes positions des stabilisateurs sur le WOB.

Les coefficients de régression estimés et les statistiques résumées obtenus montrent que le modèle RSM est adéquat pour expliquer une grande partie de la variance observée dans les données.

La Méthode du Gaussien Modifié, quant à elle, a permis d'affiner davantage le modèle en ajustant les données à une fonction gaussienne modifiée. Cette méthode s'est révélée particulièrement utile pour capturer les variations non linéaires typiques des systèmes de forage, offrant ainsi une meilleure précision dans les prédictions.

Enfin, l'algorithme PSO a été utilisé pour optimiser les paramètres du modèle gaussien modifié. Grâce à cet algorithme inspiré par le comportement des essaims, nous avons pu converger rapidement vers une solution optimale, améliorant ainsi l'efficacité globale du modèle.

En conclusion, l'approche combinée du RSM, de la Méthode du Gaussien Modifié et de l'algorithme PSO constitue une méthode robuste et efficace pour l'optimisation des paramètres dans des contextes industriels complexes comme le forage pétrolier. Cette méthode permet non seulement d'améliorer la précision des prédictions mais aussi de mieux comprendre les interactions entre les variables clés, contribuant ainsi à des opérations plus sûres et plus efficaces.

La Bibliographie :

- [1] MEHDI METAICHE. Forage techniques et procédés. Université Bouira, Octobre 2013
- [2] Djennadi Idriss Moulay Contrôle des venues des fluides au cours d'un forage pétrolier
Cas d'études de puits: DHKT-2/NZ-22/RNA-15 ENP Promotion Juin 2015
- [5] Mr. HOUSSAM MAMOUNI Analyse des risques liés aux activités de forage d'un puits pétrolier ENP le (20/06/2016)
- [6] negadi ali, (la maintenance des équipements des forage cas tp127 Hassi Messaoud),
Mémoire de master, UNIVERSITÉ ABOU BAKR BELKAID, Tlemcen ,2014.
- [7] OUCHTATI ALI ,études et suivies de propriétés des boues de forage université de Guelma
juin 2011
- [8] Wiltz, B., 2012, Pétrole et Gaz Informations n°1821
- [9] Moussa Ala Eddine, Miloudi Khenniche, Nadji Ibrahim Elkhilil , Analyse vibratoire du phénomène stick-slip lors de forage pétrolier Université KASDI MERBAH OUARGLA
2022/2023
- [10] Merakha Akram , CONCEPTION ET FABRICATION D'UN CORPS D'OUTIL DE FORAGE A SIX LAMES EN PDC UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA 2021/2022
- [11] Article de enspm formation industrie IFP TRAINING
- [12] Document de synthèse relatif à une Barrière de sécurité sur les installations de forage d'hydrocarbures Onshore BLOC OBTURATEUR DE PUIITS (BOP) RAPPORT FINAL
10/12/2019 N° DRA-18-171525-10838C
- [13] AMADOU ABDOULAYE BA. « Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier ». Thèse. L'école nationale supérieure d'arts et métiers 31/03/2010
- [14] <https://www.mcourses.net/cours/pdf/yass3/yass3cli1906.pdf>
- [15] Par Quang Thinh TRAN , MODÉLISATION DE LA DYNAMIQUE NON LINÉAIRE D'UN TRAIN DE TIGES DE FORAGE IMMERGÉ DANS UN PUIITS DE TRAJECTOIRE 3D
Présentée devant l'Institut National de Sciences Appliquées (INSA) de Lyon , le 28 Octobre 2019
- [16] Projet de perfectionnement des superviseurs de forage , M5 Section 1 Garnitures de forage et Equipements de fond, IAP LIFE LONG LEARNING
- [17] FORMATION JDF Module F1 Réalisé par: A. Slimani M. Daddoumai 2006
- [18] LINKEDIN
- [19] Mon téléphone (ENTP169)

[20] GABOUSSA Boubaker LAHLALI Mohammed Amine, Optimisation des Paramètres Mécanique des Machines de Forage Pétrolier 2018

[23] Dhaker Ezzeddine, Modélisation du comportement dynamique d'un train de tiges de forage pétrolier : application aux vibrations laterals Submitted on 21 Apr 2017 HAL open science

[24] Document Technique Shlumberger Drill string vibration and vibration modeling, , 2010.

[25] Farag ABDULGALIL : Commande non linéaire dans les systèmes de forage pétrolier : contribution à la suppression du phénomène de <stick-slip>. Thèse de doctorat, UniversitéParis Sud-Paris XI, 2006.

[26] BELGHITAR Elhafed ,TAMMA Laiche, TIHAMI Mourad Analyse des phénomènes de vibration sur la garniture de forage en phase 16"

[27] Joël AKOWANOU Modélisation tridimensionnelle du flambage des tiges dans les puits de forage à trajectoire complexe le 16 décembre 2009
Modélisation MINES PARIS TECH

[28] AADE-11-NTCE-9 A New Buckling Model Successfully Validated with Full-Scale Buckling Tests Stéphane Menand, Mines ParisTech; Arve Bjorset, Statoil; Ludovic Macresy, DrillScan.

[29] MFMahyari1*,MBehzad1*, and G R Rashed2, Drill string instability reduction by optimum positioning of stabilizers

[30] MINITABE 16

[31] Berrim Ali Megdoud Dhia Eddine Abd Alhak, Prédiction de la tension de contournement par l'approche d'optimisation PSO 2018/2019

[32] MATLABBE

[33] Modélisation du comportement dynamique d'un train de tiges de forage pétrolier : application aux vibrations laterals

[4] <http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11898/3/chapitre%201.pdf>

[21] https://fr.123rf.com/photo_68753587_tiges-de-forage-de-p%C3%A9trole-et-de-forage.html

[22] <https://en.forage-matfor.fr/gammes/tubulaires>