

Université KASDI MERBAH OUARGLA

**Faculté des hydrocarbures, des énergies renouvelables et
des sciences de la terre et de l'univers**

Département : Forage et mécanique des chantiers pétroliers



Mémoire

MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Forage

Présenté par :

Benamor Ahmed

Laib Takieddine

Boukerma Rachid

Thème

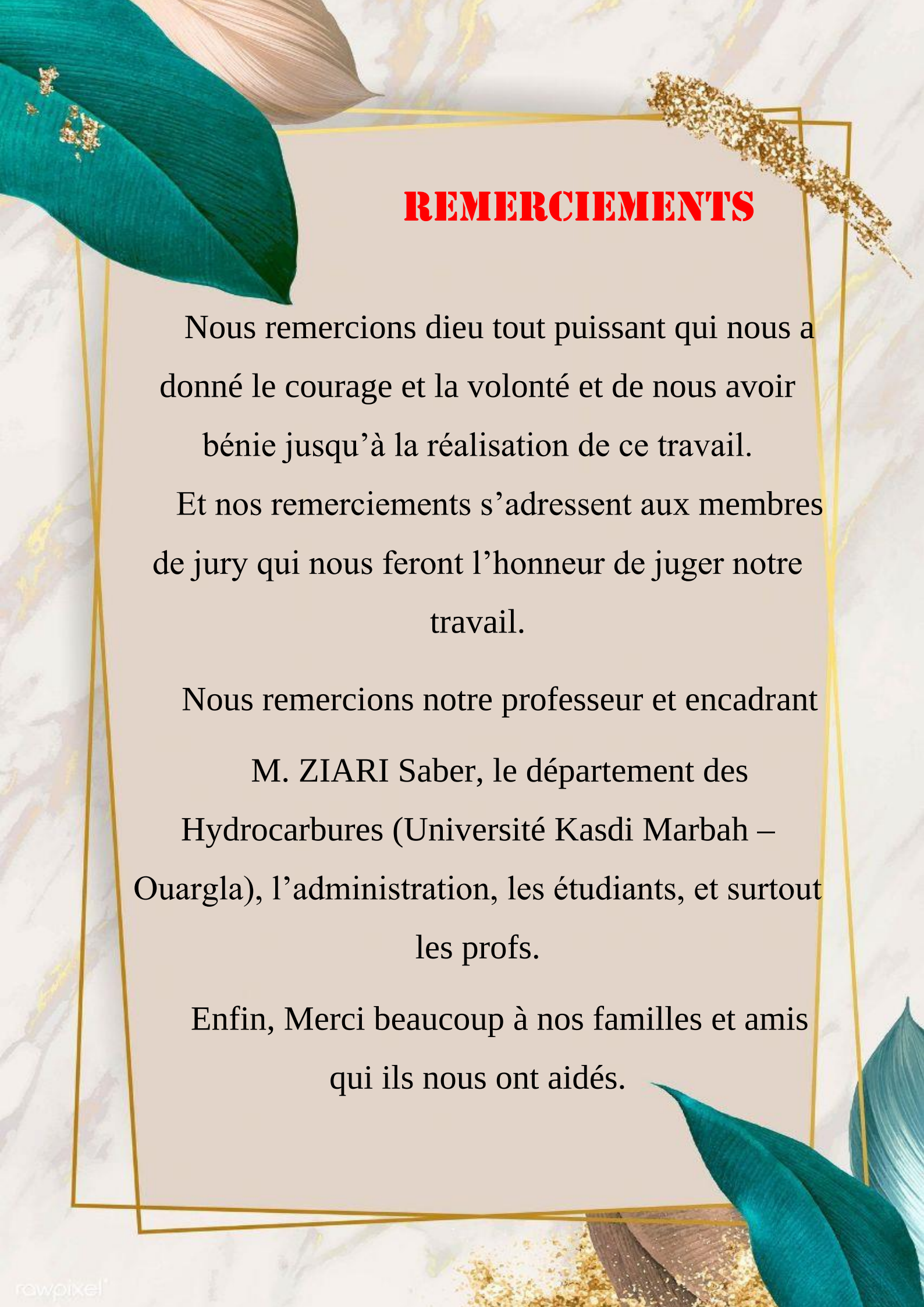
**Optimisation de la trajectoire des puits
déviés par l'algorithme des essaims de
particules (PSO)**

Soutenu publiquement le : 12/06/2023

Devant le jury :

M. Leghrieb Youcef	Dr.	Président	UKMO
M. Hachana Oussama	Dr.	Examineur	UKMO
M. Ziari Saber	MAA	Rapporteur	UKMO

Année Universitaire : 2022/2023



REMERCIEMENTS

Nous remercions dieu tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté et de nous avoir bénie jusqu'à la réalisation de ce travail.

Et nos remerciements s'adressent aux membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Nous remercions notre professeur et encadrant M. ZIARI Saber, le département des Hydrocarbures (Université Kasdi Marbah – Ouargla), l'administration, les étudiants, et surtout les profs.

Enfin, Merci beaucoup à nos familles et amis qui ils nous ont aidés.

Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier ce travail :

Ma chère mère 🌹, qui es partie trop tôt. À ton esprit précieux, je dédie cet hommage empreint de tristesse et d'amour. Tu étais le soleil qui illuminait ma vie, la force qui me poussait en avant, et la tendresse qui me protégeait. Je n'ai jamais connu un amour plus grand que le tien, un amour infini et incalculable. Je n'oublierai jamais ton âme douce et ta compassion infinie.

Je prie Dieu pour qu'Il te pardonne et t'accorde Sa miséricorde. Je Lui demande de t'accueillir dans Son vaste paradis, parmi les vertueux.

Avec une profonde tristesse et un amour infini.

BOUKERMA Rachid



Dédicace

*Je dédie ce travail à mes parents,
ma mère et mon père, pour leurs
patiences, leurs soutiens, leurs
amours et leurs encouragements. À
toute ma famille, amis et mes
connaissances.*

BENAMOR Ahmed



Dédicace

Je dédie cette Modest travail à toutes ma famille. Surtout mes chers parents et mes chers frères et ma petite sœur Emama.

À tous mes chers amis :

Haithem, Amine, Zaki, Souhaib, Saad, Nour el islam, Yasser, Anis, Nadjib, Yahya, Aymen, Taha, Karim, Zinou, Chaker, Nidhal.

A tous mes êtres chers, je leur dédie ce travail. Que Dieu Tout-Puissant nous accorde le succès.

LAIB Takieddine

ملخص

يعد تحسين مسار الآبار الموجهة باستخدام طريقة PSO (التحسين بواسطة الجزيئي) نهجًا واعدًا لتحسين التخطيط وتنفيذ عمليات الحفر الاتجاهي. من خلال محاكاة سلوك أسراب الجسيمات، تسمح هذه الطريقة بالعثور بسرعة وكفاءة على المسار الأمثل الذي يلبي القيود والأهداف المحددة لمشروع الحفر. وبالتالي فإنها توفر فرصة لتحسين أداء عمليات الحفر وتحسين إنتاج الموارد الجوفية وتقليل التكاليف المرتبطة بهذه العمليات.

الكلمات المفتاحية: التحسين بواسطة الجزيئي، مسار، الآبار الموجهة.

Résumé

L'optimisation de la trajectoire des puits déviés par la méthode PSO est une approche prometteuse pour améliorer la planification et l'exécution du forage dévié. En simulant le comportement d'un essaim de particules, cette méthode permet de trouver rapidement et efficacement la trajectoire optimale qui répond aux contraintes et aux objectifs spécifiques du projet de forage. Elle offre ainsi la possibilité d'améliorer la performance du forage, d'optimiser la production des ressources souterraines et de réduire les coûts associés à ces opérations.

Mots clés : PSO, Optimisation, Trajectoire, Forage dévié.

Abstract

Optimizing the trajectory of deviated wells using the PSO method is a promising approach to improve the planning and execution of directional drilling. By simulating the behavior of a particle swarm, this method allows for quickly and efficiently finding the optimal trajectory that meets the specific constraints and objectives of the drilling project. It offers the opportunity to enhance drilling performance, optimize the production of underground resources, and reduce costs associated with these operations.

Key words: PSO, Trajectory, Optimizing, Directional drilling.

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles et définitions

Introduction générale.....1

Chapitre I : Le forage dévié

I.1. Introduction3

I.2. Généralité sur le forage pétrolier.....3

I.3. Le forage dévié.....4

I.3.1. Définition du forage dévié4

I.3.2. Les avantages et les inconvénients.....4

I.3.3. Les objectifs de forage dévié.....5

I.3.4. Les situations d'application du forage dévié.....6

I.3.4.1. Déviation du forage incontrôlé.....6

I.3.4.2. Déviation du forage contrôlé.....7

I.3.5. Les applications du forage dévié.....7

I.3.5.1. Puits pour control de la verticalité.....8

I.3.5.2. Puits d'interception (Relief Well).....8

Table des matières

I.3.5.3. Side tracking	9
I.3.5.4. Forage pour des raisons géologiques	9
I.3.5.5. Forage de drainage.....	10
I.3.5.6. Emplacements inaccessibles	11
I.3.5.7. Plates-formes Multi puits (Clusters).....	11
I.3.5.8. Puits en Réentrée (Re-entry Wells).....	11
I.3.6. Profils et types de puits	12
I.3.6.1. Puits dévié vertical.....	12
I.3.6.2. Puits dévié directionnel.....	12
I.3.6.3. Puits dévié horizontal.....	13
I.3.6.4. Puits dévié multilatéral.....	15
I.3.6.5. Puits dévié à angle variable.....	16
I.3.6.6. Puits dévié foré en S.....	16
I.3.6.7. Puits dévié en J.....	17
I.4. Equipements spécifiques au forage dirigé.....	17
I.4.1. Les moteurs de fond PDM (Positive Dis placement Motor).....	17
I.4.1.1. Introduction.....	17
I.4.1.2. Le moteur de dépassement positif PDM.....	18
I.4.1.3. Principe de fonctionnement d'un PDM.....	18
I.4.1.4. Descriptions de Positive Dis placement Motors PDM.....	19
I.4.2. Equipements amagnétiques.....	21

Table des matières

I.4.2.1. Raccords coudés.....	22
I.4.2.2. Raccords d'orientation.....	22
I.4.2.3. Outils de déflexion.....	23
I.4.3. Equipements de mesure.....	23
I.4.3.1. Outils de mesures en temps différé.....	23
I.4.3.2. Outils de mesures en temps réel.....	23

Chapitre II : Optimisation de la trajectoire des puits déviés

II.1. Introduction.....	25
II.2. Optimisation de la trajectoire des puits déviés.....	25
II.2.1. Les méthodes d'optimisation.....	26
II.2.2. Optimisation par les essaims de particules (PSO)	27
II.2.2.1. Fonctionnement du PSO.....	29
II.2.2.2. Application du PSO dans le domaine pétrolier.....	30
II.2.2.3. Exemples d'utilisation du PSO dans le domaine pétrolier.....	30
II.2.2.4. Avantages du PSO dans le domaine pétrolier.....	31
II.2.2.5. Limites du PSO dans le domaine pétrolier.....	32
II.3. Conclusion.....	32

Chapitre III : Etude de cas MDZ-790

III.1. Introduction.....	34
III.2. Présentation de puits MDZ790.....	34
III.3. Données générales du puits MDZ790	34

Table des matières

III.4. Localisation du puits MDZ790.....	35
III.5. Objectifs du puits MDZ790.....	35
III.6. Profile du puits MDZ790	36
III.7. Méthode de rayons de courbure	37
III.8. Les résultats.....	40
III.9. Interprétation des résultats obtenus.....	42
III.10. Conclusion.....	43
Conclusion.....	45
Bibliographie.....	47

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Données générale du puits MDZ790.....	34
Tableau III.2 : Les paramètre de forage proposé.....	39
Tableau III.3 : les échelles des paramètres de forage.....	40
Tableau III.4 : Les résultats du test utilisant PSO.....	41
Tableau III.5 : Les paramètres de forage proposés et les résultats du PSO.....	42

Liste des figures

Figure I.1 : le forage directionnel (inaccessible locations)	4
Figure I.2 : Trajectoire du puits L-3D (JPT, Nov 2003)	6
Figure I.3 : Cas d'application du forage dévié.....	8
Figure I.4 : Puits pour control de la verticalité.....	8
Figure I.5 : Puits d'interception (Relief Well).....	9
Figure I.6 : Side tracking.....	9
Figure I.7 : Forages pour des raisons géologiques.....	10
Figure I.8 : Forage de drainage.....	10
Figure I.9 : Emplacements inaccessibles.....	11
Figure I.10 : Plates-formes Multi puits (Clusters).....	11
Figure I.11 : Puits en Réentrée (Re-entry Wells).....	12
Figure I.12 : Puits dévié directionnel.....	13
Figure I.13 : Différents profils des forages horizontaux.....	14
Figure I.14 : Puits horizontaux	15
Figure I.15 : Puits dévié à angle variable.....	16
Figure I.16 : Puits dévié en S.....	17
Figure I.17 : PDM (Positive Dis placement Motor)	18
Figure I.18 : Principe de fonctionnement d'un PDM.....	19
Figure I.19 : Drump valve.....	19
Figure I.20 : Power section assembly.....	20
Figure I.21 : Géométrie des moteurs du fond.....	21
Figure I.22 : Raccord coudés.....	22

Liste des figures

Figure I.23 : Raccord d'orientation.....	22
Figure II.1: Algorithmes d'optimisation	26
Figure II.2: Organigramme de PSO avec nouvelle fonction de voisinage.....	29
Figure III.1 : Carte de localisation du puits MDZ790.....	35
Figure III.2 : profile du puits a été proposé par OILSERV.....	36
Figure III.3 : profile du puits a été proposé par Schlumberger... ..	37
Figure III.4: TMD vs nombre d'itérations	40

Liste des symboles et définitions

- **Trajectoire** : Le cheminement du puits depuis la tête de puits jusqu'à sa profondeur finale.
 - **Profondeur mesurée (MD)** : La longueur du puits mesurée le long de la trajectoire.
 - **Profondeur verticale (TVD)** : La distance verticale entre le plan horizontal contenant un point du puits et le plan de la référence de profondeur.
 - **PDM (Positive Dis placement Motors)** : moteur de fond
 - **Azimut** : La direction du puits par rapport au Nord.
 - **Montée en inclinaison (Build-up)** : Section du puits où l'inclinaison augmente
 - **Gradient de montée (Build-up rate)** : Croissance de l'inclinaison par unité de longueur exprimé positivement en deg/10m, deg/30m ou deg/100ft.
 - **Rayon de courbure** : Le rayon d'une section curviligne du puits.
 - **HOLD** : la capacité d'un équipement ou d'un système de retenir ou de maintenir une position donnée pendant une opération de forage
 - **HMD**: Hassi Messaoud.
 - **PDM**: Positive Displacement Motor
 - **BUR**: Build Up Rate (°/30m ou °/10m)
 - **MWD**: Measurement While Drilling.
 - **HD**: Horizontal Drilling.
 - **DD**: Directional Drilling
 - **KOP**: Kick-Off Point.
 - **a**: Angle de deviation.
 - **EOB**: End of Build.
 - **LWD**: Logging While Drilling.
 - **RPM**: Rotation Per Minute.
 - **WOB** : Poids sur l'outil.
 - **EOD**: End of DROP.
 - **VS** : Vertical section.
 - **DROP**: Drill string Rotation Off Bottom Procedure.
 - **PSO**: Particle Swarm Optimization.
 - **π** : 3,14159
-

Liste des symboles et définitions

- **LWD:** Logging While Drilling.
 - **MPD:** Managed Pressure Drilling.
 - **TVDS:** Total Vertical Depth Subsea.
 - **UBD:** Under balanced drilling.
 - **OBD:** Over balanced drilling.
-

Introduction générale

L'évaluation de la trajectoire des puits déviés est un problème majeur dans l'étude et la conception du forage pétrolier. Le défi que doit soulever le déviateur est chercher à améliorer l'efficacité et la précision du forage directionnel. Les puits déviés sont des puits forés avec une trajectoire courbée ou inclinée par rapport à la verticale, ce qui permet d'atteindre des zones spécifiques du sous-sol qui seraient autrement inaccessibles avec un forage vertical traditionnel.

L'une des méthodes d'optimisation de la trajectoire du puits dévié est l'algorithme des essaims (PSO), qui offre plusieurs avantages. En effet, elle permet d'explorer un large éventail de solutions potentielles de manière simultanée, ce qui permet d'obtenir des résultats plus rapidement par rapport à des méthodes d'optimisation traditionnelles. De plus, la méthode PSO est capable de gérer des problèmes complexes avec un grand nombre de variables et de contraintes, ce qui en fait une approche adaptée aux problématiques complexes du forage directionnel.

L'objectif principal de l'optimisation de la trajectoire des puits déviés par la méthode PSO est de maximiser la production des ressources souterraines tout en minimisant les coûts, les risques opérationnels et les impacts environnementaux. Cela implique de prendre en compte divers facteurs tels que la géométrie des réservoirs, les contraintes géologiques, les conditions de fluide, les contraintes de forage et les objectifs de production.

Pour atteindre l'objectif de travail, on a vu utile d'organiser le présent mémoire en trois chapitres :

- Un premier chapitre consacré aux notions liées au forage des puits déviés ainsi que les équipements nécessaires à la réalisation de ce genre de forage.
- Un deuxième chapitre dédié aux algorithmes d'optimisation avec un intérêt particulier pour l'algorithme PSO.
- Un troisième chapitre qui inclut le calcul de la trajectoire optimale du puits MDZ 790.



Chapitre I : Le forage dévié



I.1. Introduction

Le pétrole et le gaz jouent un rôle fondamental dans l'économie algérienne, ils constituent la source la plus importante d'énergie qui a une valeur inestimable.

Pour exploiter ces richesses souterraines on procède au forage qui est une opération très délicate et la plus couteuse du processus d'exploitation de cette énergie. L'objectif prioritaire des foreurs est la réalisation d'un trou, conformément au programme qui leur a été fourni, au meilleur cout possible dans les meilleures conditions techniques.

I.2. Généralités sur le forage pétrolier

Le forage pétrolier est une technique utilisée pour extraire le pétrole et le gaz naturel du sous-sol. Son histoire remonte à plusieurs siècles, et au fil du temps, les techniques et les technologies de forage se sont développées et améliorées.

Les premières formes de forage pétrolier remontent à l'Antiquité, où des puits peu profonds étaient creusés à la main ou à l'aide d'outils rudimentaires. Ces premières exploitations étaient principalement utilisées pour obtenir du bitume, qui était utilisé pour des applications diverses, notamment la construction et l'étanchéité des bateaux.

Au 19e siècle, avec la révolution industrielle, la demande en pétrole et en gaz naturel a augmenté de façon exponentielle. Les techniques de forage ont alors évolué pour répondre à cette demande croissante. L'un des développements majeurs a été l'utilisation de la technique du forage rotatif, qui a été introduite dans les années 1860. Cette méthode permettait de creuser des puits plus profonds et plus rapidement.[1]

Au fil des années, de nouvelles technologies ont été développées pour améliorer l'efficacité et la sécurité du forage pétrolier. Les techniques de forage directionnel ont permis d'explorer des gisements situés sous des obstacles géologiques difficiles. Le forage horizontal a également été développé pour maximiser la récupération des hydrocarbures d'un gisement.

Les puits de forage peuvent être classés en plusieurs types selon leur trajectoire : le forage vertical, dirigé, et horizontal.[2]

I.3. Le forage dévié

I.3.1. Définition du forage dévié

Le forage dévié est une technique de forage qui consiste à forer un puits en direction d'une cible géologique située à une certaine distance latérale par rapport à la position verticale du puits. Cette technique permet d'atteindre des cibles géologiques qui ne peuvent pas être atteintes par un puits de forage vertical traditionnel. Le forage dévié peut être réalisé à des angles variables et peut être utilisé pour atteindre des formations géologiques profondes ou pour contourner des obstacles tels que des montagnes ou des rivières.[3]

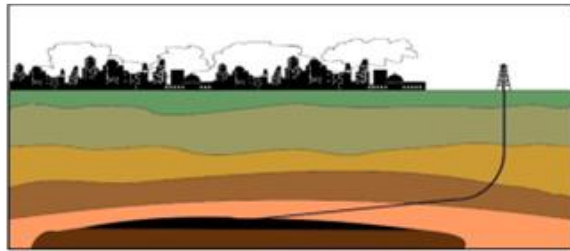


Figure I.1 : Le forage directionnel (inaccessible locations)

I.3.2. Les avantages et les inconvénients

➤ Les avantages du forage dévié

Le forage dévié offre plusieurs avantages dans l'industrie pétrolière, notamment :

- ❖ L'augmentation de la production grâce à l'augmentation de la surface de contact entre le puits et la zone de production.
- ❖ La réduction des coûts de forage en permettant de forer plusieurs puits à partir d'un même emplacement de surface.
- ❖ La réduction de l'impact environnemental en évitant les zones sensibles et résidentielles.
- ❖ L'accès à des cibles géologiques difficiles, qui ne peuvent pas être atteintes par un puits de forage vertical traditionnel.
- ❖ Une meilleure gestion de la pression dans le réservoir, ce qui peut améliorer l'efficacité de la récupération de pétrole ou de gaz naturel.[4]

➤ Les inconvénients du forage dévié

Le forage dévié présente plusieurs inconvénients potentiels, notamment :

- ❖ Coût élevé : le forage dévié peut être plus coûteux que le forage vertical en raison des équipements nécessaires et de l'utilisation de technologies avancées pour surveiller et contrôler le forage.
- ❖ Temps nécessaire : le forage dévié peut prendre plus de temps à mettre en place et à forer que le forage vertical, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires.
- ❖ Risques environnementaux : la complexité de la trajectoire de forage peut rendre plus

Difficile la gestion des risques environnementaux tels que les fuites de pétrole ou de gaz.

- ❖ Qualité du forage : la difficulté à maintenir une direction précise peut avoir un impact négatif sur la qualité de forage et donc sur la production de pétrole ou de gaz.
- ❖ Accès limité : la nécessité d'utiliser des technologies avancées et des compétences spécialisées peut limiter l'accès à cette technique de forage pour les petites entreprises ou les entreprises opérant dans des zones moins développées.[5]

I.3.3. Les objectifs de forage dévié

Les objectifs que nous cherchons et ce que nous voulons au cours de forage dévié sont multiples et dépendent du contexte spécifique de chaque projet :

- Atteindre des cibles géologiques qui ne peuvent pas être atteintes par un puits vertical, tels que des réservoirs sous-marins ou sous des zones sensibles.
- Maximiser la récupération de pétrole ou de gaz en permettant un accès direct aux zones de production.
- Minimiser les impacts environnementaux en réduisant le nombre de puits nécessaires pour atteindre les cibles géologiques.
- Économiser les coûts en réduisant le nombre de puits nécessaires pour atteindre les cibles géologiques et en permettant l'accès aux réserves de pétrole ou de gaz qui seraient autrement inaccessibles.
- Éviter les obstacles tels que les montagnes, les rivières ou les zones urbanisées.
- Réduire les risques de collisions de puits ou d'interférence avec d'autres installations de forage.[6]

I.3.4. Les situations d'application du forage dévié

Le forage dévié est mis en œuvre dans les situations suivantes :

- Lorsque la zone de forage est inatteignable ou déjà urbanisée
- Pour contourner un obstacle tel qu'un dôme de sel
- Après un incident de forage
- Et surtout en mer, pour éviter de déplacer la plate-forme et économiser les coûts de déplacement.

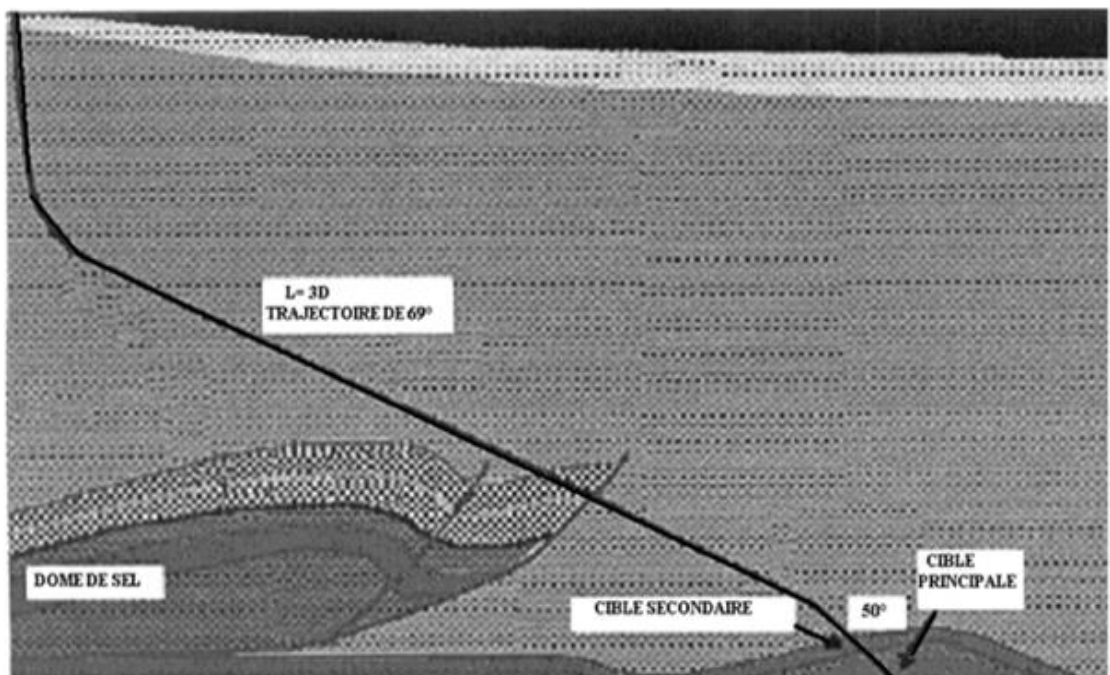


Figure I.2 : Trajectoire du puits L-3D (JPT, Nov. 2003)

Le puits L-3D, situé dans la mer d'Ionien au Sud de l'Italie, est un puits producteur de gaz. Le réservoir est composé de sables non consolidés. Pour contourner le dôme de sel, la trajectoire du puits a été déviée. L'inclinaison du puits par rapport à la verticale peut atteindre jusqu'à 80 degrés. Lorsque l'angle de 90 degrés est atteint (l'horizontale absolue), le forage peut être orienté vers le haut. Dans ce cas, l'angle après 90 degrés est continué en 95 degrés plutôt que d'être rapporté comme une inclinaison de 85 degrés par rapport à la verticale.

I.3.4.1. Déviation du forage incontrôlé

Il est rare que le forage suive exactement le parcours et le diamètre initialement prévus, sauf pour quelques cas particuliers de forages verticaux peu profonds (jusqu'à 100 mètres de profondeur). L'expérience montre que dans les formations tendres, l'outil de forage creuse un

diamètre plus grand que dans les formations dures. Cela s'explique par le délavage des couches marneuses suite à la circulation du fluide de forage, favorisant ainsi l'augmentation du diamètre du trou. Il est même possible de forer des puits avec des écarts incontrôlés par rapport à la verticale jusqu'à 70 degrés. Cependant, réduire la vitesse d'avancement permet de forer de manière plus verticale.

I.3.4.2. Déviation du forage contrôlé

Ce type de forage commence par un forage vertical, mais peut être dévié pour plusieurs raisons, notamment :

- Si la roche est impossible à traverser
- Pour contourner un obstacle tel qu'un dôme de sel
- Si une partie du matériel est laissée au fond suite à la rupture ou au dévissage des tiges ou du tubage, le forage peut être dévié après une prise d'empreinte pour orienter la trajectoire du forage, plutôt que de déplacer la plate-forme ou risquer d'endommager le matériel.
- Si le train de sonde est bloqué en raison d'un rétrécissement du diamètre du trou, d'un coincement par les sédiments ou d'une circulation insuffisante pour éliminer correctement les sédiments, ou d'une floculation de la boue par un agent chimique.
- Pour atteindre plus facilement la roche réservoir.

Dans un forage dévié, le train de tige ne tourne plus contrairement à un forage vertical. Le trépan est entraîné par une turbine, activée par la boue descendant à l'intérieur du train de tige. Le train de tige s'incurve naturellement au fur et à mesure de sa progression, selon un rayon de courbure d'environ 500 mètres.[7]

I.3.5. Les applications du forage dévié

Le forage dévié est largement utilisé dans l'industrie pétrolière pour atteindre des réserves de pétrole et de gaz qui seraient autrement inaccessibles. Voici quelques-unes des principales applications de cette technique :

- Puits pour control de la verticalité
- Relief Well
- Side tracking
- Forages pour des raisons géologiques

- Forage de drainage
- Emplacements inaccessibles
- Plates-formes Multi puits (Clusters)
- Puits en Réentrée (Re-entry Wells). [8]

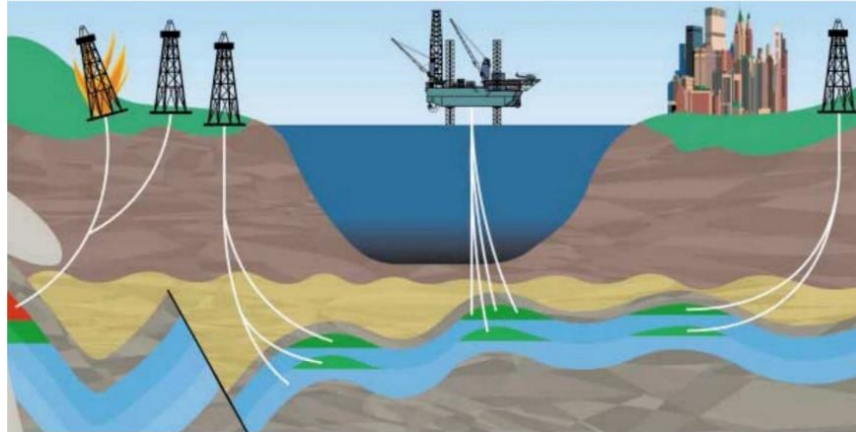


Figure I.3 : Cas d'application du forage dévié

I.3.5.1. Puits pour control de la verticalité

Puits pour control de la verticalité l'une des premières applications du forage dirigé est la correction d'un puits serpenté.[8]

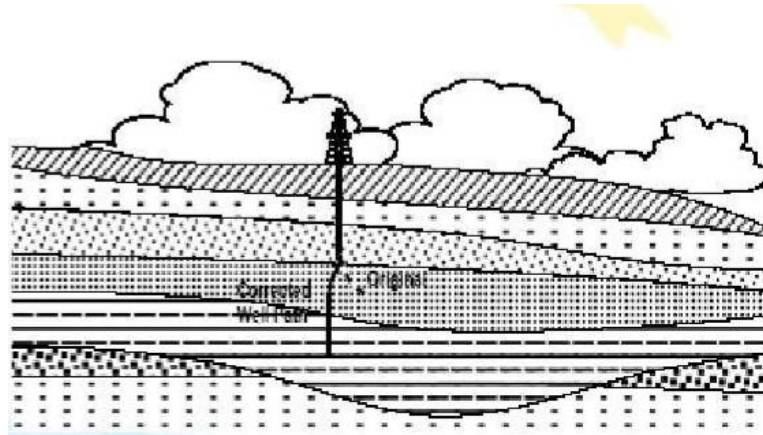


Figure I.4 : Puits pour control de la verticalité

I.3.5.2. Puits d'interception (Relief Well)

Lorsque l'équipement et les procédures de contrôle de puits ont échoué, entraînant une situation incontrôlée appelée éruption, un puits dévié est foré comme solution corrective. La technique consiste à forer d'un emplacement de surface adjacent à la formation source de l'écoulement incontrôlé aussi près que possible ou même au puits incontrôlé lui-même. En arrivant à la cible, une boue de destruction est pompée pour reprendre le contrôle. [9]



Figure I.5: Puits d'interception (Relief Well)

I.3.5.3. Side tracking

Pendant les opérations de forage, le train de tiges peut être coincé par des mécanismes différentiels ou mécaniques ou il peut être perdu en raison d'une défaillance du train de tiges. Dans le cas où le poisson ne peut pas être retiré du trou, le puits doit être détourné. Le side tracking commence par placer un bouchon de ciment au sommet du poisson, ce qui permet une bonne fondation pour lancer le puits de forage. La déviation peut être réalisée en utilisant un whip stock ou un moteur à déplacement positif (PDM) avec une mesure en perçant des outils (MWD). Le suivi latéral du puits de forage peut également être effectué à partir d'un trou tubé, où une fenêtre est ouverte dans le tubage et le puits de forage est dirigé à travers cette fenêtre. [9]

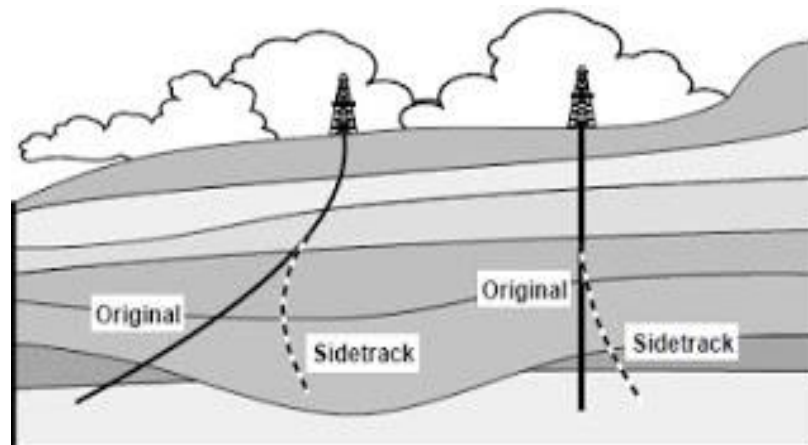


Figure I.6: Side tracking

I.3.5.4. Forage pour des raisons géologiques

Il existe certaines situations où les opérations de forage peuvent être difficiles. De nombreux problèmes peuvent être rencontrés en raison du type de formations telles que le forage à travers un dôme de sel ou le passage à travers une faille. Par exemple, le forage à travers un dôme de sel peut causer de multiples problèmes tels que des lavages importants, de

la corrosion et même une perte de circulation ; un puits directionnel peut être foré pour contourner ce type de structure de formation. Le perçage d'un défaut incliné peut entraîner des difficultés pour contrôler le comportement du trépan et provoquer une déviation du trépan lors du passage à travers le plan de défaut. Le forage directionnel permet de forer à travers les formations faussées sans franchir la ligne de faille. [9]

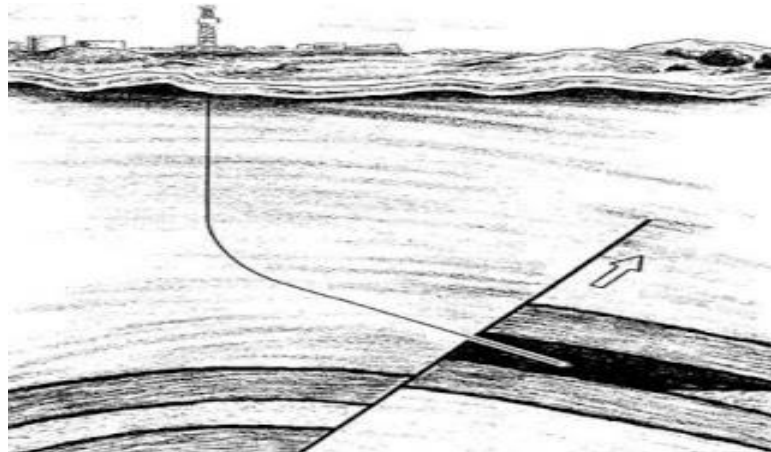


Figure I.7 : Forages pour des raisons géologiques

I.3.5.5. Forage de drainage

Les puits déviés avec un angle d'inclinaison supérieur à 70° sont considérés comme des puits horizontaux. Plusieurs problèmes peuvent être rencontrés lors du forage de ce type de puits, ce qui peut augmenter leur coût de forage. Il y a de nombreux avantages à forer un puits horizontal :

- Augmentation de la zone de drainage d'une structure en mer
- Surmonter les problèmes de conduction de gaz et d'eau
- Augmentation de la zone de contact avec le réservoir
- Augmentation de la productivité en intersectant des fractures verticales [9]

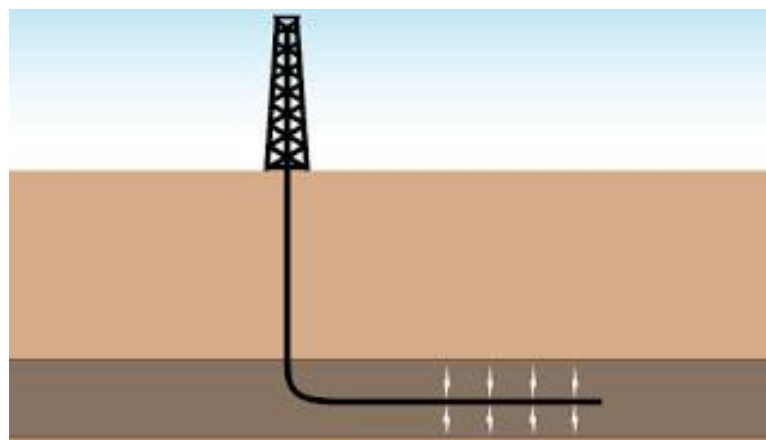


Figure I.8 : Forage de drainage

I.3.5.6. Emplacements inaccessibles

Lorsque des cibles sont situées sous une ville, une rivière ou dans des zones écologiquement sensibles, il est nécessaire de localiser la plate-forme de forage à une certaine distance. Un puits directionnel est alors foré afin d'atteindre la cible. [10]

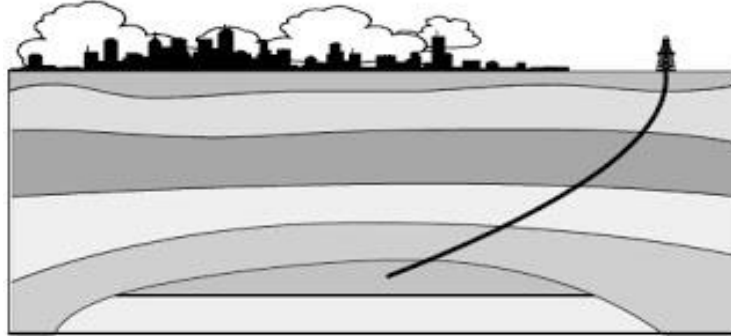


Figure I.9 : Emplacements inaccessibles

I.3.5.7. Plates-formes Multi puits (Clusters)

Le forage directionnel à partir d'une plate-forme offshore multipuits est le moyen le plus économique de développer des champs pétroliers en mer. Sur terre, une méthode similaire est utilisée lorsque des contraintes d'espace sont présentes, par exemple dans la jungle ou les marais. Dans ce cas, la plate-forme est glissée sur une plate-forme et les puits sont forés en "grappes".[10]

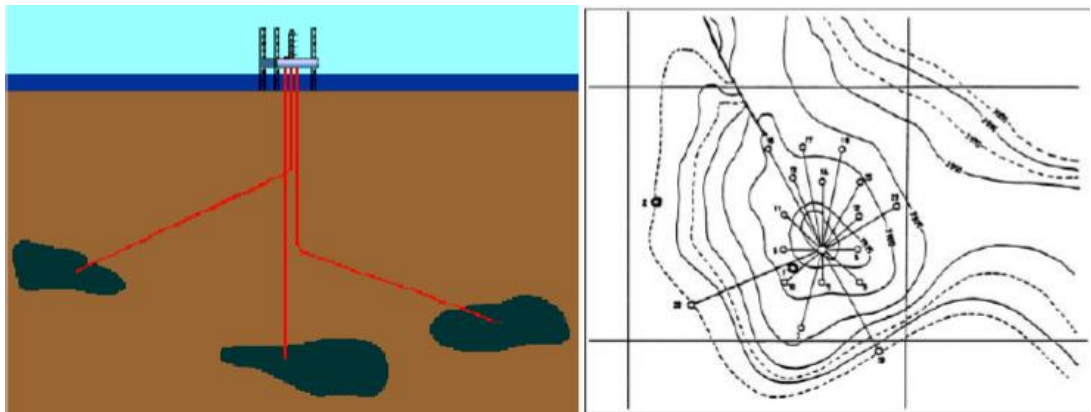


Figure I.10 : Plates-formes Multi puits (Clusters)

I.3.5.8. Puits en Réentrée (Re-entry Wells)

Les principales options technologiques disponibles pour la gestion des réservoirs étaient les suivantes :

La sélection du forage sous-équilibré de tubes enroulés comme outil de gestion des réservoirs pour améliorer l'économie du développement des piscines a été établie après avoir pris en compte les objectifs ci-dessus. Les principales options technologiques disponibles étaient les suivantes :

- Perçage intercalaire vertical

- Nouveau forage intercalaire horizontal
- Forage de rentrée horizontale

Les options ci-dessus pourraient en outre être divisées en techniques de forage suréquilibré et sous-équilibré et pourraient être conduites avec la technologie de forage de tuyau articulé conventionnelle ou la technologie de forage de tube enroulé.[11]

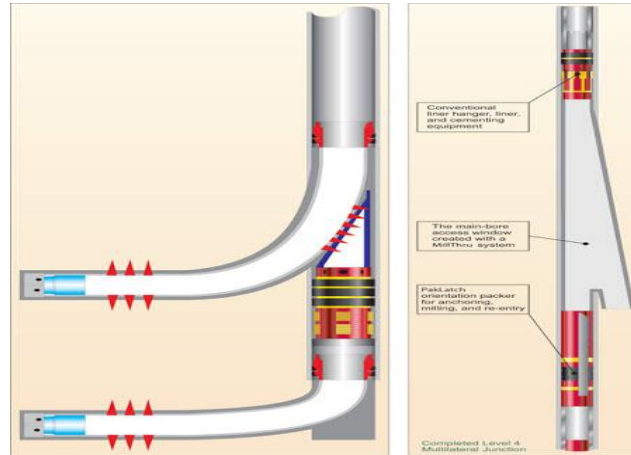


Figure I.11 : Puits en Réentrée (Re-entry Wells)

I.3.6. Profils et types de puits

Il existe plusieurs types de puits déviés, qui diffèrent par leur objectif et leur angle de déviation :

I.3.6.1. Puits dévié vertical

Un puits dévié vertical est foré à un angle délibéré par rapport à la verticale pour atteindre une couche de roche cible qui ne peut pas être atteinte par un puits vertical traditionnel. Une fois que le forage atteint la couche de roche cible, le puits peut être foré horizontalement dans cette formation pour accéder à une zone plus large.[12]

I.3.6.2. Puits dévié directionnel

Un puits dévié directionnel est une technique de forage avancée qui permet de diriger le puits de manière précise et contrôlée vers une cible spécifique, en utilisant des mesures de référence pour s'assurer que le puits suit la trajectoire planifiée. Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie du pétrole et du gaz pour accéder à des réservoirs difficiles d'accès. Les étapes principales de ce processus comprennent la planification de la trajectoire, le forage initial du puits vertical, l'utilisation d'outils de mesure, la déviation contrôlée, les mesures de référence, la surveillance et les ajustements, et enfin la mise en place des tubes de revêtement et des têtes de puits pour la production.

Le forage de puits dévié directionnel avec référence permet une précision accrue dans la direction et l'angle de déviation du puits, ce qui peut améliorer la récupération de pétrole et de gaz tout en minimisant les risques de collision avec d'autres puits.

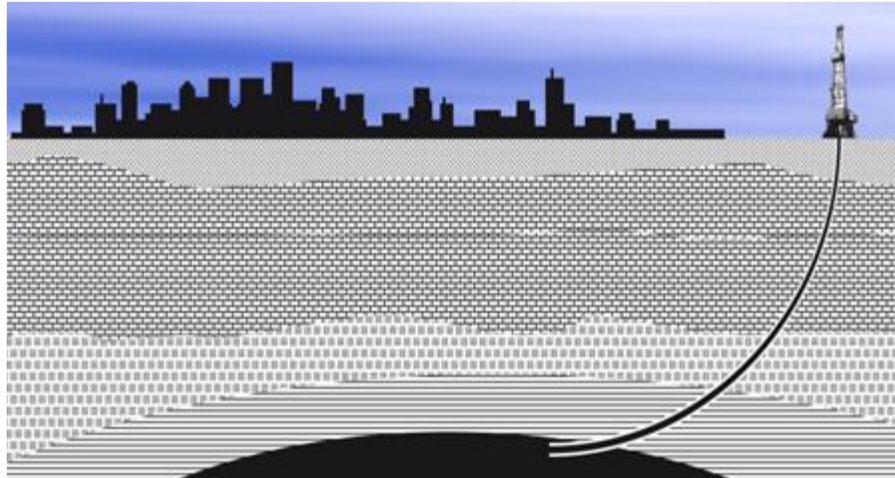


Figure I.12 : Puits dévié directionnel

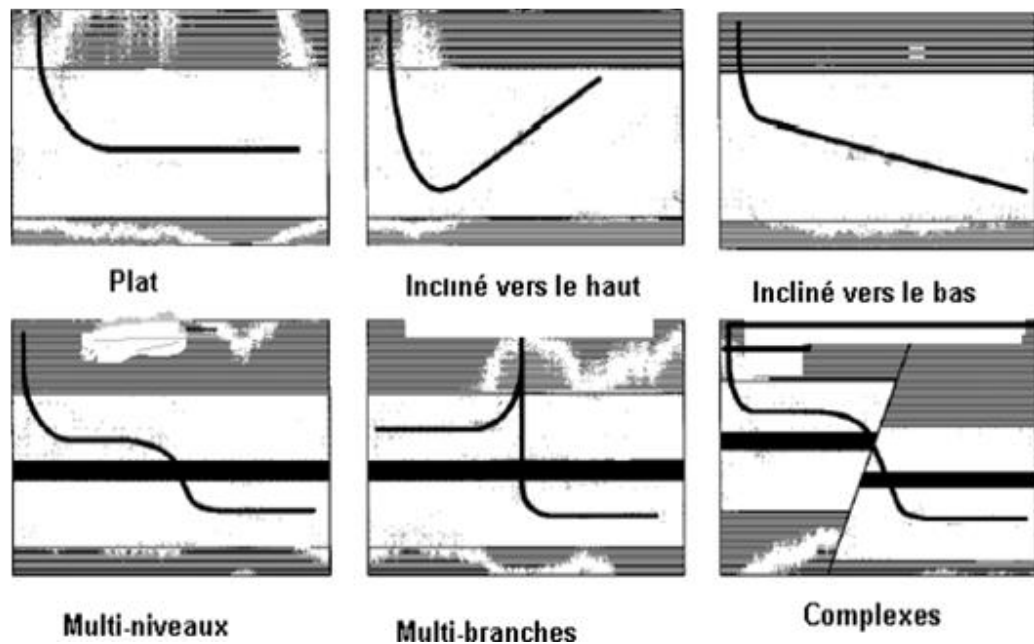
I.3.6.3. Puits dévié horizontal

Les puits horizontaux consistent à percer le réservoir de manière horizontale ou subhorizontale (entre 80 et 100 degrés) afin d'améliorer la production de celui-ci en augmentant la surface de la couche de forage. En comparaison, un puits vertical permet seulement d'estimer les réserves du réservoir sur une profondeur de 6 à 10 mètres, tandis qu'un puits horizontal peut fournir des informations sur les réserves à des profondeurs allant de 600 à 1000 mètres.[13]

Il est possible de classer le puit horizontal en trois types selon le gradient de montée (le rayon de courbure) :

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| ❖ Long rayon (Long radius) | gradients de 1 à 2 degré/10m |
| ❖ Moyen rayon (Medium radius) | gradients de 3 à 10 degré/10m |
| ❖ Court rayon (short radius) | gradients 3 à 10 degré/m |

Le forage horizontal est une méthode qui est plus difficile et coûteuse par rapport aux techniques conventionnelles telles que le forage vertical ou dévié. Selon les données, le coût d'un puits vertical augmente généralement de 28 à 38 % pour atteindre le coût d'un puits horizontal.[14]



- ❖ Il y a plusieurs types des puits horizontaux :
- **Short radius** : Le rayon court est caractérisé par une section de construction d'environ 60 pieds et une section horizontale de 100 à 800 pieds. Il est possible de forer des trous de petit diamètre à partir du même puits de forage. Le forage du rayon court nécessite l'utilisation de systèmes de déviation spéciaux et de tubes non conventionnels. L'équipement utilisé est plus fragile en raison de son diamètre réduit, ce qui accroît les risques de panne. La vitesse de progression lors du forage de ce type de puits horizontal est très limitée dans les formations dures et le contrôle directionnel peut s'avérer problématique.
- **Medium radius** : Le rayon moyen est caractérisé par un angle d'accumulation de 6° à 35° / 100 pieds avec une section d'accumulation de 200 à 700 pieds. La section horizontale peut être de 1000 à 3500 pieds. Il est appliqué lors du forage à travers des réservoirs fracturés et de l'eau potentielle et réservoirs de coning de gaz.
- **Long radius** : Le rayon long est utilisé principalement pour les trous de grand diamètre. Son taux d'accumulation peut varier de 1 à 6 degrés pour chaque tranche de 100 pieds de profondeur, et la section horizontale peut s'étendre jusqu'à 5000 pieds de long. Il est principalement utilisé dans des zones offshore ou difficiles d'accès. Les puits de rayon long présentent des

diamètres plus importants, et sont sensibles à des couples et des frottements plus élevés en raison de sections de trous plus longues. Leur taille plus importante permet l'utilisation de moteurs à déplacement positif plus puissants.[15]

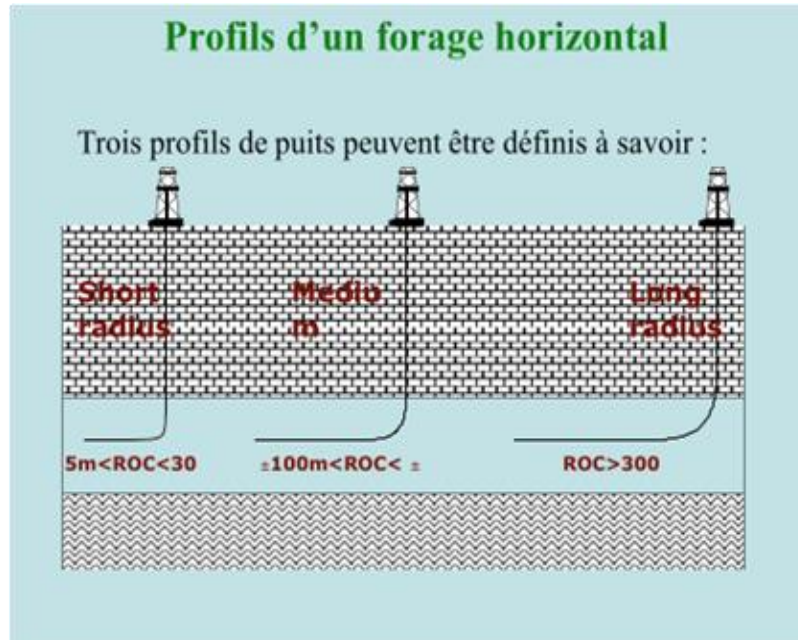


Figure I.14 : Puits horizontaux [16]

I.3.6.4. Puits dévié multilatéral

Ce type de puits consiste à forer plusieurs branches de puits à partir d'un seul puits central appelé tronc. Cette technique présente plusieurs avantages : l'exposition au réservoir est accrue, ce qui conduit à une augmentation de la production ; cela réduit également le nombre d'équipements de surface et les coûts d'installation. Le forage de puits multilatéraux est utilisé dans de nombreux cas, notamment pour les réservoirs étanches où la perméabilité est très faible. Dans ce cas, la production peut être augmentée en augmentant la surface de contact grâce au forage de plusieurs branches. Cette technique permet également d'injecter et de produire à partir du même puits et peut être une bonne option pour le forage à travers des réservoirs de drainage complexes. Cependant, de nombreux problèmes doivent être pris en compte lors du forage de ce type de puits, tels que la conception des jonctions, les problèmes de contrôle des puits et la planification du programme d'achèvement, afin de rendre le forage multilatéral plus efficace. [17]

I.3.6.5. Puits dévié à angle variable

Le forage dévié à angle variable est une technique de forage qui permet de modifier l'angle de forage pour atteindre une cible précise à une profondeur et une position déterminée. Contrairement au forage vertical, il permet de diriger le puits dans une direction horizontale ou inclinée pour atteindre des réservoirs de pétrole et de gaz situés à des profondeurs ou des angles différents. Cette technique utilise des outils de forage spéciaux pour contrôler la direction du forage et maintenir la trajectoire du puits en ligne avec la cible visée, optimisant ainsi la récupération des hydrocarbures. Il est utilisé pour atteindre des zones situées à différents angles par rapport à la verticale.

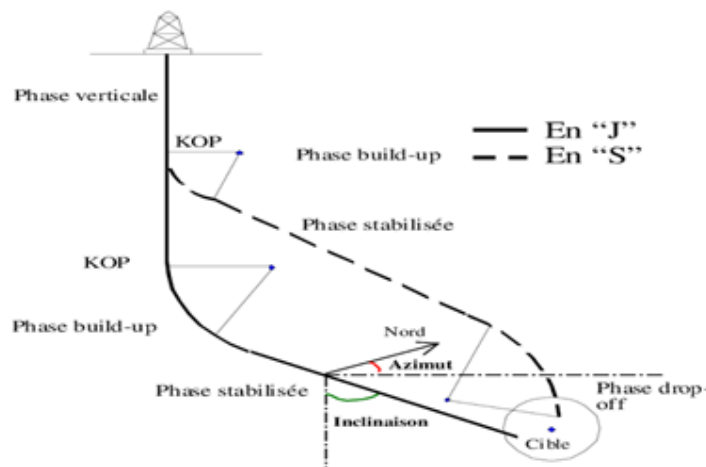


Figure I.15 : Puits dévié à angle variable [18]

I.3.6.6. Puits dévié foré en S

Les puits de type S sont caractérisés par un alésage comprenant une section droite, une section de construction, une section tangente et une section de goutte. Ce type de puits est foré dans le but d'améliorer l'efficacité du puits et de faciliter la localisation d'un puits soufflé. En forage en mer, les puits de type S permettent d'assurer la précision de l'espacement des trous de fond lorsque plusieurs puits sont forés à partir de la même plate-forme. Il est utilisé pour atteindre des zones situées sous différents angles à des profondeurs différentes.

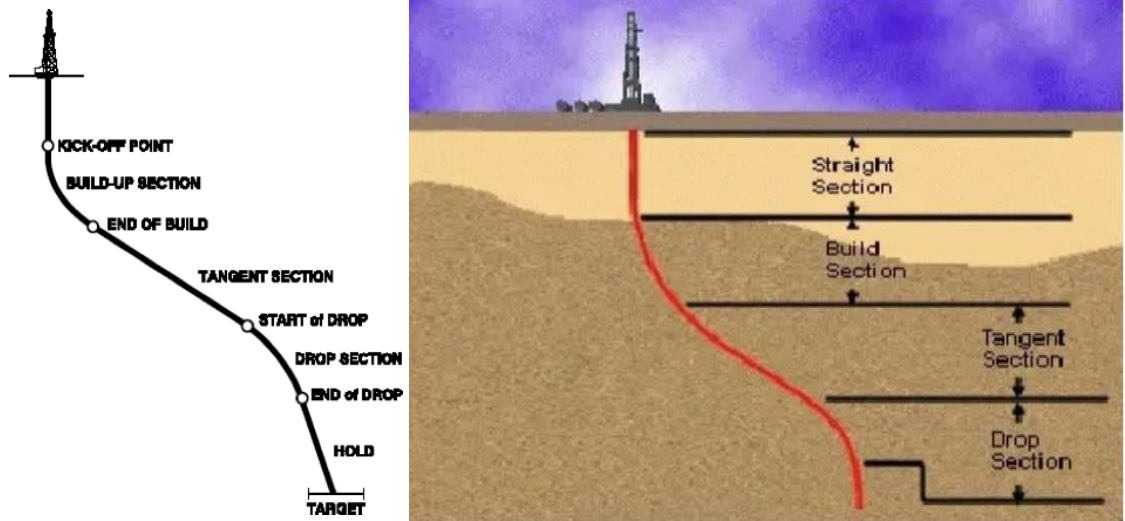


Figure I.16 : Puits dévié en S

I.3.6.7. Puits dévié en J

Les puits inclinés, parfois appelés puits de type J, ont un alésage avec une section droite, une section de construction et une section tangente directement à la cible. Des puits inclinés ou de type J sont forés là où il n'est pas souhaitable ou possible de localiser l'emplacement de la surface directement au-dessus de la cible ou d'une plate-forme multi-puits.

I.4. Equipements spécifiques au forage dirigé

I.4.1. Les moteurs de fond PDM (Positive Dis placement Motor)

I.4.1.1. Introduction

Les industries pétrolière et gazière ont besoin de dispositifs spéciaux pour leurs opérations. L'un de ces dispositifs est le moteur à fond de trou (PDM), qui est souvent utilisé dans la planification du cycle de travail. Le PDM est impliqué dans l'extraction de minéraux liquides et gazeux, ainsi que de minéraux solides, et peut également être utilisé pour réparer les puits existants. Les équipements spéciaux ont un certain nombre de caractéristiques techniques particulières. Pour que l'unité remplisse efficacement ses fonctions, elle doit être correctement sélectionnée en fonction des conditions de fonctionnement existantes. Cela nécessite une compréhension de la conception du PDM, ainsi que des règles pour son application à différents objets.

I.4.1.2. Le moteur de dépassement positif PDM

Le moteur à déplacement positif, aussi connu sous le nom de moteur volumétrique, hydraulique à déplacement positif ou à cavité progressive, s'inspire du principe des pompes à Moineau. Lorsque le train de tiges n'est pas entraîné en rotation depuis la surface, ce type de moteur peut être utilisé pour des opérations telles que le forage de performance, le forage de trous droits, le carottage, le sous-fraisage et les opérations de fraisage. En forage de trou droit, le moteur fonctionne comme un outil de performance de forage pour augmenter le taux de pénétration et réduire l'usure du tubage en minimisant la rotation du train de forage. [19]

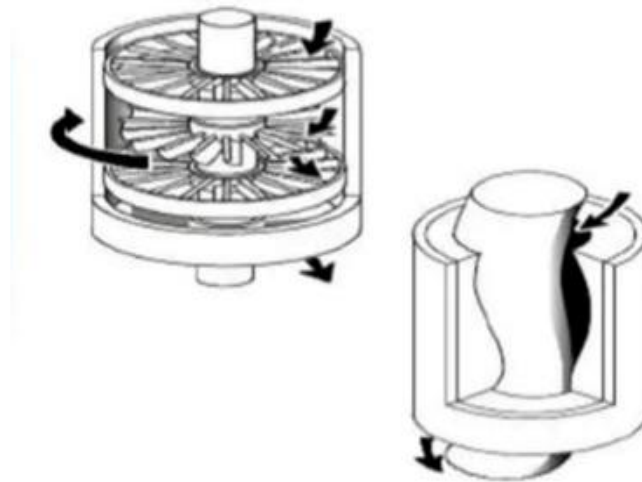


Figure I.17 : PDM (Positive Dis placement Motor) [20]

I.4.1.3. Principe de fonctionnement d'un PDM

Le fonctionnement du moteur de fond de trou est basé sur les caractéristiques de sa conception. Il s'agit d'une machine rotative volumétrique, dans laquelle le stator avec des cavités jouxte les chambres basse et haute pression, tandis que le rotor à vis est en tête. Le couple est transmis à l'actionneur grâce à ce dispositif. Les vis de blocage, appelées membres de fuite, assurent l'étanchéité du moteur et empêchent le liquide de la chambre haute pression de pénétrer dans le compartiment basse pression par l'intermédiaire des contacteurs. Le fluide circule à l'intérieur de la structure grâce aux organes de travail et à la chute de pression, ce qui produit un couple sur le rotor. Les éléments à visser des organes de travail se ferment mutuellement et séparent les zones de haute et basse pression. Le principe de fonctionnement du moteur de fond de trou est similaire à celui des équipements à piston, avec des passerelles distinctes créées dans les organes de travail du MPD. La multiplicité est l'un des principaux paramètres de

l'équipement, avec plusieurs organes de travail pour la production nationale de l'UZD et des moteurs présentant une ou plusieurs approches de rotor pour les sociétés étrangères.[20]

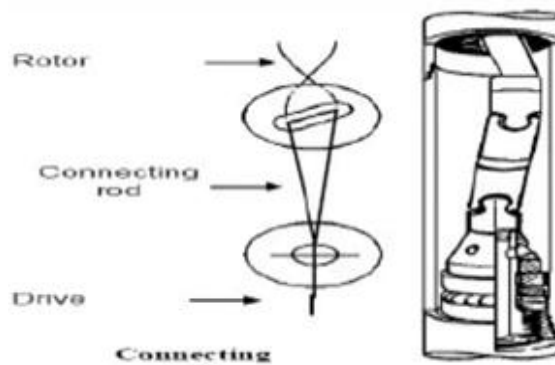


Figure I.18 : Principe de fonctionnement d'un PDM [20]

I.4.1.4. Descriptions de Positive Displacement Motors PDM

➤ Une valve de détournement (by-pass)

Les moteurs à fond de trou sont équipés d'une valve de détournement (by-pass) située dans la partie supérieure de leur corps pour les protéger. Cette valve fonctionne en fonction de la pression différentielle et permet de détourner le fluide lorsqu'il n'y a pas de rotation du moteur. L'un des rôles de cette valve est d'amortir le démarrage de la rotation, ainsi que de faciliter le remplissage du train de tiges pendant la descente et la vidange pendant la remontée.

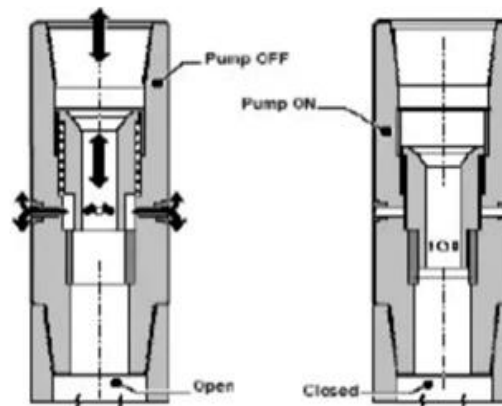


Figure I.19 : Drump valve

➤ Power section

Dans la section de puissance, un rotor en forme de spirale est mis en rotation grâce à la force exercée par le fluide de forage. Si la résistance du trépan ou de la formation à la rotation (appelée exigence de couple de forage) est trop élevée, le fluide de forage peut potentiellement

provoquer une déformation temporaire du matériau élastomère du stator. Dans ce cas, la division ou l'étanchéité entre les zones à haute et basse pression est perdue, entraînant un blocage du moteur. À mesure que la pression à l'intérieur de chaque cavité diminue en raison d'une fuite de fluide au-delà du joint perdu, une augmentation significative de la pression en surface se produit. Cela signifie que le moteur doit être retiré et redémarré par le bas. Si le blocage n'est pas correctement corrigé, le stator sera endommagé de manière permanente et la durée de vie de l'ensemble du moteur sera réduite. Ceci est particulièrement important lorsqu'on travaille avec des débits ou des pressions différentielles élevés. Une pression différentielle plus faible signifie moins de blocages.

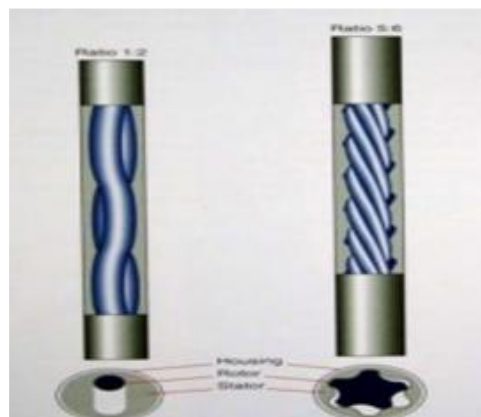


Figure I.20 : Power section assembly

➤ Universal joint ou connecting rod section

Le rotor et l'arbre de transmission sont connectés par un joint de cardan, qui est essentiel pour convertir le mouvement excentrique du rotor en un mouvement concentrique

➤ Géométrie des moteurs du fond

Au départ, les PDM étaient construits avec un corps droit et leur angle par rapport au train de tiges était obtenu grâce à un raccord coudé installé au-dessus du moteur. Aujourd'hui, ils intègrent un coude fixe ou ajustable (bent-housing) situé dans la partie basse du moteur. La proximité de ces coudes par rapport à l'outil de forage améliore l'efficacité de l'angle. Un faible angle et une diminution de la distance angle-outil permettent la rotation du train de tiges, ce qui élimine l'effet d'angle et permet de forer droit même avec un moteur coudé. Ces coudes sont souvent ajustables en surface, de zéro (moteur droit) à 3 degrés, par quart de degré. Une dernière génération de moteurs possède un coude ajustable depuis la surface, permettant de modifier le

comportement de la garniture sans avoir à manœuvrer. Certains moteurs ont un corps courbé, tandis que d'autres sont articulés. [21]



Figure I.21 : Géométrie des moteurs du fond [21]

I.4.2. Equipements amagnétiques

Il est nécessaire d'utiliser des matériaux non-magnétiques ou amagnétiques en combinaison avec des capteurs de mesure magnétiques pour garantir une utilisation optimale des instruments de mesure. Ces matériaux amagnétiques peuvent être composés d'aluminium, d'aciers inoxydables de haute qualité ou d'alliages tels que le "Monel" (70% de nickel et 30% de cuivre). Les équipements amagnétiques les plus couramment utilisés sont les suivants :

- Masse-tiges amagnétiques : utilisées pour éliminer les perturbations du champ magnétique causées par la présence du train de tiges, elles sont plus coûteuses (3 à 4 fois) que les masses-tiges en acier standard.
- Tiges de forage amagnétiques : des tiges compressives amagnétiques sont utilisées en forage horizontal où les masses-tiges ne sont plus justifiées par le poids.
- Stabilisateurs amagnétiques : dans certains cas, il est nécessaire d'utiliser des stabilisateurs amagnétiques près des équipements de mesure au lieu de stabilisateurs standards.
- Raccords amagnétiques : dans certains cas, il est également nécessaire d'utiliser des

Raccords amagnétiques près des équipements de mesure au lieu de raccords standards.

- Les équipements de mesure : il s'agit de MWD (Measurement While Drilling) et de steering Tools (outils de direction).[20]

I.4.2.1. Raccords coudés

Les raccords coudés sont utilisés en combinaison avec un moteur de fond à corps droit pour le décentrer par rapport à l'axe du puits, ce qui désaxe également l'outil de forage. L'angle est obtenu en décentrant le filetage mâle et sa portée par rapport à l'axe du corps. Ces raccords sont installés directement au-dessus du moteur et peuvent être fabriqués en acier standard ou en acier amagnétique. [19]

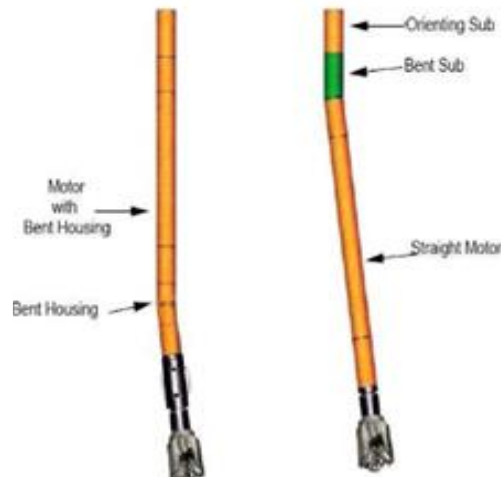


Figure I.22 : Raccord coudés [19]

I.4.2.2. Raccords d'orientation

Ils sont habituellement fabriqués en acier amagnétique en raison de leur proximité par rapport au compas ou aux magnétomètres.

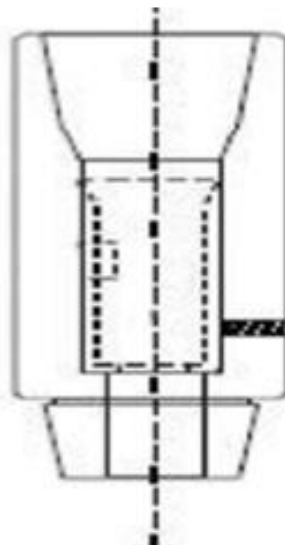


Figure I.23 : Raccord d'orientation [20]

I.4.2.3. Outils de déflexion

Les outils déviateurs sont utilisés au cours d'un forage dirigé, soit pour amorcer la courbe soit pour modifier l'azimut, de façon à atteindre l'objectif, l'un de ces outils est les Whip stock.

I.4.3. Equipements de mesure

Différents instruments de mesure peuvent être utilisés en fond de trou pour effectuer ces mesures. Ils varient selon le type de capteurs utilisés et surtout selon le mode de transmission de l'information.

- ❖ **En temps différé** : l'information est remontée avec l'outil lui-même
- ❖ **En temps réel** : l'information est transmise du fond vers la surface par l'intermédiaire d'un système de télémétrie

I.4.3.1. Outils de mesures en temps différé

- D'un ensemble de capteurs de mesures
- D'un système d'horlogerie capable de déclencher les mesures et leur enregistrement
Après un délai programmé
- D'un système d'enregistrement On distingue les :
 - Inclinomètres
 - Single-shots magnétiques
 - Multi-shots magnétiques
 - Gyroscopes

I.4.3.2. Outils de mesures en temps réel

- D'un ensemble de capteurs de mesures
- D'une électronique de contrôle
- D'un système de télémétrie On distingue les
 - Steering Tools
 - MWD ET LWD
 - Gyroscope. [14]



Chapitre II : Optimisation de la trajectoire des puits déviés



II.1. Introduction

Le forage directionnel présente certains avantages par rapport au forage vertical, bien qu'il soit plus coûteux. En ingénierie de forage, l'optimisation du puits de forage joue un rôle important, qui peut être optimisé en fonction de la minimisation de la longueur. Jusqu'à aujourd'hui, de nombreuses approches et méthodes sont utilisées pour optimiser la trajectoire de ce puits de forage.

L'optimisation de la trajectoire du puits dévié est un domaine d'application important dans l'industrie pétrolière. Lors du forage de puits déviés, il est essentiel de déterminer la trajectoire optimale qui permettra d'atteindre efficacement les zones cibles du réservoir tout en évitant les obstacles géologiques ou techniques.

II.2. Optimisation de la trajectoire des puits déviés

Dans l'industrie du pétrole et du gaz, les ingénieurs de forage accordent une grande importance à la réduction des coûts. Depuis le tout début, les avantages du puits de forage dévié sont largement connus dans l'industrie. Bien que le forage dévié soit plus onéreux que le forage vertical, il offre des avantages tels que l'accès à des réserves de pétrole et de gaz qui ne seraient pas disponibles autrement, ainsi qu'une plus grande efficacité de production.

Par conséquent, les ingénieurs de forage cherchent constamment des moyens d'optimiser la trajectoire du puits de forage dévié afin de minimiser les coûts et de maximiser les avantages. Cela implique l'utilisation de technologies et de méthodes de forage avancées, ainsi que l'analyse continue des données de forage pour identifier les zones d'amélioration et de réduction des coûts. L'optimisation de la trajectoire du puits de forage dévié est donc une priorité pour l'industrie pétrolière et gazière, afin de maximiser les bénéfices tout en minimisant les coûts.

Le forage d'un puits de forage dévié est coûteux, mais il est possible de maintenir la trajectoire dans une plage de rentabilité. Le forage du puits de forage est l'une des procédures les plus coûteuses pendant la production et l'exploration de réservoirs dans l'industrie pétrolière et gazière. Ainsi, la construction ultérieure est directement affectée par la conception de la trajectoire. Une empreinte de forage est formée depuis le point de départ jusqu'au point cible lors de la conception de la trajectoire du puits de forage. Elle est ensuite optimisée en fonction des conditions géologiques.

Lorsque les ingénieurs commencent le processus de forage, ils essaient d'ajuster la trajectoire conçue en fonction de la magnitude de la déviation réelle de la trajectoire. Ils essaient également de s'ajuster avec les données de forage mesurées. Si les coordonnées de la tête de puits et les coordonnées de la cible sont données, l'objectif de la conception optimale est de décider d'un ensemble de paramètres géométriques optimaux. Ces paramètres doivent répondre aux contraintes techniques et géométriques.[18]

II.2.1. Les méthodes d'optimisation

Les méthodes d'optimisation sont des approches mathématiques et informatiques visant à atteindre la solution optimale la plus appropriée à un problème d'optimisation. Ces méthodes sont employées dans une variété de domaines, notamment l'ingénierie, les sciences économiques, la finance, la logistique, entre autres, pour résoudre divers problèmes.[18]

➤ Il y a plusieurs méthodes d'optimisation :

- Essaims de particules (pso)
- Colonies d'abeilles
- Colonies de fourmis
- Algorithme génétique
- Recherche hybride plate
- Recherche hybride du coucou

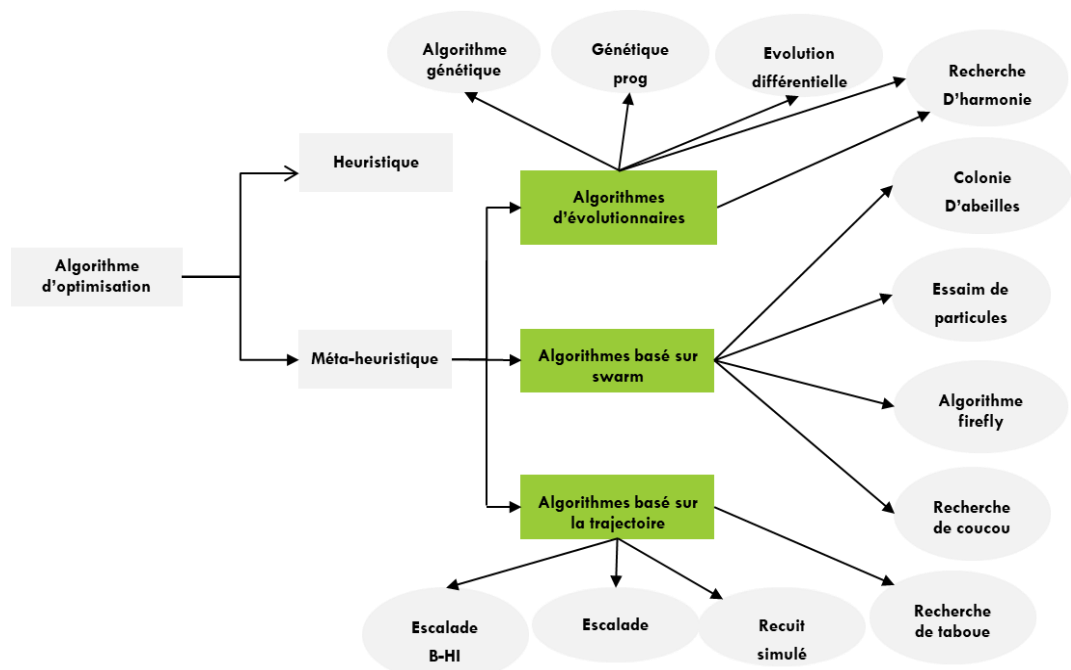


Figure II.1 : Algorithmes d'optimisation [22]

Dans notre travail on va utiliser la méthode basée sur l'algorithme des essaims de particules (PSO).

II.2.2. Optimisation par les essaims de particules (PSO)

Le PSO est un algorithme métaheuristique d'optimisation. Il essaie de chercher à donner des solutions probables à un problème. Il a la capacité de rechercher une solution dans un grand espace de recherche. Cet algorithme utilise des itérations aléatoires. Les particules échangent leurs informations au sein du groupe. La façon dont les particules interagissent computationnellement peut être connue à l'aide de la matrice d'adjacence. Dans cette matrice, la ligne représente les mêmes types d'un essaim, appelées particules informâtes. Elles communiquent entre elles. Mais la colonne représente les particules informées. Elles contiennent les informations recueillies par différents essaims. Elles contiennent également des informations sur la position globale. Ainsi, la position globale peut être atteinte lorsque la particule communique l'information aux particules informées.

Le PSO surveille d'abord, puis améliore la solution candidate. De cette manière, il essaie d'optimiser une fonction objective. Le PSO ajuste la position encore et encore en fonction d'une formule mathématique. Ensuite, à partir de cela, il essaie de trouver la position et la vitesse des particules. Les recherches récentes montrent que le PSO a été appliqué à de nombreuses applications diverses.

L'algorithme PSO utilise des candidats aléatoires. Une particule se voit attribuer une valeur initiale. Ensuite, deux vecteurs, le vecteur de vitesse et le vecteur de position, sont également attribués à chaque particule. Ensuite, les particules se déplacent dans l'espace de recherche. Elles essaient de trouver des solutions réalisables et de découvrir la prochaine valeur la plus favorable. La meilleure position est conservée en mémoire. Après la dernière itération, la meilleure position est attribuée à la mémoire générale. De cette manière, l'algorithme répète l'approche dans la recherche de la meilleure solution. Lorsqu'il trouve une meilleure solution, il remplace la valeur précédente. Ce processus se poursuit jusqu'à ce qu'il trouve l'optimum global, mais la découverte d'une position globale réelle n'est pas garantie. Les particules sont regroupées en un essaim. La façon dont les particules interagissent les unes avec les autres est déterminée par le concept de la matrice d'adjacence. Différents types de PSO peuvent être définis en fonction de différentes topologies de communication de voisinage. Dans l'algorithme

PSO, trois composantes importantes sont la composante cognitive φ_p , la composante d'inertie (ω) et la composante sociale φ_g . [18]

Pour un espace bidimensionnel :

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + \varphi_1 r_1^k (P_i^k - X_i^k) + \varphi_2 r_2^k (P_g^k - X_i^k) \quad (\text{II.1})$$

- V_i représente la vitesse d'une particule
- P_i représente le meilleur résultat précédent de la particule actuelle ;
- X_i représente la position actuelle de la particule ;
- P_g représente le meilleur résultat précédent global de l'ensemble de l'essaim ; chacune de ces variables est un vecteur de longueur d , représentant le nombre de dimensions dans le problème. Les autres variables sont :
- φ_1 Et φ_2 qui sont considérées comme des constantes d'accélération, respectivement 1 et 2.
- ω qui est une constante d'inertie pondérée [0,4 à 1,4].
- r_1 Et r_2 sont des valeurs aléatoires prises dans la distribution uniforme [0, 1]. [23]

La position de la particule i est calculée de la manière suivante :

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (\text{II.2}) \quad [23]$$

La vitesse calculée aide à ajuster la valeur de la particule i , X_i , pour chaque dimension. Cela est fait pour fournir les valeurs numériques de la particule à tester dans la prochaine itération du modèle. Ici, le composant d'inertie restreint les particules à l'intérieur des limites de la zone de problème. Les particules se déplacent vers leur meilleure position précédente lorsque les composants cognitifs entrent en jeu. Et elles peuvent atteindre leur meilleure position globale avec l'aide des composants sociaux. [18]

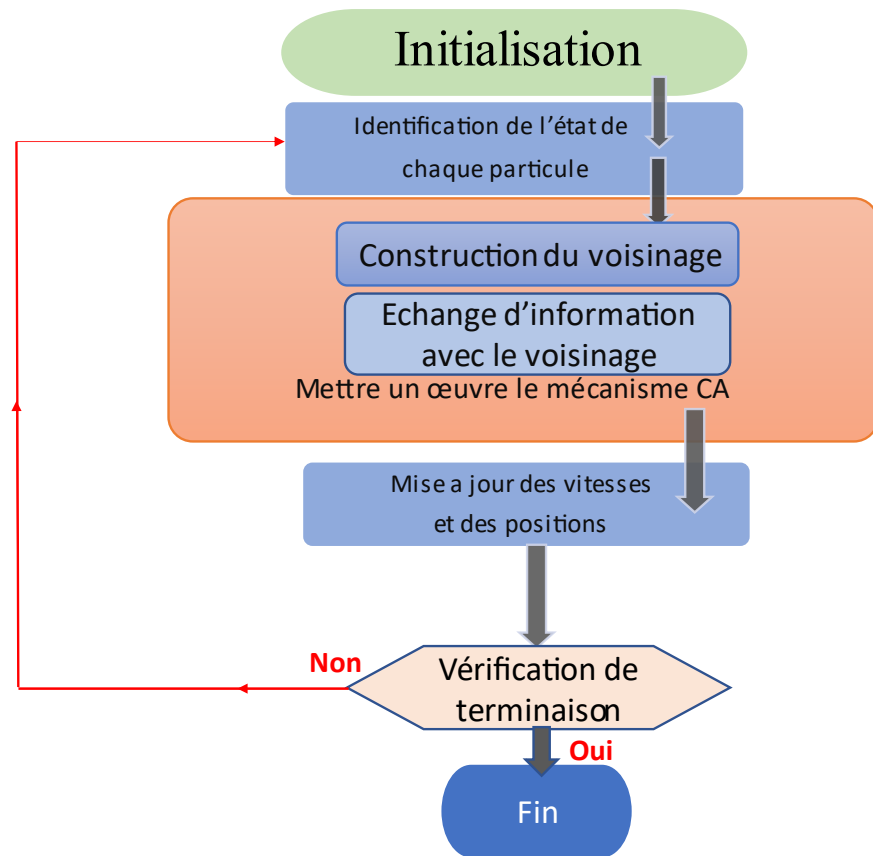


Figure II.2: Organigramme de PSO avec nouvelle fonction de voisinage [18]

II.2.2.1. Fonctionnement du PSO

Le fonctionnement du PSO peut être décrit en plusieurs étapes. Initialement, un essaim de particules est généré, et chaque particule est associée à une position et à une vitesse initiale. Les positions des particules représentent les solutions potentielles du problème d'optimisation.

À chaque itération, les particules se déplacent dans l'espace de recherche en fonction de leur propre meilleure position antérieure et de la meilleure position globale trouvée par l'essaim. Ce processus est influencé par des coefficients d'accélération qui régulent la vitesse de déplacement des particules.

Les positions des particules sont évaluées à l'aide d'une fonction objectif qui mesure la qualité de la solution. Si une meilleure solution est trouvée, à la fois au niveau individuel ou global, les positions et les vitesses des particules sont mises à jour en conséquence.

Le processus itératif se poursuit jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt prédéfini soit atteint, tel qu'un nombre maximum d'itérations ou une convergence de la solution.

II.2.2.2. Application du PSO dans le domaine pétrolier

Le domaine pétrolier présente des problèmes uniques qui nécessitent une adaptation du PSO pour obtenir des solutions optimales. Voici quelques adaptations spécifiques du PSO pour les problèmes pétroliers :

- **Modélisation des contraintes** : Dans le domaine pétrolier, il existe souvent des contraintes techniques, opérationnelles et réglementaires à prendre en compte. Le PSO peut être modifié pour incorporer ces contraintes dans la recherche de solutions, garantissant ainsi que les solutions obtenues sont réalisables.
- **Gestion des incertitudes** : Les opérations pétrolières sont soumises à des incertitudes liées aux données géologiques, aux conditions du réservoir, aux fluctuations des prix, etc. Le PSO peut être adapté pour gérer ces incertitudes en utilisant des techniques telles que l'optimisation robuste ou l'optimisation sous contraintes probabilistes.
- **Optimisation multi-objectifs** : Dans de nombreux problèmes pétroliers, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs objectifs concurrents, tels que maximiser la production, minimiser les coûts et réduire les impacts environnementaux. Le PSO peut être étendu pour traiter des problèmes d'optimisation multi-objectifs en utilisant des approches telles que les métaheuristiques basées sur le concept de domination de Pareto.

II.2.2.3. Exemples d'utilisation du PSO dans le domaine pétrolier

Le PSO a été appliqué avec succès à divers problèmes dans le domaine pétrolier. Voici quelques exemples d'utilisation du PSO :

- **Optimisation de la production pétrolière** : Le PSO peut être utilisé pour optimiser les stratégies de production, telles que la gestion des puits, la planification de l'injection d'eau ou de gaz, et l'optimisation des taux de production. Cela permet d'optimiser la production tout en minimisant les coûts opérationnels.
- **Placement optimal des puits** : Le positionnement des puits de forage dans un champ pétrolier a un impact significatif sur la production. Le PSO peut être utilisé pour

trouver les emplacements optimaux des puits afin de maximiser la récupération des hydrocarbures.

- **Conception de systèmes de transport de pétrole :** Le PSO peut être appliqué pour optimiser la conception des pipelines, des réseaux de distribution et des systèmes de transport de pétrole afin de minimiser les coûts de transport et les pertes de production.
- **Planification de la maintenance :** Le PSO peut être utilisé pour optimiser la planification de la maintenance des équipements et des installations pétrolières, en prenant en compte les contraintes de disponibilité, les coûts de maintenance et les exigences de sécurité.

Ces exemples illustrent la diversité des applications du PSO dans le domaine pétrolier et démontrent son potentiel pour résoudre des problèmes complexes et fournir des solutions optimales.

Dans la prochaine section, nous aborderons les avantages et les limites du PSO dans le domaine pétrolier, ainsi que les perspectives futures de recherche.

II.2.2.4. Avantages du PSO dans le domaine pétrolier

L'utilisation du PSO dans le domaine pétrolier présente plusieurs avantages significatifs :

- **Efficacité :** Le PSO permet de résoudre rapidement des problèmes d'optimisation complexes, ce qui est essentiel dans l'industrie pétrolière où les décisions doivent être prises rapidement pour maximiser les bénéfices.
- **Adaptabilité :** Le PSO peut être facilement adapté aux différentes contraintes et objectifs spécifiques du domaine pétrolier. Il peut être utilisé pour résoudre une large gamme de problèmes, allant de l'optimisation de la production à la conception des infrastructures.
- **Exploration globale :** Grâce à son mécanisme d'exploration collaborative, le PSO est capable de rechercher efficacement des solutions optimales, même dans des espaces de recherche complexes et vastes.

- **Robustesse** : Le PSO est robuste face aux problèmes non linéaires, non convexes et à plusieurs optima locaux, ce qui est courant dans le domaine pétrolier. Il peut trouver des solutions de haute qualité même dans des environnements difficiles.

II.2.2.5. Limites du PSO dans le domaine pétrolier

Malgré ses nombreux avantages, le PSO présente également certaines limites lorsqu'il est appliqué dans le domaine pétrolier :

- **Sensibilité aux paramètres** : Le PSO comporte plusieurs paramètres, tels que la taille de l'essaim, les coefficients d'accélération et les limites de vitesse, qui doivent être ajustés de manière appropriée. Des valeurs inappropriées de ces paramètres peuvent affecter la performance et la convergence du PSO.
- **Prise en compte des contraintes complexes** : Certaines contraintes spécifiques au domaine pétrolier peuvent être difficiles à modéliser et à intégrer dans le processus d'optimisation. Une attention particulière doit être accordée à la modélisation des contraintes techniques, environnementales et réglementaires.
- **Interprétation des résultats** : Comme tout algorithme d'optimisation, l'interprétation des résultats du PSO dans le domaine pétrolier peut être complexe. Il est important de comprendre les implications et les limites des solutions obtenues.

II.3. Conclusion

En conclusion, le PSO offre des avantages significatifs dans le domaine pétrolier, notamment son efficacité, son adaptabilité et sa capacité à explorer l'espace de recherche de manière globale. Malgré certaines limites, le PSO continue d'être une méthode d'optimisation prometteuse pour résoudre les problèmes complexes et variés de l'industrie pétrolière. Les perspectives futures de recherche visent à améliorer et à étendre l'application du PSO dans le domaine pétrolier, en intégrant des techniques avancées et en explorant de nouveaux domaines d'application.



Chapitre III : Etude du cas MDZ-790



III.1. Introduction

Dans cette dernière partie, nous présentons les résultats obtenus après avoir utilisé l'algorithme des essais de particules pour l'évaluation de la trajectoire optimale du puits dévié MDZ-790. Nous allons ensuite comparer la trajectoire expérimentale et la trajectoire simulée trouvée par la technique d'optimisation proposée. Le code proposé est écrit en langage Matlab.

III.2. Présentation de puits MDZ-790

MDZ-790 est un puits dévié de production de pétrole en développement, qui est implanté dans l'interzone du champ de Hassi Messaoud : 20B et 20A et 6. Le puits MDZ-790 sera foré à une profondeur totale de 3349m/4136m (TVD)/(MD) ; l'objectif principal de ce puits est de forer un drain horizontal d'environ 700 mètres dans le réservoir D1 pour une longueur totale de 900 mètres. La pression estimée dans le réservoir est d'environ 180-200 kg/cm².

III.3. Données générales du puits MDZ790

Ce tableau contenu les informations du puits MDZ790 :

Tableau III.1 : Données générale du puits MDZ790

Nom du puits	MDZ-790	
Champ	HASSI MESSAOUD	
Classement du puits	Cambrian Réservoir Développent	
Operateur	SONATRACH	
Entrepreneur en forage	ENTP	
Plate-forme de forage	TP-198	
Emplacement en surface	UTM (m)	X = 786 156.985
		Y = 3 511 254.980
	LSA (m)	X= 814 736.52
		Y= 128 087.20
	Latitude	31° 42' 12.186''
	Longitude	6° 1' 8.894''
Puits situé dans système de		
Élévations	Niveau du sol	170.082 m au-dessus du niveau de
	Table rotative	10.67 m au-dessus du niveau du
	Table rotative	180.752 au-dessus du niveau de la
TD du puits	TVD /MD	+/- 3349m/ +/- 4136.33 (-3305m

III.4. Localisation du puits MDZ-790

Le puits MDZ-790 se trouve dans le bloc de Hassi Messaoud. Les coordonnées d'implantation du puits MDZ-790 sont les suivantes :

U.T.M (Zone 31) sur X=786 156.985 m et sur Y=3 511 254.980 m.

- Les coordonnées géographiques du puits sont :
Latitude = 31°42'12.186", longitude = 06°1'08.894"

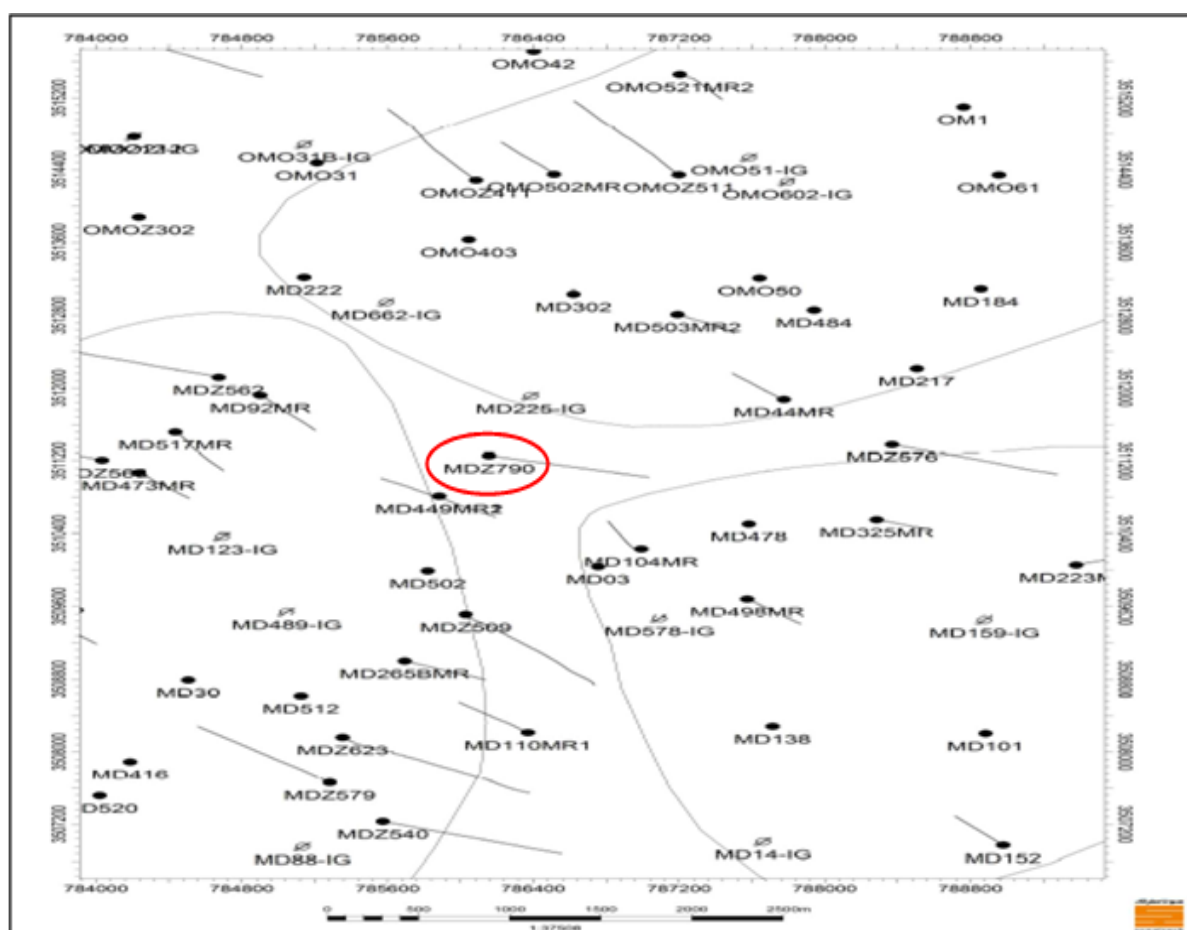


Figure III.1 : Carte de localisation du puits MDZ790

III.5. Objectifs du puits MDZ-790

- Réaliser un drain horizontal dans le réservoir D1, AZ=N105°, VS total de 900 mètres.
- Installer un chemisage de 7" à 3289m TVD et 3307,85m MD, (3m dans le réservoir DH/D2).

- Poursuivre le forage de la section de construction dans les réservoirs DH/D2, ID & D1 jusqu'au point d'atterrissage à 3342m TVD et 3436,31m MD, VS de 200m.
- Forer 700 mètres de drain horizontal dans le réservoir D1.
- Atteindre la profondeur totale à 3349m TVD, 4136,33m MD, avec un VS de 900m et une inclinaison de 89,43°.
- Réaliser une diagraphie et un test de production pour évaluer la qualité du réservoir.

III.6. Profil du puits MDZ790

Le profil du puits MDZ-790 a été proposé par les compagnies suivant :

- ❖ La première partie a été proposée par OIL SERV :

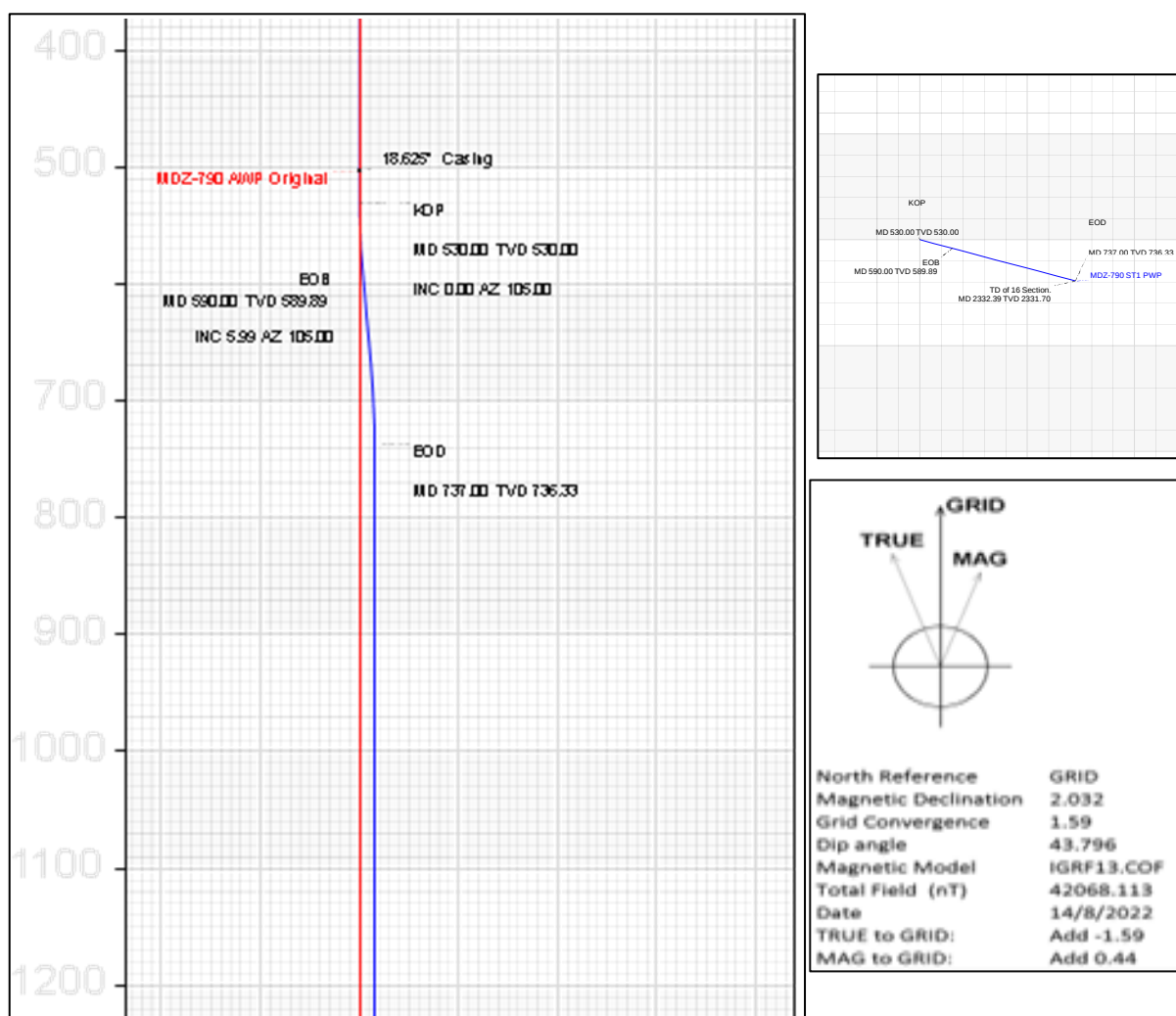


Figure III.2 : Profil du puits proposé par OILSERV

❖ La deuxième partie a été proposée par Schlumberger :

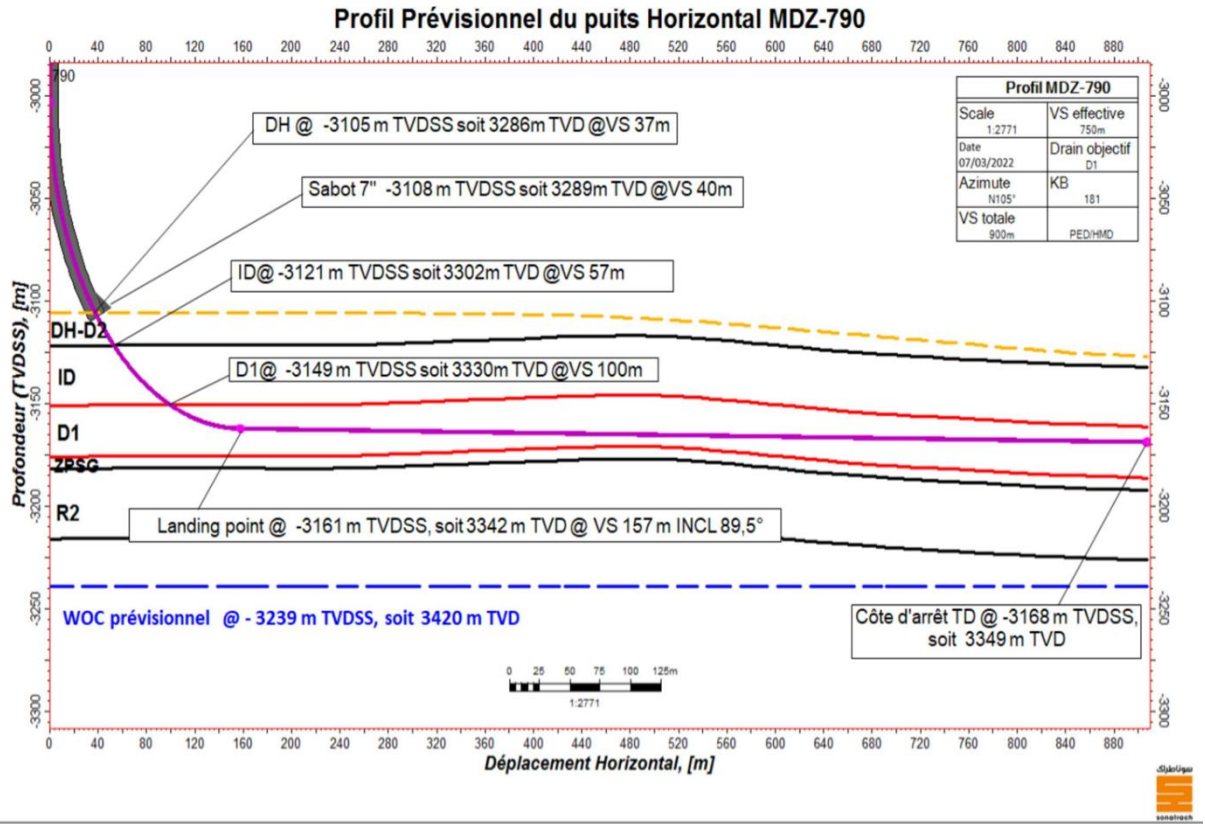


Figure III.3 : Profil du puits proposé par Schlumberger

III.7. Méthode de rayons de courbure

Pour les calculs de la trajectoire on a utilisé la méthode de rayons de courbure :

$$MD = \frac{\pi \times (TVD_2 - TVD_1) \times (a_2 - a_1)}{[180 \times (\sin a_2 - \sin a_1)]} \quad (III.1)$$

$$MD = (angle\ de\ déviation) / BUR \quad (III.2)$$

Remarque :

$$\frac{(\pi \times a^\circ)}{180 \times \sin a} \approx 1, \text{ avec : } 5 < a^\circ < 10 \quad (III.3)$$

Dans cette étude il faut calculer 7 MD :

$$MD_1 = \text{first build section} \quad (III.4)$$

$$MD_1 = TVD_{EOB} - TVD_{KOP1} \quad (III.5)$$

$$MD_1 = \frac{a_1}{BUR} \quad (\text{III. 6})$$

$$MD_2 = HOLD_1 \quad (\text{III. 7})$$

$$MD_2 = \frac{TVD_{DROP} - TVD_{EOB}}{\cos a_1} \quad (\text{III. 8})$$

$$MD_3 = DROP \quad (\text{III. 9})$$

$$MD_3 = TVD_{EOD} - TVD_{DROP} \quad (\text{III. 10})$$

$$MD_3 = \frac{a_1}{BUR_3} \quad (\text{III. 11})$$

$$MD_4 = HOLD_2 \quad (\text{III. 12})$$

$$MD_4 = TVD_{KOP2} - TVD_{EOD} \quad (\text{III. 13})$$

$$MD_5 = \text{second build section} \quad (\text{III. 14})$$

$$MD_5 = \frac{\pi \times (TVD_{EOB2} - TVD_{KOP2} \times a_2)}{(180 \times \sin a_2)} \quad (\text{III. 15})$$

$$MD_6 = \text{third build section} \quad (\text{III. 16})$$

$$MD_6 = \frac{\pi \times (TVD_{EOP3} - TVD_{EOB2}) \times (a_3 - a_2)}{180(\sin a_3 - \sin a_2)} \quad (\text{III. 17})$$

$$MD_7 = \text{fourth build section} \quad (\text{III. 18})$$

$$MD_7 = \frac{\pi \times (TVD_{EOP4} - TVD_{EOB3}) \times (a_4 - a_3)}{180(\sin a_4 - \sin a_3)} \quad (\text{III. 19})$$

$$TMD = KOP + MD_1 + MD_2 + MD_3 + MD_4 + MD_5 + MD_6 + MD_7 + 700_m \quad (\text{III. 20})$$

$$TVD = \frac{180 \times MD \times (\sin a_2 - \sin a_1)}{\pi \times (a_2 - a_1)} \quad (\text{III. 21})$$

$$TVD_t = TVD_{KOP} + TVD_{BUILD1} + TVD_{HOLD1} + TVD_{DROP} + TVD_{HOLD2} + TVD_{BUILD2} \\ + TVD_{BUILD3} + TVD_{BUILD4} + 700 \times \cos a_4 \quad (\text{III. 22})$$

$$TVD_{BUILD1} = TVD_{EOB} - TVD_{KOP1} \quad (\text{III. 23})$$

$$TVD_{HOLD1} = MD_2 \times \cos a_1 \quad (\text{III. 24})$$

$$TVD_{DROP\ section} = TVD_{EOD} - TVD_{DROP} \quad (III. 25)$$

$$TVD_{HOLD2} = TVD_{KOP2} - TVD_{EOD} \quad (III. 26)$$

$$TVD_{BUILD2} = \frac{(180 \times MD_5 \times \sin a_2)}{(\pi \times a_2)} \quad (III. 27)$$

$$TVD_{BUILD3} = \frac{180 \times MD_6 \times (\sin a_3 - \sin a_2)}{\pi(a_3 - a_2)} \quad (III. 28)$$

$$TVD_{BUILD4} = \frac{180 \times MD_7 \times (\sin a_4 - \sin a_3)}{\pi(a_4 - a_3)} \quad (III. 29)$$

■ TMD Et TVD_t proposé par les compagnies des services :

$$TMD = 4136.33_m \quad (III. 30)$$

$$TVD_t = 3349_m \quad (III. 31)$$

Le tableau III.2 présente les données de simulation du puits dévié :

Tableau III.2 : Les paramètres de forage proposé

Paramètre des forage	Valeur
TVD_{KOP1}	530 _m
TVD_{EOB1}	589.89 _m
TVD_{DROP}	669.45 _m
TVD_{EOD}	736. _m
TVD_{KOP2}	3020 _m
TVD_{EOB2} (Casing shoe 9 ^{5/8} ")	3257 _m
TVD_{EOB3} (Casing shoe 7")	3289 _m
TVD_{EOB4}	3342 _m
a_1	6°
a_2	30.5°
a_3	40.2°
a_4	89.43°
TMD	4136.33 _m
HD	700 _m
TVD_t	3349 _m

Le tableau III.3 présente les contraintes du problème imposées pour le calcul de la trajectoire :

Tableau III.3 : Les échelles des paramètres de forage

Paramètres de forage	Max valeurs	Min valeurs
TVD_{KOP1}	560 _m	510 _m
TVD_{EOB1}	599 _m	579 _m
TVD_{Drop}	680 _m	659 _m
TVD_{EOD}	740 _m	700 _m
TVD_{KOP2}	3050 _m	3000 _m
TVD_{EOB2}	3257 _m	3257 _m
TVD_{EOB3}	3289 _m	3289 _m
TVD_{EOB4}	3343 _m	3337 _m
BUR_1	0.1°/m	0.09°/m
BUR_3	0.1/m	0.09°/m
BUR_5	0.13°/m	0.1°/m
BUR_6	0.35°/m	0.2°/m
BUR_7	0.38°/m	0.35°/m
a_1	8°	6°
a_2	38°	28°
a_3	50°	35°
a_4	90°	89°

III.8. Les résultats

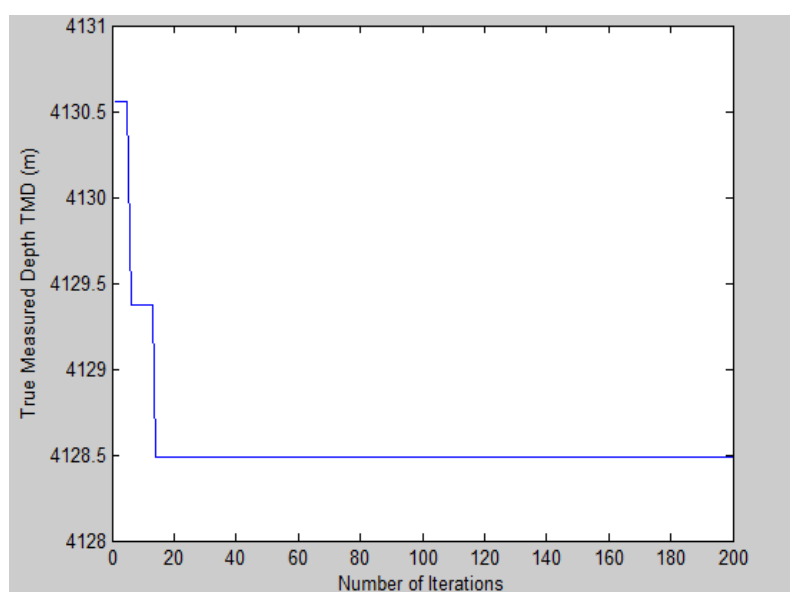


Figure III.4: TMD vs nombre d'itérations

Le figure III.4 représente le TMD final vs nombre d'itérations après l'exécution du code dans le programme de Matlab. Les meilleurs résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.4:

Tableau III.4 : Les résultats du test utilisant PSO

Paramètres de forage	Valeurs
TVD_{KOP1}	530.54 _m
TVD_{EOB1}	597.91 _m
TVD_{DROP}	659 _m
TVD_{EOD}	729.98 _m
TVD_{KOP2}	3025.83 _m
TVD_{EOB2}	3257 _m
TVD_{EOB3}	3289 _m
TVD_{EOB4}	3337 _m
BUR_1	0.0967°/m
BUR_3	0.0918°/m
BUR_5	0.12°/m
BUR_6	0.35°/m
BUR_7	0.38°/m
a_1	6.52°
a_2	29.07°
a_3	42.46°
a_4	89.01°
HD	700 _m
TMD	4128.48 _m
TVD_t	3349.02 _m

Le tableau suivant III.5 présente une comparaison entre les paramètres de forage proposés par les compagnies et les résultats du test utilisant PSO.

Tableau III.5 : Les paramètres de forage proposés et les résultats du PSO

Paramètres de forage	Paramètres de forage proposé	Résultats du test utilisant PSO
TVD_{KOP1}	530 _m	530.54 _m
TVD_{EOB1}	589.89 _m	587.91 _m
TVD_{DROP}	669.45 _m	659 _m
TVD_{EOD}	736 _m	729.98 _m
TVD_{KOP2}	3020 _m	3025.83 _m
TVD_{EOB2}	3257 _m	3257 _m
TVD_{EOB3}	3289 _m	3289 _m
TVD_{EOB4}	3342 _m	3337 _m
a_1	6°	6.52°
a_2	30.5°	29.07°
a_3	40.2°	42.46°
a_4	89.43°	89.01°
TMD	4136.33 _m	4128.48 _m
HD	700 _m	700 _m
TVD_t	3349 _m	3349.02 _m

III.9. Interprétation des résultats obtenus

D'après le **tableau III.5**, qui présente une comparaison entre les paramètres du forage dévié proposé et ceux calculés par l'algorithme PSO. Les résultats montrent une grande concordance avec une nombre d'itérations minime (Figure III.4).

L'utilisation du code PSO (Optimisation par Essaim de Particules) a donné des résultats satisfaisants pour l'atteinte des objectifs de forage de puits, en particulier en ce qui concerne le maintien de paramètres tels que la profondeur verticale totale (TVD), la profondeur verticale totale du tubage, les taux de construction et la TVD du puits. Le code PSO a permis une optimisation efficace des paramètres de forage, ce qui a conduit à une amélioration de la précision lors de la construction du puits. En exploitant la capacité du PSO à explorer et à exploiter les espaces de recherche, les opérations de forage ont bénéficié d'un meilleur contrôle de la position et de la trajectoire du tubage, réduisant ainsi les écarts et garantissant l'obtention

de la TVD souhaitée. De plus, l'utilisation du code PSO permet une gestion optimale des taux de construction, assurant ainsi la stabilité et la fiabilité du processus de forage. Dans l'ensemble, l'application du code PSO s'est avérée être un outil précieux pour la réalisation d'une construction de puits réussie, tout en respectant les objectifs liés à la TVD du tubage, aux taux de construction et à la TVD du puits.

III.10. Conclusion

En conclusion, l'algorithme Particle Swarm Optimization (PSO) s'est avéré être un outil hautement efficace pour optimiser les trajectoires de puits en prenant en compte diverses contraintes. Grâce à l'utilisation de PSO, nous avons identifié la trajectoire optimale du puits qui a minimisé le coût global de forage tout en atteignant la cible de réservoir avec une grande précision. Cela démontre le potentiel de PSO en tant qu'outil précieux pour l'industrie pétrolière et gazière, en particulier dans le domaine de la planification de puits et de l'optimisation de trajectoire. Dans l'ensemble, nous pouvons affirmer avec confiance que l'algorithme PSO est un bon code qui a réussi à atteindre notre objectif désiré.



Conclusion



Conclusion

L'optimisation de la trajectoire du puits dévié revêt une importance cruciale dans l'industrie pétrolière et gazière. Grâce aux avancées technologiques et aux méthodes d'optimisation de pointe, il est désormais possible d'améliorer significativement l'efficacité et la productivité des opérations de forage.

Cette étude a démontré que l'utilisation de la méthode PSO pour optimiser la trajectoire des puits déviés présente de nombreux avantages et perspectives prometteuses.

L'optimisation de la trajectoire des puits déviés par PSO permet d'améliorer la planification et l'exécution du forage directionnel. En utilisant la simulation du comportement d'un essaim de particules, la méthode PSO permet de trouver rapidement et efficacement la trajectoire optimale qui répond aux contraintes spécifiques du projet de forage. Cette approche offre la possibilité d'optimiser la production des ressources souterraines, d'améliorer la performance du forage et de réduire les coûts associés aux opérations.

Le mémoire a également souligné l'importance de la recherche continue dans le domaine de l'optimisation de la trajectoire des puits déviés. Il existe encore des possibilités d'amélioration et de développement de nouvelles techniques et méthodes d'optimisation pour maximiser les résultats.

En fin, ce travail a confirmé que l'optimisation de la trajectoire des puits déviés par PSO est une approche prometteuse pour l'industrie du forage. Les résultats obtenus fournissent une base solide pour une meilleure planification, exécution et performance du forage directionnel. Cette étude contribue ainsi à l'avancement de la recherche dans le domaine de l'optimisation des opérations de forage et à l'amélioration globale de l'industrie pétrolière et gazière.



Bibliographie



- [1] - Mémoire de fin d'étude/ Djamil Rezki / Système intelligent d'aide à la décision pour le pilotage d'un processus de forage pétrolier, 2015/2016
- [2] - Abdoulaye AMADOU, 'Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolière', Thèse Doctorat, L'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 31 mars 2010.
- [3] - Mémoire de fin d'études Réalisé par :(OUGHANEM Rezki -MERZOUK Houda) : « Étude des paramètres optimaux pour un bon nettoyage lors du forage d'un medium radius dans la région de haoud el-hamra a Hassi Messaoud ».2010/2009.
- [4] - Livre : « Directionnel Drilling and Déviation Control Technology » ; Auteur : Zhikun Hou Éditeur : Gulf Professional Publishing Année de publication : 2018.
- [5] - Siddiqui, M. A., & Abdul Wahab, A. K. (2016). "Directional Drilling Technology: Advantages, Challenges, and Future Prospects". Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 6(4), 741-751.
- [6] - PDF forage dévié ingénierie et méthodes réaliser par Jean-Paul Szezuka en 2005.
- [7] - Thèse doctorat : Baba Hamed Samira « transport des déblais dans les forages pétroliers cas des forages inclinés » ; université Mouhamed Boudiaf Oran.
- [8] - Groupement « INSTITUT ALGÉRIEN DU PÉTROLE, Corporate university » IAP-CU, Engineering School of Boumerdas Upstream Training and Research.
- [9] - www.drillingcouse.com/ Viste le (10/ 05/ 2023) a l'heur 22:00 / (Directional drilling applications)/ drilling course.
- [10] - Directional Drilling-Riadh AHMADI-Master-pro-PDF
- [11] - G.A. Graham, R.J.Cox, J.A.Stadlwieser , R.Stinn / Horizontal Re-entry Drilling with coiled tubing : a viable Technology/ for (journal of Canadian petroleum Technology)/ papier paper number. PETSOC-99-10-02.
- [12] - Houssein Assali, « Optimisation de la trajectoire de forage de puits déviés verticaux pour l'exploitation » ; (2015)
- [13] - DADDOU.M et SLIMANI.A. « Formation Industrie d'ingénieurs en forage ». Modules M1. Sonatrach division forage, mars 2004.

- [14] – « Etude des paramètres influençant la forabilité des puits horizontaux » BELLEK Housseyn, BEKHTI Abderrahmane université kasdi merbah Ouargla année 2017/2018.
- [15] - CHEKOUFI Said, « Forage directionnel et horizontal : La Réalisation d'une Re-rntry Short Radius en Slim hole Cas : Puits OMJZ-441 à Hassi Messaoud » ; université kasdi Merbah Ouargla, (2018).
- [16] - OURAK Walid, SEMMOUHI Fares, DEHIMI Dia Eddine, « Technique de forage horizontal et optimisation de la trajectoire par un trou pilote. Application sur le puits MAMS »1'université kasdi merbah Ouargla 2016/2017.
- [17] – « Etude des techniques de forage multilatéral : conception et évaluation des performances » ; par Amine Bahi, Mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2013.
- [18] – Article “Metaheuristic Algorithm for Wellbore Trajectory Optimization “, Authorized licensed use limited to: University of Exeter. Downloaded on June 29,2020 at14:14:28 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.
- [19] - Positive Dis placement Motors (PDM) [catalogue], MICON Company, Nienhagen• Germany
- [20] - Abdelli Djaoued - Assas Sahaoui ; « Etude évaluative entre deux moteurs de fond turbine et PDM(HP) » ; Université kasdi merbah Ouargla (2018/2019)
- [21] - Groupement 《 INSTITUT ALGÉRIEN DU PÉTROLE, Corporate university 》 IAP-CU, Engineering School of Boumerdas Upstream Training and Research.
- [22] – Shehab, M., Khader, A. T., Laouchedi, M. (2018). “A hybrid method based on cuckoo search algorithm for global optimization problems”. Journal of Information and Communication Technology, 17 / 03 July 2018.
- [23] - Nur Azia Azwani binti Ismail, "Optimisation par essaim de particules (PSO) pour le problème de routage CNC", Licence en génie électrique (électronique) à la Faculté de génie électrique et électronique.
- [24] – Document SONATRACH “Fiche Puits MDZ-790 version 1 – signé”

Bibliographie

[25] – Document OILSERV “MDZ-790 ST1 Drilling Proposal Rev01”

[26] – Document Schlumberger “MDZ-790 Technical Proposal Rev2.0”