

No Ordre...../FHC/UMBB/2024

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique



Université M'Hamed Bougara-Boumerdes  
Faculté des Hydrocarbure et de la Chimie  
Département Gisements Miniers et Pétroliers



---

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**en vue de l'obtention du Diplôme**  
**MASTER**

Présenté par :

**LARIBI BILAL**

**LADGHEM CHIKOUCHE Oussama**

**Filière : Hydrocarbures**

**Spécialité : Génie pétrolier – forage des puits d'hydrocarbures**

---

**Etude et analyse de la méthode RSS dans le forage horizontal phase**  
**6"**

**Cas : Puits TNK 305 et puits TNK 304**

---

Devant le jury composé :

|                     |            |      |           |
|---------------------|------------|------|-----------|
| BEN YOUNES Khaled   | Professeur | UMBB | Président |
| MELLAK Abderrahmane | Professeur | UMBB | Encadrant |
| BELIMANE Zakarya    | MA(A)      | UMBB | Examineur |

Année universitaire : 2023/2024

## **Résumé :**

Ce mémoire explore le forage horizontal, une technique innovante et essentielle dans l'industrie pétrolière, en mettant particulièrement l'accent sur le système Rotary Steerable System (RSS). Le forage horizontal présente des avantages significatifs par rapport au forage vertical, notamment en maximisant le contact avec les zones productrices et en améliorant la récupération des hydrocarbures. Dans la première partie, nous introduisons les principes généraux du forage horizontal, en définissant la technique, en décrivant les profils de puits, et en classifiant les différents types de puits horizontaux. Nous discutons des avantages et des inconvénients, comme les coûts additionnels et les risques opérationnels, ainsi que les bénéfices tels qu'une meilleure gestion des réservoirs et une efficacité accrue. La deuxième partie se concentre sur les méthodes de réalisation d'un drain horizontal, en détaillant des techniques spécifiques telles que le forage de navigation. Nous examinons également les équipements utilisés, en soulignant les innovations technologiques comme le système RSS, qui permet un contrôle précis et en temps réel de la trajectoire du forage. Ensuite, nous analysons deux études de cas : les puits TNK 305 et TNK 304. En utilisant le langage de programmation Python, nous créons des graphes de taux de pénétration (ROP) en fonction de la profondeur pour comparer les performances des puits forés avec le système RSS. Cette analyse permet d'identifier les paramètres clés influençant l'efficacité du forage et d'évaluer les performances du système RSS dans différents contextes géologiques. De plus, un modèle prédictif du ROP a été développé en utilisant des techniques d'apprentissage automatique, telles que la régression, les réseaux de neurones artificiels et la méthode Random Forest, afin d'améliorer encore la précision et l'efficacité des opérations de forage. Enfin, nous concluons avec des recommandations pour optimiser l'utilisation du système RSS et améliorer les performances globales du forage horizontal. Ce mémoire contribue à l'avancement des techniques de forage et à une exploitation plus efficace des ressources en hydrocarbures. En somme, ce travail met en lumière les innovations et les meilleures pratiques dans le forage horizontal, offrant des perspectives prometteuses pour l'industrie pétrolière.

## **Summary :**

This thesis explores horizontal drilling, an innovative and essential technique in the oil industry, with a particular focus on the Rotary Steerable System (RSS). Horizontal drilling offers significant advantages over vertical drilling, notably by maximizing contact with productive zones and improving hydrocarbon recovery. In the first part, we introduce the general principles of horizontal drilling, defining the technique, describing well profiles, and classifying different types of horizontal wells. We discuss the advantages and disadvantages, such as additional costs and operational risks, as well as benefits like better reservoir management and increased efficiency. The second part focuses on the methods for creating a horizontal drain, detailing specific techniques such as navigational drilling. We also examine the equipment used, highlighting technological innovations like the RSS, which allows precise, real-time control of the drilling trajectory. Next, we analyze two case studies: wells TNK 305 and TNK 304. Using the Python programming language, we create rate of penetration (ROP) graphs based on depth to compare the performance of wells drilled with the RSS. This analysis identifies key parameters influencing drilling efficiency and evaluates the performance of the RSS in different geological contexts. Furthermore, a predictive model for ROP was developed using machine learning techniques such as regression, artificial neural networks, and the Random Forest method to further improve the accuracy and efficiency of drilling operations. Finally, we conclude with recommendations to optimize the use of the RSS and improve the overall performance of horizontal drilling. This thesis contributes to the advancement of drilling techniques and more efficient exploitation of hydrocarbon resources. In summary, this work highlights innovations and best practices in horizontal drilling, offering promising prospects for the oil industry.

## المخلص :

يستكشف هذا البحث الحفر الأفقي، وهي تقنية مبتكرة وأساسية في صناعة النفط، مع التركيز بشكل خاص يقدم الحفر الأفقي مزايا كبيرة مقارنة بالحفر العمودي، بما في ذلك (RSS) على نظام التوجيه الدوار زيادة التماس مع المناطق المنتجة وتحسين استرداد الهيدروكربونات. في الجزء الأول، نقدم المبادئ العامة للحفر الأفقي، مع تعريف التقنية ووصف ملفات الآبار وتصنيف الأنواع المختلفة للآبار الأفقية. نناقش المزايا والعيوب، مثل التكاليف الإضافية والمخاطر التشغيلية، بالإضافة إلى الفوائد مثل تحسين إدارة المكامن وزيادة الكفاءة. يركز الجزء الثاني على طرق تنفيذ بئر أفقي، مع تفصيل تقنيات محددة مثل الحفر الملاحى. نستعرض أيضًا المعدات المستخدمة، مع تسليط الضوء على الابتكارات التكنولوجية مثل نظام: الذي يسمح بالتحكم الدقيق والفوري في مسار الحفر. بعد ذلك، نحلل دراستي حالة (RSS) التوجيه الدوار باستخدام لغة البرمجة بايثون، نقوم بإنشاء رسوم بيانية لمعدلات TNK 304 والبئر TNK 305 البئر نتيج هذه (RSS) حسب العمق لمقارنة أداء الآبار المحفورة بنظام التوجيه الدوار (ROP) الاختراق التحليلات تحديد العوامل الرئيسية التي تؤثر على كفاءة الحفر وتقييم أداء النظام في سياقات جيولوجية مختلفة. بالإضافة إلى ذلك، تم تطوير نموذج تنبؤي لمعدل الاختراق باستخدام تقنيات التعلم الآلي، مثل الانحدار والشبكات العصبية الاصطناعية وطريقة الغابة العشوائية، بهدف تحسين دقة وكفاءة عمليات وتحسين الأداء الكلي (RSS) الحفر. في النهاية، نقدم توصيات لتحسين استخدام نظام التوجيه الدوار للحفر الأفقي. يساهم هذا البحث في تقدم تقنيات الحفر واستغلال أكثر كفاءة لموارد الهيدروكربونات. بشكل عام، يسلط هذا العمل الضوء على الابتكارات وأفضل الممارسات في الحفر الأفقي، مما يقدم آفاقاً واعدة لصناعة النفط.

# *Dédicaces*

À mes parents,

Pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours. Vous avez toujours cru en moi et m'avez donné la force de poursuivre mes rêves. Merci de tout cœur.

À mes amis,

Pour leur amitié sincère et leur soutien durant les moments difficiles. Votre présence et vos encouragements ont été une source de motivation continue. Merci pour les moments de partage, de rire et de soutien.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire,

Pour leur aide, leurs conseils et leur encouragement. Votre soutien a été inestimable et a joué un rôle crucial dans l'achèvement de ce travail.

**BILAL**

## *Remerciements*

Nous remercions **DIEU**, Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers

**Monsieur le professeur ABDERRAHMANE MELLAK**

pour sa disponibilité et ses conseils avisés. Ses précieuses contributions ont grandement contribué à l'achèvement de ce travail.

Nos remerciements vont également à toute l'équipe pédagogique du département, qui nous a offert une formation de qualité. Leurs enseignements et leur encadrement nous ont été d'une grande importance tout au long de ce parcours.

Nous souhaitons adresser nos vifs remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nos remerciements vont également à nos familles et à nos amis, dont le soutien indéfectible nous a été d'une aide précieuse tout au long de cette année. Leur présence et leurs encouragements nous ont motivés à donner le meilleur de nous-mêmes.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin, dans la réalisation de ce mémoire.

**BILAL ET OUSSAMA**

# SOMMAIRE

|     |  |    |
|-----|--|----|
| I.  | INTRODUCTION :   | 1  |
| II. | CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE FORAGE HORIZONTAL.....           | 4  |
| A.  | INTRODUCTION :   | 4  |
| B.  | DEFINITION D'UN DRAIN HORIZONTAL :                               | 4  |
| C.  | PROFILE D'UN PUIT HORIZONTAL :                                   | 4  |
| 1.  | <i>Préparation de profil théorique :</i>                         | 4  |
| a)  | Le déplacement horizontal requis au point d'entrée :             | 4  |
| b)  | La longueur du drain horizontal :                                | 4  |
| c)  | Capacité à permettre des gradients importants :                  | 4  |
| d)  | Les pertes :   | 5  |
| e)  | La nature de réservoir :   | 5  |
| 2.  | <i>Le profil théorique :</i>                                     | 5  |
| a)  | Le plan vertical :   | 5  |
| b)  | Le plan horizontal :   | 6  |
|     | La tête du puits   | 7  |
| D.  | CLASSIFICATION DES PUIITS HORIZONTAUX :                          | 9  |
| 1.  | <i>Ultra short radius :</i>                                      | 9  |
| a)  | Avantage :   | 9  |
| b)  | Inconvénients  | 9  |
| 2.  | <i>Shorts radius :</i>   | 9  |
| a)  | Avantages:   | 10 |
| b)  | Inconvénients :  | 10 |
| 3.  | <i>Médiums radius :</i>  | 10 |
| a)  | Avantage :   | 10 |
| b)  | Inconvénient :   | 11 |
| 4.  | <i>Long radius :</i>   | 11 |
| 5.  | <i>Les puits multilatéraux :</i>                                 | 11 |
| E.  | AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU FORAGE HORIZONTAL :                | 15 |
| 1.  | <i>Avantages du forage horizontal :</i>                          | 15 |
| a)  | Réservoirs fracturés   | 15 |
| b)  | Réservoirs multi-couches :                                       | 15 |
| c)  | Réservoirs à faible épaisseur :                                  | 16 |
| d)  | Réservoirs à basse perméabilité :                                | 16 |
| e)  | Formations non consolidées - Contrôle des sables :               | 16 |
| f)  | Conning de gaz et d'eau :  | 17 |
| g)  | Réservoirs d'huile lourde :                                      | 17 |
| 2.  | <i>Inconvénients du forage horizontal :</i>                      | 17 |
| a)  | Coûts additionnels :   | 17 |
| b)  | Risques opératoires :  | 18 |
| II. | CHAPITRE 2 : METHODES DE REALISATION D'UN DRAIN HORIZONTAL ..... | 20 |
| A.  | INTRODUCTION :   | 20 |
| B.  | APPLICATION DES PUIITS HORIZONTAUX :                             | 20 |
| 1.  | <i>Réservoir fracturé :</i>                                      | 20 |
| 2.  | <i>Réservoirs multicouches :</i>                                 | 20 |
| 3.  | <i>Couches minces :</i>  | 20 |

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| 4.          | <i>Formation compacte</i> :.....   | 20        |
| 5.          | <i>Réservoir à basse perméabilité</i> :.....   | 20        |
| 6.          | <i>Réservoir à forte perméabilité</i> :.....   | 21        |
| 7.          | <i>La production non consolidée (contrôle de sable)</i> :.....                                   | 21        |
| 8.          | <i>Conning de gaz et de l'eau</i> :.....   | 21        |
| 9.          | <i>Récupération assistée</i> :.....  | 21        |
| C.          | LES METHODES DE REALISATION D'UN DRAIN HORIZONTAL :.....   | 21        |
| 1.          | <i>Trou pilote</i> :.....  | 21        |
| 2.          | <i>Forage de navigation (steerable drilling)</i> :.....  | 23        |
| a)          | <i>Géosteering</i> :.....  | 24        |
| 3.          | <i>Le Système Rotary Steerable (RSS)</i> :.....  | 26        |
| <b>III.</b> | <b>CHAPITRE 3 : EQUIPEMENTS DE FORAGE HORIZONTAL</b> .....                                       | <b>30</b> |
| 1.          | <i>Introduction</i> :.....   | 30        |
| 2.          | <i>Équipements de forage (Équipements standard de forage)</i> :.....                             | 30        |
| a)          | <i>Les mass-tiges</i> :.....   | 30        |
| b)          | <i>Tiges de forage</i> :.....  | 31        |
| c)          | <i>Coulisses de forage</i> :.....  | 32        |
| d)          | <i>Elargisseurs</i> :.....   | 32        |
| e)          | <i>Aléseurs à rouleaux</i> :.....  | 32        |
| f)          | <i>Amortisseurs de vibrations</i> .....  | 33        |
| g)          | <i>Raccords</i> :.....   | 34        |
| h)          | <i>Aléseurs de key-seat (key-seat wipers)</i> .....  | 34        |
| 3.          | <i>Équipements spécifiques au forage horizontal</i> :.....                                       | 35        |
| a)          | <i>Moteurs de fond</i> :.....  | 35        |
| b)          | <i>Stabilisateurs</i> :.....   | 35        |
| c)          | <i>Équipements amagnétiques</i> :.....   | 36        |
| d)          | <i>Raccords d'orientation</i> :.....   | 37        |
| e)          | <i>Raccords coudés</i> :.....  | 37        |
| f)          | <i>Outils de déflexion</i> :.....  | 38        |
| 4.          | <i>Équipements de mesure</i> :.....  | 38        |
| a)          | <i>Outils de mesure en temps différé</i> :.....  | 38        |
| b)          | <i>Outils de mesure en temps réel</i> :.....   | 39        |
| <b>IV.</b>  | <b>CHAPITRE 4: GENERALITES SUR LE SYSTEME RSS ET LOCALISATION DES DEUX Puits D'ETUDE</b> : ..... | <b>41</b> |
| A.          | SYSTEME RSS :.....   | 41        |
| 1.          | <i>Le principe de déviation du RSS</i> :.....  | 41        |
| 2.          | <i>Les avantages de système RSS</i> :.....   | 42        |
| 3.          | <i>Inconvénients de système RSS</i> :.....   | 42        |
| 4.          | <i>La composition de BHA</i> :.....  | 43        |
| a)          | <i>Masse-tiges</i> :.....  | 43        |
| b)          | <i>Tiges de forage</i> :.....  | 43        |
| c)          | <i>Tige lourd HWDP</i> :.....  | 43        |
| d)          | <i>Coulisses de forage</i> :.....  | 44        |
| e)          | <i>Stabilisateurs</i> :.....   | 45        |
| f)          | <i>Les outils de forage</i> :.....   | 45        |
| B.          | LOCALISATION DES DEUX Puits ET GEOLOGIE DE LA REGION .....                                       | 46        |
| 1.          | <i>Puits TNK 305</i> :.....  | 46        |
| 2.          | <i>Puits TNK 304</i> :.....  | 50        |
| <b>V.</b>   | <b>CHAPITRE 5: GENERALITES SUR LES DEUX Puits D'ETUDE</b> .....                                  | <b>53</b> |
| A.          | OBJECTIF DES DEUX Puits :.....   | 53        |
| 1.          | <i>Puits TNK 305</i> :.....  | 53        |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 2. | <i>Puits TNK304</i> :                                    | 54 |
| B. | MOTEURS RSS UTILISE DANS LE Puits TNK 304 :              | 55 |
| 1. | <i>Puits TNK 304</i> :                                   | 55 |
| a) | Présentation et caractéristique de moteur RSS utilise :  | 56 |
| C. | BHA DES DEUX Puits :                                     | 60 |
| 1. | <i>TNK 305</i> :   | 60 |
| 2. | <i>TNK 304</i> :   | 61 |
| D. | PROBLEMES MAJEURS RENCONTRES DANS LA PHASE 6'' :         | 62 |
| 1. | <i>Puits TNK 305</i> :                                   | 62 |
| 2. | <i>Puits TNK 304</i> :                                   | 63 |
| E. | ANALYSE COMPARATIVE DES Puits TNK 305 ET TNK 304 :       | 64 |
| F. | PROCEDURES DE FORAGE SUIVIES POUR EVITER LES PROBLEMES : | 67 |
| 1. | <i>La procédure suivie dans TNK 305</i> :                | 67 |
| 2. | <i>La procédure suivie dans TNK 305</i> :                | 67 |

## VI. CHAPITRE 6 : ETUDE DE L'AVANCEMENT ROP DANS LA PHASE 6'' (TNK 305 TNK304) EN UTILISANT LE LANGAGE DE PROGRAMMATION PYTHON : ..... 70

|    |  |    |
|----|--|----|
| A. | INTRODUCTION :   | 70 |
| B. | UTILISATION DE PYTHON POUR L'ANALYSE ET LA VISUALISATION DES DONNEES DE FORAGE :             | 70 |
| C. | REALISATION DES GRAPHES ROP EN FONCTION DE LA PROFONDEUR MD A L'AIDE DE PYTHON :             | 71 |
| 1. | <i>TNK 305 drilling data phase 6''</i> :   | 71 |
| a) | Le code python proposée :  | 72 |
| b) | Explication brève de code :  | 72 |
| c) | Les graphes obtenus :  | 73 |
| 2. | <i>TNK 304 drilling data phase 6''</i> :   | 74 |
| a) | Le code de pythone proposée :  | 75 |
| b) | Les graphes obtenus :  | 76 |
| D. | ANALYSE DES GRAPHES :  | 77 |
| 1. | <i>Les paramètres de forage utilisé dans les deux puits en phase 6'' sont les suivants</i> : | 77 |
| 2. | <i>La lithologie traversée</i> :   | 77 |
| a) | Géologie des Puits TNK 305.....  | 77 |
| b) | Géologie des Puits TNK 304.....  | 78 |
| c) | Similitudes :  | 78 |
| d) | Déduction :  | 78 |
| 3. | <i>Explication et analyse des graphes</i> :  | 79 |
| a) | TNK 305 :  | 79 |
| b) | Analyse Globale des graphes du puits TNK 305: .....  | 79 |
| c) | TNK 304 :  | 80 |
| d) | Analyse Globale des graphes du puit TNK 304 : .....  | 80 |
| e) | Comparaison et analyse des graphes des deux le Puits (TNK 305, TNK 304) :                    | 81 |
| E. | . CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS :  | 85 |
| a) | Conclusion :   | 85 |
| b) | Recommandations :  | 85 |

## VII. CHPITRE 7 :DEVELOPPEMENT DE MODEL POUR PREDIRE ROP EN UTILISANT DES TECHNIQUES D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE : ..... 87

|    |   |    |
|----|---|----|
| A. | PRESENTATION DES ALGORITHMES UTILISES POUR MODELISER LE ROP:..... | 87 |
| 1. | <i>Modèles empiriques basés sur des équations physiques</i> ..... | 87 |
| 2. | <i>Modèles basés sur la régression</i> .....                      | 87 |
| 3. | <i>Modèles statistiques avancés</i> .....                         | 88 |
| 4. | <i>Réseaux de neurones artificiels (ANN)</i> .....                | 88 |
| 5. | <i>Méthodes d'optimisation évolutives</i> .....                   | 88 |
| B. | SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE:.....                                    | 88 |



|  |  |            |
|--|--|------------|
| C.   | METHODOLOGIE DE TRAVAIL :.....   | 90         |
| 1.   | <i>Présentation des Méthodes Utilisées</i> :.....                              | 90         |
| 2.   | <i>Données Collectées</i> :.....   | 90         |
| D.   | ALGORITHMES UTILISÉS POUR MODÉLISER LE ROP:.....                               | 91         |
| 1.   | <i>Le Random Forest Regression</i> :.....                                      | 91         |
| a)   | Étapes impliquées dans l'algorithme Random Forest .....                        | 92         |
| 2.   | <i>Application de Random Forest pour la prédiction du ROP</i> :.....           | 93         |
| a)   | Le code propose : .....  | 94         |
| b)   | Explication de code : .....  | 95         |
| 3.   | <i>Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)</i> .....                             | 98         |
| a)   | Structure des Réseaux de Neurones .....  | 98         |
| 4.   | <i>Application le RNA pour la prediction de ROP</i> : .....                    | 101        |
| a)   | Le code propose : .....  | 101        |
| b)   | Explication de code: .....   | 102        |
| E.   | DESCRIPTIONS DES DONNEES:.....   | 105        |
| 1.   | <i>Carte de corrélation</i> :.....   | 105        |
| a)   | Analyse des Corrélations avec le ROP .....                                     | 106        |
| F.   | LES RESULTATS DE RNN ET RFR :.....   | 108        |
| 1.   | <i>Random Forest Régression</i> : .....  | 108        |
| a)   | Score d'entraînement .....   | 108        |
| b)   | Score de test .....  | 109        |
| 2.   | <i>RNN (MLP Regressor)</i> .....   | 109        |
| a)   | Score d'entraînement .....   | 109        |
| b)   | Score de test .....  | 109        |
| 3.   | <i>Comparaison et conclusion</i> .....   | 110        |
| 4.   | <i>Interprétation des résultats de la régression par Random Forest</i> : ..... | 111        |
| a)   | Scores de régression .....   | 111        |
| b)   | Erreurs de prédiction .....  | 111        |
| c)   | Analyse générale.....  | 111        |
| d)   | Visualisation graphique des prédictions.....                                   | 111        |
| G.   | CONCLUSION :.....  | 112        |
| <br>   |  |            |
| <b>VIII. CHAPITRE 8 : VISUALISATION EN TROIS DEMONTIONS 3D DE LA</b> |  |            |
| <b>TRAJECTOIRE DE PUIITS TNK 304 :.....</b>                          |  | <b>115</b> |
| A.   | INTRODUCTION :.....  | 115        |
| B.   | LES DONNEES DE PUIITS :.....   | 115        |
| C.   | CODE PYTHON POUR OBTENIR LA 3D :.....  | 117        |
| D.   | LE PROFILE 3D OBTENU : .....   | 118        |
| E.   | ANALYSE DES RÉSULTATS: .....   | 120        |
| F.   | PROPOSITION D'UNE TRAJECTOIRE OPTIMISEE : .....                                | 121        |
| <br>   |  |            |
| <b>IX. CONCLUSION GENERALE :.....</b>                                |  | <b>124</b> |
| <br>   |  |            |
| <b>X. BIBLIOGRAPHIES : .....</b>                                     |  | <b>126</b> |

## Table des figures :

|             |   |                                    |
|-------------|---|------------------------------------|
| FIGURE 1:   | CHEMIN TYPIQUE D'UN PUIITS HORIZONTAL .....                                     | 6                                  |
| FIGURE 2:   | CHEMIN DU PLAN HORIZONTAL D'UN PUIITS HORIZONTAL .....                          | 7                                  |
| FIGURE 3:   | PROFIL D'UN PUIITS HORIZONTAL .....   | 8                                  |
| FIGURE 4:   | TYPES DES PUIITS .....  | 14                                 |
| FIGURE 5:   | RESERVOIRS FRACTURES .....  | 15                                 |
| FIGURE 6:   | RESERVOIRS MULTI-COUCHES .....  | 16                                 |
| FIGURE 7:   | WATER CONNING .....   | 17                                 |
| FIGURE 8:   | TROU PILOTE POUR L'ATERRISSAGE DANS LES PUIITS HORIZONTAUX .....                | 23                                 |
| FIGURE 9:   | MODES DE FORAGE (A. SLIDING, B. ROTARY) .....                                   | 24                                 |
| FIGURE 10:  | TYPE DES MOTEURS A. SINGLE B. DOUBLE C.DTU .....                                | 25                                 |
| FIGURE 11:  | MASSE TIGE LISSES ET SPIRALES .....   | 30                                 |
| FIGURE 12:  | MASSE TIGES CARRES .....  | 30                                 |
| FIGURE 13:  | MASSE-TIGES ASYMETRIQUES .....  | 31                                 |
| FIGURE 14:  | TIGES (STANDARDS, LOURDES, COMPRESSION) .....                                   | 31                                 |
| FIGURE 15:  | TIGES LOURDES SPIRALEE .....  | 31                                 |
| FIGURE 16:  | COULISSE MECANIQUE      COULISSE HYDRAULIQUE .....                              | 32                                 |
| FIGURE 17:  | ELARGISSEURS A BRAS FIXES      ELARGISSEURS A BRAS MOBILES .....                | 32                                 |
| FIGURE 18:  | ALESEURS A ROULEAUX .....   | 33                                 |
| FIGURE 19:  | TYPES DES RACCORDS .....  | 34                                 |
| FIGURE 20:  | DIFFERENTS TYPES DE STABILISATEURS .....  | 35                                 |
| FIGURE 21:  | INTERFERENCE MAGNETIQUE .....   | 36                                 |
| FIGURE 22:  | RACCORD COUDÉ INCORPORÉ ("BENT-HOUSING") .....                                  | 37                                 |
| FIGURE 23:  | WHIPSTOCK .....   | 38                                 |
| FIGURE 24:  | A-PUSH THE BIT. B-PUSH THE BIT C-POINT THE BIT .....                            | <b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b> |
| FIGURE 25:  | QUALITE DES PAROIS EN COURS DE DEVIATION PAR RSS (A. PUSH THE BIT, POINT) ..... | 43                                 |
| FIGURE 26:  | MASSE TIGE SPIRALEE .....   | 43                                 |
| FIGURE 27:  | TIGE LOURD .....  | 44                                 |
| FIGURE 28:  | COULISSES DE FORAGE .....   | 44                                 |
| FIGURE 29:  | STABILISATEURS .....  | 45                                 |
| FIGURE 30:  | GEOGRAPHIC SITUATION OF FEIDJ HASSI MOUINA .....                                | 47                                 |
| FIGURE 31:  | PROJECTION SISMIQUE .....   | 48                                 |
| FIGURE 32:  | ARCHITECTURE GRAPHIC TNK305 .....   | 49                                 |
| FIGURE 33:  | ARCHITECTURE GRAPHIC TNK305 .....   | 51                                 |
| FIGURE 34:  | MOTEUR RSS UTILISE AUTO TRAK .....  | 58                                 |
| FIGURE 35:  | COMPOSANTS MOTEUR AUTO TRAK .....   | 59                                 |
| FIGURE 36:  | GRAPHES REPRÉSENTANT KOP PAR RAPPORT A LA PROFONDEUR .....                      | 73                                 |
| FIGURE 37:  | GRAPHES REPRESENTANT KOP .....  | 76                                 |
| FIGURE 38:  | LE GRAPHE DE ROP DES DEUX PUIITS .....  | 82                                 |
| FIGURE 39:  | STRUCTURE ARBORESCENTE .....  | 92                                 |
| FIGURE 40 : | LA STRUCTURE DE RNA .....   | 99                                 |
| FIGURE 41:  | CARTE DE CORRELATION .....  | 106                                |
| FIGURE 42:  | LES RESULTATS OBTENUS UTILISANT LE RANDOM FOREST .....                          | 109                                |
| FIGURE 43:  | LES RESULTATS OBTENUS UTILISANT LE RNN .....                                    | 110                                |
| FIGURE 44:  | COMPARAISON DU ROP REEL ET DU ROP PREDIT EN FONCTION DE LA PROFONDEUR .....     | 112                                |
| FIGURE 45 : | WELL PROFILE 3D TNK 304 .....   | 118                                |
| FIGURE 46 : | VARIATION DE L'AZIMUTHE ET L'INCLINATION EN FONCTION DE MD .....                | 119                                |
| FIGURE 47:  | DLS EN FONCTION DE MD .....   | 119                                |
| FIGURE 48 : | TRAJECTOIRE OPTIMISEE DU PUIITS TNK 304 .....                                   | 123                                |

## Liste des tableaux :

|   |     |
|---|-----|
| TABLEAU 1: RECAPITULATIF SUR LES PUIITS HORIZONTAUX .....           | 12  |
| TABLEAU 2: COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS TYPES DE RSS .....      | 27  |
| TABLEAU 3 : DESCRIPTIF DE PUIT TNK305 ET SA LOCALISATION .....      | 46  |
| TABLEAU 4: DESCRIPTIF DE PUIITS TNK304 ET SA LOCALISATION.....      | 50  |
| TABLEAU 5: CARACTERISTIQUE ET AVANTAGES DE MOTEUR RSS UTILISE ..... | 57  |
| TABLEAU 6: DETAIL BHA TNK 305 PHASE 6" .....                        | 60  |
| TABLEAU 7 : DETAIL BHA TNK 304 PHASE 6" .....                       | 61  |
| TABLEAU 8: TNK 305 DRILLING DATA PHASE 6.....                       | 71  |
| TABLEAU 9: TNK 304 DRILLING DATA PHASE 6``: .....                   | 74  |
| TABLEAU 10: PARAMETRES DE FORAGE DES DEUX PUIITS PHASE 6" .....     | 77  |
| TABLEAU 11 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE:.....                         | 88  |
| TABLEAU 12: DESCRIPTIONS DES DONNEES: .....                         | 105 |
| TABLEAU 13: LES DONNEES DE PUIITS TNK 304 .....                     | 115 |

## Abréviations :

**RSS** : Rotary Steerable System

**KOP**: Kick Off Point

**ROP**: Rate of Penetration

**MD**: Measured Depth

**DLS**: Dog-Leg Severity

**MWD** : Measurement While Drilling

**LWD** : Logging While Drilling

**BHA**: Bottom Hole Assembly

**BUR**: Build-Up Rate

**TVD**: Total Vertical Depth

**VS** : Vertical Section

**AAPE**: Aérage absolue percentage error (%)

**D** : Bit diameter (in)

**d** : Densité (kgf/cm<sup>3</sup>) **FILTR** : Filtrat de boue **FLW** : Flow (limn)

**FV** : Fann viscosite

**GEL 10**: Gel 10 minutes (lb/100 ft<sup>2</sup>)

**GEL 0** : Gel 10 second (lb/100 ft<sup>2</sup>)

**HB-K** : Constante du modele Hershel Brukly HB-N : Constante du modele Hershel Brukly H:  
Profondeur en metre (m)

**ID** : Diametre interieure

**Mse** : Mean square error

**MW**: La densite de la boue (mud weight (sg))

**OBM** (OBDF): Boue a base d'huile (oil based mud)

**OD** : Diametre interieure (outside diameter)

**P** : Pression (psi)

**PV** : Viscosite plastique (ccp)

**Q**: Flow rate

**R**: Facteur de correlation

**RPM** : Rotation per minute (Tr/mn)

**SPP** : Stand pipe pressure (Psi)

**SBM**: Boue a base d'huile syenitique (Synthetic based mud)

**TRQ**: Torque (klbf-ft)

**UCS** : Uniaxial compressive strength, (psi)

**W**: Weight

**WOB** :Weight on bit (T)

**YP**: Yeild point (lb/100ft<sup>2</sup>)

### I. Introduction :

Le forage pétrolier est une pratique essentielle dans l'industrie de l'extraction d'hydrocarbures. Au fil des décennies, cette technique a évolué pour répondre aux défis technologiques et aux besoins croissants en production. Parmi ces évolutions majeures, le forage horizontal s'est imposé comme une méthode stratégique, offrant des avantages significatifs par rapport au forage vertical.

Le forage horizontal, en permettant de maximiser le contact avec les zones productrices, améliore considérablement la récupération des hydrocarbures. Cette technique, contrairement au forage vertical traditionnel, permet d'atteindre des réservoirs difficiles d'accès et de drainer des volumes plus importants de pétrole ou de gaz. En outre, elle offre une meilleure gestion des ressources en minimisant les impacts environnementaux et en optimisant l'exploitation des champs pétroliers complexes.

L'une des innovations notables dans le domaine du forage horizontal est l'introduction du système de forage dirigé, connu sous le nom de Rotary Steerable System (RSS). Le RSS représente une avancée technologique qui a révolutionné le forage directionnel en offrant un contrôle précis de la trajectoire du puits en temps réel. Ce système permet de maintenir et d'ajuster la direction du forage sans interrompre le processus, ce qui réduit les temps d'arrêt et améliore l'efficacité opérationnelle.

Dans ce mémoire, nous nous concentrerons sur l'analyse et la comparaison des données de forage de deux puits, TNK 305 et TNK 304, réalisés à l'aide de la méthode RSS. Nous aborderons les principes généraux du forage horizontal, en détaillant les différentes phases et équipements utilisés. Ensuite, nous examinerons les spécificités du système RSS, ses avantages et inconvénients, ainsi que son application pratique dans les puits étudiés.

Nous commencerons par une revue générale des techniques de forage horizontal, en incluant les classifications des puits et les avantages/inconvénients associés. Nous décrirons ensuite les méthodes de réalisation d'un drain horizontal, en mettant l'accent sur les innovations technologiques comme le géosteering et le RSS. Par la suite, nous analyserons les équipements spécifiques au forage horizontal, avant de plonger dans l'étude détaillée des puits TNK 305 et TNK 304.

L'objectif principal de cette analyse comparative était de comprendre les performances du Rotary Steerable System (RSS) dans divers contextes géologiques et d'élaborer les meilleures

## **Introduction générale**

---

pratiques pour optimiser l'efficacité du forage horizontal. À cet effet, nous avons utilisé le langage de programmation Python pour générer des graphiques de ROP (Rate of Penetration) en fonction de la profondeur mesurée (MD) et pour tracer la trajectoire 3D du puits TNK 304. En analysant ces données, nous avons proposé une trajectoire optimisée pour le puits TNK 304, tenant compte des caractéristiques géologiques spécifiques du site, avec l'objectif d'améliorer la productivité et l'efficacité du forage.

De plus, nous avons développé un modèle prédictif du ROP à l'aide de techniques d'apprentissage automatique, telles que la régression, les réseaux de neurones artificiels et la méthode Random Forest, pour affiner l'efficacité des opérations de forage.

En conclusion, nous proposerons des recommandations basées sur les résultats de notre étude, visant à optimiser l'utilisation du RSS et à améliorer les performances globales du forage horizontal. Cette démarche intégrée nous permettra de contribuer à l'avancement des techniques de forage et à une meilleure exploitation des ressources en hydrocarbures.

# Chapitre I

---

Généralités sur le forage horizontal

---

## II. Chapitre I : Généralités sur le forage horizontal

### A. Introduction :

Dans ce chapitre, nous aborderons les fondements théoriques du forage horizontal, en explorant les aspects suivants : la définition précise du forage horizontal, délimitant ses caractéristiques distinctives par rapport au forage vertical traditionnel, les différents types de forage horizontal, incluant le short radius, le medium radius et le long radius, le profil détaillé d'un puits horizontal, mettant en évidence ses composants essentiels à l'aide de schémas explicatifs ; enfin, une analyse des avantages et inconvénients des puits horizontaux

### B. Définition d'un drain horizontal :

Un drain horizontal est une section de canalisation ou de conduite inclinée à un angle de  $80^\circ$  à  $100^\circ$  par rapport à la verticale, s'étendant à partir d'un point d'atterrissage dans le réservoir jusqu'à un point spécifique, souvent sur une distance dépassant les 100 pieds de longueur.

### C. Profile d'un puit horizontal :

#### 1. Préparation de profil théorique :

La détermination du profil d'un puits dépend essentiellement de nombreux paramètres et doit répondre à des exigences à la fois géométriques et parfois techniques ; on peut citer :

#### a) Le déplacement horizontal requis au point d'entrée :

En particulier, le déplacement horizontal minimal est égal au rayon de courbures (déviation) d'un puits à un rayon de courbures simple.

Un long déplacement rend obligatoire le forage d'une section tangentielle et donc un kick off (KOP) relativement haut.

#### b) La longueur du drain horizontal :

La longueur du drain horizontal dépend essentiellement des caractéristiques de production mais peut-être du point de vue technique, est limitée. Par exemple :

Dans le cas d'un réservoir peu profond.

#### c) Capacité à permettre des gradients importants :

C'est la capacité du matériel de déviation (moteur de fond)



**d) Les pertes :**

Il n'y a pas mal de problème qui peut influencer sur les fonctionnements des moteurs de fond et des MWD à mud pulses. Ce sont les pertes partielles ou totales qui peuvent conduire à modifier le programme.

**e) La nature de réservoir :**

La nature du réservoir influe sur :

- La détermination de fluide de forage (nettoyage, risque d'endommagement)
- La stabilité de la paroi.
- La longueur du drain (la longueur optimale du drain doit être déterminée)

**2. Le profil théorique :**

Généralement, la trajectoire théorique d'un puits horizontal est composée de deux plans :

**a) Le plan vertical :**

- Dans lequel on trouve la profondeur et ainsi le déplacement, ce plan comporte généralement Une partie verticale.
- Une partie courbe (build up) à partir de l'amorce de la déviation ou l'inclinaison peut atteindre 90° degrés qui va vers le drain cible : le cible (Target)
- Une partie horizontale : c'est le vertical section vers l'azimut choisi.

✚ Un profil théorique vertical est défini par quatre paramètres à savoir :

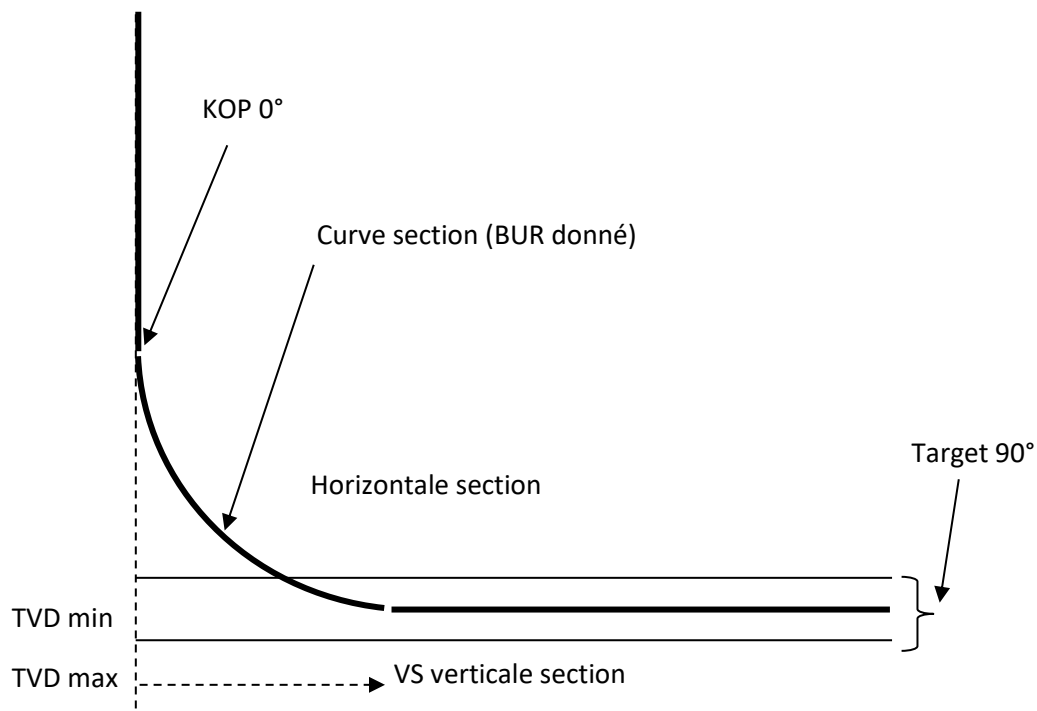
- **TVD** : C'est la distance verticale séparant la tête du puits (ou la table de rotation ou encore tout autre niveau de référence), de la cible sera appelée côte ou « total vertical depth, 'TVD' » ; Alors que la longueur de la trajectoire réellement forée par l'outil sera appelée profondeur ou « longueur forée » ou bien measurement depth (MD)
- **U ou Vs** : le déplacement horizontal total.
- **KOP** : la côte de l'amorce de la déviation (kick off point) et pour le choix, il faut tenir compte des paramètres géologiques et éviter les zones à perte ou le forage est difficile.
- **BUR** : le gradient d'inclinaison de la déviation (build up rate) :

Ce dernier peut être remplacé par le rayon de courbure R qui est proportionnel à l'inverse de l'inclinaison.

$$R = \frac{3600}{2 \pi i}$$

R : rayon de courbure

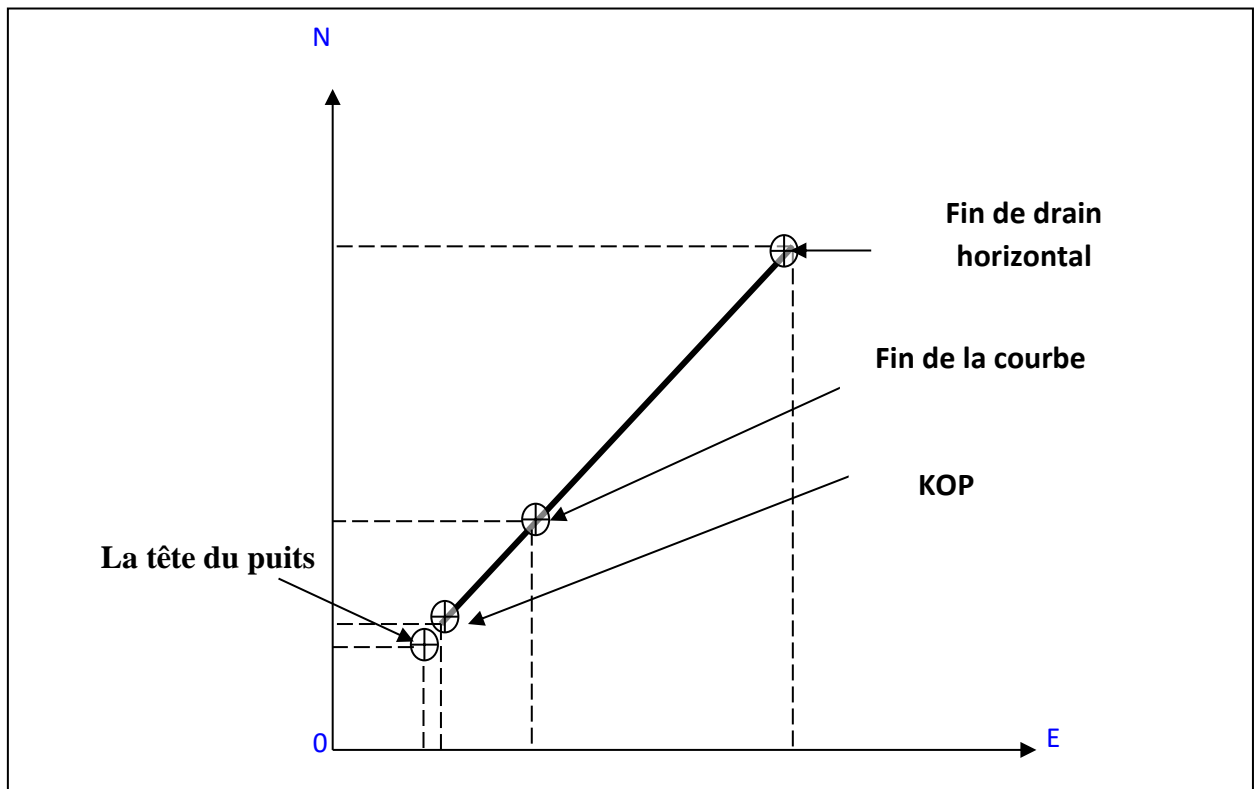
i : gradient de déviation (en degré /10m)



**Figure 1: Chemin typique d'un puits horizontal.**

**b) Le plan horizontal :**

Dans ce plan, on représente la position du puits dans un plan horizontal par rapport au Nord en indiquant l'azimut dans ce dernier. Exemple : un puits qui a un déplacement horizontal de 600 m, un azimuth de 45° sera présenté comme suit :



**Figure 2: Chemin du Plan horizontal d'un puits horizontal.**

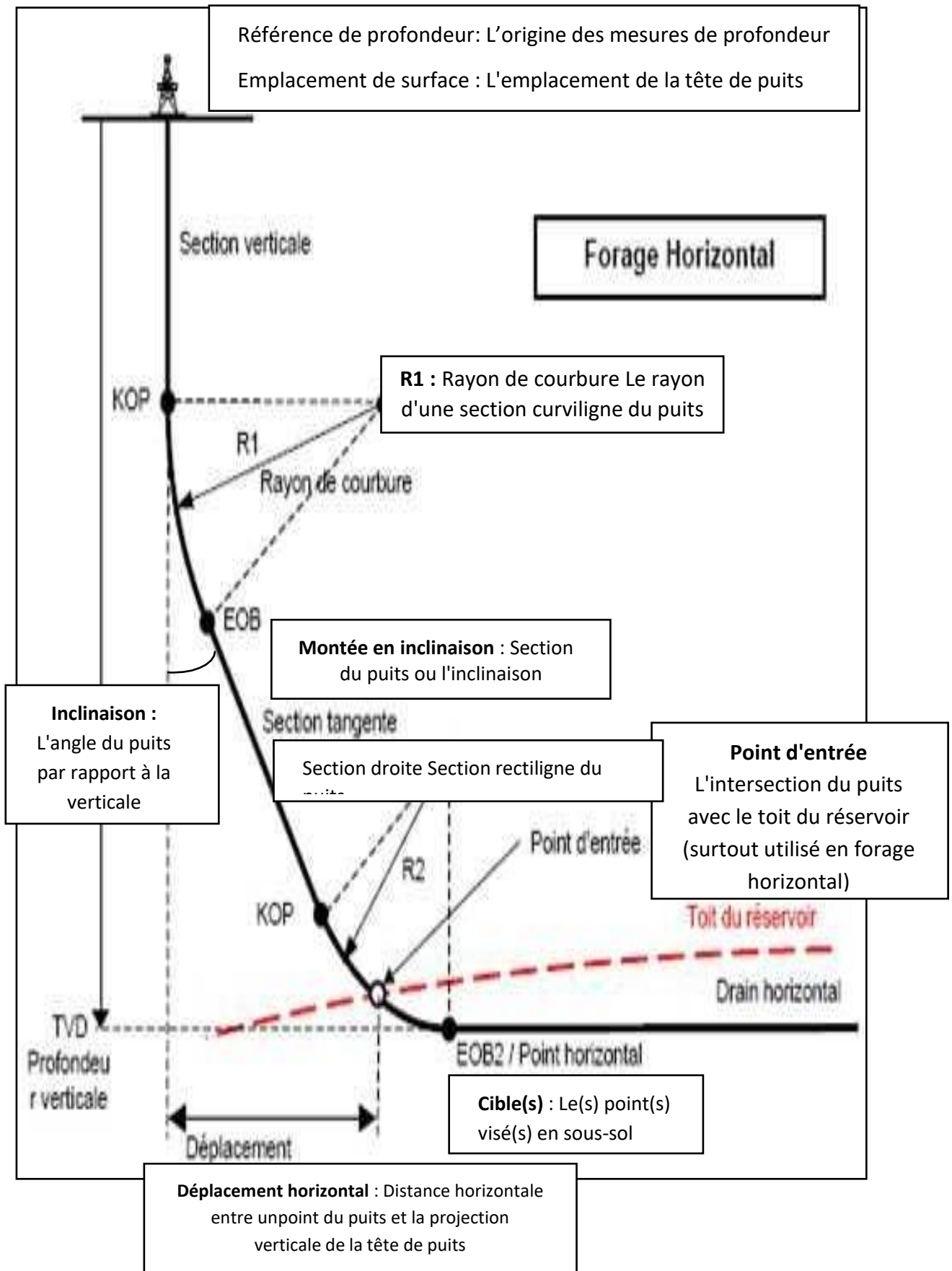


Figure 3: Profil d'un puits horizontal.

## D. Classification des puits horizontaux :

### 1. Ultra short radius :

Ces puits ont un rayon de déviation entre 1 et 2 ft, le BUR (build up rate) varie entre 45° à 60°/ft.

Dans cette technique, 100 à 200 ft de longueur de drain est forée par l'utilisation de waters jets et par conséquent, le tubing est séparé et le drain suivant est foré à la même profondeur.

#### a) **Avantage :**

Bien que le jeting puisse s'effectuer même dans les roches dures, il est évident qu'il n'est pas adapté pour les formations tendres ou peu consolidées (sable bitumineux). Donc, la technique ultra short peut être retenue pour les projets miniers comme pour le nettoyage des puits d'eau peu profonds.

#### b) **Inconvénients**

Cette technique nécessite des équipements spéciaux (flexibles ou articulés) en raison de difficulté de contrôle de la trajectoire.

Ils requièrent également des moteurs MWDs.

La vitesse d'avancement des outils est faible vu le petit diamètre de forage utilisé et ainsi que leur espérance de vie.

Elle nécessite un élargissement du trou au voisinage de la partie latérale.

### 2. Shorts radius :

Ces puits ont un rayon de déviation compris entre 20 à 40 ft. Le BUR est de 2° à 5°/ft. Dans cette technique, le drain horizontal est réalisé à partir d'un puits vertical déjà existant. La première technique de forage utilise le forage rotary pour forer le drain, puis en ajoutant des tiges flexibles qui permet de faciliter le forage.

Une déviation de 85° est employée pour permettre de forer la partie courbée de drain, et le forage sera fini par la déviation finale (totale)

Le contrôle directionnel est limité, ce qui présente un point faible de ce système, mais par l'utilisation de **Down Hole Mud Motors (DHM)**, ce système a un bon Contrôle directionnel. Plus tard, ces puits peuvent être complétés ou bien laisser en open Hole.

**a) Avantages:**

Les puits short radius plus précis en déplacement vertical que le puits long radius ou même médium radius, ces puits sont attractifs sur des petits permis ou de petites lentilles dont la position précise est connue.

Ces puits sont une autre séquelle du forage horizontal et consiste à partir d'un puits déjà existant qui est alors abandonné et bouché afin de forer un drain latéral se terminant à l'horizontal.

Du point de vue économique, les puits en short radius sont moins chers à compléter puisque l'infrastructure est déjà en place (la tête de puits, tubing...), comme il est facile à compléter.

Ces puits permettent de placer les équipements de pompes le plus bas possible et représentent donc moins risque au cours de forage.

**b) Inconvénients :**

Il est évidemment clair que ces puits en short radius nécessitent toujours des équipements spéciaux pour la réalisation des drains horizontaux tels que : les tiges flexibles ou articulés.

Ainsi que la vitesse d'avancement de l'outil est faible, vu le petit diamètre de forage utilisé, ainsi que leur espérance de vie. Donc un nombre très important de manœuvre est nécessaires pour changer l'outil ou le BHA.

**3. Médioms radius :**

Le rayon de courbure de ces puits est de 300 a 800 ft, le BUR est de 6° a 20°/100ft.

Il est plus utilisé à cause de son rayon de déviation qui donne de possibilité d'utiliser beaucoup des outils conventionnels dans le drain.

La méthode DHM est utilisée dans ce type de forage, la longueur de ces puits peut atteindre 4000 ft. Ensuite le puits est complété en open Hole ou slotted liner et il est possible d'intervenir sur le puits par la fracturation.

**a) Avantage :**

L'utilisation de MDW est possible avec différents diamètres d'outils de forage et de forer à des longueurs importantes. La descente de casing est aussi possible.

**b) Inconvénient :**

Dans les puits médium radius, le poids sur l'outil est plus faible que dans le puits long radius en raison de BUR qui est grand.

**4. Long radius :**

Ces puits ont un rayon de courbures compris entre 100 à 3000 ft. Et le BUR varie entre 2° à 6°/100ft et permettent l'utilisation de toutes les procédures de forage conventionnel (rotary, carottage, tubage.)

Le forage rotary pour forer le KOP et le drain à incliner et l'autre pour forer un drain horizontal.

**5. Les puits multilatéraux :**

La technique du puits multilatéral consiste à forer plusieurs branches à partir d'un drain primaire qui peut être vertical, dévié ou horizontal.

Les puits multilatéraux maximisent la production en augmentant le contact avec le réservoir et en améliorant le drainage des hydrocarbures, tout en réduisant les coûts grâce à une économie sur les infrastructures et au partage des installations. Ils optimisent également l'utilisation de l'espace en réduisant l'empreinte écologique et en permettant un accès à plusieurs zones du réservoir depuis un seul emplacement.

Cependant, ils présentent des défis techniques et opérationnels. Ils sont plus complexes à concevoir et à forer, ce qui entraîne des coûts initiaux élevés en raison des technologies avancées nécessaires. De plus, la maintenance et la gestion de la production sont plus difficiles, avec des problèmes d'accès aux branches latérales et une surveillance complexe, augmentant le risque de problèmes mécaniques.

**Tableau 1: Récapitulatif sur les puits horizontaux**

| Type         |            | Rayon de déviation | BUR         | Diamètre du trou | Longueur du drain | Complétion                   |
|--------------|------------|--------------------|-------------|------------------|-------------------|------------------------------|
| Ultra shore  |            | 1 à 2              | 45 à 60°/FT | -                | 100 à 200         | -Tubing perforé              |
| Short radius | Rotary     | 30                 | 2° à 5°/FT  | 4 <sup>3/4</sup> | - 350 à 450       | -Open hole<br>-Slotted liner |
|              |            | 35                 |             |                  |                   |                              |
|              | Mud Motors | 40                 |             | 4 <sup>3/4</sup> | - 350 à 450       |                              |
|              |            | 40                 |             | 3 <sup>3/4</sup> |                   |                              |



|                      |   |                       |   |  |  |
|----------------------|---|-----------------------|---|--|--|
| <b>Médium radius</b> | <p>300</p> <p>300</p> <p>400 à 800</p> <p>300</p> | <p>6° à 20°/100ft</p> | <p>4<sup>1/2</sup></p> <p>6</p> <p>8<sup>1/2</sup></p> <p>9<sup>7/8</sup></p> | <p>500 à 1000</p> <p>1000 à 2000</p> <p>1000 à 3000</p> <p>-</p> | <p><b>-Open hole</b></p> <p><b>-Slotted liner</b></p> <p><b>-Liner perforé</b></p> |
| <b>Long radius</b>   | <p>1000</p> <p>1000 à 2500</p>                    | <p>2° à 6°/100ft</p>  | <p>8<sup>1/2</sup></p> <p>12<sup>1/4</sup></p>                                | <p>1000 à 3000</p>   | <p><b>Slotted liner avec des perforations cimentée</b></p>                         |

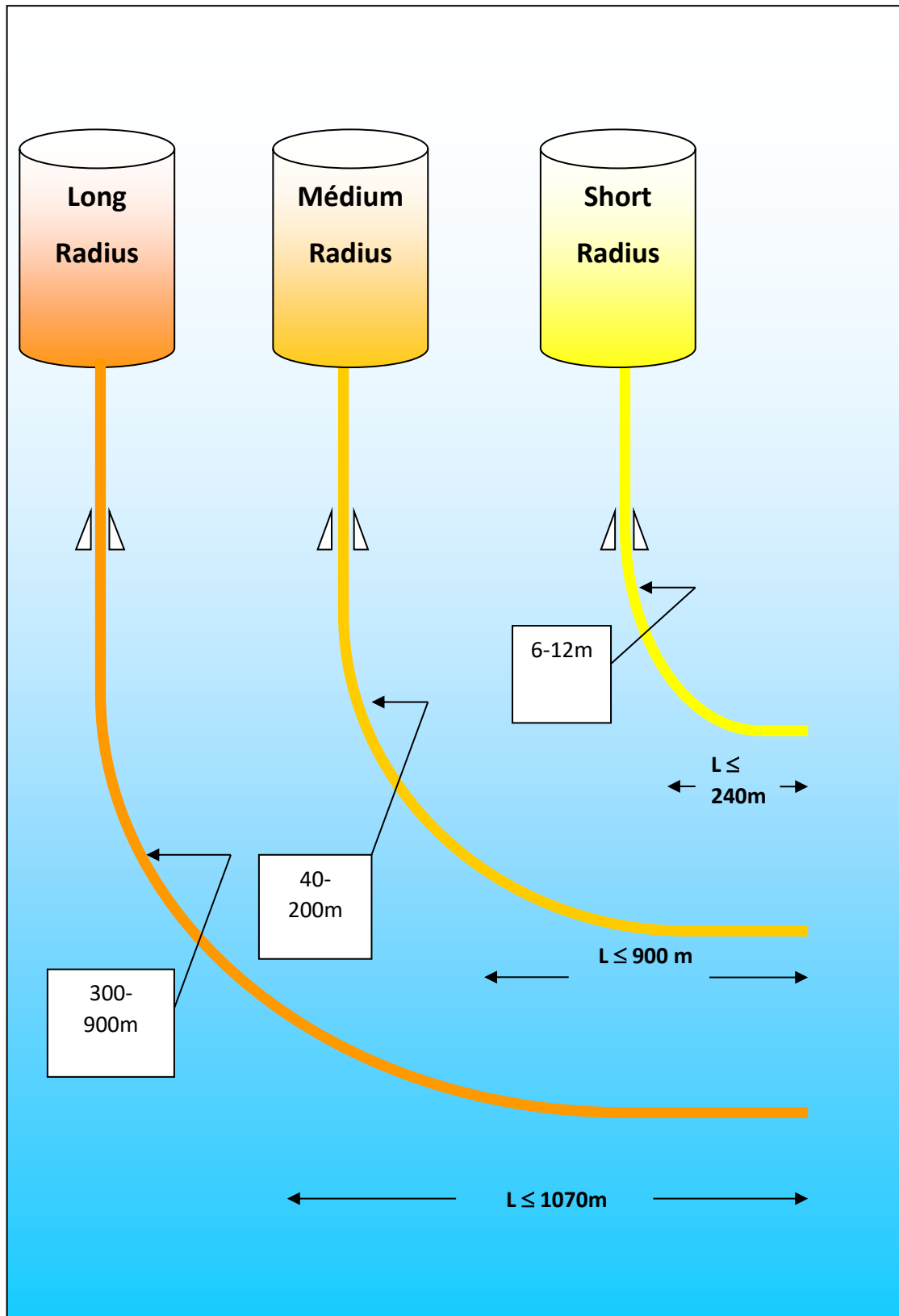


Figure 4: Types des puits.

## E. Avantages et inconvénients du forage horizontal :

### 1. Avantages du forage horizontal :

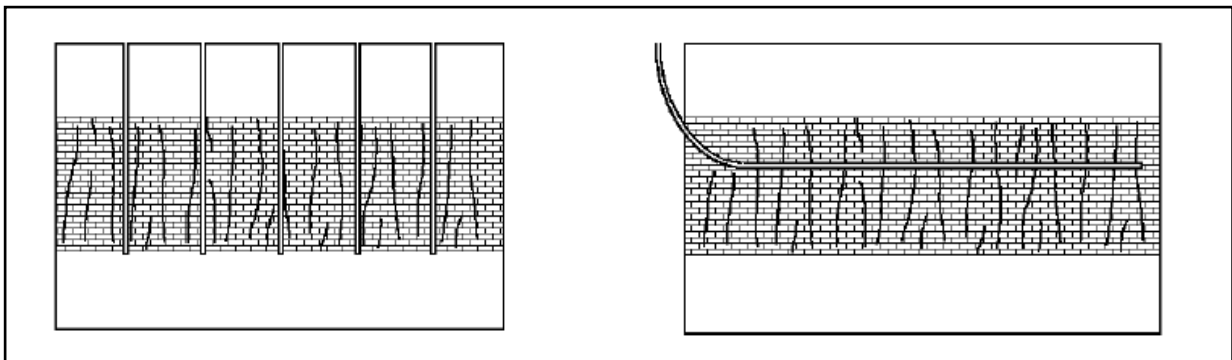
Les avantages du forage horizontal sont nombreux et nous pouvons citer :

- Le forage horizontal permet le développement de champs qui n'auraient pu être exploités commercialement autrement ;
  - Dans beaucoup de réservoirs, le forage horizontal permet d'augmenter la production mais aussi d'améliorer le taux de récupération, ceci par un meilleur drainage et en retardant l'arrivée d'eau.

On privilégie la réalisation d'un forage horizontal dans les cas suivants :

#### a) Réservoirs fracturés :

Les réservoirs fracturés sont parmi les meilleurs candidats au développement par forage horizontal. Les fractures de ces réservoirs étant sub-verticales, une conséquence directe est que le meilleur moyen d'en intercepter le plus grand nombre est de forer un puits horizontal perpendiculairement à leur direction principale.

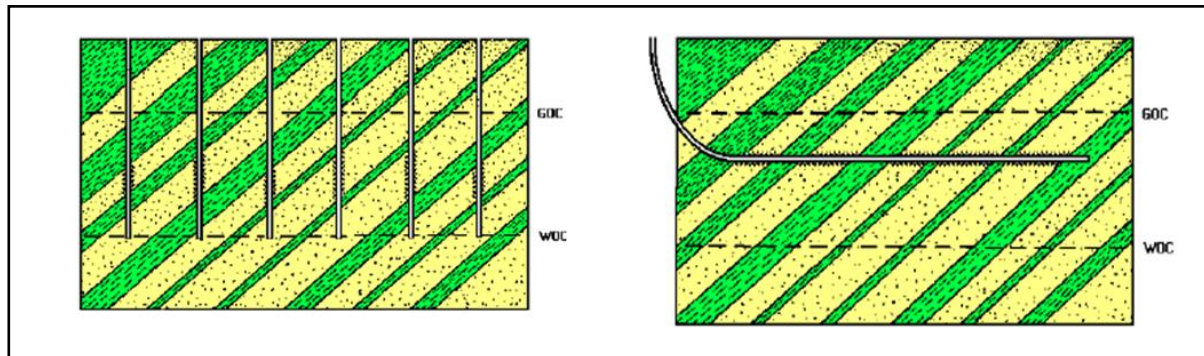


**Figure 5: Réservoirs fracturés.**

#### b) Réservoirs multi-couches :

Dans la plupart des réservoirs multi-couches un puits horizontal peut remplacer plusieurs puits verticaux ou déviés.

La figure ci-dessous illustre un tel cas de réservoir compartimenté ou un seul puits horizontal remplace six puits verticaux et de plus améliore la production en retardant le conning.



**Figure 6: Réservoirs multi-couches.**

**c) Réservoirs à faible épaisseur :**

Dans un tel réservoir, un puits vertical ne peut avoir qu'une faible pénétration dans le drain, et le but de forage horizontal est d'avoir une pénétration plus importante afin de réduire le nombre de puits.

**d) Réservoirs à basse perméabilité :**

Le forage horizontal dans un réservoir à basse perméabilité est une alternative à la fracturation de ce réservoir.

Le drain horizontal se comporte comme une fracture, avec plusieurs avantages :

- Il est plus facile et plus économique de forer un long drain plutôt que d'essayer de créer une fracture équivalente ;
- La direction est parfaitement contrôlée, ce qui n'est pas possible avec la fracturation.

**e) Formations non consolidées - Contrôle des sables :**

La production de sables non consolidés présente de sérieux problèmes pour limiter la quantité de sable entrant dans le puits.

Cette production de sable dépend des forces de viscosité à la paroi du puits, elle-même proportionnelle au débit de production.

Un drain horizontal foré dans un tel réservoir permet de réduire la vitesse à la paroi et en conséquence la production de sable, qui peut aller jusqu'à être totalement éliminée.

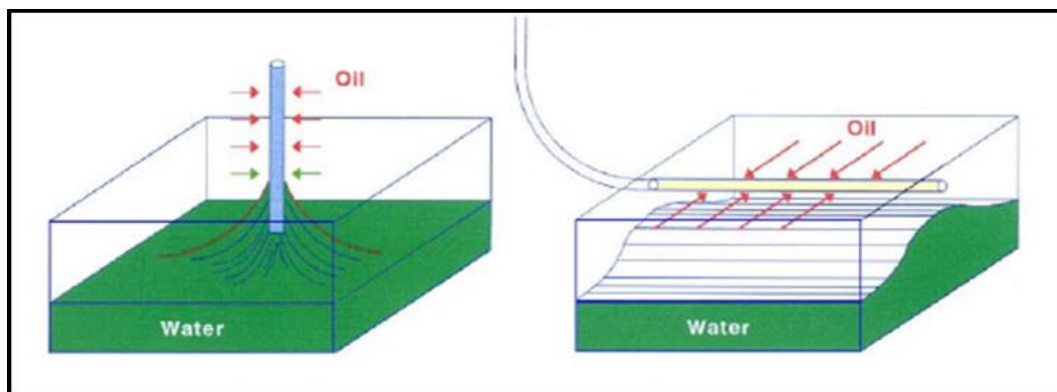
### f) Conning de gaz et d'eau :

Beaucoup de réservoirs sont produits grâce à un aquifère actif ou par injection artificielle. La production déclinera très rapidement si le niveau d'eau remonte trop vite dans le puits.

Le forage horizontal aide énormément la production de tels réservoirs :

- En augmentant la distance entre le drain et le contact huile/eau ;
- En améliorant la productivité en dispersant le soutirage et donc en diminuant la succion sur le plan d'eau.

Des considérations similaires peuvent être faites concernant l'arrivée de gaz.



**Figure 7: Water Conning.**

### g) Réservoirs d'huile lourde :

Les réservoirs d'huiles lourdes sont une application directe des considérations ci-dessus. Comme l'eau est beaucoup plus mobile que l'huile, la quantité d'eau augmente très rapidement dès la percée du plan d'eau. La durée de la période libre d'eau augmente à l'aide du forage horizontal

## 2. Inconvénients du forage horizontal :

### a) Coûts additionnels :

Il est évident qu'un forage horizontal a un coût plus élevé qu'un forage vertical ou peu dévié. Les coûts additionnels sont dus à deux facteurs principaux :

- Les puits horizontaux sont plus longs, donc nécessitent plus de temps pour les forer, plus d'outils, plus de fluide, etc.
- Le coût des services de forage dirigé n'est pas négligeable en particulier par l'obligation d'utiliser en permanence un moteur de fond et un MWD.

**b) Risques opératoires :**

Par rapport aux puits verticaux ou peu déviés, les puits horizontaux représentent, au cours de leur réalisation, un certain nombre de risques supplémentaires.

- Atteindre la cible ;
- Le nettoyage du puits ;
- Le comportement des formations ;
- L'endommagement des formations ;
- L'évaluation du potentiel de production.

# Chapitre II

---

Méthodes de réalisation d'un drain  
horizontal

---

## II. Chapitre 2 : Méthodes de réalisation d'un drain horizontal

### A. Introduction :

La mise en œuvre d'un drain horizontal nécessite l'utilisation de méthodes spécifiques et de technologies avancées pour assurer son efficacité et sa fiabilité. Ce chapitre se concentrera sur les différentes méthodes de réalisation d'un drain horizontal, en mettant en lumière sur l'application des puits horizontaux ainsi que la complétion des puits.

### B. Application des puits horizontaux :

Dans beaucoup des réservoirs, le forage sur le drain horizontal permet d'augmenter la production et aussi d'améliorer le taux de récupération. Ceci par un meilleur drainage et en retardant l'arrivée d'eau et de gaz.

Les applications de ces types de forage horizontal sont très nombreuses à savoir :

#### 1. Réservoir fracturé :

Les réservoirs fracturés sont parmi les bons candidats au développement par forage horizontal. Les facteurs de ces réservoirs étant subvertical. Le meilleur moyen d'en intercepter le plus grand nombre est de forer un puits horizontal perpendiculairement à leur direction principale.

#### 2. Réservoirs multicouches :

Dans la plupart de ces réservoirs, un puits horizontal peut remplacer plusieurs puits verticaux ou déviés.

#### 3. Couches minces :

On les considère comme des couches ayant moins de 15 à 20 m d'épaisseurs dans le cas de présence de chapeau de gaz (gaz- cap) ou d'un aquifère sous adjacent.

La situation est encore plus favorable aux puits horizontaux.

#### 4. Formation compacte :

Dans les formations compactes, il est possible de forer un puits horizontal pour l'ouvrir par fracturation hydraulique.

#### 5. Réservoir à basse perméabilité :

Le forage des drains horizontaux dans tels réservoirs est une alternative à la fracturation hydraulique. Le drain horizontal se comporte comme des fractures avec plusieurs avantages.



Car il est plus facile de forer un long drain horizontal plutôt que de créer une fracture équivalente.

### **6. Réservoir à forte perméabilité :**

Dans le cas d'un réservoir de forte perméabilité, au voisinage d'un well bore, la vitesse de gaz est très élevée dans les puits verticaux. Donc les puits horizontaux sont utilisés pour minimiser la vitesse aux voisinages de well bore. C'est à dire pour minimiser la turbulence au voisinage de well bore et améliorer par la suite la distribution de la production dans le réservoir.

### **7. La production non consolidée (contrôle de sable) :**

La production non consolidée des sables présente un sérieux problème dans les puits à grand débit car elle dépend de forces de viscosité sur la paroi.

Un drain horizontal foré dans un tel réservoir permet de réduire la vitesse d'écoulement sur la paroi du puits et en conséquence, la production de sable.

### **8. Conning de gaz et de l'eau :**

Les puits horizontaux aident énormément la production de tel réservoir en augmentant la distance entre le drain et le contacte huile / eau et aussi on

Améliorant la productivité en dispersant le soutirage donc qui fait que la vitesse d'écoulement soit faible. Et le même principe pour la venue de gaz.

### **9. Récupération assistée :**

Les puits horizontaux peuvent améliorer l'efficacité de récupération assistée par la présence de :

- Meilleure capacité d'injection.
- Injection mieux répartie dans le gisement provoquant une moindre déformation de l'interface. Il en résulte donc une percée moins rapide et une efficacité meilleure de balayage

## **C. Les Méthodes de réalisation d'un drain horizontal :**

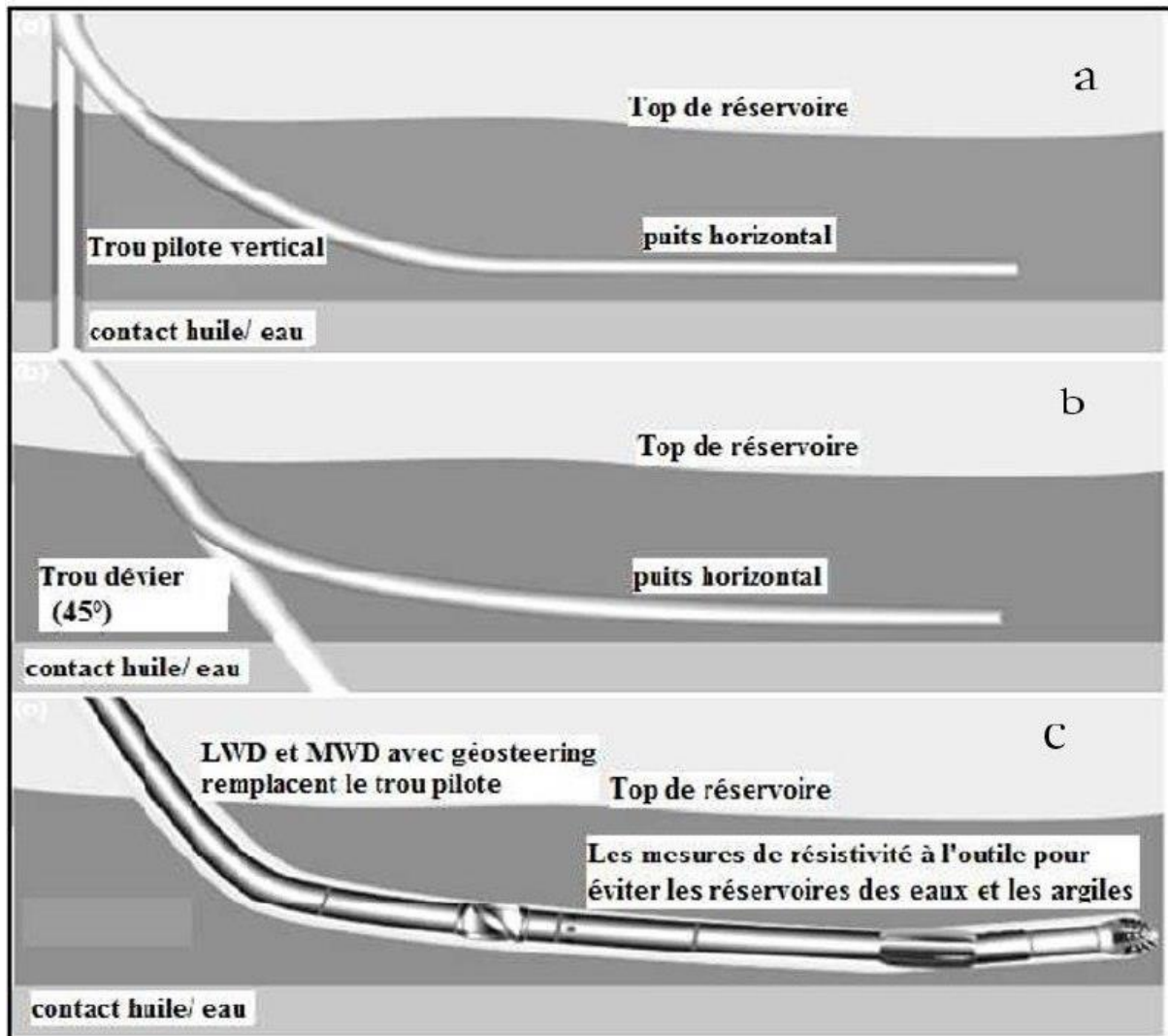
### **1. Trou pilote :**

C'est un trou de petit diamètre qui est ensuite élargit au diamètre requis, généralement pour des raisons de :

- **Sécurité :** facilité le contrôle et la détection des venues

- **Évaluation** : la qualité de certaines diagraphies est améliorée en trou de petit diamètre.
- **Contrôle** : de la trajectoire en forage dirigé
- **Probabilité de changement de programme** : en cas où le risque d'abandonner ou d'effectuer un side-track, est important.

Les premiers trous pilotes ont été verticaux pour tester la séquence géologique puis ils sont devenus inclinés, dans le prolongement d'une section tangente, à partir d'un point quelconque de la trajectoire, (en 45° comme inclinaison optimale) et de guider et contrôler la trajectoire, avant qu'elle rejoigne le réservoir. Actuellement lorsqu'on ne dispose pas des instruments de mesure sophistiqués, tels que le système géosteering, qui assiste bien le drain horizontal pour traverser le réservoir sans être écarté, le trou pilote reste un moyen économique qui nous fournisse l'information sur la bonne position (inclinaison), d'atterrissage, en absence d'un matériel sophistiqué de contrôle ou de réalisation.



**Figure 8: Trou pilote pour l'atterrissage dans les puits horizontaux**  
**a. Trou pilote vertical, b. Trou pilote incliné et c. Géosteering système**

## 2. Forage de navigation (steerable drilling) :

Le forage navigationnel fait appel au tandem MWD / moteur de fond steerable (généralement équipé d'un bent housing), soit un Moteur de Déplacement Positif (PDM) ou une turboforeuse, permettent ainsi d'alterner une combinaison de :

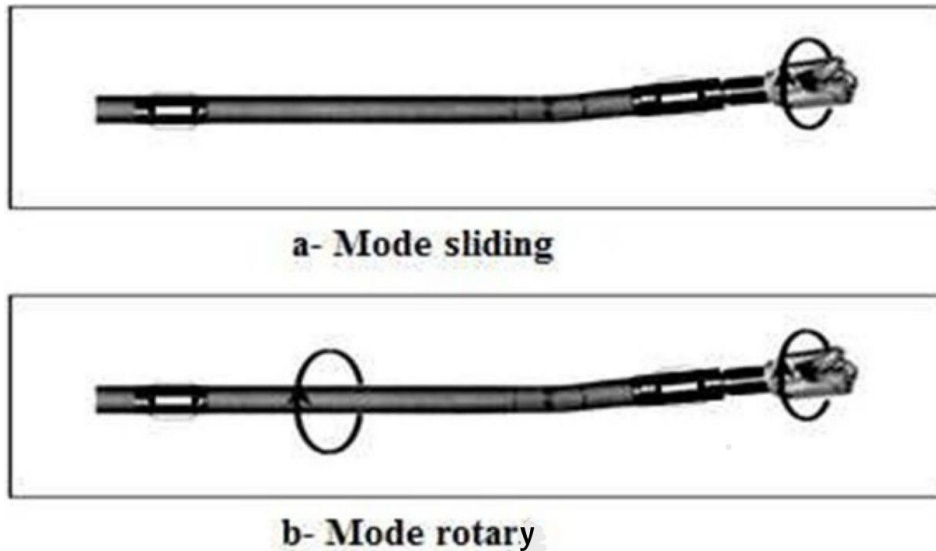
- Phases de 'sliding mode' ou 'orienting mode' ou 'steering mode ' (Figure 9.a)

Ce mode s'applique pour faire varier l'inclinaison (sections build up) et/ou pour le contrôle continu de l'azimut.

- Phases de sliding + rotary, Qu'on appelle 'rotary mode'. Ce mode s'applique lorsqu'on veut garder la trajectoire rectiligne, puisque la rotation de l'ensemble (table de rotation

et le moteur) annule l'effet du bent housing. Il en résulte un trou de diamètre légèrement surdimensionné. (Figure 9.b)

La navigation permet donc de suivre parfaitement une trajectoire théorique, et s'impose sur la plupart des puits horizontaux où l'atterrissage est délicat.



**Figure 9: Modes de forage (a. sliding, b. rotary).**

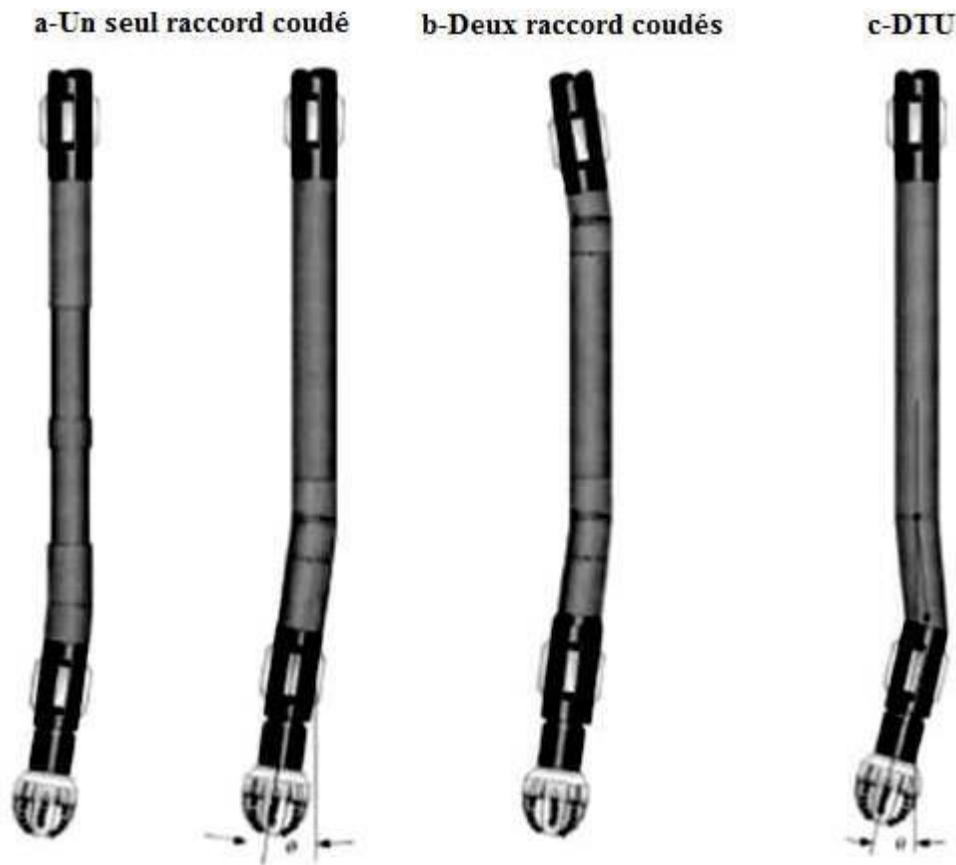
**a) Géosteering :**

Il s'agit d'une variante du sliding navigation, où non seulement le MWD est complété Par un LWD, mais où surtout on dispose d'informations géologiques et directionnelles juste derrière l'outil (résistivité azimutale et GR azimutal). On peut donc orienter la trajectoire du puits au fur et à mesure du forage, en fonction des informations géologiques reçues en direct.

Localement la 1ère expérience sera faite à Hassi R'Mel (HRZ3) avec le Navigator de Baker.

Ces unités sont des moteurs de fond dotés d'un système de déflexion (raccord coudé :bent sub), qui incline l'axe de l'outil par rapport à l'axe du trou. Ce système est le plus souvent un 'bent housing', c'est-à-dire un angle situé classiquement entre la section motrice et la section d'appui du moteur.

De nombreuses configurations sont proposées sur le marché, sont :



**Figure 10: Type des moteurs a. SINGLE b. DOUBLE c.DTU**

- **un seul raccord coudé (single bend)** : fixe ou ajustable, utilisable pour la plupart des applications de forage directionnel (Figure 10.a), son gradient de déviation est de l'ordre de  $2^\circ$  jusqu'à  $13^\circ/30$  m.
- **b- deux raccord coudés (double bend)** : en position basse et haute, fixes ou ajustables, utilisable pour des puits medium radius, ne permettent pas la rotation de la garniture, son gradient de déviation dépasse les  $10^\circ$  jusqu'à  $24^\circ$  par 30 m.
- **DTU (Double Tilted Unit)** : avec un bent housings ayant deux tilt angles dans le même plan mais opposés à  $180^\circ$ . La dernière génération de moteurs steerable propose des bent housings ajustables au fond (Figure 10.c), avec un gradient de déviation qui ne dépasse pas  $4^\circ/30$  m.




La stabilisation (optionnelle) de ces moteurs dirigeables accroît leur efficacité et aide à déterminer leur comportement en forage rotatif. Les stabilisateurs d'un moteur steerable sont toujours sous-dimensionnés. Ce sont soit des lames soudées au corps du moteur, soit des sleeves interchangeables

### 3. Le Système Rotary Steerable (RSS) :

C'est un ensemble de dispositifs permettant de dévier la trajectoire d'un puits, tout en maintenant en rotation la garniture et l'outil de forage (Trépan, PDC), est dirigé selon un Tool Face et sur une portion de d'intervalle forée déterminés Il existe plusieurs types des RSS (Tableau 2) :

- Auto truck (Backer Hughs).
- Power drive (Schlumberger)
- Géo-pilote (Haliburton)

**Tableau 2: Comparaison entre les différents types de RSS**

| Types des RSS        |   | Auto truck  | Power drive   | géo-pilote  |
|----------------------|---|---|---|---|
| Les composants       | Elément de déviation fait tourner l'outil de forage, donc il n'est pas affecté par la rotation du train de tiges, il contient trois nervures de guidage (ribs) à commande hydraulique séparées. | Steerable<br>stabiliser sleeves<br> | Bias unite<br> | Référen<br>stabilisé<br> |
|                      | <b>Système de Communication surface-fond</b>  | By-Pass Actuator  | Fast downlink   | Geo-span downlink   |
|                      | <b>Unité de commande</b>  | Contrôle électronique + inclinaison Sensors   | Contrôle unite contiens l'électronique Embarqué   | -   |
|                      | <b>Les équipements de Mesures</b>   | MWD+LWD   | MWD   | MWD + LWD   |
| Les caractéristiques | <b>DLS maximum phase 6 "</b>  | 12°/30  | 8°/30   | 5° à 6°/30m   |
|                      | <b>Temps de Transmission</b>  | 5 mn  | 7 mn  | -   |
|                      | <b>Temps de réponse</b>   | -   | 60 seconds  | 90 seconds  |

Lors de réalisation d'un drain horizontal, les composantes de la BHA doit se minimiser, que ce soit en mode rotary ou sliding ou les deux jumelés en même temps. Ces équipements sont dictés par les conditions locales de forage, les standards tels les BHAs rotary, les duos moteur droit / bent sub, les moteurs de navigation (steerable), ou spécifiques tels que les moteurs à double courbure (double bend motors) ou en RSS.



# **Chapitre III**

---

Equipement de forage horizontal

---

### III. Chapitre 3 : Equipements de forage horizontal

#### 1. Introduction :

Ce chapitre présente les divers équipements utilisés en forage dirigé, les équipements standards dans leur utilisation en forage dirigé puis les équipements spécifiques au forage dirigé. Il présente ensuite les équipements de mesure.

#### 2. Équipements de forage (Équipements standard de forage) :

Les équipements standards de forage sont :

- Masse-tiges
- Tiges de forage
- Coulisses de forage.
- Élargisseurs
- Aléseurs à rouleaux
- Amortisseurs de vibrations.
- Raccords
- Aléseurs de key-seat

##### a) Les mass-tiges :

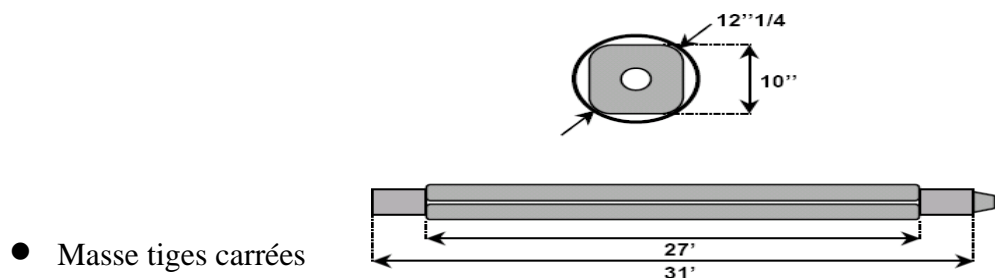
Les mass-tiges sont des tubes d'acier dont l'épaisseur du corps leur confère un poids important.

Les masses tiges perdent de leur utilité en forage très dévié et leur utilisation peut même apporter plus d'inconvénients (frottements, etc.) que d'avantages. De nombreux drains horizontaux sont forés sans aucune masse-tige dans la garniture

- Les masses tiges lisses (*Slick DC*) :
- Les masse-tiges spiralées (*Spiraled DC*) :



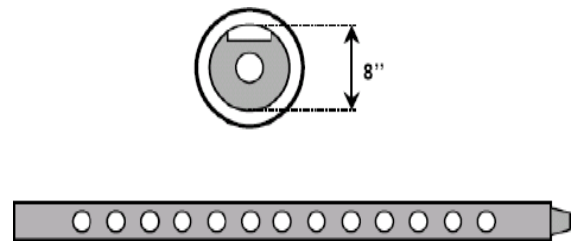
Figure 11: Masse tige lisses et spiralés



- Masse tiges carrées

Figure 12: Masse tiges carrés

- Masse-tiges asymétriques



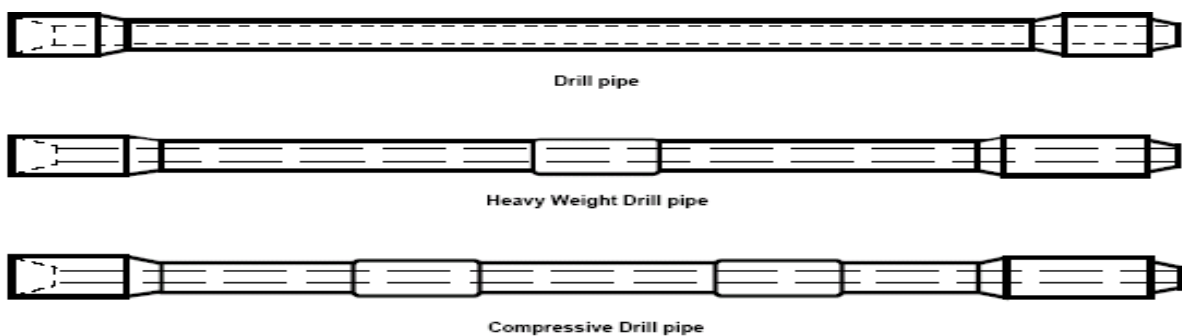
**Figure 13: Masse-tiges asymétriques**

**b) Tiges de forage :**

Les tiges de forage sont, en nombre, les principaux éléments du train de tiges.

Les tiges de forage sont des tubes d'acier de faible épaisseur, manchonnés et filetés à chaque extrémité. Elles sont disponibles en différents diamètres, poids linéaires et grades d'acier ainsi que plus ou moins renforcées, d'où différents types :

- Tiges standards (Drill-pipes - DP)
- Tiges Lourdes (Heavy weight drill pipes)
- Tiges de compression (compressive drill pipes)



- Tiges lo
- Figure 14: Tiges (standards, Lourdes, compression)**

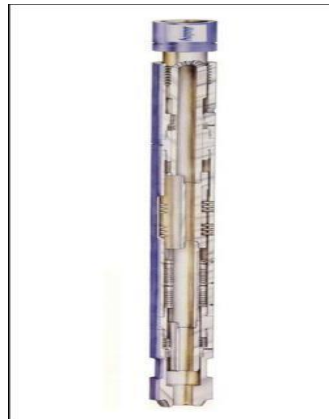


**Figure 15: Tiges lourdes spiralée**

**c) Coulisses de forage :**

Le but des coulisses de forage est d'aider à libérer le train de tiges en cas de collage ou de coincement dans le puits.

- Coulisses de forage mécaniques
- Coulisses de forage hydrauliques
- Coulisses de forage hydromécaniques



**Figure 16: Coulisse Mécanique**

**Coulisse Hydraulique**

**d) Elargisseurs :**

Les élargisseurs sont des outils conçus pour élargir un trou déjà foré.

On distingue :

- Elargisseurs à bras fixes
- Elargisseurs à bras mobiles



**Figure 17: Elargisseurs à bras fixes**

**Elargisseurs à bras mobiles**

**e) Aléseurs à rouleaux :**

Les aléseurs à rouleaux sont constitués de rouleaux dont la surface est abrasive, montés autour d'un corps tubulaire.



**Figure 18: Aléseurs à rouleaux**

*f)* **Amortisseurs de vibrations**

➤ **Amortisseurs de vibrations**

Le but des amortisseurs de vibrations est de diminuer ou d'éliminer les vibrations axiales du train de tiges.

➤ **Bumper subs**

Les "*Bumper subs*" sont surtout utilisés pour compenser ou amortir le pilonnement sur les plates-formes flottantes.

**g) Raccords :**

Les raccords sont des éléments tubulaires courts destinés à divers usages. Leur nombre doit être limité au minimum nécessaire.

- Raccords "Cross-over"
- /Raccords pour valve anti-retour
- Raccords d'usure
- Extensions
- Raccords à entrée latérale (Side entry subs) :
- Junk subs



**Figure 19: Types des Raccords**

**h) Aléyeurs de key-seat (key-seat wipers)**

Le but d'un aléyeur de key-seat est de prévenir la formation d'un key-seat ou de l'éliminer du puits. Ces outils sont constitués d'une chemise coulissant sur un mandrin.

### 3. Équipements spécifiques au forage horizontal :

- Moteurs de fond
- Stabilisateurs
- Équipement amagnétique
- Raccords d'orientation
- Raccords coudés
- Outils de déflexion

#### a) Moteurs de fond :

Les moteurs de fond aussi appelés moteurs à déplacements positifs sont devenus les outils sans lesquels le forage dirigé n'aurait pu évoluer aussi rapidement dans ces dernières années.

#### b) Stabilisateurs :

En forage dirigé, l'utilisation de stabilisateurs est l'un, sinon le moyen, de contrôler l'inclinaison du puits. Ils sont donc largement utilisés, particulièrement en forage dirigé conventionnel.

Différents types de stabilisateurs sont disponibles, variant essentiellement par la conception de leurs lames :

- Lames soudées
- Lames intégrales
- À chemise
- À chemise non rotative

La forme des lames varie également :

- Lames droites
- Lames spiralées à droite
- Lames spiralées à gauche



**Figure 20: Différents types de stabilisateurs**

## c) Équipements amagnétiques :

L'acier des éléments du train de tiges perturbe les lignes du champ magnétique terrestre. Cette perturbation est proportionnelle à la masse et inversement proportionnelles à la distance.

Pour la bonne utilisation d'instruments de mesures magnétiques il est donc nécessaire d'éloigner les équipements de mesure des éléments perturbants. Ceci est réalisé en utilisant des matériaux dits non-magnétiques ou amagnétiques au voisinage des capteurs de mesure.

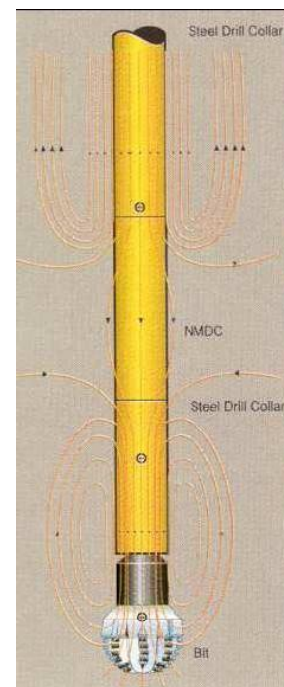
Ces matériaux amagnétiques peuvent être :

- De l'aluminium
- Des aciers inoxydables de haute qualité
- Des alliages tels que le "Monel" (70% nickel + 30% cuivre) Les équipements amagnétiques les plus courants sont :

- Des masse-tiges
- Des masse-tiges courtes
- Des tiges de forage compressives
- Des tiges de forage
- Des stabilisateurs
- Des raccords.

Et bien sur les équipements de mesure eux-mêmes :

- MWD
- Steering tools



**Figure 21: Interférence Magnétique**



**d) Raccords d'orientation :**

Les raccords d'orientation sont conçus pour recevoir une chemise dans laquelle viendra se loger l'extrémité inférieure ("mule shoe") de l'outil de mesure.

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

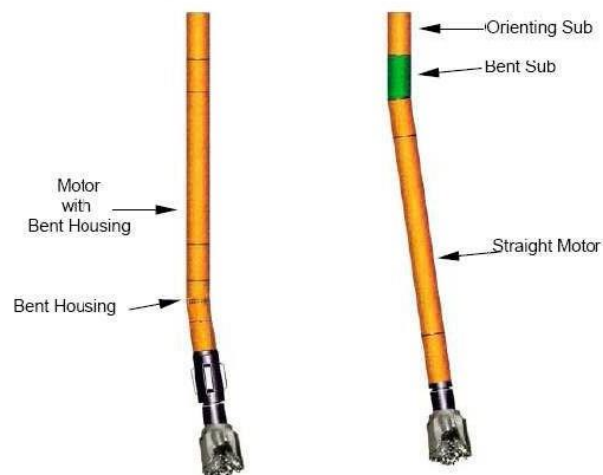
La chemise peut être positionnée et bloquée dans une position permettant d'indexer l'orientation de l'outil de déviation par rapport à l'outil de mesure.

**e) Raccords coudés :**

Les raccords coudés sont utilisés en combinaison avec un moteur de fond (de corps droit) pour le désaxer par rapport à l'axe du puits et donc désaxer l'outil de forage.

- Ils sont installés immédiatement au-dessus du moteur.
- Ils sont fabriqués soit en acier standard, soit en acier amagnétique.

La valeur de l'angle détermine le gradient de montée ou de rotation du puits, qui dépend aussi des diamètres du trou et du moteur ainsi que de la longueur de celui-ci, mais aussi de la formation.



**Figure 22: Raccord coudé incorporé ("Bent-housing")  
& Raccord coudé indépendant**

#### f) Outils de déflexion :

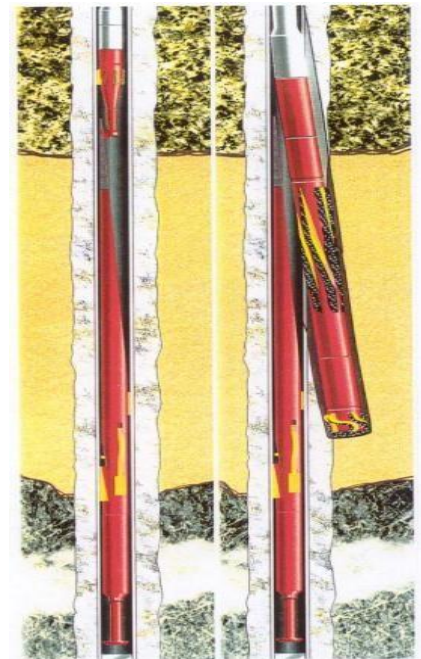
Les outils de déflexion sont souvent appelés "Whipstock" du nom de leur inventeur. Un Whipstock est un sabot d'acier dont la surface intérieure est concave et sur laquelle viendras'appuyer l'outil de forage, ainsi obliger de riper vers la paroi et de sortir du puits initial.

Les Whipstocks peuvent être :

- Permanent ou récupérables
- Orientable ou non

Il peuvent être utilisées

- En trou ouvert, pour effectuer un side-track ou démarrer un drain latéral
- Dans un tubage, pour y ouvrir une fenêtre.



**Figure 23: Whipstock**

#### 4. Équipements de mesure :

Le besoin de connaître la position de la trajectoire d'un puits dévié conduit au besoin de mesurer régulièrement l'inclinaison et l'azimut du puits. En mode orienté ces mesures permettent de plus de contrôler le Tool face du moteur et donc la direction du puits.

Ces mesures peuvent être effectuées par des instruments de mesures en fond de trou. Ils diffèrent par le type des capteurs utilisés mais surtout par leur type de transmission de l'information qui peut être :

- **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.

#### a) Outils de mesure en temps différé :

- Inclinomètres

- Single-shots magnétiques
- Multi-shots magnétiques
- Gyroscopes

**b) Outils de mesure en temps réel :**

- Steering tools:
- Les MWD (Measurement While Drilling) et LWD (Logging While Drilling)

# Chapitre IV

---

Généralités sur le système RSS et  
localisation des deux puits d'étude

---

## IV. Chapitre IV : Généralités sur le système RSS et localisation des deux puits d'étude :

### A. Système RSS :

#### 1. Le principe de déviation du RSS :

La déviation par RSS appui sur les deux actions suivantes :

- Push The Bit : où l'action de déviation est le résultat d'une poussée latérale de la BHA sur les parois du puits :
  - à l'opposé de la direction de déviation souhaitée lorsque le système utilisé constitue le premier point de contact de la BHA derrière l'outil de forage
  - Dans le sens de la direction de déviation souhaitée lorsque le système utilisé constitue le deuxième point de contact de la BHA derrière l'outil de forage
- Point The Bit : dont l'action de déviation est le résultat d'une orientation latérale du front de taille de l'outil de forage (Trépan ou PDC) est obtenue par flexion de l'arbre de transmission, ou par le biais d'un système de cardan.
- Par analogie à la définition précédente, il arrive que la configuration «Push The Bit» Suivante soit observée comme un résultat «Point The Bit» qu'il est préférable d'appeler «Pseudo Point The Bit»

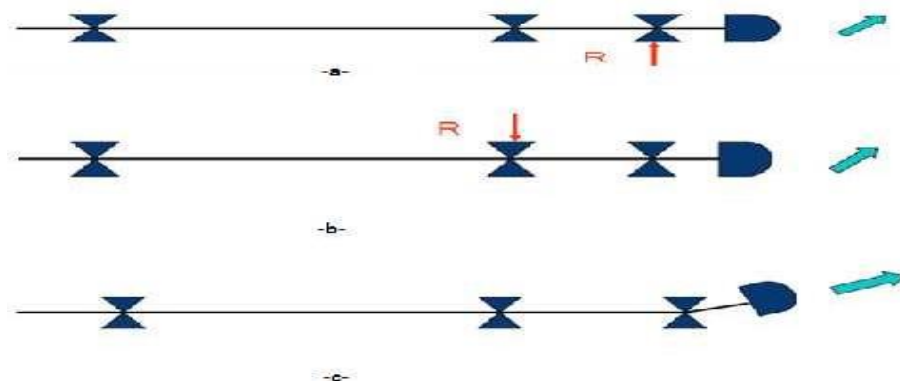


Figure 24: a-push the bit. b-push the bit c-point the bit

### **2. Les avantages de système RSS :**

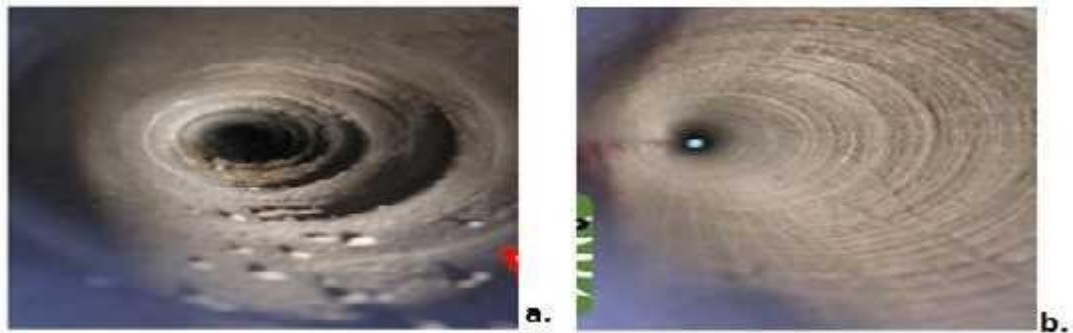
- Rotation continue de la garniture de forage en déviation , avec moins de frottements trou/tiges, un meilleur transfert du poids sur l'outil et par conséquence un accroissement de l'avancement et du potentiel grand déport
- Qualité de trou très supérieure par rapport au forage de navigation (figure.26)

Parois du trou mieux calibrées et nettement moins spiralée (par rapport à l'effet de rotation du bent housing lorsqu'il n'est pas stabilisé en near bit) contribuant à une réduction des frottements

- Opérations consécutives faciles de tubage, wire line et complétion
- Cimentation de meilleure qualité
- Un meilleur contrôle de trajectoire (configuration « Closed Loop » possible) favorisant un profil de puits moins tortueux (DLS moindres).
- Un meilleur nettoyage du trou et des conditions de Torque & Drag optimum, grâce la rotation permanente du train de tiges, permettent d'envisager une phase de forage sans « contrôle de trou » (risques de coincement réduits) .

### **3. Inconvénients de système RSS :**

- Systèmes coûteux (BHI, SLB, HPSL)
- Systèmes encore sujets à des pannes +/- rapprochées
- la durée moyenne entre deux pannes est 400 hrs (Indicatif)
- la Distance moyenne entre deux pannes est 8000 m (Indicatif)
- Exigence du personnel qualifié (opérateurs chantier et maintenances)
- Interface Homme-Machine presque exclusivement informatique
- Limité aux applications de courbure maximum de 3°/30m



**Figure 25: Qualité des parois en cours de déviation par RSS (a. Push The Bit, point)**

#### **4. La composition de BHA :**

##### **a) Masse-tiges :**

Les masses tiges perdent de leur utilité en forage très dévié et leur utilisation peut même apporter plus d'inconvénients (frottements, ... etc.) que d'avantages. De nombreux drains horizontaux sont forés sans aucune masse-tige dans la garniture.



**Figure 26: Masse tige spiralée**

##### **b) Tiges de forage :**

Les tiges de forage sont, en nombre, les principaux éléments du train de tiges. , utiliser dans ce type des puits pour prolonger et ajouter une flexibilité à la garniture de forage.

##### **c) Tige lourd HWDP :**

L'utilisation des tiges lourdes a des buts multiples :

- Fournir une provision supplémentaire de poids sur l'outil, avec l'avantage d'un diamètre extérieur réduit et donc une surface de contact réduite avec la paroi du puits.
- Servir de transition entre les masse-tiges et les tiges.
- Fournir du poids sur une coulisse de forage.



**Figure 27: Tige lourde**

**d) Coulisses de forage :**

L'utilisation des coulisses de forage aide à libérer le train de tiges en cas de collage ou de coincement dans le puits.

Le positionnement et le nombre des coulisses dans une garniture orientée vers la réalisation d'un drain horizontal doit prendre en compte l'expérience locale de forage, le profil du drain, le diamètre du trou, le nettoyage du puits, la géologie, ...etc.

Un réservoir dépletif nécessite une configuration avec deux coulisses

Si l'on n'anticipe pas de problème de collage par pression différentielle ou de nettoyage du puits, on peut se limiter à une seule coulisse. Elle peut être placée soit au-dessus de la BHA directionnelle, et dans ce cas elle doit être du type up jar, soit dans la partie inférieure du build up, et dans ce cas être de type standard.

Si la formation contient des petits bancs intercalaires durs, il faut alors incorporer une coulisse, car il y a une forte probabilité pour que la BHA se coince ou bien pose sur ces bancs.

Dans une formation connue pour ses problèmes, il faut incorporer une coulisse. Pour la même raison dans une zone réputée pour la stabilité de ses parois, certains opérateurs choisiront de ne pas descendre de coulisse du tout (c'est le cas dans le sud du Texas, avec la formation

'Austin chalk', célèbre pour le forage underbalance).



**Figure 28: Coulisses de forage**



### e) Stabilisateurs :

Un seul stabilisateur (toujours sous-dimensionné) placé au-dessus du moteur steerable suffit , à moins qu'il y est un risque de collage par pression différentielle.

Trois ou quatre stabilisateurs (near bit inclus) suffisent amplement pour une garniture de forage rotary



**Figure 29: Stabilisateurs**

### f) Les outils de forage :

Généralement le facteur le plus important durant la réalisation d'un drain horizontal est de choisir un outil avec une vitesse d'avancement élevée et un bon comportement directionnel. A la limite, c'est la fréquence des mesures du Tool face par le MWD qui peut dicter le choix de l'outil.

En cas de doute au sujet du contrôle du Tool face ou formation difficile, préférer un tricône, si la formation est abrasive (sables, grès) il faut que le pourtour des molettes protégé (inserts éventuellement recouverts de diamant) et les bras renforcés de pads d'usure spéciaux.

L'espérance de vie d'un outil dans la section horizontale est plus au moins la même que dans un puits vertical avec les mêmes paramètres de forage (WOB faible, RPM élevé), à condition que la protection du diamètre de cet outil soit adéquat pour le forage horizontal.

Les outils à tête fixe peuvent avoir des jupes calibrées plus longues, une densité de diamant ou TSP accrue, davantage de cutters PDC à la périphérie.

Les outils à diamants s'associaient aux turbines de déviation pour forer des formations dures et abrasives, ils donnent d'excellents résultats dans les sections horizontales. A l'instar des outils PDC, ces outils nécessitent une longue jupe de stabilisation afin d'augmenter tant la maîtrise de l'orientation que la qualité du trou (spiralling réduit).

**B. Localisation des deux puits et géologie de la région**

**1. Puits TNK 305 :**

**Tableau 3 : Descriptif de puit TNK305 et sa localisation**

|                                     |   |           |
|-------------------------------------|---|-----------|
| <b>Well Name:</b>                   | TNK-305 (TINERKOUK -305)  |           |
| <b>Wilaya</b>                       | ELBAYADH  |           |
| <b>Bassin</b>                       | TIMIMOUN  |           |
| <b>Field:</b>                       | TINERKOUK   |           |
| <b>Block:</b>                       | 321b  |           |
| <b>Geologic Coordinates:</b>        | Lat: 0° 36' 50.64448" E<br>Long: 29° 49' 11.97253" N                |           |
| <b>Grid Coordinates:</b>            | X= 269 427.101m Y= 3300969.343m Zt= 396.724m<br>Zs = 404.411m (msl) |           |
| <b>Coordinate system</b>            | UTM fuseau31  |           |
| <b>Well Type:</b>                   | Development   |           |
| <b>Well Profile:</b>                | <b>Horizontal</b>   |           |
| <b>Objective:</b>                   | Tournaisian   |           |
| <b>Well TD:</b>                     | 1668 m<br>MD  | 1668mTVD  |
| <b>Formation at TD:</b>             | Tournaisian   | 1668 m TD |
| <b>Target days drilling to TD :</b> | <b>67.58 days ( Horizontal )</b>                                    |           |
| <b>Drilling Rig:</b>                | TP208   |           |

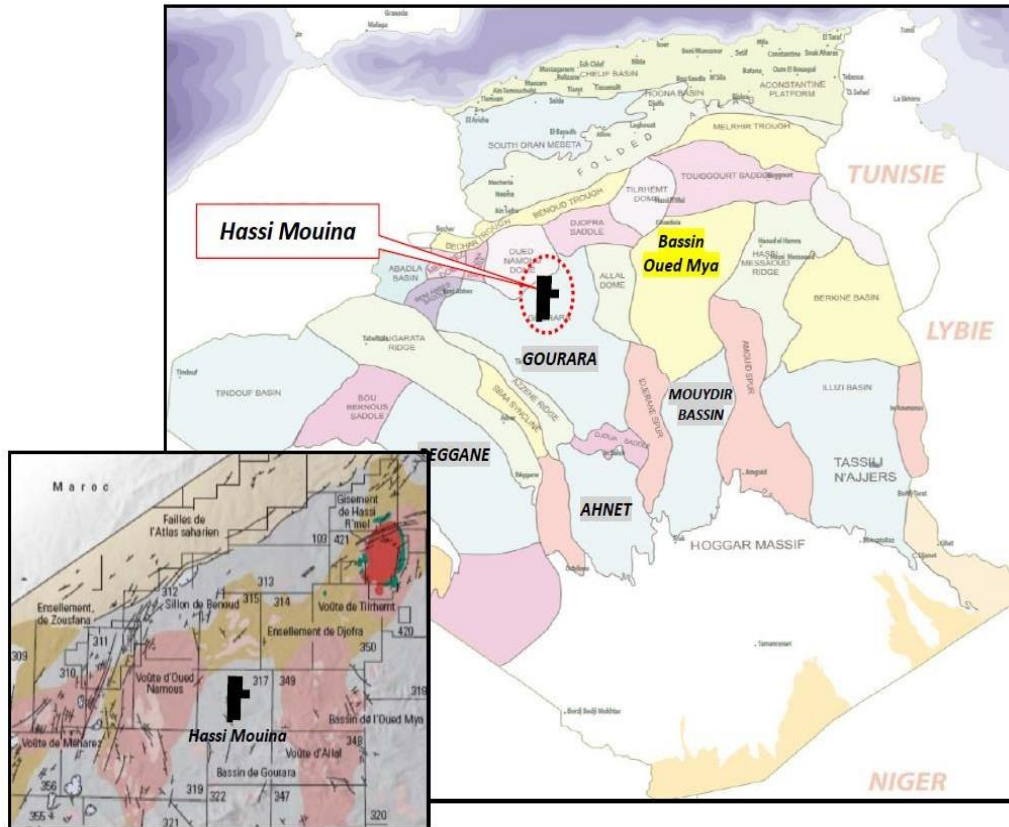


Figure 30: Geographic situation of Feidj Hassi Mouina

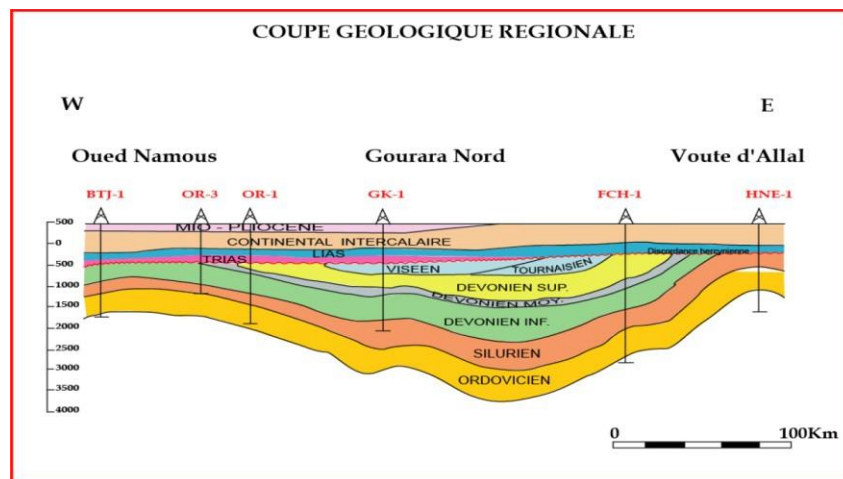


Figure32: Coupe géologique de la région

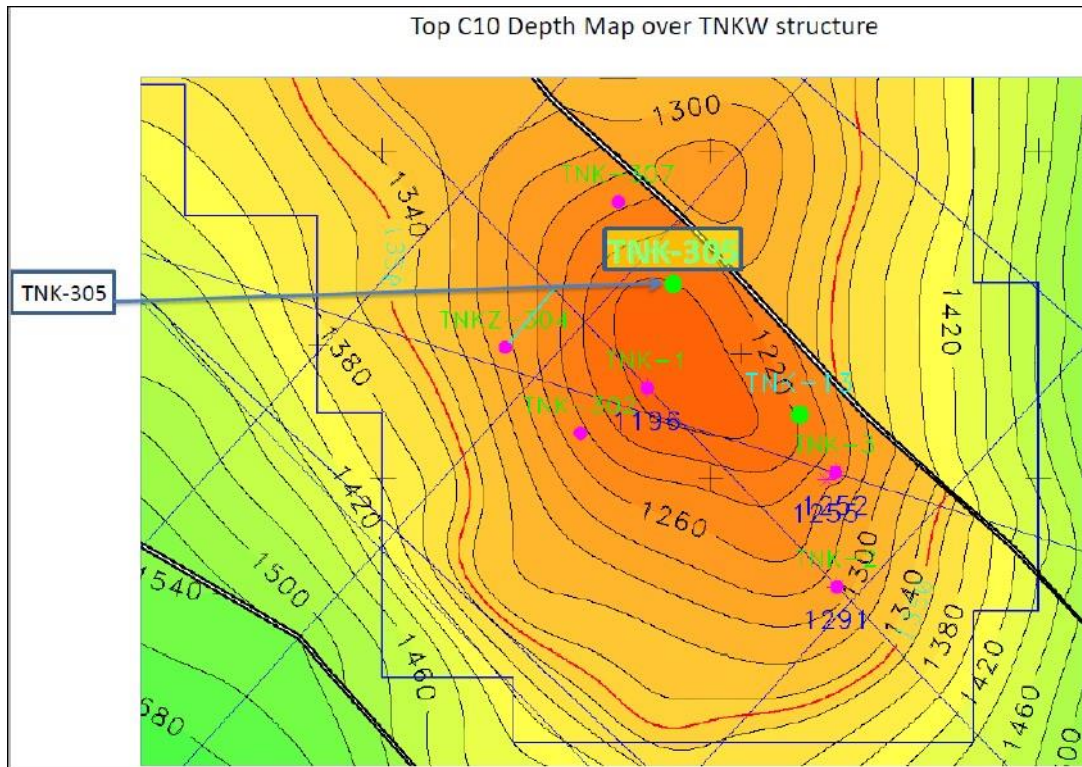


Figure 33: Cartes-en depth au toit du réservoir C10 illustrant les lignes sismiques

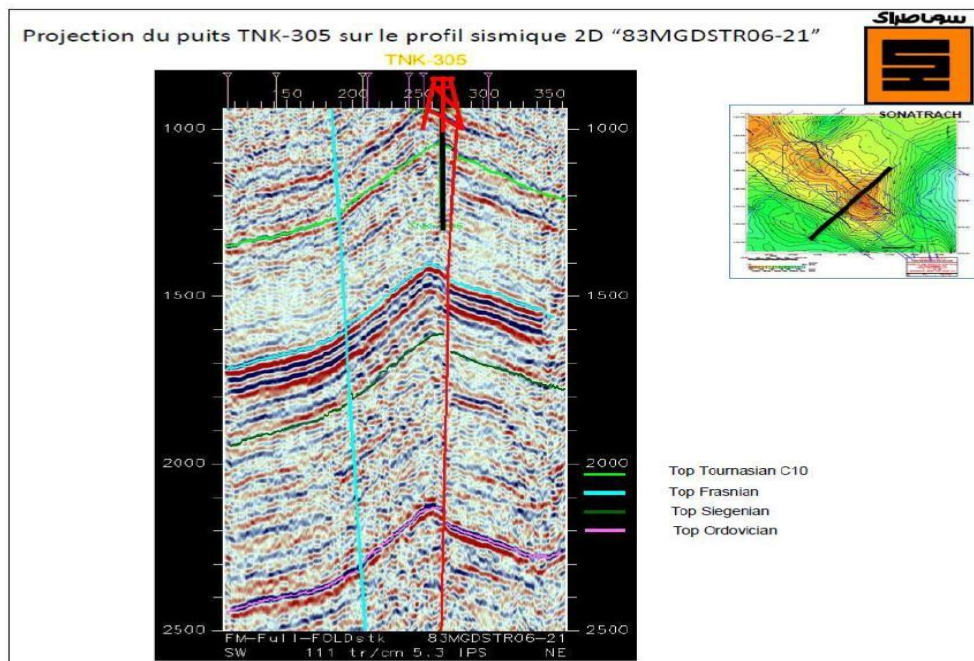


Figure 31: Projection sismique.

# Chapitre IV : Généralités sur le système RSS et localisation des deux puits d'étude

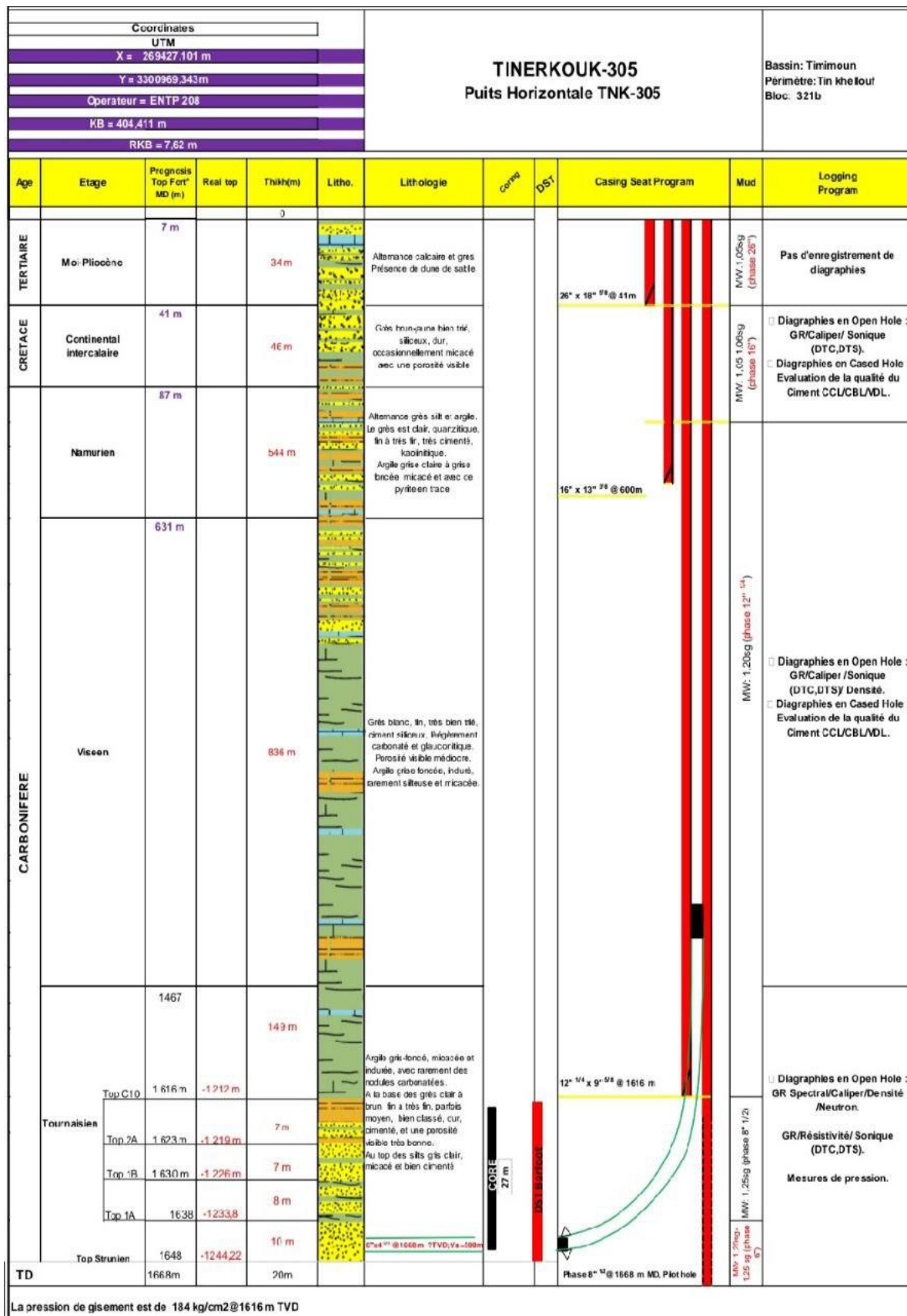


Figure 32: Architecture Graphic TNK305.

2. Puits TNK 304:

Tableau 4: Descriptif de puits TNK304 et sa localisation.

| FIELD INFORMATION   |   |  |
|---|---|--|
| Field: <b>Hassi Mouina</b>                                      | Operator: <b>Sonatrach DF</b>   | Area: <b>Algeria</b>                   |
| Field Grid System: <b>Clarke 1880 (RGS) / UTM Zone 31 North</b> | North Reference: <b>Grid North</b>  | Scale: <b>True Distance</b>            |
| Field Reference   | Horizontal Ref Pt: <b>Field Center</b>  | Vertical Ref Pt: <b>Mean Sea Level</b> |
|   | Easting: <b>271899.85m</b> Northing: <b>3298100.07m</b> Lat: <b>29°47'40.480"N</b> Long: <b>0°38'24.882"E</b> |  |

| FACILITY INFORMATION  |   |                   |   |  |
|---|---|-------------------|---|--|
| Facility: <b>TNK-304</b>  | Horizontal Ref Pt: <b>Facility Center</b>               |                   | Vertical Ref Pt: <b>Facility Vertical Datum</b>       |  |
|   | Easting: <b>267682.67m</b> Northing: <b>3300965.88m</b> |                   | Lat: <b>29°49'10.682"N</b> Long: <b>0°35'45.711"E</b> |  |
| Horiz Offset from Field Ref<br><b>2865.81m North -4217.18m East</b> | Facility Vert Ref Pt                                    | Field Vert Ref Pt | Distance  | Facility Vertical Datum to ground level:<br><b>0.00m</b> |
|   | Facility Vertical Datum                                 | to Mean Sea Level | <b>391.85m</b>  |  |
| Facility Location Uncertainty                                       | Horizontal Error Radius: <b>6.096m</b>                  |                   | Vertical Error Radius: <b>0.914m</b>                  |  |

| SLOT INFORMATION |           |          |               |                |                |               |                    |                             |                 |               |              |                      |                     |
|------------------|-----------|----------|---------------|----------------|----------------|---------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|---------------|--------------|----------------------|---------------------|
| Slot Name        | North [m] | East [m] | Grid East [m] | Grid North [m] | Latitude       | Longitude     | Elev above Fac [m] | Elev above Ground Level [m] | Active Decl [°] | Grid Conv [°] | Scale Factor | Horiz Err Radius [m] | Vert Err Radius [m] |
| TNK-304          | 0.00      | 0.00     | 267682.67     | 3300965.88     | 29°49'10.682"N | 0°35'45.711"E | 0.00               | 0.00                        | 0.29E           | 1.20W         | 1.000266     | 0.61                 | 0.30                |

| DECLINATION AND CONVERGENCE INFORMATION                   |  |  |
|---|--|--|
| Data Source: <b>BGGM (1900.0 to 2019.0)</b>               | Calculation Date: <b>03/Mar/2018</b>       |  |
| Magnetic Flux Dip Angle: <b>39.95°</b>                    | Magnetic Field Strength: <b>40545.3 nT</b> |  |
| Declination: <b>0.29° East</b>                            | Convergence: <b>1.20° West</b>             |  |
| Magnetic North is 0.29 degrees East of True North         |  |  |
| Grid North is 1.20 degrees West of True North             |  |  |
| To correct azimuth from True to Grid add 1.20 degrees     |  |  |
| To correct azimuth from Magnetic to Grid add 1.49 degrees |  |  |

## Chapitre IV : Généralités sur le système RSS et localisation des deux puits d'étude

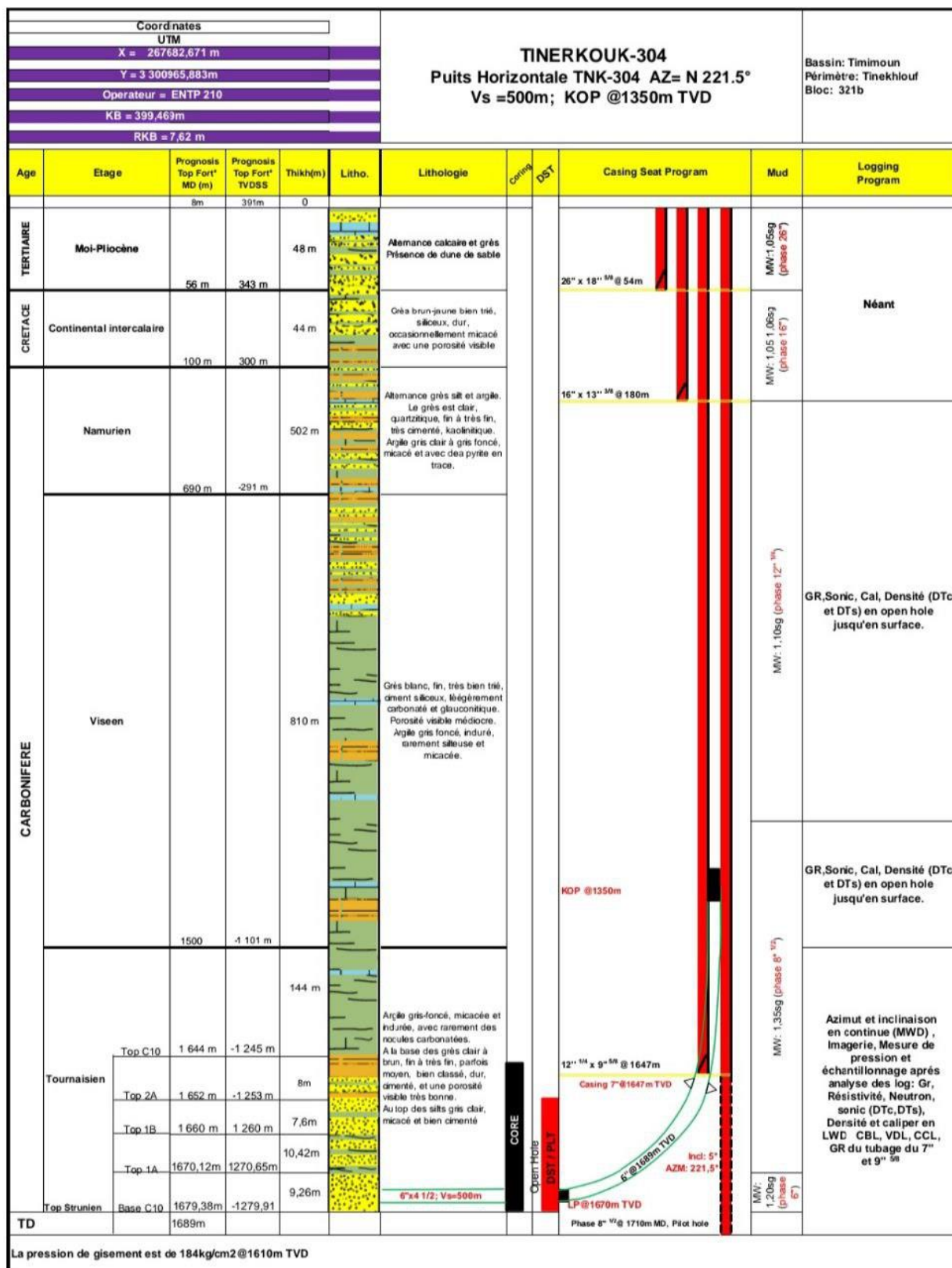


Figure 33: Architecture Graphique TNK305.

# **Chapitre V**

---

Généralités sur les deux puits d'étude

---



## V. Chapitre V : Généralités sur les deux puits d'étude

### A. Objectif des deux puits :

#### 1. Puits TNK 305 :

- **La sécurité est toujours l'objectif numéro 1 pour toutes les activités opérationnelles sur le site de forage.**
  - Assurer un environnement de travail sûr pour tous les employés et le personnel impliqué dans les opérations.
  - Minimiser les risques d'accidents et de blessures en suivant des procédures strictes de sécurité.
  - Mettre en place des mesures préventives pour éviter les incidents et les situations d'urgence.
- **Achever toutes les opérations conformément aux directives HSE (Hygiène, Sécurité et Environnement) standard de Sonatrach afin de ne pas avoir d'accidents et d'éviter tout impact environnemental négatif.**
  - Suivre rigoureusement les protocoles et les procédures établis par Sonatrach pour garantir la sécurité et la protection de l'environnement.
  - Surveiller en permanence les opérations pour identifier et corriger les écarts par rapport aux normes HSE.
  - Promouvoir une culture de sécurité et de respect de l'environnement parmi tous les travailleurs.
- **Évaluer les formations cibles pour la présence d'hydrocarbures.**
  - Utiliser des technologies et des techniques de pointe pour analyser les formations géologiques.
  - Effectuer des tests de formation pour détecter et quantifier la présence d'hydrocarbures.
  - Collaborer avec des experts pour interpréter les données et évaluer le potentiel des formations.
- **Assurer des conditions de puits appropriées pour permettre le test et l'évaluation de tous les réservoirs.**
  - Maintenir la stabilité et l'intégrité du puits tout au long des opérations de forage et d'évaluation.

- Préparer le puits pour des tests de production en utilisant des équipements et des méthodes adaptés.
- Garantir que les conditions du puits permettent une évaluation précise des réservoirs.
- **Confirmer les ressources en gaz dans les réservoirs Tournaisiens.**
  - Réaliser des analyses détaillées pour valider la présence et la quantité de gaz dans les réservoirs identifiés.
  - Utiliser des méthodes de test fiables pour confirmer les découvertes de gaz.
  - Documenter et rapporter les résultats pour une planification et une prise de décision informées.
- **Maximiser la récupération de carottes dans les sections sélectionnées.**
  - Utiliser des techniques de carottage efficaces pour extraire des échantillons représentatifs des formations.
  - Minimiser les pertes et les dommages aux carottes pendant l'extraction et le transport.
  - Analyser les carottes pour obtenir des informations précieuses sur la géologie et les propriétés des réservoirs.

## 2. Puits TNK304 :

- **Localisation du puits : Bloc 321b dans le champ TIMIMOUN / HASSI MOUINA (TNK).**
  - Le puits est situé dans la région de TIMIMOUN / HASSI MOUINA, spécifiquement dans le bloc 321b.
  - Le champ TNK se trouve dans une région connue pour ses réserves de gaz récupérables.
- **Objectif pour ce champ : développer ses réserves de gaz récupérables en forant treize (13) puits horizontaux dans la formation Tournaisienne contenant du gaz à environ 1635m.**
  - Le développement de cette réserve de gaz nécessite le forage de treize puits horizontaux.
  - La formation Tournaisienne ciblée contient du gaz à une profondeur approximative de 1635 mètres.
- **Réservoir cible pour le champ : les sables de Tournaisien C10 situés à une profondeur d'environ 1635m (1235m TVD MSL).**
  - Les sables de Tournaisien C10, d'âge Carbonifère, sont la formation géologique ciblée.
  - Ces sables se trouvent à une profondeur de 1635 mètres, soit 1235 mètres TVD MSL (profondeur verticale mesurée à partir du niveau de la mer).

➤ **Découvertes de gaz dans les puits d'exploration :**

- Les quatre puits d'exploration forés dans la région de TNK et TNKW ont tous découvert du gaz dans le réservoir de Tournaisien C10.
- Ces découvertes confirment le potentiel gazier de la région.

➤ **Développement du réservoir dans la partie sud de la licence Hassi Mouina:**

- Le réservoir de Tournaisien dans cette zone est développé comme une séquence de 20 à 30 mètres d'épaisseur.
- Les meilleurs sable se trouvent dans les 5 à 10 mètres inférieurs du réservoir.

➤ **Propriétés du réservoir :**

- Le réservoir est estimé contenir 21 milliards de Sm<sup>3</sup> (0,75 Tcf) de gaz.
- La porosité moyenne du réservoir varie entre 11 et 14 %, avec une perméabilité de l'ordre de 2 à 4 md.

➤ **Besoins en puits horizontaux en raison de la faible perméabilité :**

- La très faible perméabilité du réservoir nécessite l'utilisation de puits horizontaux pour produire du gaz à un débit suffisant.
- Ces puits permettront d'exploiter efficacement le gaz contenu dans les sables de Tournaisien C10.

➤ **Couvercle du réservoir C10 : séquence argileuse du Tournaisien, une argilite serrée sans perméabilité.**

- La couverture du réservoir est constituée d'une séquence d'argilite du Tournaisien.
- Cette formation est caractérisée par une absence de perméabilité, agissant comme une couche de confinement efficace pour le réservoir de gaz.

## **B. Moteurs RSS utilise dans le puits TNK 304 :**

### **1. Puits TNK 304 :**

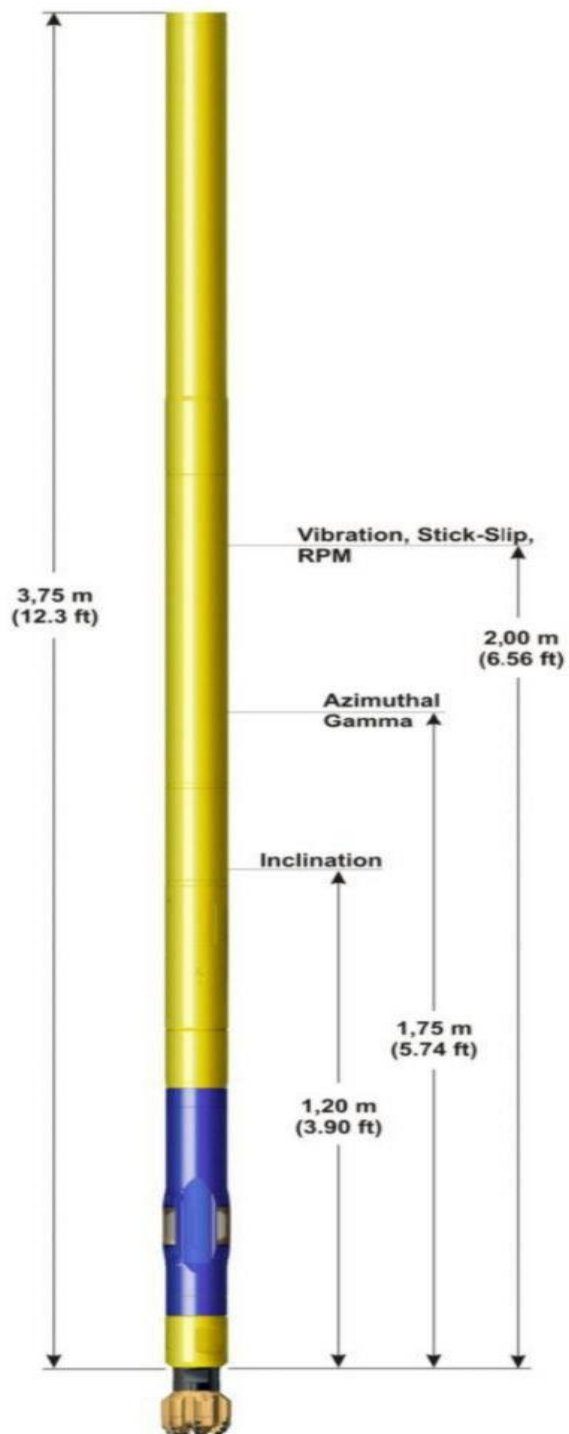
Le moteur RSS utilise dans la phase 6'' est nommé Auto Trak GT4. Le moteur RSS Auto Trak GT4G est un dispositif de pointe conçu pour optimiser le processus de forage directionnel. Ce moteur joue un rôle crucial dans la phase 6'', où il assure une performance et une précision accrues dans des conditions de forage souvent difficiles. Grâce à sa technologie avancée, le GT4G offre une rotation contrôlée et un ajustement directionnel précis, permettant ainsi une meilleure gestion de la trajectoire du puits.

**a) Présentation et caractéristique de moteur RSS utilise :**

- L'unité de direction est le cœur de tous les systèmes de forage rotatif dirigé AutoTrak™, offrant un contrôle directionnel de premier ordre dans des applications allant du forage directionnel axé sur la performance dans des environnements de développement à des puits à portée étendue de haute précision et sur mesure. Le système a prouvé sa fiabilité et ses capacités dans une large gamme de formations et d'environnements à travers le monde.
- L'unité de direction AutoTrak de 4-3/4 pouces avec mesure gamma azimutale près du trépan intégré combine les performances de forage rotatif dirigé avec une mesure critique de la formation à une distance minimale du trépan. Le système est un élément clé pour maintenir le puits dans la zone de production optimale et minimiser l'exposition à des formations problématiques. Cela représente un avantage particulier dans les ensembles de forage AutoTrak alimentés par moteur, où les systèmes de mesure pendant le forage (MWD) et de diagraphie pendant le forage (LWD) sont poussés plus haut dans la colonne de forage.

**Tableau 5: Caractéristique et avantages de moteur RSS utilise**

| Caractéristiques  | Avantages   |
|---|---|
| Rotation continue de la colonne de forage depuis la surface et des cibles de direction pendant le forage.   | Performance de forage maximale avec un risque et un temps non productif minimaux.   |
| Direction précise en boucle fermée avec ajustement continu et fluide de la direction de forage et mode avancé de maintien de l'inclinaison.                                 | Sections droites et précises avec un calibre exact et des courbes précises, offrant une excellente qualité de trou pour des complétions sans problème et une amélioration du taux de pénétration (ROP).   |
| Mesure réelle des rayons gamma azimutaux à seulement 5,74 pieds (1,75 m) au-dessus du trépan avec une capacité d'imagerie jusqu'à 16 secteurs.                              | <p>Placement optimal du puits dans la zone optimale grâce à la navigation en temps réel dans le réservoir.</p> <p>Détection précoce des changements de formation pour permettre l'arrêt géologique et minimiser la pénétration des zones problématiques.</p> <p>Images gamma de haute qualité pour l'évaluation de la formation et la détermination de l'inclinaison.</p> |
| Mesure de la dynamique de forage près du trépan.  | Performance et fiabilité de forage optimisées dans les applications RSS alimentées par moteur.  |
| Plaquettes de direction découplées de la rotation rapide dans une manche courte, tournant lentement.  | Direction cohérente dans tous les environnements, y compris les formations tendres et les trous surdimensionnés.  |
| Direction indépendante du régime de pression du trépan.   | Performance optimisée du trépan et gestion de la pression de circulation équivalente (ECD).   |
| Les plaquettes se rétractent complètement dans le corps de l'outil sur commande ou en cas de coupure d'alimentation, permettant la rotation complète de toutes les parties. | Risque de coincement minimisé et aucune restriction dans les opérations de reconditionnement et de remontée   |



**Figure 34: Moteur RSS utilise Auto Trak**

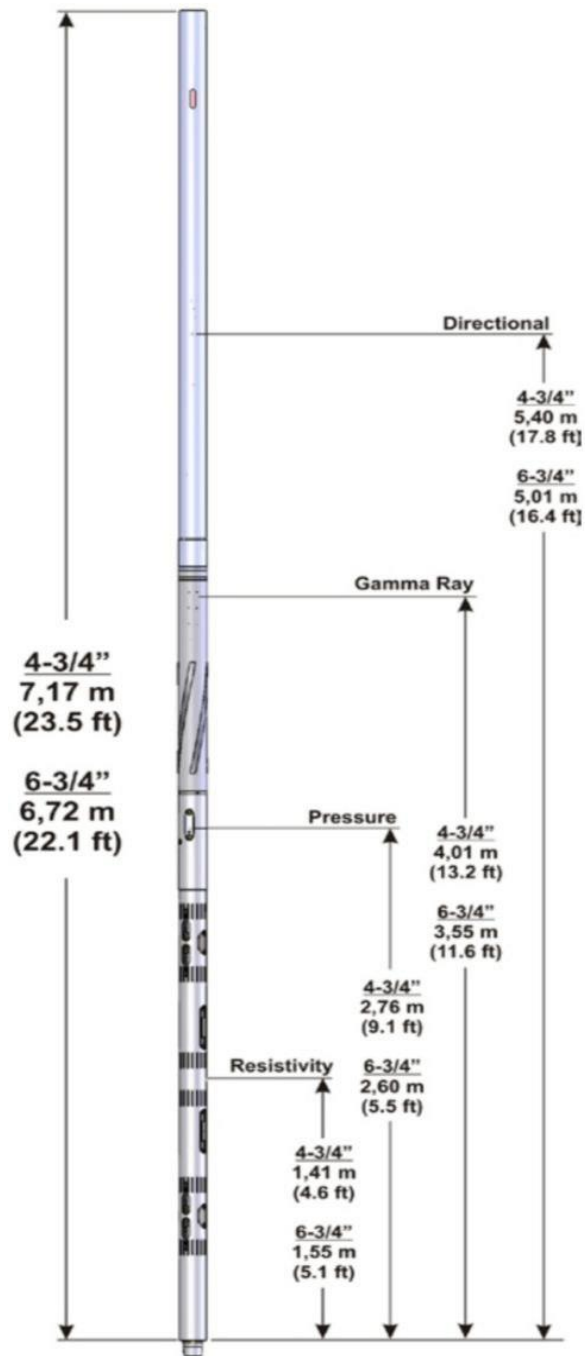


Figure 35: Composants moteur Auto Trak

**C.BHA des deux puits :**

**1. TNK 305 :**

La garniture de forage utilise pour cette phase (6'') est représenté dans le tableau qui suit :

**Tableau 6: Détail BHA TNK 305 phase 6''**

| String Components |                          |          |      |             |       |         |          |            |                             |          |             |
|-------------------|--------------------------|----------|------|-------------|-------|---------|----------|------------|-----------------------------|----------|-------------|
| #                 | Component                | S/N      | Mfr  | Gauge OD in | OD in | ID in   | FN OD in | FN Len. cm | Thread                      | Length m | Total Len m |
| 15                | Drill pipe               |          |      |             | 5     | 4.276   |          |            | (BP) 4 1/2 IF - 4 1/2 IF    | 100.00   | 1234.10     |
| 14                | Sub - X/O                |          |      |             | 5     | 3 1/4   |          |            | (BP) 4 1/2 IF - 3 1/2 IF    | 0.36     | 1134.10     |
| 13                | Drill pipe x 36          |          |      |             | 3 1/2 | 2.602   |          |            | (BP) 3 1/2" IF - 3 1/2" IF  | 340.50   | 1133.74     |
| 12                | HWDP x 5                 |          |      |             | 3 1/2 | 2 1/4   |          |            | (BP) 3 1/2" IF - 3 1/2" IF  | 47.35    | 793.24      |
| 11                | Jar                      |          |      |             | 4 3/4 | 2 1/4   |          |            | (BP) 3 1/2" IF - 3 1/2" IF  | 9.00     | 745.89      |
| 10                | HWDP x 18                |          |      |             | 3 1/2 | 2 1/4   |          |            | (BP) 3 1/2" IF - 3 1/2" IF  | 170.46   | 736.89      |
| 9                 | Drill pipe x 57          |          |      |             | 3 1/2 | 2.602   |          |            | (BP) 3 1/2" IF - 3 1/2" IF  | 535.80   | 566.43      |
| 8                 | HWDP                     |          |      |             | 3 1/2 | 2 1/4   |          |            | (BP) 3 1/2" IF - 3 1/2" IF  | 9.47     | 30.63       |
| 7                 | Sub - circulation        |          | BHGE |             | 4 3/4 | 2 1/4   |          |            | (BP) 3 1/2" IF - 3 1/2" IF  | 0.70     | 21.16       |
| 6                 | NM Sub - filter          |          | BHGE |             | 4 3/4 | 2 1/2   |          |            | (BP) 3 1/2" IF - 3 1/2" IF  | 1.70     | 20.46       |
| 5                 | Stab - string            |          |      | 5 3/4       | 4 3/4 | 1 1/2   |          |            | (BP) 3 1/2" IF - 3 1/2" IF  | 1.56     | 18.76       |
| 4                 | MWD - NaviGamma          |          | BHGE |             | 4 3/4 | 2 11/16 |          |            | (BP) 3 1/2" IF - 3 1/2" IF  | 1.20     | 17.20       |
| 3                 | Drill pipe - compressive |          | BHGE | 4 3/4       | 3 1/2 | 2 11/16 |          |            | (BP) 3 1/2" IF - 3 1/2" IF  | 9.45     | 16.00       |
| 2                 | Motor - steerable        | 1.2° AKO | BHGE | 5 7/8       | 4.874 | 3.800   |          |            | (BB) 3 1/2" IF - 3 1/2" Reg | 6.35     | 6.55        |
| 1                 | Bit - PDC - fixed cutter |          |      | 6           | 6     |         |          |            | 3 1/2" Reg                  | 0.20     | 0.20        |

➤ **Résumé explicatif :**

**Composants :** Le BHA se compose de 15 éléments différents, allant du trépan PDC à des tubes de forage compressif et de circulation.

**Dimensions :** Les dimensions des composants, y compris le diamètre extérieur (OD), le diamètre intérieur (ID), et les longueurs totales sont spécifiées.

**Fabricant (Mfr) :** Plusieurs composants sont fabriqués par BHGE (Baker Hughes, a GE company).

**Filetage :** Les spécifications de filetage varient principalement entre (BP) 3 1/2" IF et (BB) 3 1/2" Reg.



**Longueurs** : Les longueurs des composants vont de 0,20 m (trépan) à 535,80 m (tubes de forage).

**2. TNK 304 :**

La garniture de forage utilise pour cette phase (6'') est représenté dans le tableau qui suit :

**Tableau 7 : Détail BHA TNK 304 phase 6''**

| Case - TNK-304 _ 6" _ATK GT4G AZT BHA G.0                     |                          |               |                 |             |       |            |          |            |                                    |          |             |
|---|--------------------------|---------------|-----------------|-------------|-------|------------|----------|------------|------------------------------------|----------|-------------|
| Operator  |                          | SH-DF         |                 | Facility    |       | TNK-304    |          |            |                                    |          |             |
| Well  |                          | TNK-304       |                 | Field       |       | TIMIMIMOUN |          |            |                                    |          |             |
| String Components   |                          |               |                 |             |       |            |          |            |                                    |          |             |
| #   | Component                | S/N           | Mfr             | Gauge OD in | OD in | ID in      | FN OD in | FN Len. cm | Thread                             | Length m | Total Len m |
| 16  | Drill pipe               |               |                 |             | 3 1/2 | 2.992      |          |            | (BP) 3 1/2 IF - 3 1/2 IF           | 1.00     | 1072.01     |
| 15  | HWDP x 5                 |               | Drilltech Group |             | 3 1/2 | 2 1/4      |          |            | (BP) 3 1/2 IF - 3 1/2 IF           | 47.35    | 1071.01     |
| 14  | Jar                      |               | NOV             |             | 4 1/2 | 2 3/8      |          |            | (BP) 3 1/2 IF - 3 1/2 IF           | 8.69     | 1023.66     |
| 13  | HWDP x 24                |               | Drilltech Group |             | 3 1/2 | 2 1/4      |          |            | (BP) 3 1/2 IF - 3 1/2 IF           | 226.80   | 1014.97     |
| 12  | Drill pipe x 79          |               |                 |             | 3 1/2 | 2.992      |          |            | (BP) 3 1/2 IF - 3 1/2 IF           | 737.10   | 788.17      |
| 11  | HWDP x 3                 |               | Drilltech Group |             | 3 1/2 | 2 1/4      |          |            | (BP) 3 1/2 IF - 3 1/2 IF           | 28.35    | 51.07       |
| 10  | Sub - circulation        |               | BHGE            |             | 4 3/4 | 1 1/2      |          |            | (BP) 3 1/2 IF - 3 1/2 IF           | 2.55     | 22.72       |
| 9   | NM Sub - filter          |               | BHGE            |             | 4 3/4 | 1 1/2      |          |            | (BP) 3 1/2 IF - 3 1/2 IF           | 1.86     | 20.17       |
| 8   | Stab - string            |               | BHGE            | 5 7/8       | 4 5/8 | 2 1/2      |          |            | (BP) 3 1/2 IF - 3 1/2 IF           | 1.96     | 18.31       |
| 7   | Sub - float              |               | BHGE            |             | 4 3/4 | 1 1/2      |          |            | (BP) 3 1/2 IF - 3 1/2 IF           | 0.80     | 16.35       |
| 6   | NM Sub - stop            |               | BHGE            |             | 4 3/4 | 2 1/4      |          |            | (BP) 3 1/2 IF - 4 3/4" T2          | 0.89     | 15.55       |
| 5   | BCPM                     |               | INTEQ           |             | 4 3/4 | 2.960      |          |            | (BP) 4 3/4" T2 Box - 4 3/4" T2 Pin | 3.38     | 14.66       |
| 4   | OnTrak - MWD             | AziTrak       | INTEQ           | 5.335       | 4 3/4 | 3.080      |          |            | (BP) 4 3/4" T2 Box - 4 3/4" T2 Pin | 7.17     | 11.28       |
| 3   | MWD - stab - mod         |               | INTEQ           | 5 7/8       | 4 3/4 | 1.496      |          |            | (BP) 4 3/4" T2 Box - 4 3/4" T2 Pin | 1.00     | 4.11        |
| 2   | AT_SU                    | AutoTrak GT4G | INTEQ           |             | 4 3/4 | 1.437      |          |            | (BP) 4 3/4" T2 - 3 1/2" REG        | 2.85     | 3.11        |
| 1   | Bit - PDC - fixed cutter |               |                 | 6           | 6     |            |          |            | 3-1/2" Reg Pin                     | 0.26     | 0.26        |
| <b>16 String components with a total length of 1072.01 m.</b> |                          |               |                 |             |       |            |          |            |                                    |          |             |

○ **Résumé explicatif :**

**Composants** : Le BHA se compose de 16 éléments différents, allant du trépan PDC aux sous-ensembles de circulation et de filtration.

**Dimensions** : Les dimensions des composants, y compris le diamètre extérieur (OD), le diamètre intérieur (ID), et les longueurs totales, sont spécifiées.

**Fabricants (MFR)** : Plusieurs composants sont fabriqués par Drilltech Group, NOV, BHGE, et INTEQ.

**Filetage** : Les spécifications de filetage varient principalement entre (BP) 3 1/2" IF et (BP) 3 3/4" T2 Box - 4 3/4" T2 Pin.

**Longueurs** : Les longueurs des composants vont de 0,26 m (trépan) à 737,10 m (tubes de forage).

- Ce BHA des deux puits (TNK305, TNK304) est soigneusement conçu pour maximiser la performance de forage et minimiser les risques. Les composants sont sélectionnés pour offrir une stabilité optimale, une mesure précise des paramètres de forage, et une capacité de direction fine. L'accent sur les composants de haute qualité et les instruments avancés permet une optimisation continue du processus de forage, essentielle pour des opérations efficaces et sûres.

## **D. Problèmes majeurs rencontrés dans la phase 6" :**

### **1. Puits TNK 305 :**

- **Formation dure :**

- Usure accélérée des trépan et des outils de forage : Les trépan et outils s'usent plus rapidement, nécessitant des remplacements fréquents et augmentant les coûts.

- Augmentation des vibrations et des chocs : Cela peut endommager les équipements et réduire leur durée de vie.

- Déviation non contrôlée du puits : La dureté de la formation peut entraîner des déviations inattendues, compromettant la trajectoire prévue du puits.

- **Faible taux de pénétration (ROP) :**

- Prolongation de la durée de forage : Cela augmente les coûts opérationnels et peut retarder l'ensemble du projet.

- Coincement de la colonne de forage : Le temps prolongé dans le trou augmente le risque de coincement, entraînant des arrêts et des opérations de récupération coûteuses.

- Exposition prolongée des équipements aux conditions difficiles : Cela peut entraîner des pannes mécaniques et nécessiter des réparations fréquentes.

- Impact sur la planification du projet : Les retards dus à un faible ROP peuvent entraîner des dépassements de budget et des déviations des délais prévus.

- **Pression de formation élevée :**
  - Les formations dures peuvent être associées à des pressions élevées, augmentant le risque et nécessitant une gestion rigoureuse de la pression.
- **Problèmes de circulation :**
  - Les formations dures peuvent entraîner des problèmes de circulation des fluides de forage, compromettant l'efficacité du transport des débris et nécessitant des ajustements de la formulation des boues.

## 2. Puits TNK 304 :

- **Formation dure :**
  - Usure accélérée des trépan et des outils de forage : Les trépan et outils s'usent plus rapidement dans des formations dures, ce qui nécessite des remplacements fréquents et augmente les coûts opérationnels.
  - Déviation non contrôlée du puits\*\* : La dureté de la formation peut entraîner des déviations inattendues, compromettant ainsi la trajectoire prévue du puits.
- **Poussées de gaz (Kicks) :**
  - Blowout (éruption) : Une poussée de gaz non contrôlée peut conduire à un blowout, entraînant des risques importants pour la sécurité du personnel et des équipements.
  - Dommages aux équipements : Les poussées de gaz peuvent endommager les équipements de forage, nécessitant des réparations ou des remplacements coûteux.
  - Temps d'arrêt : La gestion des poussées de gaz peut nécessiter des interruptions des opérations de forage, augmentant les coûts et retardant le projet.
- **Pertes de circulation :**
  - Perte de circulation : La perte de fluide de forage dans la formation peut compromettre la stabilité du puits et nécessiter des traitements pour rétablir la circulation.
  - Effondrement du puits : Les pertes importantes peuvent déstabiliser la formation autour du puits, augmentant le risque d'effondrement.
  - Augmentation des coûts : Les traitements pour contrôler les pertes de fluide peuvent être coûteux et augmenter les dépenses globales du projet.
- **Trou étroit et colmatage (Pack off) :**
  - Coincement de la colonne de forage : Un trou étroit ou colmaté peut provoquer le coincement de la colonne de forage, entraînant des arrêts prolongés et des opérations de récupération difficiles.

- Détérioration des équipements : Le colmatage peut exercer une pression excessive sur les équipements, accélérant leur usure et nécessitant des remplacements fréquents.
- Risque de déviation : Les conditions de trou étroit peuvent rendre difficile le maintien de la trajectoire prévue, compromettant la précision du forage.

### **E. Analyse Comparative des Puits TNK 305 et TNK 304 :**

Les puits TNK 305 et TNK 304, bien qu'étant situés dans des formations similaires, présentent des défis distincts et nécessitent des approches spécifiques pour optimiser les opérations de forage et minimiser les risques. Cette analyse vise à comparer les problèmes rencontrés dans ces deux puits,.

#### **➤ Formation Dure**

TNK 305 et TNK 304 rencontrent tous deux des difficultés liées à la dureté de la formation. Les impacts de cette condition incluent :

- **Usure Accélérée des Trépans et Outils de Forage :**
  - **TNK 305 :** L'usure rapide des trépans nécessite des remplacements fréquents, augmentant les coûts et le temps d'arrêt. Cela entraîne également une diminution de l'efficacité opérationnelle, car les trépans doivent être remplacés plus souvent.
  - **TNK 304 :** Les mêmes problèmes d'usure se manifestent, mais la gestion rigoureuse des intervalles de remplacement et l'utilisation de trépans plus résistants peuvent atténuer cet effet.
- **Augmentation des Vibrations et des Chocs :**
  - **TNK 305 :** Les vibrations excessives peuvent endommager les équipements de forage, entraînant des pannes coûteuses et des temps d'arrêt imprévus. Les chocs peuvent également provoquer des microfissures dans les outils, réduisant leur durée de vie.
  - **TNK 304:** La formation dure augmente les vibrations, mais l'utilisation de stabilisateurs peut aider à réduire ces effets.
- **Déviations Non Contrôlées du Puits :**
  - **TNK 305:** La dureté de la formation peut entraîner des déviations inattendues, compromettant la trajectoire prévue du puits. Une surveillance en temps réel et des ajustements fréquents sont nécessaires pour maintenir la trajectoire correcte.
  - **TNK 304:** La gestion précise de la trajectoire est essentielle. L'utilisation de systèmes de forage directionnel avancés peut aider à maintenir la trajectoire du puits malgré la dureté de la formation.

➤ **Faible Taux de Pénétration (ROP)**

- **TNK 305** est particulièrement affecté par un faible taux de pénétration, ce qui a des conséquences significatives :

- **Prolongation de la Durée de Forage :**

- La durée prolongée du forage augmente les coûts opérationnels et peut retarder l'ensemble du projet. Cela est particulièrement critique pour le puits **TNK 305**, où le faible ROP rallonge la durée de chaque phase de forage.

- **Coincement de la Colonne de Forage :**

- Le temps prolongé dans le trou augmente le risque de coincement, entraînant des arrêts et des opérations de récupération coûteuses. Une surveillance attentive et des techniques de prévention du coincement sont essentielles pour atténuer ce risque.

➤ **Poussées de Gaz (Kicks)**

- **TNK 304** fait face à des risques accrus de poussées de gaz, nécessitant une attention particulière :

- **Blowout (Éruption) :**

- Une poussée de gaz non contrôlée peut conduire à un blowout, présentant des risques importants pour la sécurité du personnel et des équipements. Des systèmes de prévention des éruptions et une gestion rigoureuse de la pression sont essentiels.

- **Dommages aux Équipements :**

- Les poussées de gaz peuvent endommager les équipements de forage, nécessitant des réparations ou des remplacements coûteux. L'installation de dispositifs de détection et de contrôle des gaz peut atténuer ce risque.

- **Temps d'Arrêt :**

- La gestion des poussées de gaz peut nécessiter des interruptions des opérations de forage, augmentant les coûts et retardant le projet. Des protocoles de gestion des incidents doivent être en place pour minimiser ces interruptions.

➤ **Pertes de Circulation**

- Les pertes de circulation sont particulièrement problématiques pour **TNK 304**:

- **Perte de Circulation :**

- La perte de fluide de forage dans la formation peut compromettre la stabilité du puits et nécessiter des traitements pour rétablir la circulation. L'utilisation de boues de forage adaptées et de techniques de gestion des pertes est cruciale.

- **Effondrement du Puits :**

- Les pertes importantes peuvent déstabiliser la formation autour du puits, augmentant le risque d'effondrement. Une gestion proactive des pertes de circulation peut prévenir ces effondrements.

- **Augmentation des Coûts :**

- Les traitements pour contrôler les pertes de fluide peuvent être coûteux et augmenter les dépenses globales du projet. Une analyse économique détaillée est nécessaire pour évaluer les options de traitement les plus efficaces.

➤ **Trou Étroit et Colmatage (Pack Off)**

TNK 304 est également confronté à des problèmes de trou étroit et de colmatage :

- **Coincement de la Colonne de Forage :**

- Un trou étroit ou colmaté peut provoquer le coincement de la colonne de forage, entraînant des arrêts prolongés et des opérations de récupération difficiles. Des techniques de prévention et des équipements spécialisés peuvent réduire ce risque.

- **Détérioration des Équipements :**

- Le colmatage peut exercer une pression excessive sur les équipements, accélérant leur usure et nécessitant des remplacements fréquents. La maintenance préventive et l'inspection régulière des équipements sont essentielles.

- **Risque de Déviation :**

- Les conditions de trou étroit peuvent rendre difficile le maintien de la trajectoire prévue, compromettant la précision du forage. L'utilisation de systèmes de guidage avancés peut aider à maintenir la trajectoire.

**Conclusion :**

Les puits TNK 305 et TNK 304 présentent des défis distincts malgré des problèmes communs de formation dure.

- **TNK 305 :** La principale difficulté réside dans le faible taux de pénétration, augmentant les coûts et les risques de coincement. La gestion de la pression et des problèmes de circulation est également cruciale.

- **TNK 304 :** Les poussées de gaz et les pertes de circulation représentent des défis majeurs, nécessitant des stratégies de gestion rigoureuses pour éviter les blowouts et les

effondrements de puits. Les problèmes de trou étroit et de colmatage nécessitent une attention particulière pour prévenir les incidents de coincement.

En conclusion, une approche personnalisée est essentielle pour chaque puits. Pour TNK 305, l'optimisation des trépan et des techniques de forage est primordiale, tandis que pour TNK 304, la surveillance et la gestion rigoureuse des conditions de formation et des gaz sont critiques pour minimiser les risques et maximiser les performances.

## **F. Procédures de forage suivies pour éviter les problèmes :**

### **1. La procédure suivie dans TNK 305 :**

- S'assurer que tous les matériaux et équipements nécessaires sont sur le site. Les composants du BHA doivent être mesurés en longueur, diamètre extérieur (OD), diamètre intérieur (ID), et collet de récupération (si applicable).
- S'assurer d'avoir environ 3000m de tuyaux de forage de 3 ½" G disponibles.
- Changer les chemises de la pompe à boue pour des chemises de 6".
- Avoir des géologues de boue sur place et prêts à commencer le forage du cuvelage de 7".
- Avoir les trépan de forage principaux prêts avec les buses appropriées installées. Les trépan de rechange doivent être disponibles sur le site.
- Inspecter casing head et l'équipement associé.
- Assurer que tous les composants du BHA directionnel sont disponibles sur le site de forage.
- À la profondeur finale (TD), faites circuler au moins jusqu'à ce que les tamis soient propres, vérifiez le débit, puis retirez la tige de forage (POOH) en vérifiant le débit au niveau du sabot.
- Effectuer un aller-retour de nettoyage (wiper trip) si nécessaire en fonction des conditions du trou.

### **2. La procédure suivie dans TNK 305 :**

- Assurer que tous les matériaux et équipements nécessaires sont sur le site.
- Les composants du BHA doivent être mesurés en longueur, diamètre extérieur (OD), diamètre intérieur (ID).
- Vérifiez la jauge de tous les stabilisateurs (pour le BHA rotatif). La tolérance est de 1/16" en dessous de la jauge.

- Ayez les trépan de forage principaux prêts avec les buses appropriées installées. Les trépan de rechange doivent être disponibles sur le site.
- Inspectez le cuvelage de 7" pour vous assurer qu'il a une longueur suffisante pour atteindre la profondeur planifiée de la section à 2000 m.
- À la profondeur finale (TD), faites circuler du fond jusqu'à ce que les tamis soient propres, vérifiez le débit, puis sortez du trou (POOH) en vérifiant le débit au niveau du sabot. Effectuez un aller-retour de nettoyage (wiper trip) si nécessaire en fonction des conditions du trou.
- Lors de la remontée, utilisez le réservoir de remplissage pour remplir le trou conformément aux directives de Sonatrach. Comparez le volume de remplissage réel au volume théorique et alertez le superviseur de forage si le remplissage réel est inférieur au volume théorique.



# Chapitre VI

---

Etude de l'avancement ROP dans la phase 6''  
(TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de  
programmation python

---

## **VI. Chapitre 6 : étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :**

### **A. Introduction :**

Le taux de pénétration (ROP) est un indicateur crucial dans l'industrie du forage, permettant de mesurer l'efficacité du forage d'un puits. Une analyse approfondie du ROP dans différentes phases de forage peut fournir des informations précieuses sur les performances opérationnelles et aider à optimiser les processus de forage.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l'analyse de l'avancement du ROP dans la phase 6'' pour deux puits distincts : TNK 305 et TNK 304. Pour ce faire, nous utiliserons le langage de programmation Python, un outil puissant et polyvalent qui s'est imposé comme une norme dans le domaine de la science des données et de l'analyse statistique.

### **B. Utilisation de Python pour l'Analyse et la Visualisation des Données de Forage :**

Python offre une multitude de bibliothèques dédiées à l'analyse et à la visualisation des données. Parmi celles-ci, `matplotlib` se distingue par sa popularité et sa facilité d'utilisation. Cette bibliothèque permet de générer une grande variété de graphiques, tels que des courbes, des barres et des diagrammes en secteurs, avec une grande flexibilité en termes de personnalisation.

En utilisant `matplotlib`, nous serons en mesure de représenter graphiquement les données de ROP de manière claire et détaillée. Les graphiques produits faciliteront l'interprétation et l'analyse des tendances et des anomalies, permettant ainsi de mieux comprendre les performances du forage dans les puits TNK 305 et TNK 304. Grâce à la puissance de `matplotlib`, Python devient un outil incontournable pour les ingénieurs et les analystes cherchant à optimiser les opérations de forage.

**C. Réalisation des graphes ROP en fonction de la profondeur MD à l'aide de python :**

**1. TNK 305 drilling data phase 6` :**

**Tableau 8: TNK 305 drilling data phase 6**

| <b>Depth</b> | <b>ROP m/hr</b> |
|--------------|-----------------|
| <b>M</b>     | <b>M/h</b>      |
| 1638         | 6,97            |
| 1639         | 5,93            |
| 1640         | 5,73            |
| 1641         | 6,36            |
| 1642         | 6,46            |
| 1643         | 7,19            |
| 1644         | 6,75            |
| 1645         | 5,42            |
| 1646         | 5,66            |
| 1647         | 8,02            |
| 1648         | 6,62            |
| 1649         | 9,05            |
| 1650         | 9,04            |
| 1651         | 8,04            |
| 1652         | 9,03            |
| 1653         | 7,53            |
| 1654         | 5,74            |
| 1655         | 7,34            |
| 1656         | 12,36           |
| 1657         | 6,05            |
| 1658         | 9,71            |
| 1659         | 11,1            |
| 1660         | 8,4             |
| 1661         | 11,09           |
| 1662         | 6,48            |
| 1663         | 6,24            |
| 1664         | 6,66            |
| 1665         | 6,5             |
| 1666         | 5,24            |
| 1667         | 5,97            |
| 1668         | 4,8             |

## Chapitre VI: étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :

### a) Le code python proposée :

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2
3 # Données pour les graphiques
4 y = [6.97, 5.93, 5.73, 6.36, 6.46, 7.19, 6.75, 5.42, 5.66, 8.02, 6.62]
5 x = [1638, 1639, 1640, 1641, 1642, 1643, 1644, 1645, 1646, 1647, 1648]
6
7 y1 = [9.05, 9.04, 8.04, 9.03, 7.53, 5.74, 7.34, 12.36, 6.05, 9.71]
8 x1 = [1649, 1650, 1651, 1652, 1653, 1654, 1655, 1656, 1658, 1659]
9
10 y2 = [9.71, 11.1, 8.4, 11.09, 6.48, 6.24, 6.66, 6.5, 5.24, 5.97]
11 x2 = [1659, 1660, 1661, 1662, 1663, 1664, 1665, 1666, 1667, 1668]
12
13 # Créer une figure avec des subplots alignés verticalement et ajuster l'espace
14 fig, axs = plt.subplots(3, 1, figsize=(10, 15), sharex=True, gridspec_kw={'hspace': 0.5})
15
16 # Premier graphe (en haut)
17 axs[0].plot(x, y, 'r') # 'r' est la couleur rouge
18 axs[0].set_title('Premier Graphe', fontsize=14, fontweight='bold')
19 axs[0].set_ylabel('ROP (m/hr)', fontsize=12)
20 axs[0].grid(True)
21 axs[0].set_xlabel('Depth (m)', fontsize=12) # Nom de l'axe x
22
23 # Deuxième graphe (au milieu)
24 axs[1].plot(x1, y1, 'g') # 'g' est la couleur verte
25 axs[1].set_title('Deuxième Graphe', fontsize=14, fontweight='bold')
26 axs[1].set_ylabel('ROP (m/hr)', fontsize=12)
27 axs[1].grid(True)
28 axs[1].set_xlabel('Depth (m)', fontsize=12) # Nom de l'axe x
29
30 # Troisième graphe (en bas)
31 axs[2].plot(x2, y2, 'b') # 'b' est la couleur bleue
32 axs[2].set_title('Troisième Graphe', fontsize=14, fontweight='bold')
33 axs[2].set_xlabel('Depth (m)', fontsize=12) # Nom de l'axe x
34 axs[2].set_ylabel('ROP (m/hr)', fontsize=12)
35 axs[2].grid(True)
36
37 # Ajuster l'espace entre les graphiques
38 plt.subplots_adjust(hspace=0.5)
39
40 # Sauvegarder le graphe en tant qu'image JPG
41 plt.savefig('graphes_organises_vertical_axes_spaced.jpg', format='jpg')
42
43 # Afficher les graphiques
44 plt.show()
45
```

### b) Explication brève de code :

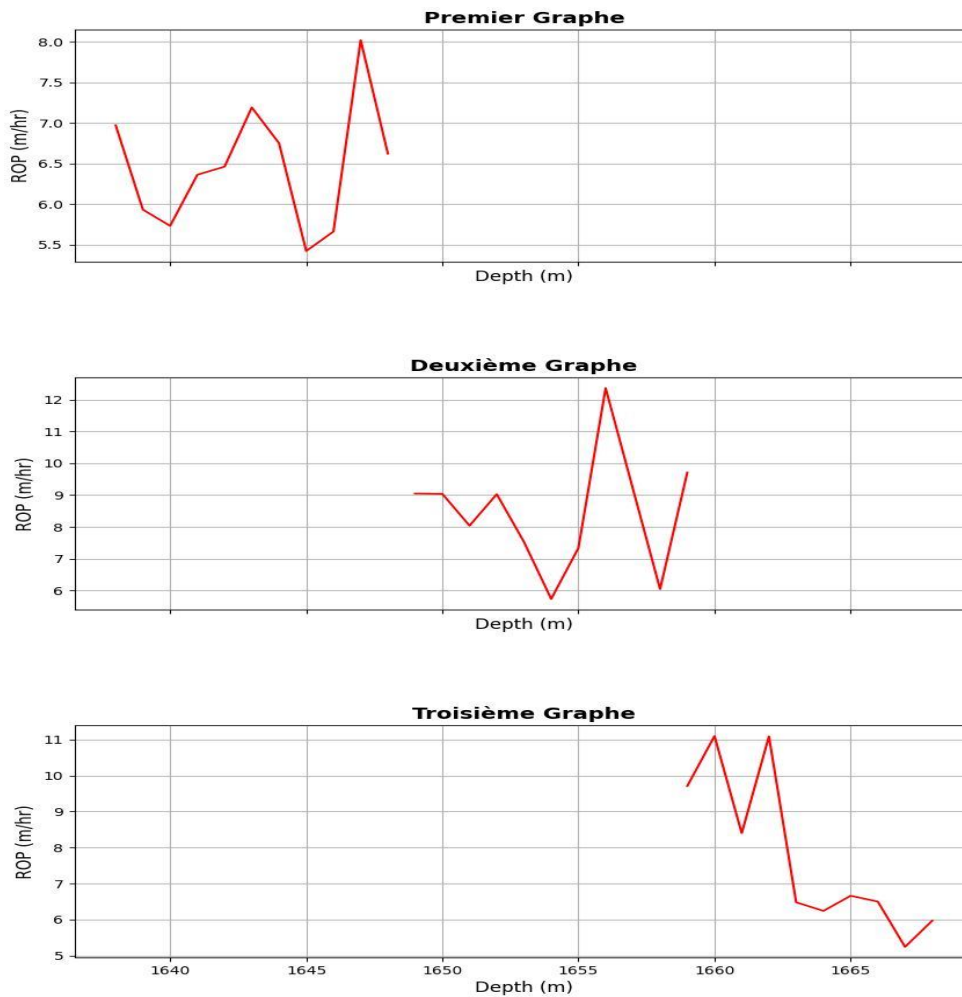
Ce code créer un graphique en utilisant la bibliothèque matplotlib en Python, qui est une bibliothèque populaire pour la visualisation de données.

## Chapitre VI: étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :

---

Ce dernier génère un graphique linéaire qui montre la variation de la profondeur (en mètres) par rapport au taux de pénétration (ROP en mètres par heure).

### c) Les graphes obtenus :



**Figure 36: Graphes représentant ROP par rapport a la profondeur phase 6'' (TNK305)**

- Graphe 1 : l'avancement ROP entre (1638-1648) mètre
- Graphe 2 : l'avancement ROP entre (1648-1658) mètre
- Graphe 3 : l'avancement ROP entre (1658-1668) mètre

2. TNK 304 drilling data phase 6'' :

Tableau 9: TNK 304 drilling data phase 6'' :

| Depth | ROP m/hr |
|-------|----------|
| M     | M/h      |
| 1652  | 8.87     |
| 1653  | 10.69    |
| 1654  | 10.19    |
| 1655  | 8.48     |
| 1656  | 7.36     |
| 1657  | 8.02     |
| 1658  | 9.64     |
| 1659  | 8.76     |
| 1660  | 9.45     |
| 1661  | 9.37     |
| 1662  | 9.78     |
| 1663  | 8.39     |
| 1664  | 9.67     |
| 1665  | 8.87     |
| 1666  | 9.78     |
| 1667  | 9.84     |
| 1668  | 8.65     |
| 1669  | 10.15    |
| 1670  | 8.49     |
| 1671  | 6.74     |
| 1672  | 8.24     |
| 1673  | 14.01    |
| 1674  | 7.58     |
| 1675  | 10.93    |
| 1676  | 10.25    |
| 1677  | 8.90     |
| 1678  | 11.37    |
| 1679  | 9.27     |
| 1680  | 10.95    |
| 1681  | 9.3      |
| 1682  | 8.15     |
| 1683  | 7.55     |
| 1684  | 6.35     |
| 1685  | 6.72     |
| 1686  | 6.42     |
| 1687  | 5.3      |
| 1688  | 6.05     |
| 1689  | 4.75     |

## Chapitre VI: étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :

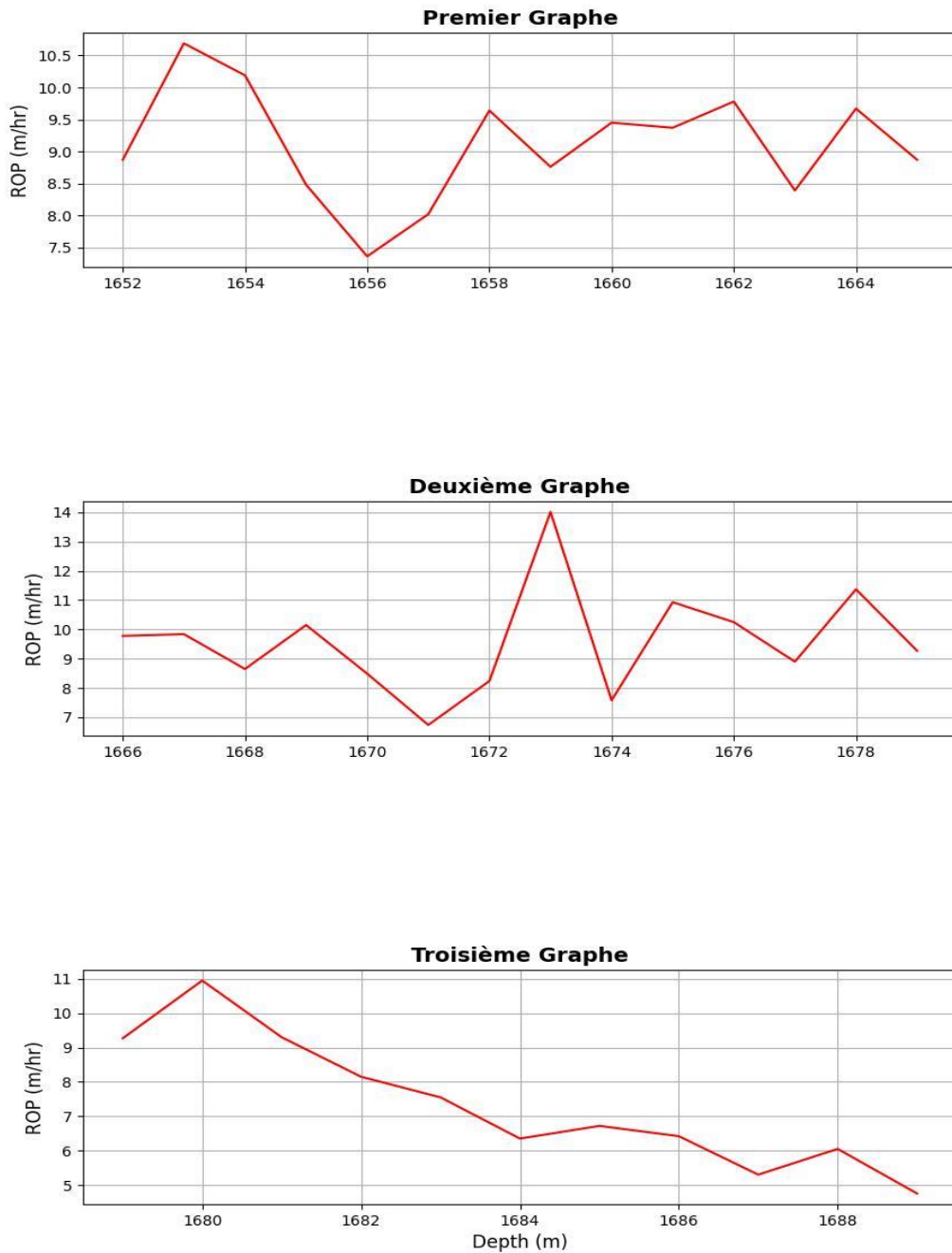
### a) Le code de pythone proposée :

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2
3 # Données pour les graphiques
4 x = [1652, 1653, 1654, 1655, 1656, 1657, 1658, 1659, 1660, 1661, 1662, 1663, 1664, 1665]
5 y = [8.87, 10.69, 10.19, 8.48, 7.36, 8.02, 9.64, 8.76, 9.45, 9.37, 9.78, 8.39, 9.67, 8.87]
6
7 x1 = [1666, 1667, 1668, 1669, 1670, 1671, 1672, 1673, 1674, 1675, 1676, 1677, 1678, 1679]
8 y1 = [9.78, 9.84, 8.65, 10.15, 8.49, 6.74, 8.24, 14.01, 7.58, 10.93, 10.25, 8.90, 11.37, 9.27]
9
10 x2 = [1679, 1680, 1681, 1682, 1683, 1684, 1685, 1686, 1687, 1688, 1689]
11 y2 = [9.27, 10.95, 9.3, 8.15, 7.55, 6.35, 6.72, 6.42, 5.3, 6.05, 4.75]
12
13
14 # Données pour les graphiques
15
16 # Créer une figure avec des subplots alignés verticalement
17 fig, axs = plt.subplots(3, 1, figsize=(10, 15))
18
19 # Premier graphe (en haut)
20 axs[0].plot(x, y, 'r') # 'r' est la couleur rouge
21 axs[0].set_title('Premier Graphe', fontsize=14, fontweight='bold')
22 axs[0].set_ylabel('ROP (m/hr)', fontsize=12)
23 axs[0].grid(True)
24
25
26 # Deuxième graphe (au milieu)
27 axs[1].plot(x1, y1, 'r') # 'g' est la couleur verte
28 axs[1].set_title('Deuxième Graphe', fontsize=14, fontweight='bold')
29 axs[1].set_ylabel('ROP (m/hr)', fontsize=12)
30 axs[1].grid(True)
31
32
33 # Troisième graphe (en bas)
34 axs[2].plot(x2, y2, 'r') # 'b' est la couleur bleue
35 axs[2].set_title('Troisième Graphe', fontsize=14, fontweight='bold')
36 axs[2].set_xlabel('Depth (m)', fontsize=12) # Nom de l'axe x
37 axs[2].set_ylabel('ROP (m/hr)', fontsize=12)
38 axs[2].grid(True)
39
40 # Ajuster l'espace entre les graphiques
41 plt.subplots_adjust(hspace=1)
42
43 # Sauvegarder le graphe en tant qu'image JPG
44 plt.savefig('graphes_organises_vertical_axes_spaced.jpg', format='jpg')
45
46 # Afficher les graphiques
47 plt.show()
48
```

## Chapitre VI: étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :

---

Les graphes obtenus :



**Figure 37: Graphes représentant ROP par rapport à la profondeur phase 6'' (TNK304)**



## Chapitre VI: étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :

---

- Graphe 1 : l'avancement ROP entre (1652-1665) mètre
- Graphe 2 : l'avancement ROP entre (1666-1679) mètre
- Graphe 3 : l'avancement ROP entre (1679-1689) mètre

### D. Analyse des graphes :

1. Les paramètres de forage utilisé dans les deux puits en phase 6'' sont les suivants :

**Tableau 10: Paramètres de forage des deux puits phase 6''**

|                        | <b>Puit TNK 305</b> | <b>Puit TNK 304</b> |
|------------------------|---------------------|---------------------|
| WOB (tonne)            | 4-6                 | 5-7                 |
| Flow rate (Lpm)        | 500 -650            | 800-950             |
| Surface rotation (Rpm) | 95                  | 100-140             |
| Torque (ft/lb)         | 3750                | 4501                |

2. La lithologie traversée :

#### a) Géologie des Puits TNK 305

- **Argile gris-foncé, micacée et indurée :**
  - Argile de couleur gris foncé
  - Contient des micas
  - Durcie
  - Rarement des nodules carbonatés
- **Grès clair à brun :**
  - À la base
  - Grains fins à très fins, parfois moyens
  - Bien classé
  - Dur et cimenté

## **Chapitre VI: étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :**

---

- Porosité visible très bonne

- **Silt gris clair :**

- Au sommet
- Contient des micas
- Bien cimenté

### **b) Géologie des Puits TNK 304**

- **Argile gris-foncé, micacée et indurée :**

- Argile de couleur gris foncé
- Contient des micas
- Durcie
- Rarement des nodules carbonatés

- **Grès clair à brun :**

- À la base
- Grains fins à très fins, parfois moyens
- Bien classé
- Dur et cimenté
- Porosité visible très bonne

- **Silt gris clair :**

- Au sommet
- Contient des micas
- Bien cimenté

### **c) Similitudes :**

- Les descriptions géologiques des puits TNK 305 et TNK 304 sont identiques.
- Les deux puits présentent une séquence stratigraphique similaire : une couche d'argile gris-foncé indurée en bas, suivie d'une couche de grès clair à brun avec une très bonne porosité, et enfin une couche de silt gris clair bien cimenté au sommet.

### **d) Déduction :**

La géologie des puits TNK 305 et TNK 304 est similaire. Les deux puits montrent une stratigraphie identique avec les mêmes types de roches et propriétés, ce qui suggère que les deux puits sont situés dans des environnements géologiques très similaires ou identiques. Cela peut indiquer des conditions favorables pour la prospection d'hydrocarbures dans cette

## **Chapitre VI: étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :**

---

région, étant donné la présence de grès bien classé avec une bonne porosité, qui constitue un réservoir potentiel pour le pétrole ou le gaz naturel.

### **3. Explication et analyse des graphes :**

#### **a) TNK 305 :**

- Premier Graphe (Profondeurs de 1640 à 1647 m)
  - Le ROP oscille entre 5,5 et 8,0 m/h.
  - Il y a une légère tendance à la hausse avec quelques fluctuations.
  - Le ROP atteint un pic à environ 1646 m avant de redescendre légèrement.
  
- Deuxième Graphe (Profondeurs de 1647 à 1655 m)
  - Le ROP varie de 6,0 à 12,0 m/h.
  - Le ROP montre des variations significatives, avec des augmentations brusques et des diminutions.
  - Un pic notable de ROP à environ 1651 m suivi d'une chute rapide.
  
- Troisième Graphe (Profondeurs de 1640 à 1668 m)
  - Le ROP fluctue entre 5,0 et 11,0 m/h.
  - Après 1660 m, il y a une tendance à la baisse marquée.
  - Avant cette diminution, il y a des fluctuations importantes avec un pic vers 1660 m.

#### **b) Analyse Globale des graphes du puits TNK 305:**

- Fluctuations du ROP :
  - Les trois graphiques montrent des fluctuations significatives du ROP à différentes profondeurs. Cela peut être dû à des variations dans la dureté des formations traversées.
- Tendances de ROP :
  - Il y a des pics de ROP dans chacun des graphiques, indiquant des zones où le forage est plus rapide. Ces zones peuvent correspondre à des couches de roche plus tendre ou à des changements dans les paramètres de forage.
- Chute du ROP :
  - Le troisième graphe montre une baisse notable du ROP après 1660 m, suggérant une couche plus dure ou des conditions de forage plus difficiles à ces profondeurs.

**❖ Dédution :**

Les graphiques montrent que le ROP varie avec la profondeur, ce qui est typique des opérations de forage où différentes formations géologiques sont rencontrées. Les pics de ROP indiquent des zones où le forage est plus efficace, tandis que les baisses indiquent des zones plus résistantes. Une attention particulière doit être portée aux zones de chute rapide du ROP pour optimiser les paramètres de forage et éventuellement ajuster les techniques ou les outils utilisés.

**c) TNK 304 :**

- Premier Graphe (Profondeurs de 1652 à 1665 m)
  - Le ROP oscille entre 7,5 et 10,5 m/h.
  - Il y a une légère tendance à la baisse avec quelques fluctuations.
  - Le ROP atteint un pic à environ 1653 m, suivie d'une baisse jusqu'à 1656 m, puis remonte légèrement avant de fluctuer à nouveau.
- Deuxième Graphe (Profondeurs de 1666 à 16789m)
  - Le ROP varie de 7,0 à 14,0 m/h.
  - Le ROP montre des variations significatives, avec des augmentations brusques et des diminutions.
  - Un pic notable de ROP à environ 1673 m suivi d'une chute rapide.
- Troisième Graphe (Profondeurs de 1679 à 1689 m)
  - Le ROP fluctue entre 5,0 et 11,0 m/h.
  - Une tendance générale à la baisse est observée.
  - Avant cette diminution, il y a un pic à environ 1679 m, puis le ROP diminue progressivement avec quelques légères fluctuations.

**d) Analyse Globale des graphes du puit TNK 304 :**

- Fluctuations du ROP :

## **Chapitre VI: étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :**

---

- Les trois graphiques montrent des fluctuations significatives du ROP à différentes profondeurs. Cela peut être dû à des variations dans la dureté des formations traversées.

### ➤ Tendances de ROP :

- Il y a des pics de ROP dans chacun des graphiques, indiquant des zones où le forage est plus rapide. Ces zones peuvent correspondre à des couches de roche plus tendre ou à des changements dans les paramètres de forage.

### ➤ Chute du ROP :

- Le troisième graphe montre une baisse notable du ROP après 1679 m, suggérant une couche plus dure ou des conditions de forage plus difficiles à ces profondeurs.

### ❖ **Déduction :**

Les graphiques montrent que le ROP varie avec la profondeur, ce qui est typique des opérations de forage où différentes formations géologiques sont rencontrées. Les pics de ROP indiquent des zones où le forage est plus efficace, tandis que les baisses indiquent des zones plus résistantes. Une attention particulière doit être portée aux zones de chute rapide du ROP pour optimiser les paramètres de forage et éventuellement ajuster les techniques ou les outils utilisés.

### **e) Comparaison et analyse des graphes des deux le Puits (TNK 305, TNK 304) :**

Pour pouvoir bien comparer et remarquer les différences et les similitudes de l'avancements ROP nous avons procédé à jumeler les graphes obtenus précédemment dans un seul graphe en utilisant python.

## Chapitre VI: étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :

### ➤ Code python :

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2
3 # Données pour les graphiques de puit tnk 305:
4
5 x1 = [1638, 1639, 1640, 1641, 1642, 1643, 1644, 1645, 1646, 1647, 1648, 1649, 1650, 1651,
6 1652, 1653, 1654, 1655, 1656, 1658, 1659, 1660, 1661, 1662, 1663, 1664, 1665, 1666, 1667, 1668]
7 y1 = [6.97, 5.93, 5.73, 6.36, 6.46, 7.19, 6.75, 5.42, 5.66, 8.02, 6.62, 9.05, 9.04,
8 8.04, 9.03, 7.53, 5.74, 7.34, 12.36, 6.05, 9.71, 11.1, 8.4, 11.09, 6.48, 6.24, 6.66, 6.5, 5.24, 5.97]
9 # Données pour les graphiques de puit tnk 304 :
10 x = [1652, 1653, 1654, 1655, 1656, 1657, 1658, 1659, 1660, 1661, 1662, 1663, 1664, 1665, 1666, 1667, 1668, 1669, 1670, 1671,
11 1672, 1673, 1674, 1675, 1676, 1677, 1678, 1679, 1680, 1681, 1682, 1683, 1684, 1685, 1686, 1687, 1688, 1689]
12 y = [8.87, 10.69, 10.19, 8.48, 7.36, 8.02, 9.64, 8.76, 9.45, 9.37, 9.78, 8.39, 9.67, 8.87, 9.78, 9.84, 8.65, 10.15,
13 8.49, 6.74, 8.24, 14.01, 7.58, 10.93, 10.25, 8.90, 11.37, 9.27, 10.95, 9.3, 8.15, 7.55, 6.35, 6.72, 6.42, 5.3, 6.05, 4.75]
14
15
16
17 # Tracé des données
18 plt.figure(figsize=(10, 6))
19 plt.plot(x1, y1, 'r-', label='Puit TNK 305') # Couleur rouge pour TNK 305 sans points
20 plt.plot(x, y, 'g-', label='Puit TNK 304') # Couleur verte pour TNK 304 sans points
21
22
23 # Ajout des labels et du titre
24 plt.xlabel('Depth (Profondeur)')
25 plt.ylabel('ROP (m/hr)')
26 plt.title('Graphiques des puits TNK 305 et TNK 304')
27 plt.legend()
28
29 # Affichage du graphique
30 plt.grid(True)
31 plt.show()
32
```

### ➤ Graphe obtenu :

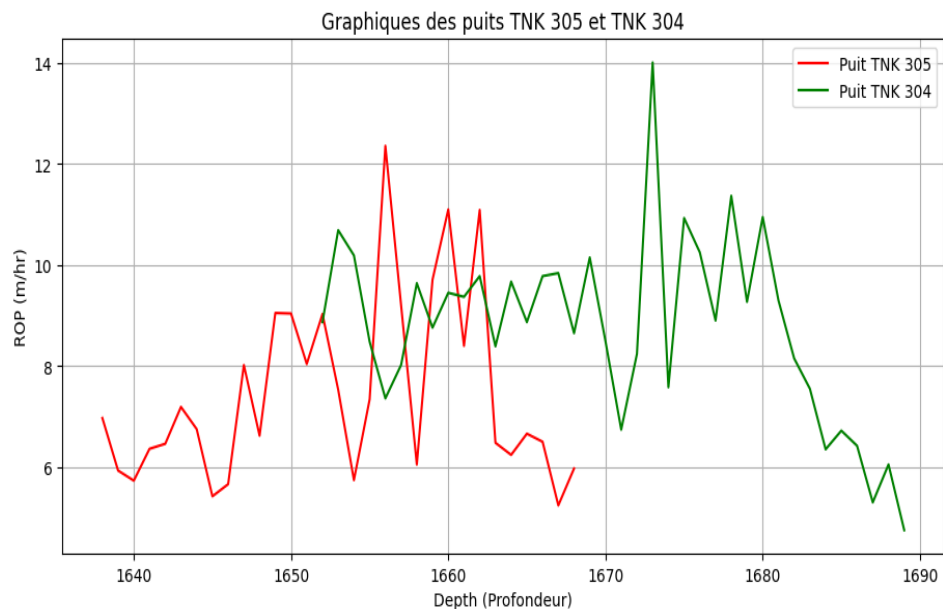


Figure 38: Le graphe de ROP des deux puits

### ➤ Similitudes :

## Chapitre VI: étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :

---

- Les deux puits montrent des variations significatives du ROP à différentes profondeurs.
- Les deux présentent des pics et des baisses du ROP, suggérant des formations géologiques hétérogènes.
- Les tendances générales de fluctuations et de pics du ROP sont similaires.

### ➤ Différences :

- Les profondeurs spécifiques des pics et des baisses diffèrent légèrement entre les deux puits.
- Les valeurs exactes du ROP à certaines profondeurs varient, mais ces variations ne sont pas significatives au point de suggérer des différences géologiques majeures entre les deux puits.

❖ **En conclusion**, les puits TNK 304 et TNK 305 montrent des comportements de ROP similaires, indiquant des conditions géologiques comparables. Les différences mineures observées sont typiques de la variabilité naturelle des formations géologiques.

**Calcul de l'avancement moyenne pour chaque puits :**

$$\text{ROP Moyen} = \sum_{i=1}^n \frac{ROP_i}{n}$$

**Ou : ROP i** est le taux de pénétration à la profondeur i

**n** est le nombre de mesures de ROP.

➤ **TNK 305 :**

$$\Sigma ROP = 218,78$$

$$ROP MOYEN = \frac{\Sigma ROP}{n} = \frac{218,78}{31} \approx 7,06 \text{ m /}$$

➤ **TNK 304 :**

$$\Sigma ROP = 342,57$$

$$ROP \text{ MOYEN} = \frac{\Sigma ROP}{n} = \frac{342,57}{38} \approx 9,01 \text{ m / h}$$

➤ **Analyse des Taux de Pénétration Moyens (ROP) :**

Puits TNK 304 : Le taux de pénétration moyen (ROP moyen) est de 9,01 m/h.

Puits TNK 305 : Le taux de pénétration moyen (ROP moyen) est de 7,06 m/h.

**Remarque** : Les deux puits ont utilisé la même technique de forage RSS (Rotary Steerable System) dans la section de 6" mais avec des moteurs différents. Cette situation permet de comparer directement l'efficacité et la performance des deux moteurs dans des formations géologiques similaires.

➤ **Rendement Opérationnel de Forage (ROP) :**

- Le puits TNK 304 a affiché un ROP moyen de 9,01 m/h, tandis que le puits TNK 305 a atteint 7,06 m/h.

- Le ROP plus élevé du TNK 304 suggère une utilisation plus efficace du moteur associé à ce puits, permettant une progression plus rapide dans les formations géologiques.

➤ **Transmission et Utilisation de l'Énergie**

- Le moteur du TNK 304 semble avoir une meilleure efficacité dans la transmission de l'énergie à l'outil de forage, ce qui contribue à son ROP supérieur.

- Une utilisation plus efficace de l'énergie peut résulter de divers facteurs, y compris une meilleure compatibilité avec le système RSS et des ajustements optimisés des paramètres opérationnels.

➤ **Conditions Opérationnelles et Adaptation :**

- Bien que les conditions géologiques soient similaires, des différences dans l'adaptation du moteur aux paramètres de forage et aux caractéristiques spécifiques du site peuvent influencer l'efficacité d'utilisation.



## **Chapitre VI: étude de l'avancement ROP dans la phase 6'' (TNK 305 TNK304) en utilisant le langage de programmation python :**

---

- Le moteur du TNK 304 est adapté aux exigences opérationnelles et aux caractéristiques des formations géologiques rencontrées, ce qui se traduit par une performance améliorée.

### **E. . Conclusion et Recommandations :**

#### **a) Conclusion :**

Les données indiquent que le moteur utilisé dans le puits TNK 304 a été plus efficacement utilisé en termes de vitesse de forage (ROP moyen de 9,01 m/h) par rapport au moteur du puits TNK 305 (ROP moyen de 7,06 m/h). Cette différence suggère une meilleure efficacité d'utilisation du moteur dans des conditions similaires.

#### **b) Recommandations :**

- Considérer l'application plus large du moteur du TNK 304 dans d'autres projets de forage similaires pour optimiser l'efficacité globale.
- Revoir et ajuster les paramètres de forage du moteur du TNK 305 pour identifier des opportunités d'amélioration et aligner ses performances avec celles du TNK 304.
- Poursuivre les tests comparatifs pour évaluer d'autres moteurs dans des conditions similaires et identifier ceux offrant la meilleure efficacité d'utilisation.

**En conclusion,** maximiser l'efficacité d'utilisation des moteurs dans le forage est crucial pour améliorer la productivité et réduire les coûts opérationnels.

# Chapitre VII

---

Developpement d'un modele pour prédire  
ROP en utilisant des techniques  
d'apprentissage automatique.

---

## VII. Chpitre 7 :Developpement de model pour prédire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

### A. Présentation des algorithmes utilisés pour modéliser le ROP:

#### 1. Modèles empiriques basés sur des équations physiques

Les premiers modèles pour estimer le ROP reposaient principalement sur des équations basées sur des relations physiques simples entre les paramètres de forage. Parmi les modèles les plus connus, on peut citer :

- **Modèle de Graham et Muench (1959)** : Ils ont développé une formule simple pour le ROP en fonction de la vitesse de rotation (RPM) et du poids sur l'outil (WOB). Cette équation a introduit l'idée d'un forage optimal basé sur la combinaison des paramètres de forage pour minimiser le coût.

$$ROP = C \cdot D \cdot k \cdot N^{0,584} \cdot WOB$$

Cependant, ce modèle n'inclut pas l'impact de l'usure de l'outil et présente des limitations pour des vitesses de rotation élevées.

- **Modèle de Maurer (1962)** : Ce modèle inclut le RPM, le WOB, la résistance à la compression non confinée (UCS) et le diamètre de l'outil. L'objectif était de mieux capturer les effets de la résistance mécanique des formations rocheuses.

$$ROP = \frac{k \cdot RPM \cdot WOP^2}{D^2 \cdot UCS^2}$$

Ce modèle souffre d'une faible corrélation avec les données réelles, avec un coefficient de corrélation  $R=0.03$  et une erreur absolue de 46 %.

#### 2. Modèles basés sur la régression

Les modèles basés sur des méthodes de régression permettent de déterminer des coefficients optimaux pour ajuster les paramètres de forage. Un exemple est le modèle de **Bingham (1965)**, qui a utilisé la régression pour déterminer des constantes dans son modèle de ROP, mais sans inclure l'UCS et les propriétés du fluide de forage. Ce modèle a également une faible corrélation avec les données réelles ( $R=0.06$ ).

## Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

### 3. Modèles statistiques avancés

L'un des modèles les plus célèbres dans ce domaine est celui de **Bourgoyne et Young (1975)**, qui a proposé une méthode statistique pour optimiser les paramètres de forage en se basant sur des données historiques. Bien que ce modèle ait intégré plusieurs paramètres, il n'a pas pris en compte l'UCS ni les propriétés du fluide de forage, ce qui limite son efficacité.

### 4. Réseaux de neurones artificiels (ANN)

Avec l'avènement de l'intelligence artificielle, les réseaux de neurones artificiels (ANN) ont été introduits pour améliorer la modélisation du ROP. **Elkatatny (2017)** a été l'un des pionniers dans l'utilisation des ANN pour modéliser le ROP. Il a développé un modèle prenant en compte des paramètres de forage tels que le WOB, le RPM, le débit de refoulement (Q), la pression (SPP), la résistance à la compression UCS, et les propriétés du fluide de forage. Ce modèle ANN a montré une corrélation élevée avec les données réelles ( $R=0.90$ ) et une erreur absolue en pourcentage (AAPE) de seulement 4 %.

$$ROP = f(WOB, RPM, Q, SPP, UCS, Fluide)$$

Elkatatny a également utilisé une méthode de réseau de neurones combinée à une évolution différentielle adaptative (SADE-ANN) pour optimiser le choix du nombre de neurones dans la couche cachée, recommandant l'utilisation de 20 neurones pour des résultats optimaux.

### 5. Méthodes d'optimisation évolutives

Les méthodes d'optimisation, telles que **l'évolution différentielle auto-adaptative (SADE)**, ont été combinées avec les ANN pour affiner les modèles prédictifs du ROP. Ces techniques permettent d'améliorer la précision des prédictions en ajustant dynamiquement les paramètres du modèle ANN, comme le nombre de neurones et les fonctions de transfert.

## B. Synthèse bibliographique:

Tableau 11 : Synthèse bibliographique:

| Chercheurs       | Année | Modèle/Théorie                                     | Paramètres considérés       | Résultats/Observations  |
|------------------|-------|--|-----------------------------|---|
| Graham et Muench | 1959  | Optimisation de forage avec RPM et WOB             | RPM, WOB                    | Modèle introduisant la notion d'optimisation du ROP, problèmes liés à l'usure des outils à grande vitesse |
| Eckel            | 1954  | Étude de la relation entre fluide de forage et ROP | Densité du fluide de forage | Augmentation de la densité diminue le ROP, mais la lubrification améliore le ROP                          |

**Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :**

|                     |            |   |  |  |
|---------------------|------------|---|--|--|
| Piaiman et al.      | 2009       | Impact des propriétés du fluide de forage sur le ROP                            | Densité, viscosité plastique, solides                | L'augmentation de la densité et de la viscosité diminue le ROP   |
| Alum et Egbon       | 2011       | Relation entre les pertes de pression annulaire et le ROP                       | Pression annulaire                                   | L'effet des propriétés du fluide sur le ROP est minime, mais les pertes de pression ont un impact majeur                 |
| Moraveji et Naderie | 2016       | Modèle de ROP incluant paramètres de forage et propriétés du fluide             | WOB, Gel-10s, Gel-10min, YP/PV                       | Importance de ces paramètres dans l'estimation du ROP  |
| Maurer              | 1962       | Modèle prenant en compte RPM, WOB, et diamètre de l'outil                       | RPM, WOB, diamètre, UCS                              | Faible corrélation avec les données du puits (R = 0.03), erreur absolue de 46 %  |
| Bingham             | 1965       | Modèle de ROP sans tenir compte de l'UCS et des propriétés du fluide            | RPM, WOB, diamètre                                   | Faible corrélation (R = 0.06), erreur absolue de 10 %, modèle jugé faible  |
| Bourgoyne et Young  | 1975       | Optimisation statistique du forage  | RPM, WOB, autres variables                           | Modèle négligeant l'UCS et les propriétés du fluide de forage  |
| Elkatatny           | 2017       | Modèle ANN incluant paramètres mécaniques et hydrauliques pour optimiser le ROP | WOB, RPM, débit, pression, propriétés du fluide, UCS | Modèle basé sur réseau de neurones artificiels (R = 0.90, AAPE = 4 %), plus précis que les modèles empiriques précédents |
| Elkatatny et al.    | 2016, 2017 | Utilisation de l'ANN pour prédire la perméabilité et les propriétés du fluide   | Paramètres hydrauliques et mécaniques                | Réseau de neurones utilisé pour estimer avec précision les propriétés du fluide et le ROP avec de grands jeux de données |

## C. Méthodologie de Travail :

### 1. Présentation des Méthodes Utilisées :

- **Régression par Forêts Aléatoires (Random Forest) :**

La méthode des forêts aléatoires est sélectionnée pour sa robustesse face à la non-linéarité et à la multicollinéarité des données. Elle permet également de mesurer l'importance des variables et offre une bonne performance en termes de prédiction du **ROP**.

- **Réseaux Neuronaux Récurrents (RNN) :**

Les réseaux neuronaux récurrents sont choisis pour leur capacité à traiter des séquences de données temporelles. Dans notre cas, ils permettent de modéliser les relations complexes entre les paramètres de forage et la prédiction du **ROP**. Les RNN sont particulièrement adaptés pour capturer les dépendances dans les séries de données liées aux forages, où chaque point de données peut être influencé par les mesures précédentes.

### 2. Données Collectées :

Pour réaliser notre étude, nous avons utilisé **8000 points de données** collectés à partir de plusieurs puits situés dans la région de **Timimoune**, une zone riche en activités de forage. Les données collectées sont divisées en deux catégories principales : **les paramètres mécaniques de forage** et **les paramètres rhéologiques de la boue utilisés**.

- **Paramètres Mécaniques de Forage :**

À chaque point de forage, nous avons mesuré les paramètres mécaniques suivants :

- **ROP (Rate of Penetration) :** Vitesse de pénétration, en m/h.
- **WOB (Weight on Bit) :** Poids appliqué sur le trépan, en kN.
- **RPM (Rotations Per Minute) :** Vitesse de rotation du trépan, en tr/min.
- **SPP (Stand Pipe Pressure) :** Pression dans le tuyau de forage, en kPa.
- **FLW (Flow Rate) :** Débit de circulation de la boue, en L/min.
- **TRQ (Torque) :** Couple appliqué au trépan, en Nm.

- **Paramètres Rhéologiques de la Boue HPWBM (High-Performance Water-Based Mud) :**

Ces paramètres permettent d'évaluer la performance de la boue de forage à chaque point :

- **MW (Mud Weight) :** Densité de la boue, en kg/L.
- **FV (Funnel Viscosity) :** Viscosité mesurée à l'aide de l'entonnoir, en secondes.
- **PV (Plastic Viscosity) :** Viscosité plastique de la boue, en cP.
- **FLTR (Filtrate Loss) :** Quantité de filtrat perdue lors du forage, en mL.
- **GelO (Gel Strength 0 sec) :** Force du gel immédiatement après arrêt de la circulation, en lb/100 ft<sup>2</sup>.

## Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

---

- **Gel10 (Gel Strength 10 sec)** : Force du gel après 10 secondes d'arrêt de circulation, en lb/100 ft<sup>2</sup>.
- **YP (Yield Point)** : Point d'écoulement de la boue, en lb/100 f

### D. Algorithmes utilisés pour modéliser le ROP:

#### 1. Le Random Forest Regression:

Le **Random Forest** (forêt aléatoire) est un algorithme de prédiction créé par Ho en 1995, puis formellement proposé par les scientifiques Adele Cutler et Leo Breiman en 2001. Il s'agit d'un algorithme d'apprentissage automatique supervisé largement utilisé pour les problèmes de régression et de classification. Il est réputé pour offrir de bons résultats même sans ajustements particuliers des hyperparamètres, ce qui en fait l'un des algorithmes les plus populaires en raison de sa simplicité et de son efficacité.

Le Random Forest fonctionne en construisant plusieurs arbres de décision sur différents échantillons de données, puis en combinant leurs prédictions. Pour un problème de classification, il prend la majorité des votes des arbres, et pour un problème de régression, il fait la moyenne des résultats.

Pour mieux comprendre son fonctionnement, il est important de savoir comment fonctionne un arbre de décision, qui est la base du Random Forest.

#### ➤ **Arbre de décision :**

Un arbre de décision est un algorithme d'apprentissage supervisé utilisé pour des problèmes de classification et de régression. Il divise les données en fonction de certaines caractéristiques, créant une structure hiérarchique avec des nœuds de décision et des feuilles.

- **Nœud racine** : point de départ de la division des données.
- **Nœud de décision** : points intermédiaires où les données sont encore divisées.
- **Nœud feuille** : point final où aucune division supplémentaire n'est possible.

Pour choisir le meilleur nœud racine, on utilise l'**indice de Gini** qui mesure l'impureté de la division. Plus l'indice de Gini est faible, plus la division est pure. L'indice de Gini est calculé comme suit :

$$\text{Gini Index} = 1 - [(P +)^2 + (P -)^2]$$

où  $p+$  est la probabilité d'une classe positive et  $p-$  la probabilité d'une classe négative.

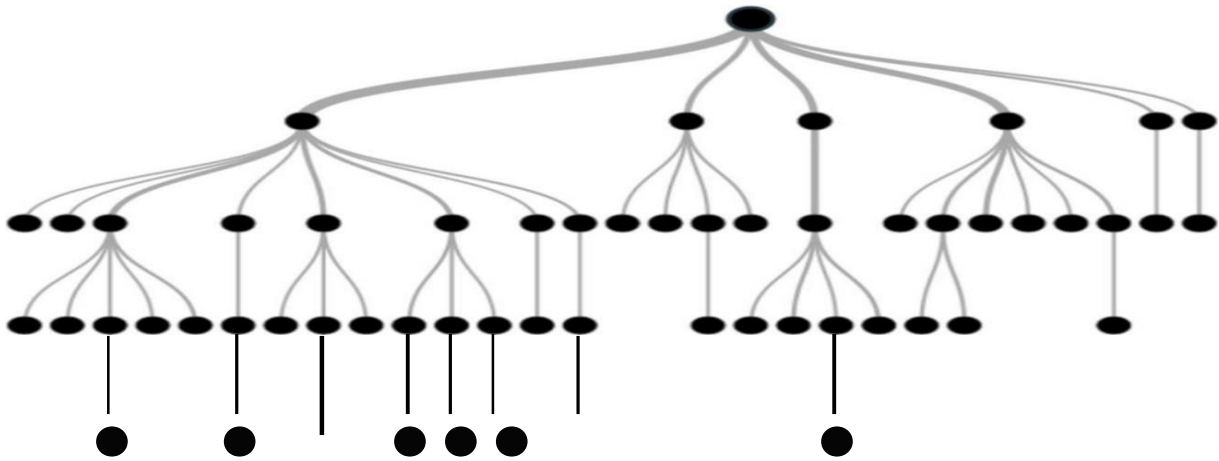


Figure 39:Structure arborescente

a) **Étapes impliquées dans l'algorithme Random Forest**

- **Création de sous-ensembles de données :**
  - L'échantillonnage des lignes et des colonnes est effectué avec remplacement, créant plusieurs sous-ensembles des données d'entraînement.
- **Construction des arbres de décision :**
  - Un arbre de décision est construit pour chaque sous-ensemble de données.
- **Prédictions individuelles :**
  - Chaque arbre produit une prédiction individuelle.
- **Prédiction finale :**
  - Pour un problème de classification, on prend le vote majoritaire, et pour une régression, on prend la moyenne des prédictions.



**2. Application de Random Forest pour la prédiction du ROP :**

L'algorithme Random Forest peut être utilisé pour prédire le taux de pénétration (ROP) en fonction de divers paramètres de forage tels que le poids sur l'outil (WOB), la pression (SPP), la vitesse de rotation (RPM), le débit de fluide (FLW), le couple (TRQ), la densité de boue (MW), et d'autres propriétés des fluides de forage (FV, PV, YP, etc.).

La relation complexe entre ces paramètres et le ROP est capturée par la fonction  $F()$ , apprise par le modèle de régression.

$$\text{ROP} = F(\text{WOB}, \text{SPP}, \text{RPM}, \text{FLW}, \text{TRQ}, \text{MW}, \text{FV}, \text{PV}, \text{GELO}, \text{GELIO}, \text{FLTR}, \text{YP})$$

Lorsqu'une nouvelle donnée  $x$  est introduite dans le modèle Random Forest, chaque arbre  $t_i$  effectue une prédiction  $y_i$ . La prédiction finale  $y$  est obtenue en prenant la moyenne des prédictions de tous les arbres :

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Ainsi, le modèle Random Forest agrège les résultats de plusieurs arbres de décision pour fournir une prédiction robuste du ROP.

## Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

---

### a) Le code propose :

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from matplotlib import rcParams
5 from sklearn.model_selection import train_test_split
6 from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
7 from sklearn.impute import SimpleImputer
8 from sklearn.preprocessing import StandardScaler, PolynomialFeatures
9 from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_squared_error
10
11 # Chargement des données
12 print("Chargement des données...")
13 data = pd.read_csv('C:\\Users\\laribi\\Desktop\\data.csv')
14
15 # Séparation des caractéristiques et de la variable cible
16 X = data.drop(['ROP', 'depth'], axis=1) # Suppression des colonnes non pertinentes
17 y = data['ROP'] # Variable cible
18
19 # Affichage de la carte de corrélation
20 print("Affichage de la carte de corrélation...")
21 rcParams['figure.figsize'] = 20, 20
22 plt.matshow(data.corr()) # Matrice de corrélation
23 plt.xticks(np.arange(data.shape[1]), data.columns, rotation=90) # Étiquettes des axes x
24 plt.yticks(np.arange(data.shape[1]), data.columns) # Étiquettes des axes y
25 plt.colorbar()
26 plt.show()
27
28 # Gestion des valeurs manquantes
29 print("Gestion des valeurs manquantes...")
30 imputer = SimpleImputer(missing_values=np.nan, strategy='mean')
31 X = imputer.fit_transform(X) # Imputation des valeurs manquantes
32
33 # Normalisation des données
34 print("Normalisation des données...")
35 scaler = StandardScaler()
36 X = scaler.fit_transform(X) # Standardisation des caractéristiques
37
38 # Division des données en ensembles d'entraînement et de test
39 print("Division des données...")
40 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3, random_state=100, shuffle=True)
41
42 # Création des caractéristiques polynomiales
43 print("Création des caractéristiques polynomiales...")
44 poly = PolynomialFeatures(degree=3)
45 X_train_poly = poly.fit_transform(X_train)
46 X_test_poly = poly.transform(X_test)
47
48 # Entraînement du modèle Random Forest
49 print("Entraînement du modèle Random Forest...")
50 model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, max_depth=100, random_state=100)
51 model.fit(X_train_poly, y_train)
52
53 # Évaluation du modèle
54 print("Évaluation du modèle...")
55 train_score = model.score(X_train_poly, y_train)
56 test_score = model.score(X_test_poly, y_test)
57 print(f"R2 Score - Entraînement: {train_score:.4f}")
58 print(f"R2 Score - Test: {test_score:.4f}")
59
60 # Prédiction et calcul des erreurs
61 print("Calcul des erreurs...")
62 y_pred = model.predict(X_test_poly)
63 mae = mean_absolute_error(y_test, y_pred)
64 mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
65 print(f"Mean Absolute Error: {mae:.4f}")
66 print(f"Mean Squared Error: {mse:.4f}")
67
```

## Chpître VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

---

### b) Explication de code :

- **Import des bibliotheques:**

```
● ● ●  
1 import numpy as np  
2 import pandas as pd  
3 import matplotlib.pyplot as plt  
4 from matplotlib import rcParams  
5 from sklearn.model_selection import train_test_split  
6 from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor  
7 from sklearn.impute import SimpleImputer  
8 from sklearn.preprocessing import StandardScaler, PolynomialFeatures  
9 from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_squared_error
```

- **Chargement des données:**

```
● ● ●  
1 # Chargement des données  
2 print("Chargement des données...")  
3 data = pd.read_csv('C:\\Users\\laribi\\Desktop\\data.csv')
```

- **Séparation des caractéristiques (X) et de la cible (y) :**

```
● ● ●  
1 # Séparation des caractéristiques et de la variable cible  
2 X = data.drop(['ROP', 'depth'], axis=1) # Suppression des colonnes non pertinentes  
3 y = data['ROP'] # Variable cible
```

Ici, nous séparons les données en deux parties :

- X contient toutes les colonnes sauf ROP et depth, qui ne sont pas pertinentes pour l'entraînement du modèle.
- y représente la cible que nous cherchons à prédire, ici le ROP (Rate of Pénétration).

## Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

---

- **Affichage de la carte de corrélation :**



```
1 # Affichage de la carte de corrélation
2 print("Affichage de la carte de corrélation...")
3 rcParams['figure.figsize'] = 20, 20
4 plt.matshow(data.corr()) # Matrice de corrélation
5 plt.xticks(np.arange(data.shape[1]), data.columns, rotation=90) # Étiquettes des axes x
6 plt.yticks(np.arange(data.shape[1]), data.columns) # Étiquettes des axes y
7 plt.colorbar()
8 plt.show()
```

Ici, nous séparons les données en deux parties :

- $X$  contient toutes les colonnes sauf `ROP` et `depth`, qui ne sont pas pertinentes pour l'entraînement du modèle.
- $y$  représente la cible que nous cherchons à prédire, ici le `ROP` (Rate of Pénétration).

- **Normalisation des données :**



```
1 # Normalisation des données
2 print("Normalisation des données...")
3 scaler = StandardScaler()
4 X = scaler.fit_transform(X) # Standardisation des caractéristiques
```

- Ici, les données sont **normalisées** en utilisant `StandardScaler`, ce qui standardise chaque caractéristique en leur donnant une **moyenne de 0** et un **écart-type de 1**.

- Cela est utile pour que les caractéristiques aient des échelles comparables avant d'entraîner le modèle.

- **Division des données en ensembles d'entraînement et de test :**



```
1 # Division des données en ensembles d'entraînement et de test
2 print("Division des données...")
3 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3, random_state=100, shuffle=True)
```

- Les données sont divisées en deux ensembles :

- **Entraînement** : `X_train, y_train` (70% des données).
- **Test** : `X_test, y_test` (30% des données).

## Chpître VII : Développement de modèle pour prédire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

---

- `train_test_split()` permet de diviser les données tout en mélangeant aléatoirement les échantillons avant la division (`shuffle=True`), et le paramètre `random_state=100` assure que la division est reproductible.
- **Création des caractéristiques polynomiales :**



```
1 # Création des caractéristiques polynomiales
2 print("Création des caractéristiques polynomiales...")
3 poly = PolynomialFeatures(degree=3)
4 X_train_poly = poly.fit_transform(X_train)
5 X_test_poly = poly.transform(X_test)
```

- Ce bloc applique une **transformation polynomiale** aux caractéristiques en ajoutant des interactions et puissances des variables d'entrée.
- `PolynomialFeatures(degree=3)` génère des termes polynomiaux jusqu'au degré 3. Cela peut améliorer la capacité du modèle à capturer des relations non linéaires dans les données.
- Les données d'entraînement et de test sont ensuite transformées avec ces nouvelles caractéristiques polynomiales.

- **Entraînement du modèle Random Forest**



```
1 # Entraînement du modèle Random Forest
2 print("Entraînement du modèle Random Forest...")
3 model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, max_depth=100, random_state=100)
4 model.fit(X_train_poly, y_train)
```

- Ici, un modèle **Random Forest** est créé pour la régression.
  - `n_estimators=100` signifie que la forêt sera composée de 100 arbres de décision.
  - `max_depth=100` fixe la profondeur maximale des arbres, ce qui permet de contrôler la complexité du modèle.
  - `random_state=100` assure la reproductibilité du modèle.
- Ensuite, le modèle est **entraîné** sur les données polynomiales d'entraînement.

## Chpître VII : Développement de modèle pour prédire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

---

- **Évaluation du modèle :**



```
1 # Évaluation du modèle
2 print("Évaluation du modèle...")
3 train_score = model.score(X_train_poly, y_train)
4 test_score = model.score(X_test_poly, y_test)
5 print(f"R2 Score - Entraînement: {train_score:.4f}")
6 print(f"R2 Score - Test: {test_score:.4f}")
```

- Ce bloc évalue la performance du modèle en calculant le  $R^2$  sur les données d'entraînement et de test.

- Le  $R^2$  mesure la proportion de la variance expliquée par le modèle. Il va de 0 (aucune variance expliquée) à 1 (toute la variance expliquée).

- **Prédictions et calcul des erreurs:**



```
1 # Prédictions et calcul des erreurs
2 print("Calcul des erreurs...")
3 y_pred = model.predict(X_test_poly)
4 mae = mean_absolute_error(y_test, y_pred)
5 mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
6 print(f"Mean Absolute Error: {mae:.4f}")
7 print(f"Mean Squared Error: {mse:.4f}")
```

- Ce bloc prédit les valeurs de  $y$  pour l'ensemble de test ( $x_{test\_poly}$ ).

- Ensuite, il calcule deux erreurs :

- **Mean Absolute Error (MAE)** : moyenne des différences absolues entre les valeurs prédites et réelles. Cela donne une idée des erreurs en termes de valeurs absolues.
- **Mean Squared Error (MSE)** : moyenne des carrés des différences entre les valeurs prédites et réelles, qui punit plus sévèrement les grandes erreurs.

### 3. Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des modèles informatiques inspirés des réseaux neuronaux biologiques, imitant leur structure et fonctionnement (Arabjamaloei, 2011). Ils se composent de plusieurs neurones interconnectés et sont utilisés pour résoudre des problèmes complexes en apprenant des relations à partir des données.

#### a) Structure des Réseaux de Neurones

Un réseau de neurones typique se compose de trois types de couches :

## Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

- **Couche d'entrée** : Receiving les données d'entrée, chaque neurone de cette couche représente une caractéristique des données.
- **Couches cachées** : Ces couches intermédiaires apprennent les représentations et les relations complexes entre les données. Un réseau peut avoir plusieurs couches cachées, chacune contenant plusieurs neurones.
- **Couche de sortie** : Produisant les résultats finaux du modèle. Chaque neurone de cette couche correspond à une sortie ou une prédiction.

Chaque neurone dans une couche est connecté aux neurones de la couche suivante par des connexions pondérées. Les poids et les biais sont ajustés pendant l'apprentissage pour minimiser l'erreur entre les prédictions et les valeurs réelles (Haykin, 1998). Un réseau bien conçu évite le sur-ajustement (overfitting) ou le sous-ajustement (underfitting) (Aalst, 2010).

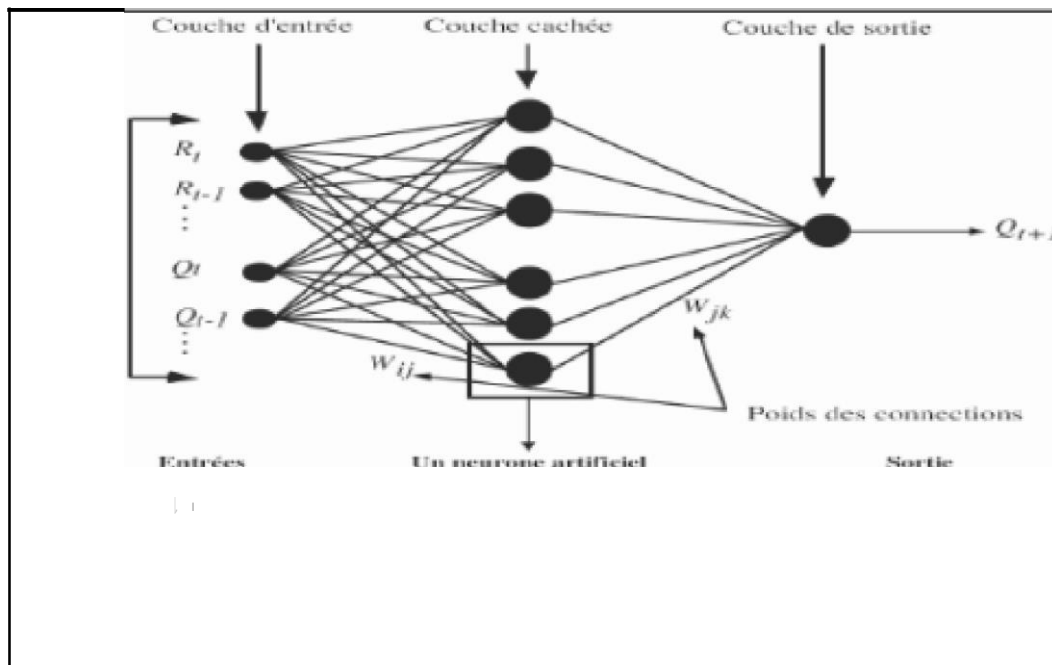


Figure 40 : La structure de RNA

- Perceptron Multicouche (PMC)

Le perceptron multicouche (PMC) est un type de réseau de neurones artificiels souvent utilisé pour les tâches de prédiction technique. Il comprend :

Une **coupe d'entrée** pour les données.

Une ou plusieurs **couches cachées** (MLP ou perceptrons multicouches) où les relations sont apprises.

Une **coupe de sortie** pour fournir les prédictions du modèle.

## **Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :**

---

Chaque neurone dans les couches cachées est connecté aux neurones de la couche suivante par des poids ajustables pendant l'apprentissage. Le PMC est flexible en termes de nombre de couches cachées et de neurones, ce qui permet d'adapter le réseau à divers problèmes (Lippmann, 1987).



### 4. Application le RNA pour la prediction de ROP:

#### a) Le code propose :



```
1 # Importation des bibliothèques nécessaires
2 import numpy as np
3 import pandas as pd
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 from sklearn.model_selection import train_test_split
6 from sklearn.impute import SimpleImputer
7 from sklearn.preprocessing import StandardScaler
8 from sklearn.neural_network import MLPRegressor
9
10 # Chargement des données
11 data = pd.read_csv('C:\\Users\\laribi\\Desktop\\data.csv')
12
13 # Séparation des caractéristiques (X) et de la cible (y)
14 X = data.drop(columns=['ROP', 'depth'])
15 y = data['ROP']
16
17 # Gestion des valeurs manquantes
18 imputer = SimpleImputer(missing_values=np.nan, strategy='mean')
19 X = imputer.fit_transform(X)
20
21 # Standardisation des données
22 scaler = StandardScaler()
23 X = scaler.fit_transform(X)
24
25 # Fractionnement des données en ensembles d'entraînement et de test
26 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3, random_state=100)
27
28 # Création et entraînement du modèle MLPRegressor
29 model = MLPRegressor(
30     activation='tanh',
31     learning_rate='constant',
32     learning_rate_init=0.0001,
33     hidden_layer_sizes=(100, 10),
34     random_state=33
35 )
36 model.fit(X_train, y_train)
37
38 # Évaluation du modèle
39 train_score = model.score(X_train, y_train)
40 test_score = model.score(X_test, y_test)
41
42 print(f'MLPRegressor Model Train Score: {train_score}')
43 print(f'MLPRegressor Model Test Score: {test_score}')
44
45 # Optionnel: Visualisation des performances (si nécessaire)
46 plt.figure(figsize=(10, 6))
47 plt.plot(model.predict(X_test), label='Prédictions du modèle', color='blue')
48 plt.plot(y_test.values, label='Valeurs réelles', color='red')
49 plt.xlabel('Index des échantillons')
50 plt.ylabel('Taux de Pénétration (ROP)')
51 plt.title('Prédictions du Modèle vs Valeurs Réelles')
52 plt.legend()
53 plt.show()
```

### b) Explication de code:

- **Importation des bibliothèques nécessaires :**



```
1 # Importation des bibliothèques nécessaires
2 import numpy as np
3 import pandas as pd
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 from sklearn.model_selection import train_test_split
6 from sklearn.impute import SimpleImputer
7 from sklearn.preprocessing import StandardScaler
8 from sklearn.neural_network import MLPRegressor
```

- **Chargement des données et Séparation des caractéristiques (X) et de la cible (y)**



```
1 # Chargement des données
2 data = pd.read_csv('C:\\Users\\laribi\\Desktop\\data.csv')
3
4 # Séparation des caractéristiques (X) et de la cible (y)
5 X = data.drop(columns=['ROP', 'depth'])
6 y = data['ROP']
```

Ce bloc charge le fichier CSV `data.csv` qui contient les données à partir d'un chemin sur le bureau de l'utilisateur.

- `X` contient toutes les colonnes du jeu de données sauf les colonnes `ROP` et `depth`.
- `y` est la variable cible, ici `ROP`, qui représente le **taux de pénétration** dans le contexte des forages (ou autre domaine similaire).

- **Gestion des valeurs manquantes et Standardisation des données:**



```
1 # Gestion des valeurs manquantes
2 imputer = SimpleImputer(missing_values=np.nan, strategy='mean')
3 X = imputer.fit_transform(X)
4
5 # Standardisation des données
6 scaler = StandardScaler()
7 X = scaler.fit_transform(X)
```

Si certaines valeurs sont manquantes (`np.nan`) dans les caractéristiques (`x`), elles sont remplacées par la **moyenne** des valeurs de la colonne respective.

## Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

---

standardise les données : chaque caractéristique est centrée sur la moyenne et réduite par l'écart-type, ce qui est important pour les réseaux de neurones pour obtenir une convergence plus rapide.

- **Fractionnement des données:**



```
1
2 # Fractionnement des données en ensembles d'entraînement et de test
3 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3, random_state=100)
4
```

- Les données sont divisées en deux parties :

- 70% pour l'entraînement (X\_train, y\_train).
- 30% pour le test (X\_test, y\_test).
- Le paramètre `random_state=100` assure que cette division soit reproductible.

- **Création et entraînement du modèle MLPRegressor:**



```
1 # Création et entraînement du modèle MLPRegressor
2 model = MLPRegressor(
3     activation='tanh',
4     learning_rate='constant',
5     learning_rate_init=0.0001,
6     hidden_layer_sizes=(100, 10),
7     random_state=33
8 )
9 model.fit(X_train, y_train)
10
```

□ Un modèle de **régression par réseau de neurones** (MLPRegressor) est créé avec les paramètres suivants :

- `activation='tanh'` : fonction d'activation tangente hyperbolique pour les neurones.
- `learning_rate='constant'` : le taux d'apprentissage est constant au fil des itérations.
- `learning_rate_init=0.0001` : taux d'apprentissage initial de 0.0001.
- `hidden_layer_sizes=(100, 10)` : deux couches cachées, la première avec 100 neurones et la seconde avec 10 neurones.
- `random_state=33` pour garantir la reproductibilité de l'entraînement.

□ Le modèle est ensuite **entraîné** sur les données d'entraînement.

- **Évaluation du modèle:**



```
1 # Évaluation du modèle
2 train_score = model.score(X_train, y_train)
3 test_score = model.score(X_test, y_test)
4
5 print(f'MLPRegressor Model Train Score: {train_score}')
6 print(f'MLPRegressor Model Test Score: {test_score}')
```

- L'évaluation du modèle est réalisée à l'aide du **coefficient de détermination ( $R^2$ )** pour les ensembles d'entraînement et de test.
- Le score  $R^2$  mesure la proportion de variance expliquée par le modèle. Plus il est proche de 1, plus le modèle est performant.

- **Visualisation des performances:**



```
1 # Optionnel: Visualisation des performances (si nécessaire)
2 plt.figure(figsize=(10, 6))
3 plt.plot(model.predict(X_test), label='Prédictions du modèle', color='blue')
4 plt.plot(y_test.values, label='Valeurs réelles', color='red')
5 plt.xlabel('Index des échantillons')
6 plt.ylabel('Taux de Pénétration (ROP)')
7 plt.title('Prédictions du Modèle vs Valeurs Réelles')
8 plt.legend()
9 plt.show()
```

- Cette partie optionnelle permet de **visualiser les prédictions** du modèle par rapport aux valeurs réelles de `y_test`.
- Un graphique est généré où :

- Les prédictions du modèle sont tracées en **bleu**.
- Les valeurs réelles de `y_test` sont tracées en **rouge**.

□ Cela permet de voir visuellement comment le modèle se comporte sur les données de test.

## E. Descriptions des donnees:

Tableau 12: Descriptions des donnees:

|      | ROP | WOB  | RPM   | FLW  | SPP  | TRQ  | MW   | FV | PV   | GELO | GELIO | FLTR | yp |
|------|-----|------|-------|------|------|------|------|----|------|------|-------|------|----|
| Mean | 22  | 8.15 | 90.34 | 3920 | 2200 | 940  | 1.18 | 48 | 14.2 | 11   | 17    | 4.1  | 19 |
| Min  | 0.8 | 0.9  | 30    | 50   | 450  | 1.2  | 1.07 | 40 | 12   | 7    | 13    | 0.2  | 12 |
| 25%  | 9.0 | 4.2  | 75    | 2850 | 1900 | 800  | 1.08 | 43 | 13   | 9.5  | 15    | 3.0  | 17 |
| 50%  | 15  | 7.5  | 88    | 3850 | 2550 | 1050 | 1.09 | 48 | 14   | 10.5 | 17    | 4.2  | 19 |
| 70%  | 32  | 12   | 95    | 4800 | 2650 | 1200 | 1.27 | 53 | 15   | 12   | 19    | 5.3  | 22 |
| Max  | 150 | 19   | 170   | 8200 | 2950 | 2100 | 1.30 | 57 | 17   | 15   | 22    | 6.5  | 25 |

### 1. Carte de correlation:

La carte de corrélation révèle les relations entre douze variables, illustrées par leurs abréviations respectives. Les coefficients de corrélation varient de -1 à 1, où :

- **1** indique une corrélation positive parfaite : les deux variables évoluent dans le même sens.
- **0** signifie une absence de corrélation : aucune relation linéaire entre les variables.
- **-1** représente une corrélation négative parfaite : les variables varient en sens opposé.

D'après Moraveji et Naderi (2016), une relation directe existe entre le **WOB**, le **RPM**, et le **ROP**. Elkatatny (2017) fournit des coefficients de corrélation pour ces relations : **ROP-WOB = 0.95**, **ROP-RPM = 0.91**, **ROP-TRQ = 0.86**, **ROP-SPP = 0.85**, **ROP-FLW = 0.92**.

Pour examiner l'impact des paramètres rhéologiques sur le **ROP**, nous nous référons à Paiaman et al. (2009), qui indiquent que l'augmentation de la densité et des solides dans le fluide de forage réduit le **ROP**. Selon Elkatatny, les coefficients de corrélation sont : **ROP-MW = -0.85**, **ROP-FV = -0.36**, **ROP-PV = -0.74**, **ROP-YP = -0.32**.

Les résultats de notre carte de corrélation permettent les conclusions suivantes :

- La relation entre le **ROP** et les paramètres rhéologiques varie en intensité.
- La **densité (MW)** et la **viscosité plastique (PV)** montrent une forte corrélation négative avec le **ROP** : leur augmentation entraîne une diminution du **ROP**.
- Le **Gel0**, la **viscosité (FV)**, le **filtrat (FLTR)**, et le **yield point (YP)** présentent une corrélation modérée, négative, avec le **ROP**. Bien que leur effet soit moins prononcé que celui de **MW** et **PV**, ces variables diminuent également lorsque le **ROP** augmente.
- L'impact du **Gel0** sur le **ROP** est relativement faible, avec une corrélation négative modeste

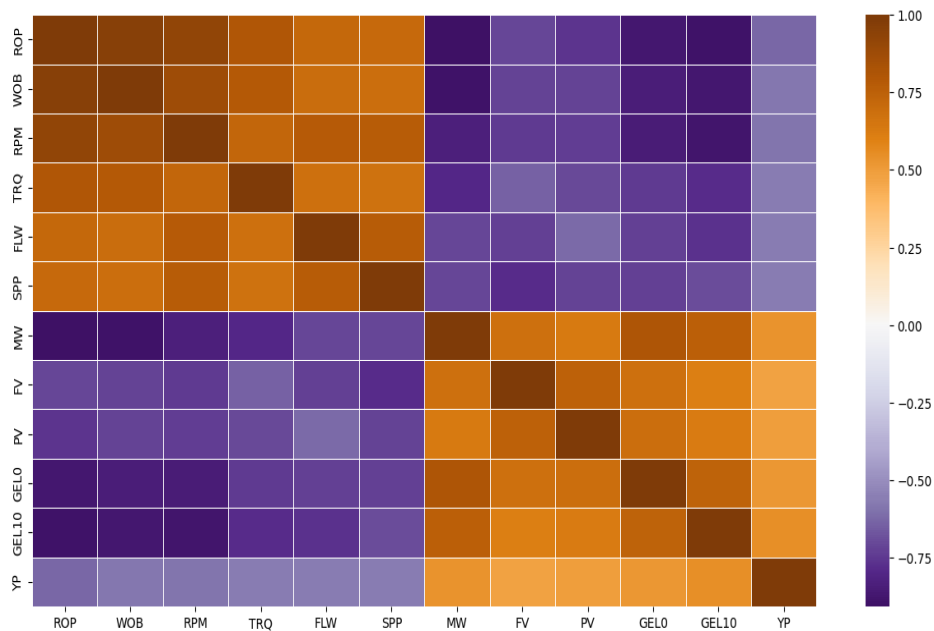


Figure 41: Carte de corrélation

a) Analyse des Corrélations avec le ROP

L'analyse des corrélations entre le ROP (Rate of Penetration) et les autres paramètres de forage met en évidence des relations importantes. Chaque paramètre peut influencer directement ou indirectement le taux de pénétration, et l'interprétation des corrélations permet d'optimiser les conditions de forage.

- ROP avec WOB (Weight on Bit)

Corrélation : (positive forte)

Interprétation : Une augmentation du WOB est généralement associée à une augmentation du ROP, ce qui est attendu, car un poids plus élevé sur le trépan permet souvent une pénétration plus rapide dans le sol.

## **Chpître VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :**

---

- ROP avec RPM (Rotations per Minute)

Corrélation : (positive forte)

Interprétation : Il existe une forte corrélation positive entre le ROP et les RPM. Une augmentation des tours par minute du trépan peut entraîner une augmentation du taux de pénétration, probablement en raison de l'efficacité accrue de la coupe des formations rocheuses.

- ROP avec TRQ (Torque)

Corrélation : (positive forte)

Interprétation : Le couple (TRQ) est également positivement corrélé au ROP, suggérant que des valeurs plus élevées de couple sont associées à un taux de pénétration plus élevé, ce qui peut être dû à une plus grande efficacité du forage sous des conditions plus difficiles.

- ROP avec FLW (Flow Rate)

Corrélation : (positive)

Interprétation : Le débit de fluide (FLW) présente une corrélation positive modérée avec le ROP. Un débit de fluide plus élevé peut améliorer le refroidissement et l'évacuation des débris, ce qui permet au trépan de fonctionner plus efficacement et d'augmenter le taux de pénétration.

- ROP avec SPP (Standpipe Pressure)

Corrélation : (positive)

Interprétation : La pression à la tige (SPP) est également positivement corrélée avec le ROP. Une pression plus élevée pourrait améliorer l'efficacité du système de forage, facilitant ainsi une meilleure pénétration.

- ROP avec MW (Mud Weight)

Corrélation : (négative forte)

Interprétation : Le poids de la boue (MW) a une forte corrélation négative avec le ROP. Cela suggère que des boues plus lourdes réduisent le taux de pénétration, probablement en raison de la pression hydrostatique accrue qui rend le forage plus difficile.

## Chpître VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

---

- ROP avec FV (Filtrate Volume)

Corrélation : (négative)

Interprétation : Il y a une corrélation négative entre le ROP et le volume du filtrat (FV). Une augmentation du filtrat pourrait indiquer une infiltration plus importante dans la formation, ce qui peut nuire à l'efficacité du forage.

- ROP avec PV (Plastic Viscosity)

Corrélation : (négative)

Interprétation : La viscosité plastique (PV) présente également une corrélation négative avec le ROP. Des valeurs de viscosité plus élevées peuvent entraver le processus de forage en augmentant la résistance à la circulation des fluides de forage.

- ROP avec GEL0 et GEL10

Corrélation avec GEL0 : (négative forte)

Corrélation avec GEL10 : (négative très forte)

Interprétation : Les valeurs de gel (GEL0 et GEL10) sont fortement et négativement corrélées avec le ROP. Cela indique que plus les propriétés de gel des fluides sont prononcées, plus le taux de pénétration est faible, probablement en raison de la difficulté accrue de la circulation des fluides dans le puits.

- ROP avec YP (Yield Point)

Corrélation : -0.62 (négative)

Interprétation : Le point de rendement (YP) est modérément négativement corrélé avec le ROP. Une augmentation du YP, qui mesure la capacité du fluide à suspendre des solides, pourrait ralentir le forage en raison d'une augmentation de la résistance au mouvement.

### **F. Les résultats de RNA et RFR :**

#### **1. Random Forest Régression :**

##### **a) Score d'entraînement**

Le score d'entraînement pour le modèle de **Random Forest Regressor** est très élevé (0.9875), ce qui indique que le modèle s'adapte extrêmement bien aux données d'entraînement. Cela montre que le modèle est capable de capturer la majorité des variations présentes dans les données et de les utiliser efficacement pour prédire la variable cible, le **ROP** (Rate of Pénétration).



## Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

### b) Score de test

Le score de test (0.9350) du **Random Forest Regressor** est légèrement inférieur à celui obtenu sur les données d'entraînement, mais reste excellent. Cette légère différence suggère que le modèle a une très bonne capacité de généralisation, c'est-à-dire qu'il peut prédire correctement les nouvelles données qui n'ont pas été utilisées pour l'entraînement. Cela montre que le modèle est bien équilibré et ne souffre pas de surapprentissage (overfitting).

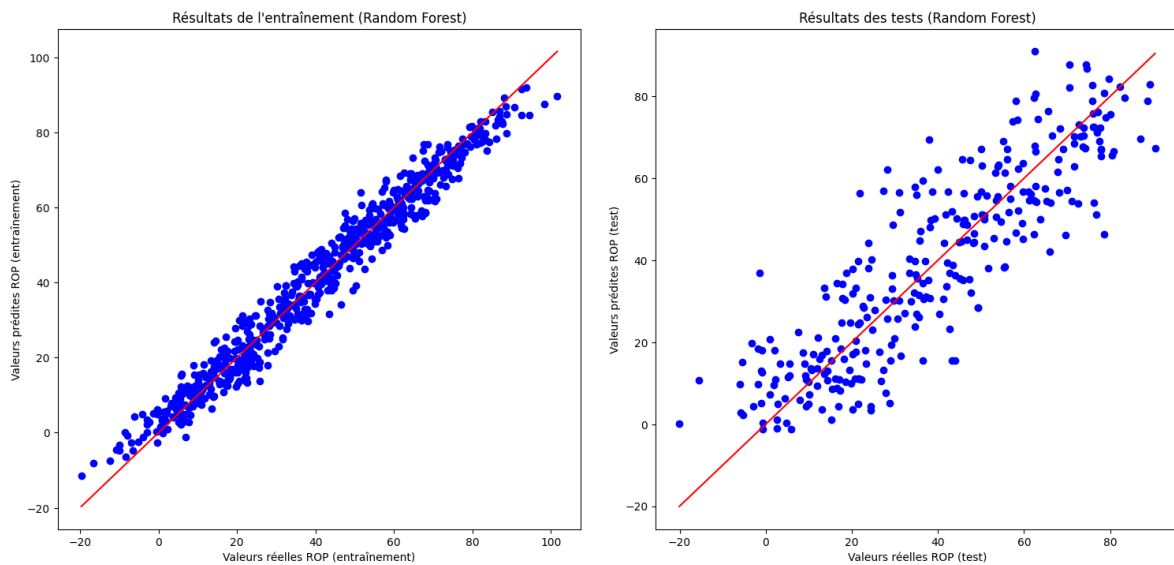


Figure 42: Les resultats obtenus utilisant le Random Forest.

## 2. RNN (MLP Regressor)

### a) Score d'entraînement

Le score d'entraînement du modèle de **RNN (MLP Regressor)** est de 0.9150, ce qui indique une bonne capacité d'apprentissage, mais légèrement inférieure à celle du modèle Random Forest. Ce score montre que le modèle parvient à apprendre les relations dans les données, mais qu'il n'est pas aussi performant que le Random Forest pour capturer toutes les variations

### b) Score de test

Le score de test pour le **RNN (MLP Regressor)** est de 0.7854. Ce score, bien qu'acceptable, est sensiblement inférieur au score d'entraînement et au score de test du Random Forest. Cela peut indiquer que le modèle a plus de difficultés à généraliser aux nouvelles données, ce qui pourrait être dû à une complexité plus élevée dans les données ou à une capacité d'apprentissage limitée comparée au modèle Random Forest.

## Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

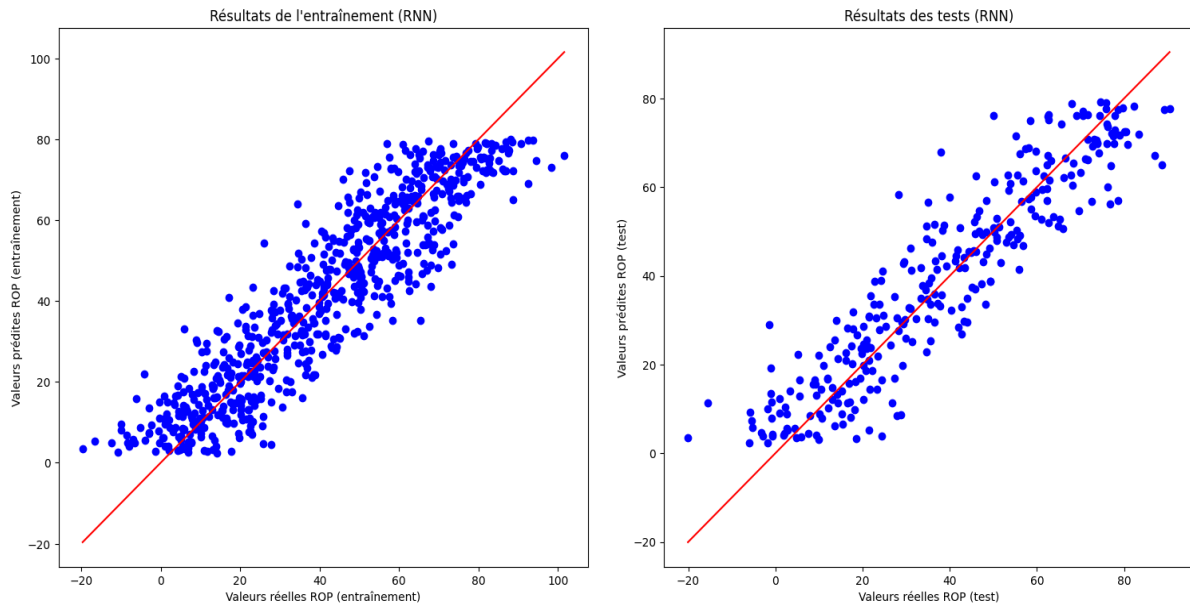


Figure 43:Les resultats obtenus utilisant le RNN.

### 3. Comparaison et conclusion

- Le **Random Forest Regressor** montre une performance supérieure, tant sur les données d'entraînement que sur les données de test, avec un score de **0.9875** pour l'entraînement et de **0.9350** pour le test. Ces résultats suggèrent que le modèle est non seulement puissant, mais également capable de généraliser efficacement les informations apprises aux nouvelles données.

- Le **RNN Regressor**, bien que performant sur les données d'entraînement (**0.9150**), affiche une performance nettement inférieure sur les données de test (**0.7854**). Ce résultat peut indiquer un problème de surapprentissage ou une capacité insuffisante à saisir les dynamiques complexes des données.

Pour cette tâche de régression spécifique, le **Random Forest Regressor** s'avère être le meilleur choix en termes de performance et de généralisation. Cependant, pour améliorer la performance du **RNN (MLP Regressor)**, des ajustements supplémentaires pourraient être nécessaires, tels que la modification de son architecture, l'utilisation de techniques de régularisation plus avancées, ou encore l'exploration d'autres méthodes de prétraitement des données.

#### **4. Interprétation des résultats de la régression par Random Forest :**

Cette section analyse les performances du modèle de régression Random Forest appliqué à notre jeu de données. Nous examinerons les métriques de performance pour évaluer la précision et la fiabilité du modèle, notamment le score de détermination, l'erreur absolue moyenne et l'erreur quadratique moyenne.

##### **a) Scores de régression**

Le score de détermination pour les données d'entraînement est exceptionnellement élevé, indiquant que le modèle capte presque toute la variance des données d'entraînement. Ce résultat démontre une capacité remarquable à modéliser les relations sous-jacentes dans les données utilisées pour l'entraînement.

Pour les données de test, le score de détermination, bien que légèrement inférieur à celui des données d'entraînement, reste très élevé. Cette différence modérée suggère que le modèle généralise bien aux nouvelles données. En d'autres termes, il est capable de faire des prédictions précises sur des données qu'il n'a pas vues pendant l'entraînement, sans souffrir de surajustement.

##### **b) Erreurs de prédiction**

L'erreur absolue moyenne (MAE) fournit une mesure de l'écart moyen entre les valeurs prédites et les valeurs réelles. Une MAE faible indique que, en moyenne, les prédictions du modèle sont très proches des valeurs observées, ce qui traduit une bonne précision du modèle.

Quant à l'erreur quadratique moyenne (MSE), elle évalue la moyenne des carrés des écarts entre les prédictions et les valeurs réelles. Un MSE faible, étant donné qu'il pénalise les grandes erreurs plus sévèrement, reflète également une bonne précision et une faible fréquence des erreurs importantes.

##### **c) Analyse générale**

Les scores de détermination proches pour les ensembles d'entraînement et de test suggèrent que le modèle est bien équilibré et qu'il ne souffre pas de surajustement. Les valeurs faibles de MAE et de MSE indiquent que les erreurs de prédiction sont globalement minimisées, attestant de la fiabilité du modèle.

##### **d) Visualisation graphique des prédictions**

Pour compléter notre analyse, une comparaison graphique des valeurs prédites par le modèle avec les valeurs réelles est réalisée. Cette visualisation permet d'évaluer visuellement la performance du modèle et de confirmer sa capacité à prédire les valeurs avec précision.

## Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :

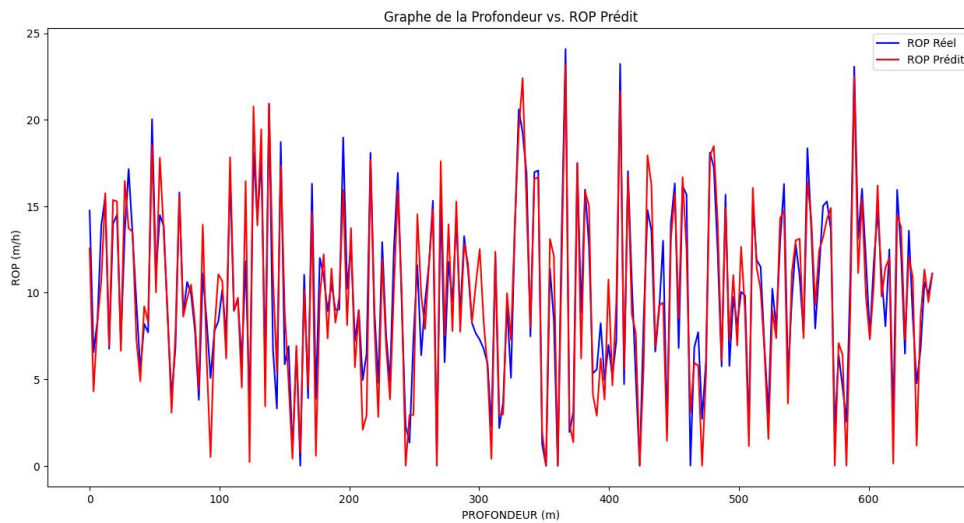


Figure 44: Comparaison du ROP Réel et du ROP Prédit en fonction de la Profondeur

### ➤ Interpretation:

le graphique illustre la comparaison entre les valeurs de ROP prédites par un modèle Random Forest (en rouge) et les valeurs réelles de ROP mesurées dans le puits tnk304(en bleu). La profondeur du puits est représentée sur l'axe des abscisses, tandis que les valeurs de ROP figurent sur l'axe des ordonnées. On constate que les courbes des ROP réels et prédits suivent globalement la même tendance à travers les différentes profondeurs. Cette observation témoigne de la capacité du modèle de régression Random Forest à capturer efficacement les variations globales du ROP en fonction de la profondeur.

## G. Conclusion :

Dans une approche générale de prédiction du taux de pénétration (ROP), il est essentiel de combiner les paramètres mécaniques du forage avec les propriétés des fluides de forage pour obtenir des résultats précis. Les méthodes modernes de prédiction, telles que les **forêts aléatoires** et les **réseaux neuronaux artificiels (RNA)**, sont particulièrement efficaces pour modéliser ces interactions complexes.

Les **paramètres mécaniques**, comme le poids sur l'outil (WOB), la vitesse de rotation (RPM), et le couple (TRQ), sont souvent positivement corrélés avec le ROP, favorisant une pénétration rapide. En revanche, les **propriétés des fluides de forage**, telles que la densité et la viscosité, peuvent ralentir le processus en augmentant la résistance.

## **Chpitre VII :Developpement de model pour predire ROP en utilisant des techniques d'apprentissage automatique :**

---

Les modèles basés sur la **machine learning**, notamment la **régression par forêts aléatoires** et les **réseaux neuronaux**, permettent d'intégrer ces multiples facteurs pour prédire avec précision le ROP. Grâce à leur capacité à capturer les non-linéarités et les corrélations complexes, ces méthodes surpassent les modèles empiriques traditionnels. Elles offrent une meilleure généralisation sur les nouvelles données et permettent d'optimiser les paramètres de forage pour maximiser l'efficacité, tout en minimisant les erreurs liées aux prédictions.

# **Chapitre VII**

---

Visualisation en trois démontions 3D de la  
trajectoire de puits TNK304

---

## VIII.Chapitre 07 : Visualisation en trois démontions 3D de la trajectoire de puits TNK 304 :

### A.Introduction :

Nous avons utilisé le langage de programmation Python pour réaliser un profil 3D du puits TNK 04 afin de suivre sa trajectoire à différentes positions. Cette approche nous a permis d'analyser la trajectoire et de formuler des remarques et des recommandations pour l'optimiser.

### B.Les données de puits :

Tableau13: Les données de puits TNK 304

| MD<br>[m] | Inclination<br>[°] | Azimuth<br>[°] | TVD<br>[m] | Vert Sect<br>[m] | North<br>[m] | East<br>[m] | DLS<br>[°/30m] |
|-----------|--------------------|----------------|------------|------------------|--------------|-------------|----------------|
| 0.00†     | 0.000              | 196.280        | 0.00       | 0.00             | 0.00         | 0.00        | 0.00           |
| 7.62      | 0.000              | 196.280        | 7.62       | 0.00             | 0.00         | 0.00        | 0.00           |
| 1340.00   | 0.000              | 0.000          | 1340.00    | 0.00             | 0.00         | 0.00        | 0.00           |
| 1377.93   | 8.480              | 196.280        | 1377.79    | 2.53             | -2.69        | -0.79       | 6.71           |
| 1392.95   | 12.270             | 204.990        | 1392.56    | 5.06             | -5.20        | -1.77       | 8.17           |
| 1405.42   | 14.980             | 212.430        | 1404.68    | 7.92             | -7.76        | -3.19       | 7.75           |
| 1413.51   | 16.110             | 211.340        | 1412.48    | 10.06            | -9.60        | -4.34       | 4.33           |
| 1423.80   | 18.070             | 210.190        | 1422.31    | 13.03            | -12.20       | -5.88       | 5.80           |
| 1432.80   | 19.380             | 211.870        | 1430.84    | 15.87            | -14.68       | -7.38       | 4.72           |
| 1442.01   | 20.770             | 213.980        | 1439.49    | 18.99            | -17.33       | -9.09       | 5.10           |
| 1451.79   | 22.150             | 216.060        | 1448.59    | 22.55            | -20.26       | -11.15      | 4.83           |
| 1461.17   | 24.020             | 216.370        | 1457.22    | 26.21            | -23.22       | -13.32      | 5.99           |
| 1470.64   | 25.850             | 217.100        | 1465.80    | 30.19            | -26.42       | -15.71      | 5.88           |
| 1480.08   | 27.590             | 217.690        | 1474.24    | 34.42            | -29.80       | -18.29      | 5.59           |
| 1489.89   | 29.450             | 218.840        | 1482.85    | 39.09            | -33.47       | -21.19      | 5.93           |
| 1499.13   | 31.180             | 220.270        | 1490.83    | 43.75            | -37.07       | -24.16      | 6.09           |
| 1510.02   | 33.140             | 221.630        | 1500.05    | 49.55            | -41.44       | -27.96      | 5.76           |
| 1518.40   | 34.660             | 221.620        | 1507.00    | 54.22            | -44.94       | -31.07      | 5.44           |
| 1528.15   | 36.480             | 220.780        | 1514.94    | 59.90            | -49.20       | -34.80      | 5.80           |
| 1537.86   | 38.050             | 220.510        | 1522.66    | 65.77            | -53.67       | -38.63      | 4.88           |
| 1546.55   | 38.670             | 221.950        | 1529.48    | 71.17            | -57.72       | -42.19      | 3.75           |
| 1552.64   | 39.330             | 222.710        | 1534.21    | 75.00            | -60.55       | -44.77      | 4.02           |
| 1563.45   | 39.790             | 223.140        | 1542.54    | 81.88            | -65.59       | -49.45      | 1.49           |
| 1572.71   | 40.780             | 224.710        | 1549.61    | 87.86            | -69.91       | -53.61      | 4.59           |
| 1582.13   | 42.170             | 225.050        | 1556.67    | 94.09            | -74.33       | -58.01      | 4.48           |
| 1592.07   | 43.380             | 226.000        | 1563.96    | 100.83           | -79.06       | -62.83      | 4.14           |
| 1602.37   | 45.310             | 226.260        | 1571.33    | 108.00           | -84.04       | -68.02      | 5.65           |
| 1614.09   | 47.690             | 225.560        | 1579.39    | 116.48           | -89.96       | -74.12      | 6.23           |
| 1620.00   | 48.977             | 224.930        | 1583.32    | 120.89           | -93.07       | -77.26      | 0.00           |
| 1630.00   | 49.326             | 226.169        | 1589.86    | 128.43           | -98.37       | -82.66      | 3.00           |

## Chapitre VIII : Visualisation en trois déontions 3D de la trajectoire de puits TNK 304

| MD<br>[m] | Inclination<br>[°] | Azimuth<br>[°] | TVD<br>[m] | Vert Sect<br>[m] | North<br>[m] | East<br>[m] | DLS<br>[°/30m] |
|-----------|--------------------|----------------|------------|------------------|--------------|-------------|----------------|
| 1650.00†  | 52.968             | 225.428        | 1602.41    | 143.97           | -109.22      | -93.82      | 5.53           |
| 1680.00†  | 58.440             | 224.439        | 1619.31    | 168.70           | -126.77      | -111.31     | 5.53           |
| 1710.00†  | 63.918             | 223.559        | 1633.76    | 194.95           | -145.67      | -129.56     | 5.53           |
| 1740.00†  | 69.401             | 222.759        | 1645.64    | 222.47           | -165.76      | -148.39     | 5.53           |
| 1770.00†  | 74.887             | 222.015        | 1654.84    | 251.02           | -186.84      | -167.63     | 5.53           |
| 1770.62   | 75.000             | 222.000        | 1655.00    | 251.61           | -187.29      | -168.03     | 5.53           |
| 1800.00†  | 82.088             | 221.731        | 1660.83    | 280.39           | -208.72      | -187.24     | 7.24           |
| 1826.15   | 88.396             | 221.500        | 1663.00    | 306.44           | -228.19      | -204.53     | 7.24           |
| 1830.00†  | 88.396             | 221.500        | 1663.11    | 310.29           | -231.07      | -207.08     | 0.00           |
| 1860.00†  | 88.396             | 221.500        | 1663.95    | 340.27           | -253.53      | -226.95     | 0.00           |
| 1890.00†  | 88.396             | 221.500        | 1664.79    | 370.26           | -275.99      | -246.83     | 0.00           |
| 1920.00†  | 88.396             | 221.500        | 1665.63    | 400.25           | -298.45      | -266.70     | 0.00           |
| 1950.00†  | 88.396             | 221.500        | 1666.47    | 430.24           | -320.91      | -286.57     | 0.00           |
| 1980.00†  | 88.396             | 221.500        | 1667.31    | 460.23           | -343.37      | -306.44     | 0.00           |
| 2010.00†  | 88.396             | 221.500        | 1668.15    | 490.22           | -365.83      | -326.31     | 0.00           |
| 2040.00†  | 88.396             | 221.500        | 1668.99    | 520.20           | -388.29      | -346.18     | 0.00           |
| 2070.00†  | 88.396             | 221.500        | 1669.83    | 550.19           | -410.75      | -366.05     | 0.00           |
| 2100.00†  | 88.396             | 221.500        | 1670.67    | 580.18           | -433.21      | -385.92     | 0.00           |
| 2130.00†  | 88.396             | 221.500        | 1671.51    | 610.17           | -455.67      | -405.79     | 0.00           |
| 2160.00†  | 88.396             | 221.500        | 1672.35    | 640.16           | -478.13      | -425.66     | 0.00           |
| 2190.00†  | 88.396             | 221.500        | 1673.18    | 670.14           | -500.59      | -445.53     | 0.00           |
| 2220.00†  | 88.396             | 221.500        | 1674.02    | 700.13           | -523.05      | -465.40     | 0.00           |
| 2250.00†  | 88.396             | 221.500        | 1674.86    | 730.12           | -545.51      | -485.28     | 0.00           |
| 2280.00†  | 88.396             | 221.500        | 1675.70    | 760.11           | -567.97      | -505.15     | 0.00           |
| 2310.00†  | 88.396             | 221.500        | 1676.54    | 790.10           | -590.43      | -525.02     | 0.00           |
| 2326.30   | 88.396             | 221.500        | 1677.00    | 806.39           | -602.64      | -535.81     | 0.00           |



## C. Code python pour obtenir la 3D :

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
3 import numpy as np
4
5 # Data in the required format
6 data = [
7     {'md': 0.00, 'inclination': 0.000, 'azimuth': 196.280, 'tvd': 0.00},
8     {'md': 7.62, 'inclination': 0.000, 'azimuth': 196.280, 'tvd': 7.62},
9     {'md': 1340.00, 'inclination': 0.000, 'azimuth': 0.000, 'tvd': 1340.00},
10    {'md': 1377.93, 'inclination': 8.480, 'azimuth': 196.280, 'tvd': 1377.79},
11    {'md': 1392.95, 'inclination': 12.270, 'azimuth': 204.990, 'tvd': 1392.56},
12    {'md': 1405.42, 'inclination': 14.980, 'azimuth': 212.430, 'tvd': 1404.68},
13    {'md': 1413.51, 'inclination': 16.110, 'azimuth': 211.340, 'tvd': 1412.48},
14    {'md': 1423.80, 'inclination': 18.070, 'azimuth': 210.190, 'tvd': 1422.31},
15    {'md': 1432.80, 'inclination': 19.380, 'azimuth': 211.870, 'tvd': 1430.84},
16    {'md': 1442.01, 'inclination': 20.770, 'azimuth': 213.980, 'tvd': 1439.49},
17    {'md': 1451.79, 'inclination': 22.150, 'azimuth': 216.060, 'tvd': 1448.59},
18    {'md': 1461.17, 'inclination': 24.020, 'azimuth': 216.370, 'tvd': 1457.22},
19    {'md': 1470.64, 'inclination': 25.850, 'azimuth': 217.100, 'tvd': 1465.80},
20    {'md': 1480.08, 'inclination': 27.590, 'azimuth': 217.690, 'tvd': 1474.24},
21    {'md': 1489.89, 'inclination': 29.450, 'azimuth': 218.840, 'tvd': 1482.85},
22    {'md': 1499.13, 'inclination': 31.180, 'azimuth': 220.270, 'tvd': 1490.83},
23    {'md': 1510.02, 'inclination': 33.140, 'azimuth': 221.630, 'tvd': 1500.05},
24    {'md': 1518.40, 'inclination': 34.660, 'azimuth': 221.620, 'tvd': 1507.00},
25    {'md': 1528.15, 'inclination': 36.480, 'azimuth': 220.780, 'tvd': 1514.94},
26    {'md': 1537.86, 'inclination': 38.050, 'azimuth': 220.510, 'tvd': 1522.66},
27    {'md': 1546.55, 'inclination': 38.670, 'azimuth': 221.950, 'tvd': 1529.48},
28    {'md': 1552.64, 'inclination': 39.330, 'azimuth': 222.710, 'tvd': 1534.21},
29    {'md': 1563.45, 'inclination': 39.790, 'azimuth': 223.140, 'tvd': 1542.54},
30    {'md': 1572.71, 'inclination': 40.780, 'azimuth': 224.710, 'tvd': 1549.61},
31    {'md': 1582.13, 'inclination': 42.170, 'azimuth': 225.050, 'tvd': 1556.67},
32    {'md': 1592.07, 'inclination': 43.380, 'azimuth': 226.000, 'tvd': 1563.96},
33    {'md': 1602.37, 'inclination': 45.310, 'azimuth': 226.260, 'tvd': 1571.33},
34    {'md': 1614.09, 'inclination': 47.690, 'azimuth': 225.560, 'tvd': 1579.39},
35    {'md': 1620.00, 'inclination': 48.977, 'azimuth': 224.930, 'tvd': 1583.32},
36    {'md': 1630.00, 'inclination': 49.326, 'azimuth': 226.169, 'tvd': 1589.86},
37    {'md': 1650.00, 'inclination': 52.968, 'azimuth': 225.428, 'tvd': 1602.41},
38    {'md': 1680.00, 'inclination': 58.440, 'azimuth': 224.439, 'tvd': 1619.31},
39    {'md': 1710.00, 'inclination': 63.918, 'azimuth': 223.559, 'tvd': 1633.76},
40    {'md': 1740.00, 'inclination': 69.401, 'azimuth': 222.759, 'tvd': 1645.64},
41    {'md': 1770.00, 'inclination': 74.887, 'azimuth': 222.015, 'tvd': 1654.84},
42    {'md': 1770.62, 'inclination': 75.000, 'azimuth': 222.000, 'tvd': 1655.00},
43    {'md': 1800.00, 'inclination': 82.088, 'azimuth': 221.731, 'tvd': 1660.83},
44    {'md': 1826.15, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1663.00},
45    {'md': 1830.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1663.11},
46    {'md': 1860.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1663.95},
47    {'md': 1890.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1664.79},
48    {'md': 1920.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1665.63},
49    {'md': 1950.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1666.47},
50    {'md': 1980.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1667.31},
51    {'md': 2010.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1668.15},
52    {'md': 2040.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1668.99},
53    {'md': 2070.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1669.83},
54    {'md': 2100.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1670.67},
55    {'md': 2130.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1671.51},
56    {'md': 2160.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1672.35},
57    {'md': 2190.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1673.18},
58    {'md': 2220.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1674.02},
59    {'md': 2250.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1674.86},
60    {'md': 2280.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1675.70},
61    {'md': 2310.00, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1676.54},
62    {'md': 2326.30, 'inclination': 88.396, 'azimuth': 221.500, 'tvd': 1677.00}
63 ]
64
65 # Initialize North, East, and TVD lists
66 north = [0]
67 east = [0]
68 tvd = [point['tvd'] for point in data]
69
70 # Calculate North and East coordinates
71 for i in range(1, len(data)):
72     md_diff = data[i]['md'] - data[i-1]['md']
73     inclination_rad = np.radians(data[i]['inclination'])
74     azimuth_rad = np.radians(data[i]['azimuth'])
75
76     north.append(north[-1] + md_diff * np.sin(inclination_rad) * np.cos(azimuth_rad))
77     east.append(east[-1] + md_diff * np.sin(inclination_rad) * np.sin(azimuth_rad))
78
79 # Create the 3D plot
80 fig = plt.figure(figsize=(10, 8))
81 ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
82
83 # Plot the data
84 ax.plot(north, east, tvd, label='Well Path')
85
86 # Set labels and title
87 ax.set_xlabel('North, m')
88 ax.set_ylabel('East, m')
89 ax.set_zlabel('TVD, m')
90 ax.set_title('Well Profile')
91 ax.invert_zaxis() # Invert Z axis
92 ax.legend()
93
94 # Show the plot
95 plt.tight_layout()
96 plt.show()

```

D. Le profile 3D obtenu :

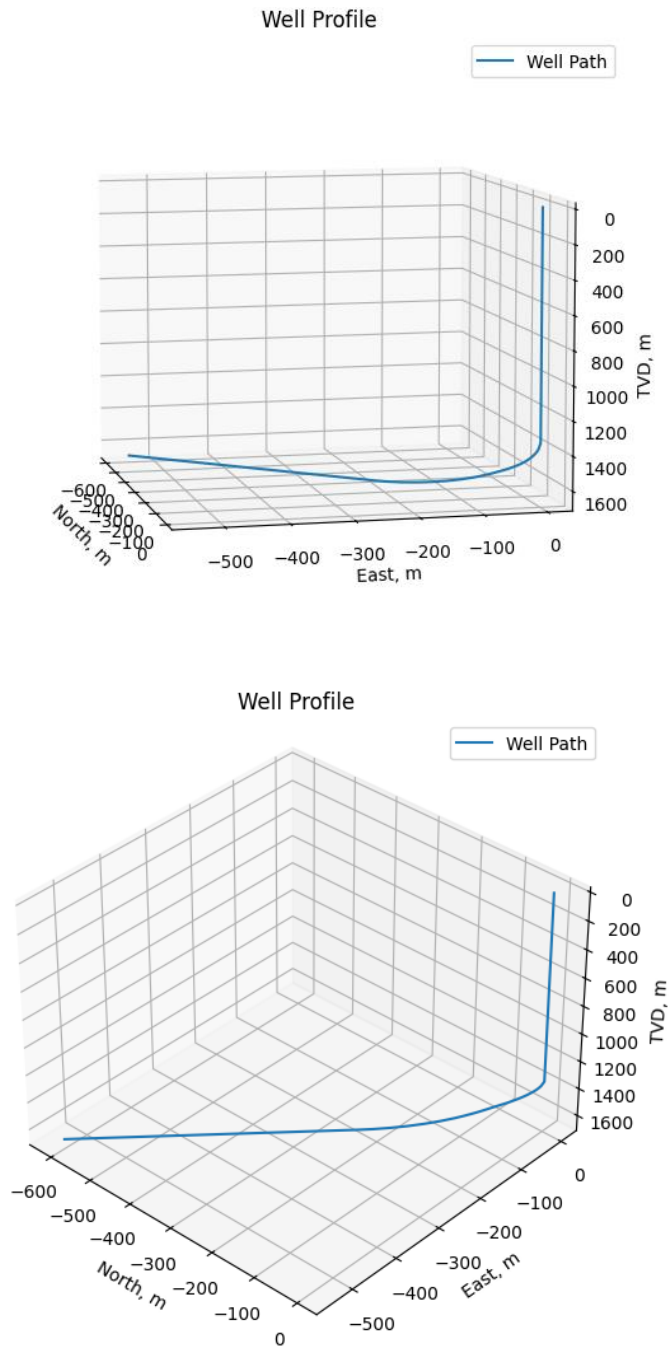


Figure 45 : well profile 3D TNK 304

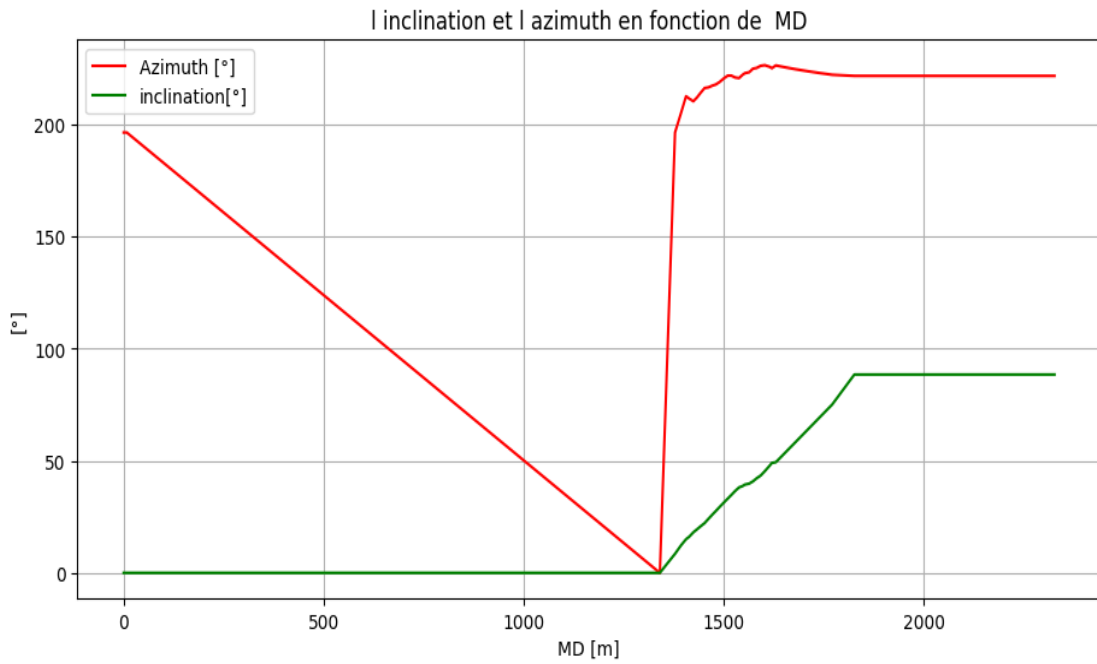


Figure 46 : Variation de l'azimuthe et l'inclination en fonction de MD

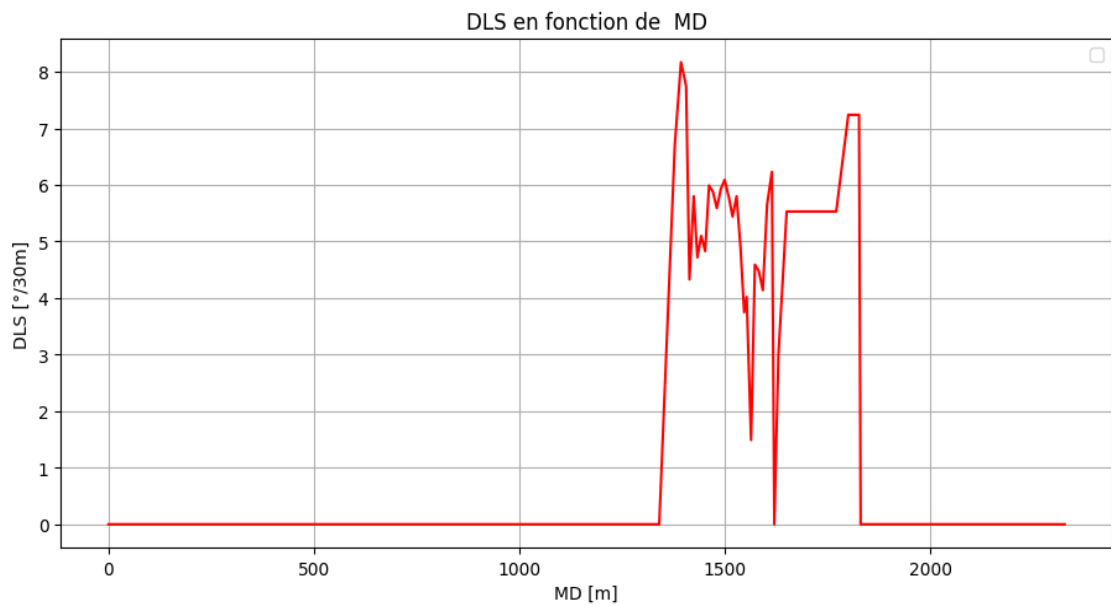


Figure 47: DLS en fonction de MD

### E. Analyse des résultats:

Le graphique montre la trajectoire du puits TNK 304 en 3D. Voici une analyse de cette trajectoire, en tenant compte du fait que le side track a été effectué à 1620 m de profondeur mesurée (MD).

➤ Analyse de la Trajectoire

• **Trajectoire Initiale (0 à 1620 m MD) :**

- La trajectoire initiale commence à une inclinaison de  $0^\circ$  et un azimut de  $196.280^\circ$ .
- La profondeur vraie verticale (TVD) augmente de manière linéaire jusqu'à environ 1340 m où l'inclinaison commence à augmenter.
- L'inclinaison continue d'augmenter progressivement, atteignant environ  $49.326^\circ$  à 1620 m MD. L'azimut varie légèrement mais reste autour de  $221-226^\circ$ .

• **Side Track à 1620 m MD :**

- À 1620 m MD, un side track a été effectué, marquant un changement significatif dans l'inclinaison et l'azimut.
- L'inclinaison passe rapidement à environ  $88.396^\circ$ , indiquant une trajectoire presque horizontale.
- L'azimut reste relativement constant autour de  $221.500^\circ$ , indiquant que la direction générale du forage reste stable après le side track.

• **Phase Post-Side Track (1620 m MD et plus) :**

- La trajectoire post-side track montre une inclinaison maintenue autour de  $88.396^\circ$ , ce qui est typique pour atteindre des cibles horizontales ou des réservoirs éloignés.
- La TVD augmente légèrement, passant de 1583.32 m à 1677.00 m, indiquant un forage horizontal prolongé.

➤ **Visualisation :**

La visualisation en 3D montre clairement les segments verticaux, déviés et horizontaux de la trajectoire du puits. Les principaux points à noter sont :

- Le segment vertical initial.

- La déviation progressive jusqu'au side track.
- La phase horizontale après le side track.

### ➤ **Conclusion**

Le side track à 1620 m MD a permis de réorienter le puits de manière efficace vers une trajectoire horizontale, typique pour atteindre des réservoirs éloignés horizontalement. L'inclinaison élevée après le side track indique un forage quasi-horizontale, ce qui est crucial pour maximiser la production dans des réservoirs à large étendue horizontale.

### **F. Proposition d'une trajectoire optimisée :**

Pour proposer une trajectoire optimisée pour le puits TNK 304, nous allons suivre une approche basée sur les objectifs suivants :

- Réduire la longueur totale du forage tout en atteignant le réservoir efficacement.
- Optimiser l'inclinaison et l'azimut pour atteindre le réservoir à 1689 m MD.
- Maximiser l'exposition dans le réservoir pour augmenter la production.

#### • **Étape 1: Segment Vertical Initial**

Forer verticalement jusqu'à une profondeur de 1000 m MD pour minimiser les risques et coûts initiaux.

#### • **Étape 2: Déviation Progressivement Contrôlée**

De 1000 m MD à 1300 m MD : Augmenter progressivement l'inclinaison de 0° à 30°.

De 1300 m MD à 1500 m MD : Continuer à augmenter l'inclinaison de 30° à 60°.

#### • **Étape 3: Segment Dévié pour Atteindre le Réservoir**

De 1500 m MD à 1689 m MD : Maintenir l'inclinaison de 60° pour atteindre le réservoir à 1689 m MD.

#### • **Étape 4: Forage Horizontal dans le Réservoir**

À partir de 1689 m MD : Forer horizontalement pour maximiser l'exposition dans la zone de réservoir.

Exemple de Code pour la Visualisation de la Trajectoire Optimisée

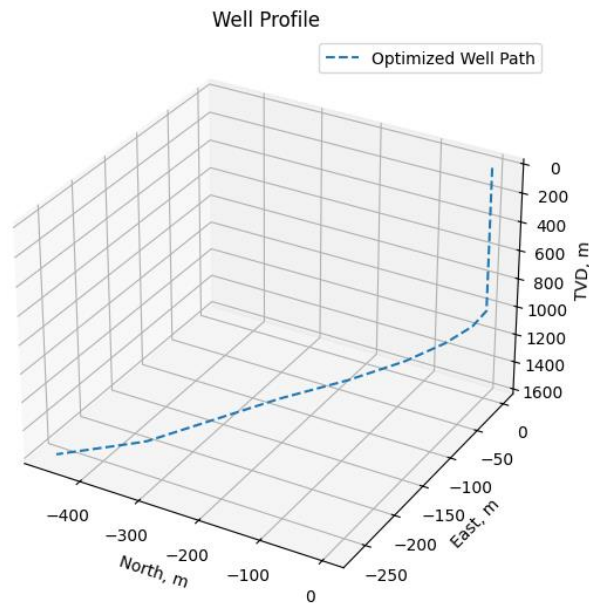
Voici un exemple de code Python pour visualiser cette trajectoire optimisée :

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
3 import numpy as np
4
5 # Data for optimized trajectory (example values)
6 optimized_data = [
7     {'md': 0.00, 'inclination': 0.000, 'azimuth': 0.000, 'tvd': 0.00},
8     {'md': 1000.00, 'inclination': 0.000, 'azimuth': 210.000, 'tvd': 1000.00},
9     {'md': 1100.00, 'inclination': 10.000, 'azimuth': 210.000, 'tvd': 1098.48},
10    {'md': 1200.00, 'inclination': 20.000, 'azimuth': 210.000, 'tvd': 1193.53},
11    {'md': 1300.00, 'inclination': 30.000, 'azimuth': 210.000, 'tvd': 1282.94},
12    {'md': 1400.00, 'inclination': 45.000, 'azimuth': 210.000, 'tvd': 1362.47},
13    {'md': 1500.00, 'inclination': 60.000, 'azimuth': 210.000, 'tvd': 1427.84},
14    {'md': 1689.00, 'inclination': 60.000, 'azimuth': 210.000, 'tvd': 1600.00},
15    {'md': 1700.00, 'inclination': 90.000, 'azimuth': 210.000, 'tvd': 1602.00},
16    {'md': 1800.00, 'inclination': 90.000, 'azimuth': 210.000, 'tvd': 1602.00},
17 ]
18
19 # Initialize North, East, and TVD lists for optimized trajectory
20 north_opt = [0]
21 east_opt = [0]
22 tvd_opt = [point['tvd'] for point in optimized_data]
23
24 # Calculate North and East coordinates for optimized trajectory
25 for i in range(1, len(optimized_data)):
26     md_diff = optimized_data[i]['md'] - optimized_data[i - 1]['md']
27     inclination_rad = np.radians(optimized_data[i]['inclination'])
28     azimuth_rad = np.radians(optimized_data[i]['azimuth'])
29
30     north_opt.append(north_opt[-1] + md_diff * np.sin(inclination_rad) * np.cos(azimuth_rad))
31     east_opt.append(east_opt[-1] + md_diff * np.sin(inclination_rad) * np.sin(azimuth_rad))
32
33 # Create the 3D plot for optimized trajectory
34 fig = plt.figure(figsize=(10, 8))
35 ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
36
37 # Plot the optimized trajectory
38 ax.plot(north_opt, east_opt, tvd_opt, label='Optimized Well Path', linestyle='--')
39
40 # Set labels and title
41 ax.set_xlabel('North, m')
42 ax.set_ylabel('East, m')
43 ax.set_zlabel('TVD, m')
44 ax.set_title('Well Profile')
45 ax.invert_zaxis() # Invert Z axis
46 ax.legend()
47
48 # Show the plot
49 plt.tight_layout()
50 plt.show()
```

### ➤ Visualisation de la Trajectoire optimisée

Le code ci-dessus visualise la trajectoire optimisée par rapport à la trajectoire initiale.

Voici un aperçu de la trajectoire optimisée :



**Figure 48 : Trajectoire optimisée du puits TNK 304**

- Segment vertical jusqu'à 1000 m MD.
- Augmentation progressive de l'inclinaison de 1000 m à 1500 m MD.
- Maintien de l'inclinaison pour atteindre le réservoir à 1689 m MD.
- Forage horizontal à partir de 1689 m MD pour maximiser l'exposition dans le réservoir.

Cette trajectoire propose un plan pour optimiser le forage du puits TNK 304, en minimisant les coûts et les risques tout en maximisant la production. Les valeurs spécifiques peuvent être ajustées en fonction des données géologiques et des objectifs du réservoir.

## **Conclusion générale :**

### **IX. Conclusion générale :**

System (RSS) dans les puits TNK 305 et TNK 304 a révélé des résultats significatifs pour l'industrie pétrolière. Le RSS a démontré sa capacité à améliorer la précision et l'efficacité du forage en permettant un contrôle dynamique. En conclusion, l'étude approfondie du forage horizontal avec l'utilisation du système Rotary Steerable de la trajectoire, ce qui maximise le contact avec les zones productrices tout en réduisant les risques opérationnels.

L'analyse comparative des performances des moteurs RSS utilisés dans ces deux puits a montré des variations importantes, influencées par les conditions géologiques spécifiques et les stratégies opérationnelles mises en œuvre. Le puits TNK 305 a bénéficié d'une utilisation efficace du RSS, atteignant des performances supérieures en termes de taux de pénétration (ROP) et de contrôle de trajectoire, tandis que le puits TNK 304 a rencontré des défis techniques qui ont limité son efficacité globale.

Dans le cadre de l'optimisation du forage, un modèle de prédiction du ROP a été développé en utilisant des techniques d'apprentissage automatique telles que la méthode Random Forest (RF) et les réseaux de neurones artificiels (RNA). Ces techniques permettent de mieux comprendre et anticiper les variations du taux de pénétration en fonction des conditions géologiques et des paramètres opérationnels. L'application de ces modèles a démontré leur efficacité dans l'amélioration des performances du forage, offrant ainsi des perspectives pour optimiser l'utilisation du RSS et maximiser la productivité.

Les recommandations finales visent à optimiser davantage l'intégration et l'utilisation du RSS dans les opérations de forage horizontal, en mettant l'accent sur l'adaptabilité aux variations géologiques et l'amélioration continue des stratégies de gestion de réservoir. Cela permettra non seulement de maximiser le potentiel de récupération des hydrocarbures mais aussi d'assurer une exploitation plus sûre et plus efficace des ressources pétrolières.

En somme, cette étude illustre l'importance croissante du RSS dans l'industrie du forage horizontal, en tant que technologie clé pour répondre aux défis complexes de l'exploration et de la production pétrolière à travers des approches innovantes et orientées vers la performance durable.



---

# **Bibliographies**

---

## **X. Bibliographies :**

- **Mike Smith:** Directional training drilling manual. Edition Anadril technique, 1996.
- <https://theses.hal.science/tel-01134041v2> Thèse de Analyse et validation du comportement directionnel réaliser par Malek BEN HAMIDA.
- **Rodriguez, P.** (2019). Geosteering and its Impact on Horizontal Well Placement. Doctoral Dissertation, Colorado School of Mines.
- **Abderrahmane Mellak.** Tubage et Cimentation, brochure bibliothèque N131187.FHC- Université Boumerdes, 2022
- **Azar, J.J., & Samuel, G.R.** (2007). Drilling Engineering. PennWell Corporation.
- **Chen, Y., & Xu, J. (2022).** Directional Drilling: From Theory to Technology. Gulf Professional Publishing.
- **Xu, H., & Gao, D. (2022).** Recent Advances in Rotary Steerable System Technology for Horizontal Wells." Journal of Petroleum Science and Engineering, 208, 109526.