



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



**Université Amar Telidji- Laghouat**

**FACULTE : TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS**

## **MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : MEDJADI HAMZA**

**DOMAINE : Sciences et Technologies  
FILIERE : Hydrocarbures  
OPTION : Génie gazier**

### **Thème**

**ETUDE DU PROBLEME DE DEVIATION INCONTROLEEE LORS DU  
FORAGE DE LA PHASE 8 ½ DES Puits VERTICAUX FORES DANS  
LA REGION DE RHOUD NOOUSS.**

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
HADJADJE ASMA	MCB	Président
YOUCEFI RIADH	MCB	Examineur
GHALEM Khaled	MAA	Rapporteur

**Année Universitaire : 2022-2023**



# **REMERCIEMENT**

Nous tenons à remercier ALLAH, le tout puissant de nous avoir donné courage et volonté pour accomplir ce modeste travail. Nous tenons à présenter nos vifs remerciements à notre promoteur "GHALEM Khaled" pour leurs patiences, leurs remarques et conseils,

Merci à vous tous.



# DEDICACE

On dédie ce modeste travail à nos très chers parents pour  
leur encouragement  
et soutien et pour leur patience  
A nos frères et sœurs  
A nos familles : MEDJADI , LAGARI, A toute nos amis  
et les amis de la résidence universitaire 2000

.MEDJADI HAMZA.

عنوان المذكرة: دراسة مشكلة الانحراف غير المقيد أثناء حفر المرحلة 8 1/2 من الآبار العمودية المحفورة في منطقة غرد النص.

المؤطر: غالم خالد

الإسم: حمزة

اللقب: مجادي

#### ملخص:

تم إجراء هذه المذكرة في نهاية الدراسة على مستوى منطقة غرد النص ، وذلك لدراسة مشكلة الانحراف وعدم التحكم في الميل وتحديد طريقة الحفر الأنسب لمرحلة 8' 2/1 في منطقة غرد النص . لهذا ، قمنا بعمل وصف لهذه المنطقة من أجل رؤية خصائص التضاريس التي تمت مواجهتها ، وعرض تقديمي للمعدات المختلفة المستخدمة، ثم نظرة عامة على المشكلة ، متبوعًا بتحليل الانحراف والأداء و ربحية المحركات المختلفة للتوصل أخيرًا إلى استنتاجات وتوصيات بشأن استخدام المحركات في هذه المرحلة .

كلمات مفتاحية: : غرد النص -الميل- الانحرافات.

---

**Memory Title:** STUDY OF THE PROBLEM OF UNCONTROLLED DEVIATION DURING DRILLING OF PHASE 8 1/2 OF DRILLED VERTICAL WELLS IN THE RHOUD NOOUSS REGION.

**Name:** MEDJADI

**First name:** HAMZA

**Directed by:** GHALEM Khaled

#### Abstract :

The aim of this thesis is to study the problem of deviation and to determine the most appropriate drilling method for the 8"1/2 phase in the Rhourd Nouss region. To do this, we described the region in order to see the properties of the terrain encountered, presented the different equipment used (pdm,vertitrak), then gave an overview of the problem, followed by an analysis of the deviation, performance and profitability of the different motors, and finally came to conclusions and recommendations on the use of motors in this phase.

**Key words:** Vertitrak, Rhourd Nouss,pdm,

---

#### Résumé :

Ce mémoire de fin d'études est réalisé au niveau de la région de Rhourde Nouss ce travail à étudier le problème de la déviation et à déterminer la méthode de forage la plus appropriée pour la phase 8''1/2 dans la région de Rhourd Nouss. Pour cela, on a fait une description de cette région afin de voir les propriétés des terrains rencontrés, une présentation des différents équipements utilisés (pdm,vertitrak), puis un aperçu sur le problème, suivis d'une analyse de déviation, des performances, et de rentabilité des différents moteurs pour aboutir enfin à des conclusions et à des recommandations sur l'utilisation des moteurs dans cette phase.

**Mots clés :** Inclinaison, Veretitrak, Rhourd Nouss.pdm.

## Sommaire:

.....Introduction générale.....	1
<b>.Chapitre I ( Présentation de la région de Rhourd Nouss).....</b>	<b>2</b>
<i>I. Introduction.....</i>	<i>3</i>
<i>I.1. Structural.....</i>	<i>4</i>
<i>I.2. Géologie.....</i>	<i>5</i>
<i>I.3. Aspect pétrolier.....</i>	<i>5</i>
<i>I.4. Historique de l'exploitation.....</i>	<i>5</i>
<i>I.5. Généralités sur le puits RN117.....</i>	<i>6</i>
<i>I.5.1. Les coordonnées du puits.....</i>	<i>6</i>
<i>I.5.2. But du Sondage.....</i>	<i>6</i>
<i>I.5.3. L'objectif du forage.....</i>	<i>6</i>
<i>I.5.4. Prévisions stratigraphiques RN- 117.....</i>	<i>6</i>
<i>I.5.5. Phase 8 ½’’ Rhourde Nouss.....</i>	<i>9</i>
<i>I.5.6. Cote d'arrêt.....</i>	<i>9</i>
<i>I.5.7. Pression de gisement.....</i>	<i>9</i>
<i>I.6. Problème de la région de RNS.....</i>	<i>10</i>
Chapitre II.(Problèmes De Déviations).....	11
<b>II. Introduction.....</b>	<b>12</b>
<i>II.1. Explications théoriques.....</i>	<i>14</i>
<i>II.1.1. Théorie du moment aux masse-tiges.....</i>	<i>14</i>
<i>II.1.2. Théorie du WHIPSTOCK.....</i>	<i>14</i>
<i>II.1.3. Théorie des différences de vitesse d'avancement.....</i>	<i>14</i>
<i>II.2. Le Problème de déviation.....</i>	<i>15</i>
<i>II.3. Les causes de la déviation.....</i>	<i>16</i>
<i>II.3.1. Problème de formation.....</i>	<i>16</i>
<i>a) Déformations cassantes.....</i>	<i>16</i>
<i>a.1) Diaclases, fissures et fentes de tension.....</i>	<i>16</i>
<i>a.2) Les Failles.....</i>	<i>16</i>
<i>b) Déformation souples.....</i>	<i>17</i>
Chapitre III.(Equipements Utilisés).....	24
<b>III Généralité sur le PDM (Positive Dis placement Motors).....</b>	<b>26</b>
<i>III.1.Composition d'un PDM.....</i>	<i>25</i>
<i>III.1.1.Valve à pression différentielle.....</i>	<i>25</i>

<i>III.1.2.Etage de moteur:</i> .....	26
<i>III.1.3.Joint de cardan:</i> .....	27
<i>III.1.4.Etage des roulements (bearing section):</i> .....	28
<i>III.2.Principe de fonctionnement</i> .....	29
<i>III.3.Considérations opérationnelles</i> .....	30
<i>III.3.1.Débit et Perte de charge</i> .....	30
<i>III.3.2.Limitations d'utilisation et les problèmes pratiques</i> .....	30
<i>III.4.Caractéristiques d'un PDM</i> .....	32
<i>III.4.1.Le nombre de lobes</i> .....	32
<i>III.4.2.L'excentricité et le diamètre du rotor</i> .....	33
<i>III.4.3.Nombre d'étages</i> .....	33
<i>III.5.Les MWD (Measurement While Drilling)</i> .....	33
<i>III.5.1.Composition d'un MWD</i> .....	33
a) Le(s) étage(s) de mesures .....	33
b) L'étage de télémétrie .....	34
c) L'étage de puissance.....	35
<i>Vertitrak (Vertical Drilling System)</i> .....	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
<i>III.6.Introduction</i> .....	36
<i>III.6.1.Description</i> .....	37
<i>III.7.Principe de fonctionnement du VertiTrack</i> .....	40
<i>III.8.Mode opératoire</i> .....	40
<i>III.8.1.Réglage du mode à partir de la surface</i> .....	41
<i>III.9.Forage avec la BHA conventionnelle (Forage Rotary)</i> .....	41
<i>III.9.1.Types des BHA</i> .....	43
a) Garnitures lisses (slick assembly).....	43
b) Garnitures pour chute de l'inclinaison ou pendulaires.....	43
c) Garniture de maintien de l'inclinaison (Packed-hole assembly).....	44
<i>III.10.Procédure de forage de la Phase 8<sup>1/2</sup></i> .....	45
<i>III.10.1.BHA utilisé</i> .....	45
<i>III.10.2.Paramètres de forage</i> .....	46
<i>III.10.3.Caractéristique de la boue</i> .....	46
<b>Chapitre IV(Etude Comparative)</b> .....	49
<i>IV.Présentation de l'échantillon des puits étudiés</i> .....	50
<i>IV.1.Analyse des données de l'échantillon</i> .....	52
<i>IV.1.1.Analyse de la déviation</i> .....	52
a) Puits forés à l'aide de PDM.....	52
b) Puits forés par le VertiTrak .....	58

<i>IV.1.1. Analyse de deviation</i> .....	52
<i>IV.1.2. Analyse des performances</i> .....	66
<i>IV.1.3. Analyse économique</i> .....	68
..... <b>Conclusion générale</b> .....	72
<b>Références</b> .....	73

## Liste de Figure

<i>Fig. I.1. Situation géographique de la région de Rhourde Nous</i>	3
<i>Fig. I.2. Localisation structures de Rhourde Nous</i>	4
<i>Fig. I.3. Fiche stratigraphique de puits RN- 117</i>	8
<i>Fig. I.4. Prévisions stratigraphiques RN- 117</i>	9
<i>Fig. II.1. Objectif d'un forage vertical - Contrôle de l'inclinaison</i>	13
<i>Fig. II.2. Schémas la faille</i>	16
<i>Fig. II.4. Les alternances de formation tendre et dure</i>	17
<i>Fig. II.3. Contraintes tectoniques – Réactions et évènements</i>	18
<i>Fig. II.5. Fig. Désignation de BHA</i>	19
<i>Fig. II.6. Coincement de la garniture</i>	21
<i>Fig. II.7. Formation de Dog leg</i>	22
<i>Fig. III.1. Composition générale d'un PDM</i>	26
<i>Fig. III.2. Valve à pression différentielle (Dump Sub)</i>	27
<i>Fig. III.3. Composition d'un Etage moteur (Section motrice)</i>	28
<i>Fig. III.4. Cardan de transmission (Transmission Assembly)</i>	29
<i>Fig. III.5. Composition d'un Etage de roulement (bearing section)</i>	30
<i>Fig. IV.6. Configurations des moteurs de fond</i>	33
<i>Fig. III.7. Composition du VertiTrak</i>	38
<i>Fig. III.8. Power Section</i>	39
<i>Fig. III.9. Différence entre ancien section motrice et X - treme Power Section</i>	40
<i>Fig. III.10. Performance de section motrice de VertiTrak</i>	40
<i>Fig. III.11. Contrôle sub et l'unité de pulsation</i>	41
<i>Fig. III.12. Garniture de drop off</i>	46
<i>Fig. III.13. Garniture de maintien de l'inclinaison (Packed-hole assembly)</i>	47
<i>Fig. IV.1. L'inclinaison en fonction de la profondeur</i>	53
<i>Fig. IV.2. L'inclinaison en fonction de la profondeur</i>	54
<i>Fig. IV.3. L'inclinaison en fonction de la profondeur</i>	55
<i>Fig. IV.4. L'inclinaison en fonction de la profondeur</i>	56
<i>Fig. IV.5. L'inclinaison en fonction de la profondeur</i>	57
<i>Fig. IV.6. L'inclinaison en fonction de la profondeur</i>	58
<i>Fig. IV.7. L'inclinaison en fonction de la profondeur</i>	59
<i>Fig. IV.8. L'inclinaison en fonction de la profondeur avant sidetrack (RN 116 a) et après sidetrack (RN 116 b)</i>	61
<i>Fig. IV.9. L'inclinaison en fonction de la profondeur</i>	62
<i>Fig. IV.10. L'inclinaison moyenne pour chaque puits</i>	63
<i>Fig. IV.11. L'inclinaison moyenne pour les 2 types de moteur</i>	64

<i>Fig. IV.12. L'inclinaison maximale pour chaque puits.....</i>	<i>64</i>
<i>Fig. IV.13. L'inclinaison moyenne réalisée par le PDM dans chaque formation. ....</i>	<i>65</i>
<i>Fig. IV.14. L'inclinaison moyenne réalisée par le VertiTrak dans chaque formation. ....</i>	<i>65</i>
<i>Fig. IV.15. L'avancement réalisé dans chaque puits.....</i>	<i>67</i>
<i>Fig. IV.16. L'avancement réalisé par chaque type de moteur.....</i>	<i>67</i>
<i>Fig. IV.17. Le prix de mètre foré dans chaque puits.....</i>	<i>71</i>
<i>Fig. IV.18. Prix de mètre foré pour chaque type de moteur. ....</i>	<i>71</i>

## **Liste de Tableau**

<b>Tableau 01.Comparaison entre les configurations des moteurs de fond .....</b>	<b>32</b>
<b>Tableau 02.BHA utilisé .....</b>	<b>48</b>
<b>Tableau 03. Les paramètres de forage. ....</b>	<b>48</b>
<b>Tableau 04.Les caractéristiques de la boue. ....</b>	<b>48</b>
<b>Tableau 05.Présentation de l'échantillon des puits étudié. ....</b>	<b>51</b>
<b>Tableau 06.L'inclinaison moyenne et maximale de chaque puits.....</b>	<b>63</b>
<b>Tableau 07.Le ROP réalisé dans chaque puits.....</b>	<b>66</b>
<b>Tableau 08.Le prix de facturation de matériel .....</b>	<b>69</b>
<b>Tableau 09.Analyse économique des puits forés par le VertiTrak. ....</b>	<b>70</b>
<b>Tableau 10.Analyse économique des puits forés par le PDM conventionnelle.....</b>	<b>70</b>

## **NOMECLATURE:**

**RN:**Rhourde Nouss.

**RNSE :** Rhourde Nouss Sud-Est.

**PDM:**Positive Displacement Motors.

**VRT:**Vertitrak-(Vertical Drilling System).

**MWD:**Measurment While Drilling.

**BHA:** Bottom hole assembly.

**ROP :** Rate of Penetration.

**STAB :** Stabilisateur.

**WOB :** Weight on Bit.

**DC:** Drill Collar.

## **Introduction générale :**

Les hydrocarbures sont la source d'énergie la plus utilisée dans le monde, et jusqu'à maintenant le seul moyen et la seule méthode pour extraire et exploiter ces sources d'énergie, c'est le forage. Ce dernier consiste à toutes les opérations successives qui nous permettent d'atteindre le réservoir dans les meilleures conditions techniques et économiques avec un prix de revient le plus bas possible. Pour cela plusieurs techniques, procédures et méthodes ont été élaborées à travers le temps afin de résoudre des nombreux problèmes liés aux forages et à la récupération des hydrocarbures.

La finalité d'un forage est d'atteindre la cible, qui est le réservoir, avec un prix de revient minimum, sans endommagement ni compromettre son exploitation (production, injection). Cependant, plusieurs techniques ainsi que plusieurs équipements ont été développés selon les besoins et les difficultés rencontrées durant le forage. Toute perte de temps augmente le coût de forage. Celle-ci est générée la plupart du temps par différentes causes principales comme la nature des terrains traversés et l'état des équipements utilisés.

Parmi les problèmes majeurs qui constituent un grand obstacle pour la poursuite du forage dans le champ de Rhourde Nouss, c'est celui des déviations dans la phase 8<sup>1/2</sup> conduit à une perte en temps et en argent considérable. Par ailleurs, lorsque ces difficultés sont constatées, nécessitant l'établissement des programmes spécifiques pour la résolution de ses derniers.

A cet effet par cette étude nous allons concentrer notre contribution sur l'analyse des déviations dans la phase 8<sup>1/2</sup>, en essayant de comprendre et expliquer les causes, les conséquences, ainsi que les solutions adaptées jusqu'au là par les ingénieurs pétroliers pour surmonter ce problème tout en espérant avoir porté un plus pour la résolution.

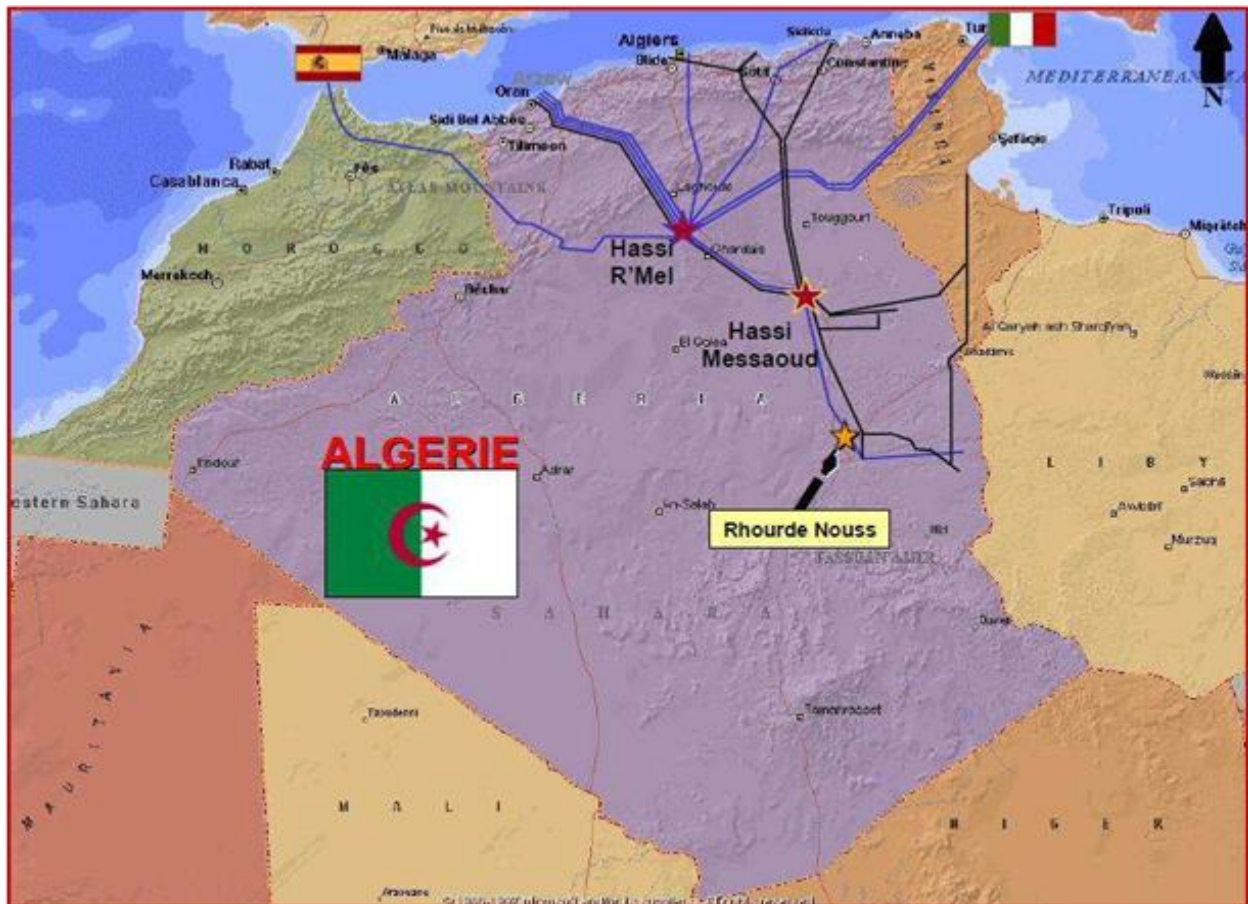
# Chapitre I

## Présentation de la Région

### De Rhourd Nouss

## I. Introduction :

La région de Rhourde Nouss (RN) est située à 230 km au sud-est du champ de Hassi Messaoud (*Fig. I.1*). Le premier forage a été réalisé en 1961 . Une série de réservoirs contenant du gaz à condensat a été rencontrée à partir de la cote 2 685 mètres.



*Fig. I.1. Situation géographique de la région de Rhourde Nouss*

Cette région est caractérisée par la présence de treize accumulations (*Fig. I.1*) comportant jusqu'à une dizaine de réservoirs. Ces réservoirs peuvent être divisés en trois principaux groupes : le Trias argilo-gréseux supérieur (TAGS), le Trias intermédiaire–Trias argilo-gréseux inférieur–Silurien (l'infra-TAGS) L'Ordovicien. Le gaz à condensat est le fluide le plus important ; il fait de cette zone la deuxième région gazière d'Algérie. L'huile est représentée principalement sous forme d'anneaux, avec des épaisseurs variant de quelques mètres à quelques dizaines de mètres.



## **I.2. Géologie :**

La région de Rhourde Nouss se situe en bordure sud du bassin triasique et culmine sur le horst Rhourde Nouss–Essaoui Mellane, qui est une extension du môle d’Amguid vers l’est. La limite de ce dernier est la faille de Ramade, qui a un rejet de 2 000 mètres. Rhourde Nouss se situe au nord-ouest du bassin d’Illizi, à l’ouest du bassin de Berkine et au sud-est du sillon de Marfag.

## **I.3. Aspect pétrolier:**

L’exploration sur la structure de Hamra a permis de découvrir la présence de gaz au niveau de l’Ordovicien, Quartzites Hamra, (puits Hamra2 en 1956). Le forage profond du puits RN- 101 sur la structure de Rhourde Nouss a confirmé l’existence de gaz riche en condensat au niveau de cette formation. Juste après, une trentaine des puits sont réalisés sur d’autres structures dont certains ont été positifs et ont confirmé l’importance de ce réservoir.

## **I.4. Historique de l’exploitation:**

Les travaux de recherche sur cette région ont débuté en 1956 par la compagnie ELPASO France Afrique avec l’implantation de HR- qui a été foré sur la structure de Hamra. Au cours de ce forage, un seul test a été effectué dans le Barrémo–Néocomien. La poursuite des travaux sur cette même structure a permis en 1958 de forer HR-2. Ce dernier a donné du gaz dans les réservoirs du Trias Gréseux et l’Ordovicien. Dès lors, les travaux ont été poursuivis vers l’Ouest avec la mise en évidence en 1959 de la structure de Ramade Nord qui a fourni des résultats négatifs. Par la suite, les recherches ont été orientées vers le Nord-Est, où la structure de Rhourde Nouss a été mise en évidence.

En 1962, le sondage RN-117 de 1200m de profondeur a révélé du gaz dans le trias et le Gothlandien. A partir de cette découverte, plusieurs autres puits furent forés. Donc de nombreuses accumulations d’hydrocarbures ont été reconnues par SONATRACH et les sociétés opératrices le long des 30 dernières années, avec environ 8500Km de sismique postérieur à 1970, et 97 forages au total, dont 79 d’exploration et 118 de développement sur ces puits, 42 tiennent donc les objectifs du Cambro-ordovicien.

## I.5. Généralités sur le puits RN117 :

### I.5.1. Les coordonnées du puits :

#### a) Coordonnées Lambert UTM :

X(m)	Y(m)	ZTABLE	ZSOL
28 ,789	3286068.99	257,26	267

#### b) Coordonnées Géographiques:

X	Y
06° 44' 4.68" E	29° 4 ' 29.2 " N

### I.5.2. But du Sondage:

RN- 117 est un puits de développement Vertical dans les réservoirs Ordoviciens de la région de Rhourde Nouss Centre, il aura les Grès d'Ouargla et les Quartzites de Hamra comme objectif principal. Il permettra l'optimisation de la production de gaz à condensât dans le cadre du développement du Projet Intégré Gassi Touil.

### I.5.3. L'objectif du forage :

L'objectif du forage de ce puits est d'atteindre la profondeur totale après la pénétration dans les grés d'El Atchane

### I.5.4. Prévisions stratigraphiques RN- 117 :

Ces prévisions ont été établies pour un Z table de 267 m

Mio-Pliocene.....	De 159 m à 314 m
Sénonien Carbonate .....	De 34 m à 469 m
Sénonien Lagunaire.....	De 469 m à 645 m
Sénonien Salifère .....	De 645 m à 66 m
Turonien.....	De 661 m à 730 m
Cénomanién .....	de 730 m à 792 m
Albien .....	De 792 m à 897 m
Aptien .....	érodé
Barrémien.....	De 897 m à 1015 m

Néocomien .....	De 1015 m à 1209 m
Malm.....	De 1209 m à 1347 m
Dogger Argileux .....	De 1347 m à 1518 m
Dogger Lagunaire.....	érodé
Lias Argilo Dolomitique .....	De 1518 m à 1678 m
Niveau H.....	De 1678 m à 1694 m
LS1.....	De 1694 m à 1716 m
Niveau B .....	De 1716 m à 1739 m
Lias Salifère .....	De 1739 m à 1941 m
Lias Argileux .....	De 1941 m à 1980 m
T.A.G.S.....	De 1980 m à 2101 m
Trias Intermédiaire II .....	De 2101 m à 2167 m
Trias Argileux Moyen .....	De 2167 m à 2200 m
Trias Intermédiaire I.....	De 2200 m à 2270 m
TA.G.I.....	De 2270 m à 2350 m
Silurien B2.....	érodé
Silurien B .....	De 2310 m à 1239 m
Silurien A2.....	De 2239 m à 2489 m
Silurien A.....	De 2489 m à 2507 m
Silurien M2 .....	De 2507 m à 2587 m
Silurien M .....	De 2587 m à 2675 m
Silurien Argileux.....	De 226 5 m à 2902 m
Dalle de M'kratta.....	De 2902 m à 2908 m
Argiles micro-conglomératiques .....	De 2908 m à 2998 m
Grès d'Oued Saret.....	De 2998 m à 3101 m
Argiles d'Azzel.....	De 3110 m à 3231 m
Grès de Ouargla .....	De 3231 m à 3321 m
Quartzites de Hamra.....	De 3231 m à 3541 m
Grès d'El Atchane.....	De 3541 m à 3591 m
Fin Sondage vers 359 m	

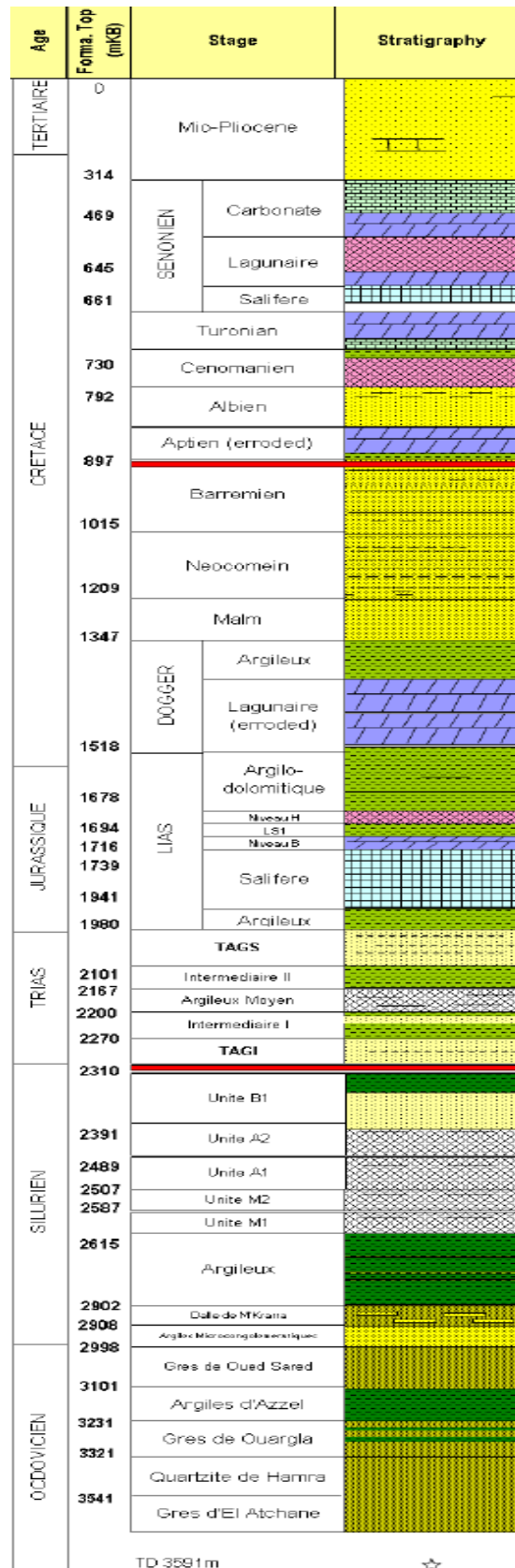


Fig. I.3. Fiche stratigraphique de puits RN- 117.

### I.5.5.Phase 8 ½’’ Rhourde Nous:

La phase 8 ½ des puits de Rhourde Nous s’étend du Trias à la partie supérieure de l’Ordovicien en passant par le Silurien. La phase 8 ½ commence au pied du Lias Argileux jusqu'au toit des Grès de Ouargla. La longueur de la phase varie en fonction des épaisseurs des formations et de la cote du sabot du tubage 7’’.

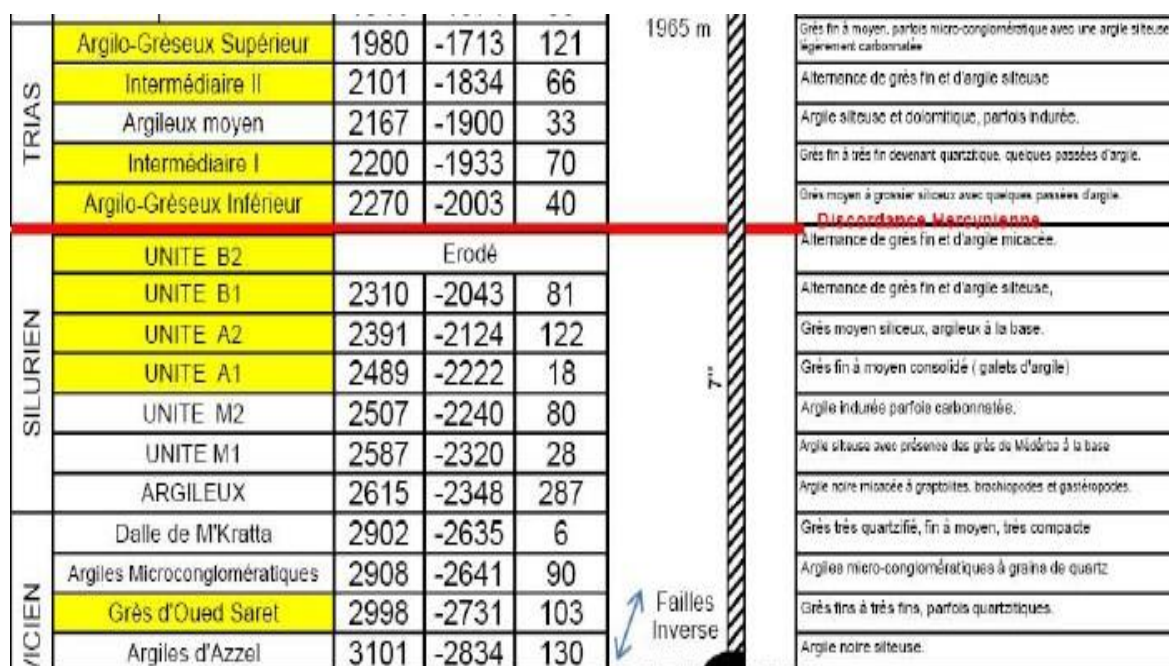


Fig. I.4. Prévisions stratigraphiques RN- 117

### I.5.6.Cote d'arrêt:

Le forage RN- 117 sera arrêté vers 359 m TVD (-3324 m TVDSS) soit après pénétration des Grès D'El Athané d'une cinquantaine de mètres.

### I.5.7.Pression de gisement :

T.A.G.S = 200 Kg/cm<sup>2</sup> a - 2445m

Trias Intermédiaire II : Pression atteignant les 300 Kg/cm<sup>2</sup>, s'il se présente en lentille gréseuse isolée (à traverser avec la plus grande prudence) Infra-TAGS

(TAGI et Silurien) = 200 Kg/cm<sup>2</sup> a - 2500 m

Quartzites de Hamra = 420 Kg/cm<sup>2</sup> a - 3400 m.

## I.6. Problème de la région de RNS :

En se référant sur les forages des puits réalisés dans le cadre de l'exploration et développement des gisements de RNS, on a constaté certaines difficultés des problèmes rencontrés lors de la réalisation de plusieurs forages au niveau des différentes structures.

Parmi ces difficultés on site :

- Instabilité des parois des puits lors des phases 26" et 16" due au caractère sableux des formations.
- Possibilités de pertes partielles ou totales dans les niveaux carbonatés des mio-pliocènes, dans les calcaires dolomitiques de l'éocène, l'apparition des pertes dans le mio-pliocène peut être due à l'origine d'éboulements des sables de surface pouvant aller jusqu'à la déstabilisation de l'appareil de forage.
- Venue d'eau douce ne pouvant être liée à la densité de la boue utilisée dans la phase 16", qu'à un mauvais remplissage en manœuvre ou un effet de pistonage.
- Coincement dans le Néocomien, principalement au niveau des intercalations de formation.
- Traction rencontrée dans les lias salifères dans la phase 12"<sup>1/4</sup>.
- Faible avancement de forage notamment lors des phases 8"<sup>1/2</sup> et 6" se traduisant par le caractère compact et dureté de formation.
- Perte de boue (partielle ou totale) lors des phases 8"<sup>1/2</sup> et 6" expliquant l'existence de fissures et fractures ayant affectés la région.
- TIAGS est un réservoir à gaz dans la phase 8"<sup>1/2</sup>. Risque de déviation des puits verticaux dont la tendance varie entre 0° et 5° particulièrement pour les de phase 8"<sup>1/2</sup> et 6".

# Chapitre II

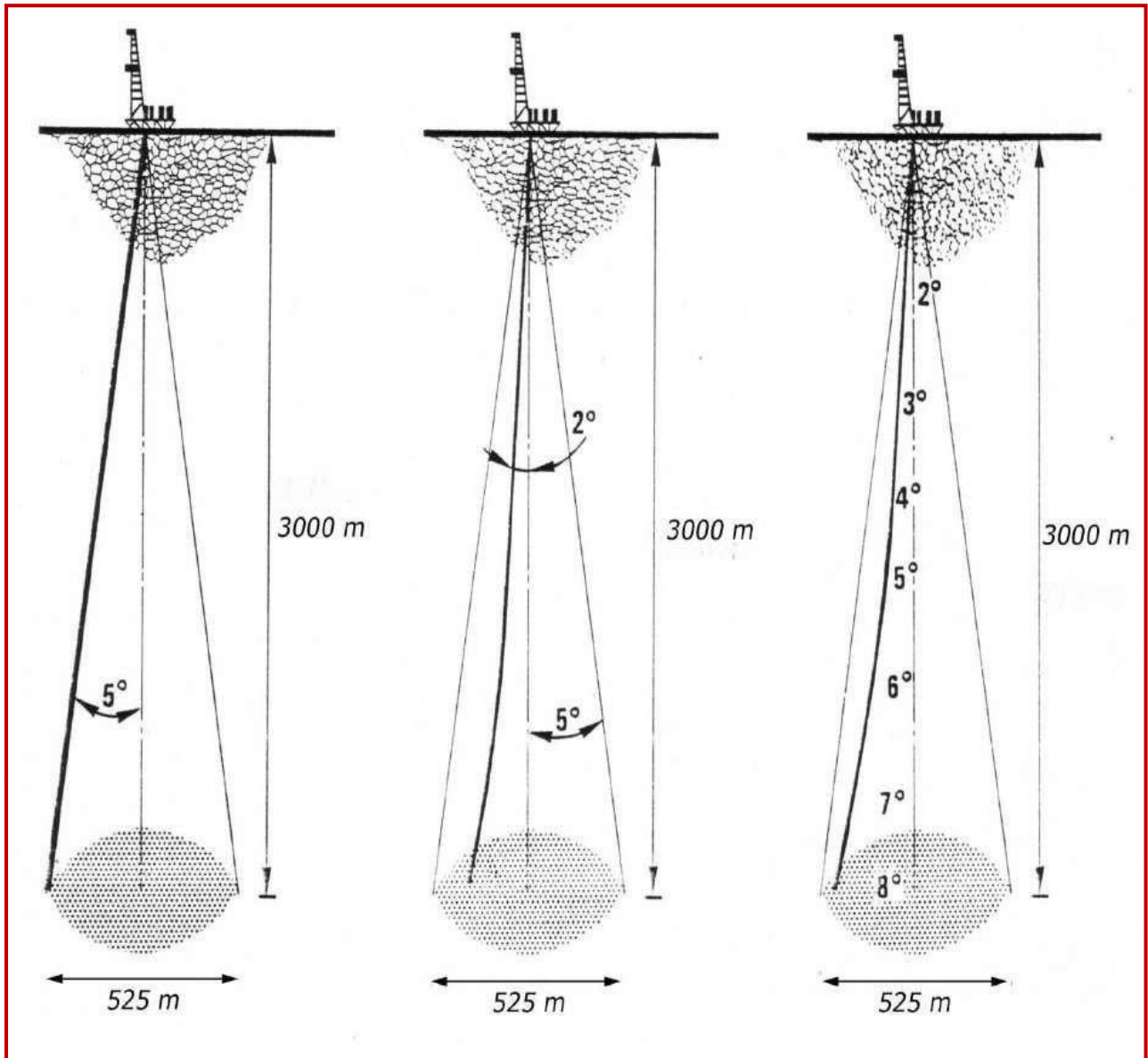
## Problèmes de déviations

## II. Introduction :

L'objectif d'un forage vertical est d'atteindre une cible donnée avec une certaine tolérance. Pour rester dans des limites admissibles (distance maximum par rapport à la verticale à respecter), il est nécessaire de contrôler et parfois de corriger l'inclinaison. Les programmes de forage imposent souvent une limite maximum d'inclinaison. Il est à noter cependant que l'écartement par rapport à la cible dépend non seulement de l'inclinaison, mais aussi du processus de montée en angle.

Si le programme prévoit un puits à 3 000 m avec une déviation maximum de 5 degrés par exemple, la déviation maximum peut être obtenue dès la surface et être conservée jusqu'à la profondeur finale auquel cas l'écartement par rapport à la verticale sera maximum (260 m dans notre exemple). Plus fréquemment le trou restera dans la limite de 2 degrés pour une partie puis s'éloignera progressivement de la verticale. Si l'on s'impose de rester dans la limite maximum de 5° en limitant le poids sur l'outil et donc en pénalisant l'avancement, on atteindra la profondeur finale à une distance bien inférieure, par ailleurs, il est fort possible de rester à l'intérieur de la cible tout en atteignant des valeurs de déviation bien supérieures aux 5 degrés imposés. Certaines spécifications ont d'ailleurs été écrites permettant une augmentation de l'angle avec la profondeur, tout en se maintenant dans une cible prévue.

Limiter et contrôler la valeur maximum de déviation constitue cependant la manière la plus simple et la plus courante de garantir un éloignement minimum par rapport à l'objectif. Dans les cas délicats cependant, on procédera à un multishot pour estimer de façon plus précise cet éloignement.



*Fig. II.1. Objectif d'un forage vertical - Contrôle de l'inclinaison*

- Dans le cas **A** la déviation est à  $5^\circ$  tout au long du forage.
- Dans le cas **B** la déviation est maintenue dans un minimum sur une partie du puits pour terminer à  $5^\circ$  en fin de forage.
- Dans le cas **C** la déviation est maîtrisée au début du puits, et dérive par la suite à  $8^\circ$  en fin de forage.

## **II.1. Explications théoriques :**

### **II.1.1. Théorie du moment aux masse-tiges :**

Lorsqu'un outil passe d'une formation tendre à une formation dure, le poids sur l'outil n'est pas réparti de façon uniforme sur le fond du trou. Du fait que le plus de poids est porté par la roche la plus dure, surtout lorsqu'elle est également la plus compressible (cas du sel et de l'anhydrite), il apparaît un moment à l'outil.

En l'absence de stabilisateur sur l'outil, le moment de flexion est transmis aux masse-tiges situées directement au-dessus de l'outil. L'angle d'attaque à l'outil, ou tilt angle (angle que fait l'axe de l'outil avec l'axe du puits), est alors augmenté du fait du jeu entre les masse-tiges et le trou [1].

### **II.1.2. Théorie du WHIPSTOCK :**

Se basant sur les observations expérimentales de HUGHES et sur les hypothèses de plusieurs chercheurs américains, cette théorie est très ancrée aux Etats Unis. Des escaliers miniatures sont créés par effet de bord entre les alternances (subsistance de parties de roches non détruites). L'outil est ainsi guidé par ces escaliers et tend à remonter la pente et à forer perpendiculairement aux couches [1].

### **II.1.3. Théorie des différences de vitesse d'avancement :**

L'outil forant moins vite dans la formation la plus dure, il a tendance à basculer dessus jusqu'à avoir éliminé toute la formation tendre. Il se trouve ainsi ramené à la perpendiculaire de la formation dure. Au passage d'une formation tendre à une formation dure cette théorie prévoit que l'outil remonte la pente de la frontière entre les deux formations [1]

## II.2. Le Problème de déviation :

Une expérience pour visualiser le phénomène du forage vertical en présence d'alternances de terrain a été menée par la compagnie HUGHES TOOL. Des plaques de verre inclinées par rapport à l'horizontale représentaient ces alternances. Dans tous les cas étudiés (pente des plaques inférieure à  $45^\circ$ ), l'outil avait tendance à forer perpendiculairement aux plaques, provoquant une déviation du trou foré par rapport à la verticale. Deux autres auteurs (T. HORIBE & M. USHIDA) ont mené au Japon des expériences analogues qui ont montré que lors du passage d'une formation tendre à une formation dure, l'inclinaison de la frontière entre les deux formations et l'usure de l'outil jouaient un rôle important dans l'apparition de phénomènes de déviation.

D'après ces expériences, la déviation augmente si :

- l'érosion latérale, ou élargissement du trou en cours de forage, diminue de la formation supérieure à la formation inférieure,
- le rapport entre la forabilité des deux formations  $R = ROP_{sup}/ROP_{inf}$  augmente. En utilisant sa cellule de forage et du gneiss prélevé sur le terrain, TERRA TEK a également observé que tant que l'inclinaison de la frontière entre formations dures et tendres restait inférieure à  $45^\circ$ , l'outil avait tendance à remonter la pente pour tendre à forer perpendiculairement à cette frontière [1]

## II.3. Les causes de la déviation:

### II.3.1. Problème de formation:

#### a) *Déformations cassantes:*

Elles se manifestent par des surfaces généralement perpendiculaires ou fortement obliques aux surfaces de stratification . Elles se regroupent en deux grandes catégories: les diaclases et les failles.

#### a.1) *Diaclases, fissures et fentes de tension:*

Le déplacement des blocs de part et d'autre de la fracture est généralement de faible amplitude. Lorsqu'il y a écartement des blocs, il se produit souvent un remplissage des cristaux formant un filon.

#### a.2) *Les Failles :*

Une faille est une fracture accompagnée du déplacement relatif des différents compartiments. Le plan de faille est la surface plus ou moins ondulée qui sépare les deux compartiments.

Il est souvent marqué par des stries et des dépôts de cristaux de calcite ou de quartz orientés dans le sens du déplacement.

La valeur du déplacement entre deux points homologues de part et d'autre est le rejet. Le dénivelé entre les deux compartiments est le rejet vertical.

Une faille est dite normale ou directe lorsque la surface de faille a sa pente en direction du compartiment abaissé. Dans le cas contraire, elle est dite inverse

Une faille normale résulte d'une distension, une faille inverse d'une compression.

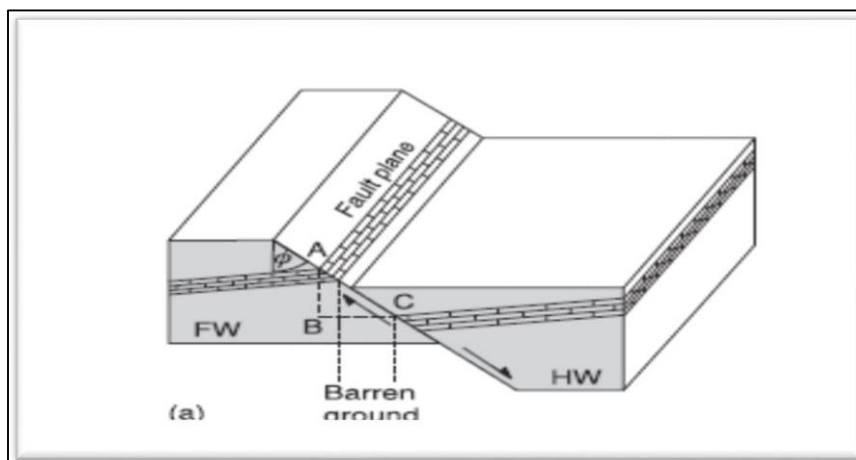


Fig. II.2. Schémas la faille

### *b) Déformation souples :*

#### *b.1) Les plis :*

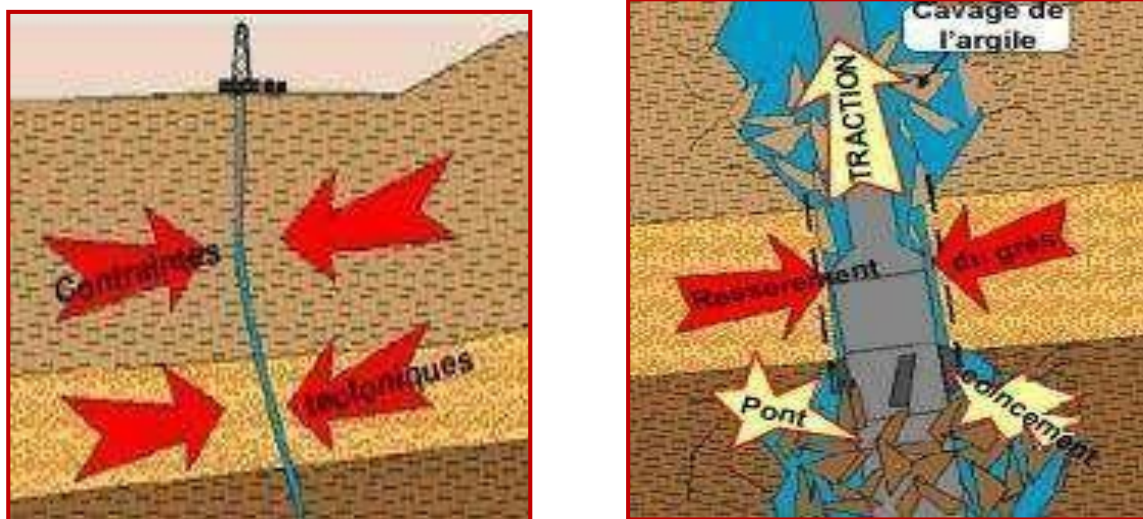
Les terrains peuvent réagir aux efforts tectoniques de façon plastique en formant des plis. Le pli comporte une forme convexe vers le haut, l'anticlinal, et une forme concave vers le haut le synclinal. Un anticlinal ou un synclinal comportent un axe. Les points hauts sur l'axe de l'anticlinal sont appelés les culminations, les points bas les ensembles.

#### *b.2) Pendage des couches :*

Le pendage de la formation traversée affecte fortement la direction du forage. Le phénomène varie selon la valeur du pendage. Il a été observé que le pendage est inférieur à 45 degrés, le puits aura tendance à "monter" pour venir perpendiculaire au pendage, Si le pendage est supérieur à 45 degrés : le puits aura tendance à "suivre" le pendage. Le contrôle de ce phénomène est difficile et il est préférable de l'utiliser plutôt que de le combattre.

#### *b.3) Contraintes due a la formation (mécaniques, tectoniques):*

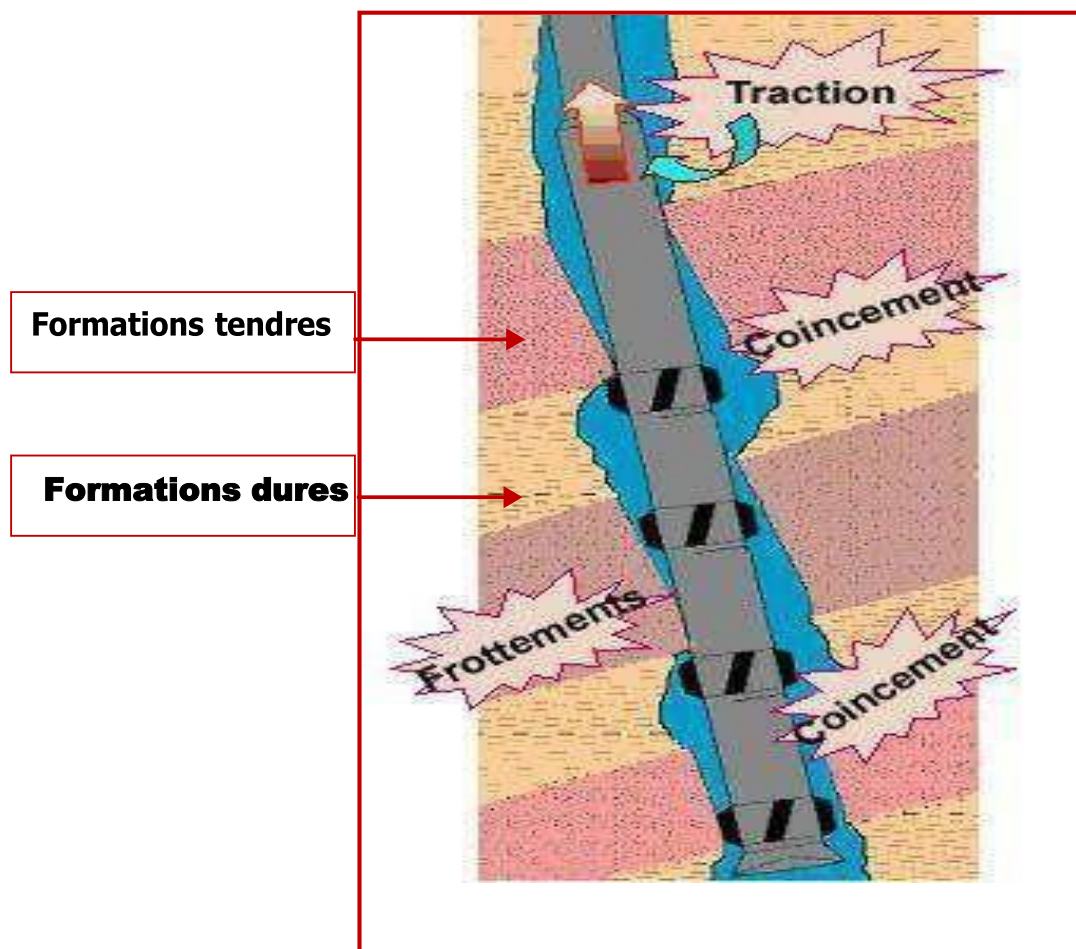
Se sont des forces latérales naturellement présentes dans les formations qu'elles engendrent l'outil de forage a dévie et la Réalisation d'un profil de puits elliptique [1].



*Fig. II.3. Contraintes tectoniques – Réactions et évènements*

**b.4) Les alternances de formation tendre et dure :**

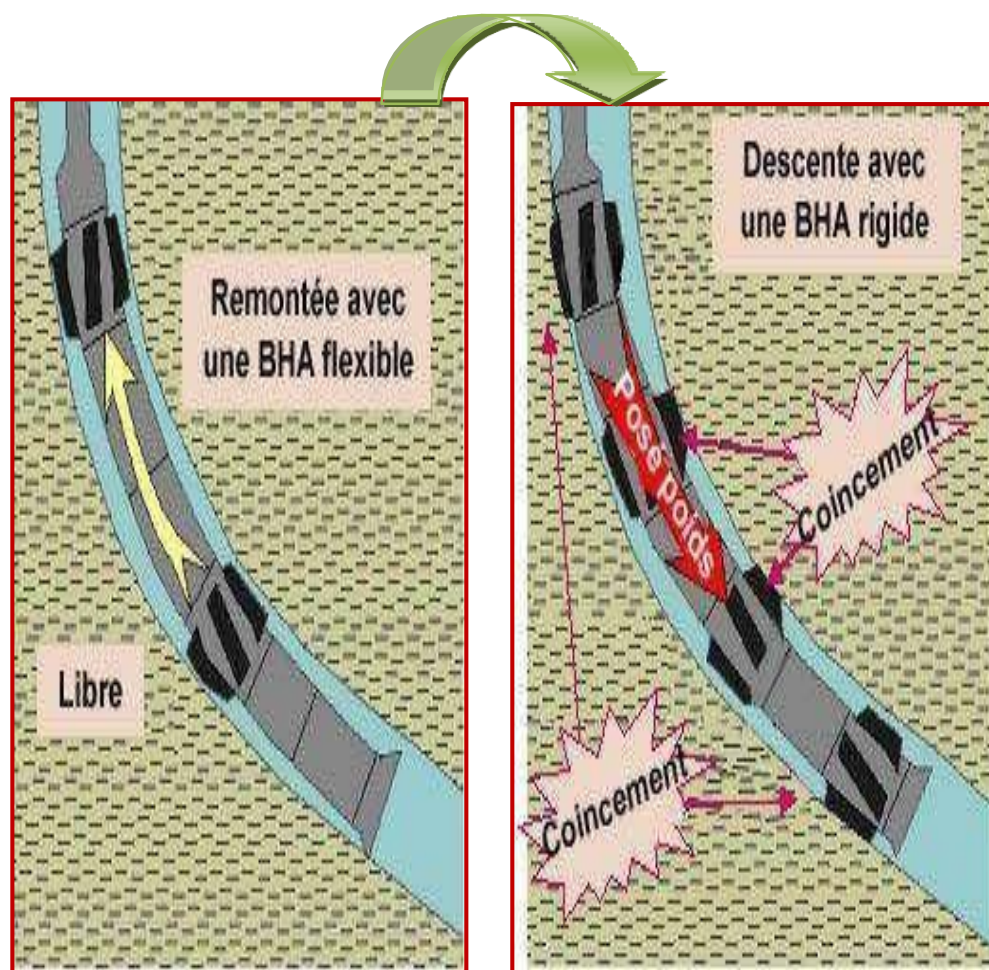
Les alternances de formations tendres et dures peuvent provoquer un décalage de l'axe du puits, résultant en un diamètre "apparent" inférieur au diamètre de forage. Les formations tendres posent moins de résistance à l'avancement de l'outil, et en raison de leurs instabilités le forage de ces formations se fait d'une manière très facile mais aléatoire. Les formations dures, qui possèdent une résistance plus élevée, la forabilité devient plus difficile, ce qui entraînera une déviation incontrôlée de l'outil sur sa trajectoire destinée [1].



*Fig. II.4. Les alternances de formation tendre et dure*

**b.5) Désignation du BHA :**

Les écarts de trajectoire en puits vertical, peuvent être provoqués involontairement par une garniture mal choisie, avec des paramètres de forage non adaptés et par des anomalies du terrain foré. Le pendage par exemple, ceci entraîne une variation d'inclinaison et/ou d'azimut. Si ce coude ou "dog leg" est assez important, il peut provoquer de très sérieuses difficultés au passage de l'outil et des stabilisateurs, notamment si cela fait suite à un changement de BHA.



*Fig. II.5. Désignation de BHA*

***b.6) Le type de l'outil :***

Le type de l'outil de forage utilisé affecte grandement le comportement d'un puits en inclinaison et surtout en azimut. Il est communément admis et observé que:

- les outils tricônes ont tendance à "tourner vers la droite" (augmentation de l'azimut).
- les outils PDC ont plutôt tendance à forer droit (azimut constant) ou à tourner légèrement vers la gauche (diminution de l'azimut).

Le programme de forage doit impérativement tenir compte du comportement prévisible des outils, prévoir ceux-ci en conséquence et adapter les paramètres initiaux du puits (en particulier la "garde").

L'expérience locale est évidemment prépondérante dans les choix ci-dessus.

Les mauvaises surprises (comportement inhabituel ou même inverse) ne sont pas exclues.

***b.7) Le poids sur l'outil :***

De fait que la garniture de forage conventionnel peut se déformer et créer des points d'appuis contre les parois du puits, desquels résulteront un comportement parfois non souhaité.

Le poids sur l'outil de forage et en particulier un poids excessif affecte le comportement de la garniture de forage en modifiant sa "déformée". Un poids excessif peut entraîner un comportement inverse du comportement prévu.

## II.4. Les conséquences de deviation:

La déviation correspondant à une situation d'exception à la quelle engendre plusieurs problèmes :

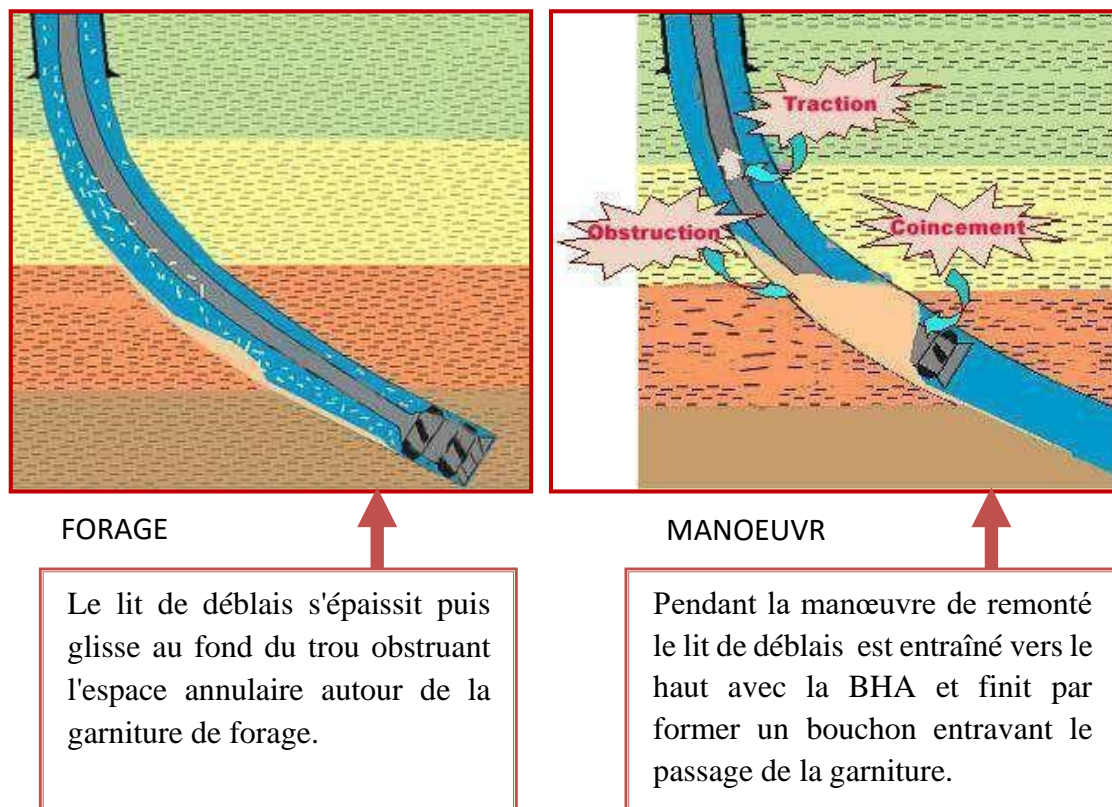
### a) *Cible non rencontre:*

Des cibles géologiques ne peuvent être rencontrées si le degré de déviation est haut.

### b) *Coincement:*

Le coincement est un obstacle qui impose un arrêt de forage dont la durée est difficilement prévisible. De toute manière c'est un problème grave, les opérations qu'il est nécessaire d'entreprendre entraînent des dépenses dont le seuil de rentabilité est souvent très difficile à déterminer et des risques pouvant aller jusqu'à la perte du puits [1].

Le silurien argileux est bien connu comme une formation instable et failles, toute en forant cette intervalle la garniture est coincée. Les conséquences sont particulièrement grave dans RNS.



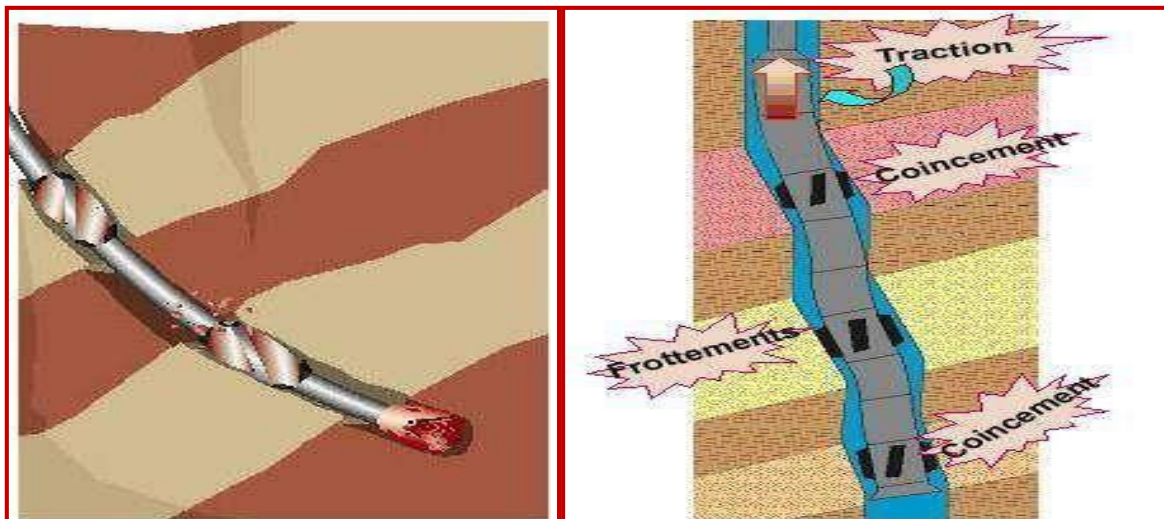
*Fig. II.6. Coincement de la garniture*

**c) Coincement dans des formations fracturées et faillées:**

Les formations fracturées et faillées sont des formations fragiles qui sont mécaniquement incompétent. Ce sont particulièrement instables lorsque les plans de stratification ont des angles de pendage élevés.

**d) Formation de dog leg :**

Les Dog-Leg sont des changements brusques d'inclinaison et d'azimut exprimé par unité de longueur forée. Généralement, on fait référence à un changement d'angle par 0m, 30 m ou 00 FT forés. Si ce "dog leg" est assez important, il peut provoquer des difficultés au passage de l'outil et des stabilisateurs [1].



*Fig. II.7. Formation de Dog leg*

**e) Formation des key-Seat :**

Les Key Seat sont des gouttières creusées dans le terrain par le frottement des tiges pendant le forage ou les manœuvres, ces gouttières se développent au niveau des dog legs ou des décrochements que sont d'autant plus profond que :

- Le terrain est tendre.
- Le dog legs est élevé.
- La tension des tiges est grande [1].

**f) Frottement de la garniture de forage :**

La première surprise pour le foreur qui n'est pas familier avec le forage est l'importance des frottements. Ils sont dus aux contacts entre les tiges et les parois du puits et dépendent principalement de la géométrie de la garniture, de la trajectoire du puits et des coefficients de frottements garniture-paroi de puits. Les frottements se manifestent par un torque excessif, une variation importante du poids au crochet, l'incapacité à transmettre du poids et à orienter

L'outil [1].

**g) Reaming et Back reaming:**

- Les Key Seat et les dog legs sont réduits par Reaming et Back reaming.
- Le Reaming et Back reaming améliore grandement la géométrie du trou.

**h) Une mauvaise géométrie de puits :**

Une mauvaise géométrie affecte chaque aspect de la cimentation et de la complétion d'un puits :

i) Mauvais transport des cuttings et mauvais nettoyage.

j) Casing excentré : Impossibilité de centrer un casing dans un puits de géométrie irrégulière.

k) Instabilité des parois du puits pendant la phase de production

**l) L'augmentation du Torque et Drag:**

**Le Torque**, est le couple nécessaire en surface pour faire tourner le train de tiges dans le puits de forage.

**Le Drag**, est la force nécessaire au crochet pour manœuvrer (sortir ou descendre) le Train de tiges dans le puits de forage.

Les pertes de transmission de couple et de force axiale sont les facteurs les plus importants pouvant perturber le forage d'un puits vertical. Les conséquences principales seront réduites la vitesse d'avancement de l'outil en empêchant le transfert du poids WOB requis, elles provoquent des twist-off et du survissage (over-torque) dans les équipements de forage, et peuvent rendre la descente d'un tubage ou liner tout à fait impossible [1].

# Chapitre III

## Equipements Utilisés

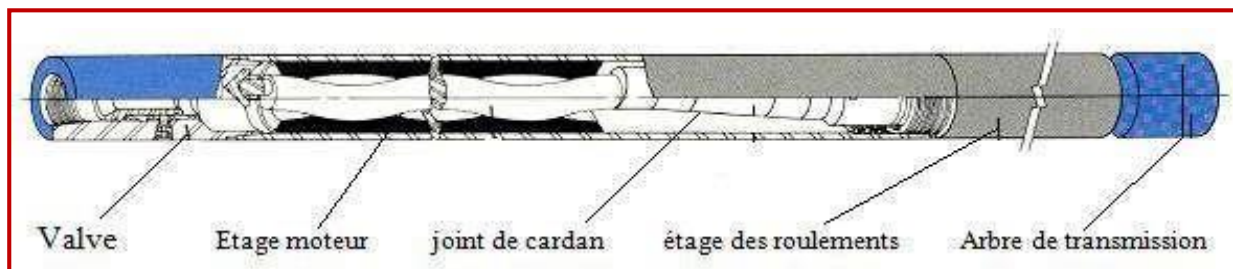
-  **PDM (Positive Dis placement Motors).**
-  **Vertitrak (Vertical Drilling System).**

### III. Généralité sur le PDM (Positive Displacement Motors) :

#### III.1. Composition d'un PDM:

Les différents éléments d'un PDM sont :

- **Un étage moteur** (power section) ou bien section motrice composée d'un rotor et un stator qui convertie l'énergie hydraulique du fluide de forage en énergie mécanique de rotation.
- **Un étage de roulement** (Baring section) ou bien section d'appui qui contient des paliers/roulements qui supportent la charge axiale et radiale pendant le forage et transmet la rotation de l'arbre vers l'outil.
- **Un joint de cardan** le rotor et l'arbre de transmission sont reliés par un joint de cardan, nécessaire pour transformer le mouvement excentrique du rotor en un mouvement concentrique.
- **L'arbre de transmission** qui transmet le couple et la vitesse de rotation produite par la section motrice à l'arbre de sortie (drive shaft).
- **Une valve à pression différentielle** est optionnellement installée en haut du moteur [2].

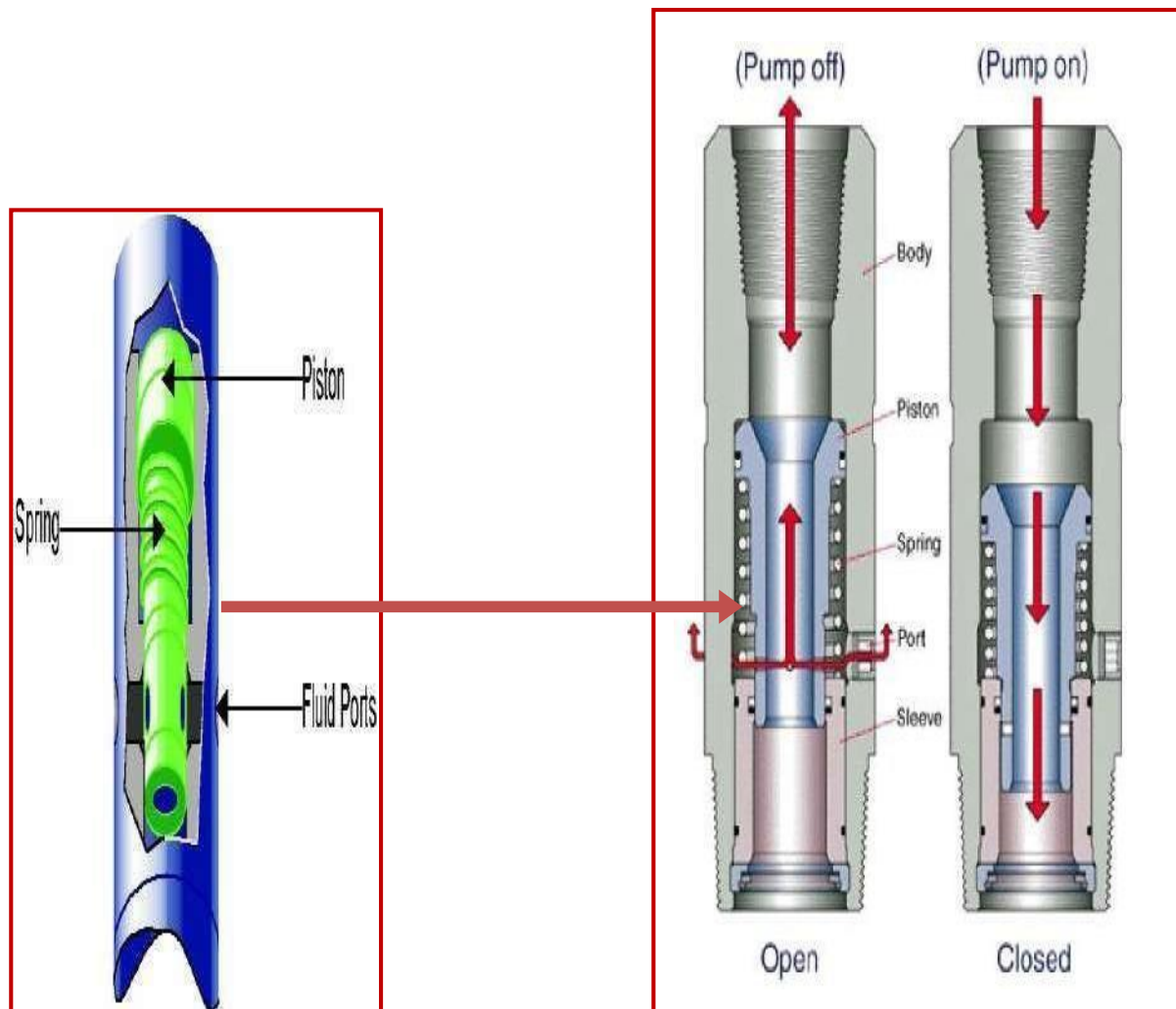


*Fig. III.1. Composition générale d'un PDM*

#### III.1.1. Valve à pression différentielle:

Les PDM sont protégés par une valve de détournement (by-pass) installée à la partie supérieure du corps. Cette valve fonctionne par pression différentielle et permet le détournement du fluide lorsque le moteur ne tourne pas (Il faut se souvenir que l'étage moteur est étanche lorsque le rotor ne tourne pas). A plus ou moins de 30% du débit maximum recommandé la vanne est activée, la boue déplace une chemise vers le bas, isolant les orifices latéraux, et la circulation se fait à travers le moteur. Si on arrête la circulation, le ressort pousse la chemise vers le haut, ouvrant les orifices latéraux. Cette vanne est optionnelle sur beaucoup de PDM au lieu de faire partie intégrante du moteur il s'agit alors d'une partie indépendante que l'on visse en haut.

Elle a plusieurs rôles, permet le remplissage du train de tiges en cours de descente et son vidage en cours de remontée, et d'amortir le démarrage de la rotation [2].

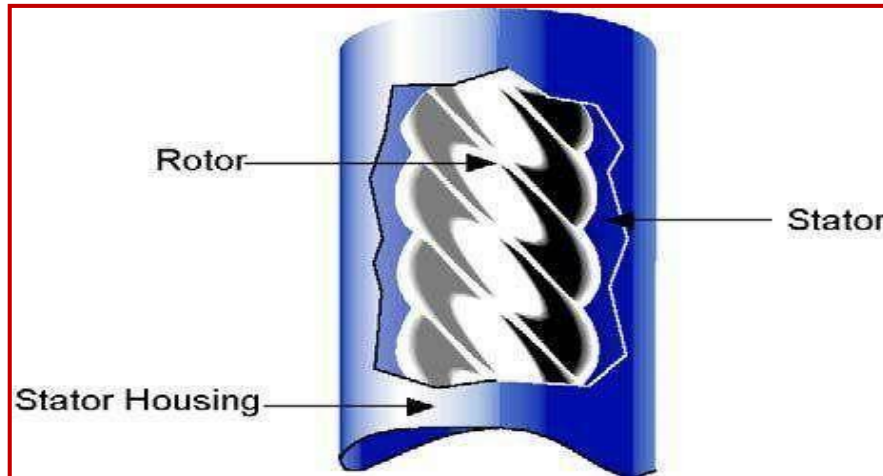


*Fig. III.2. Valve à pression différentielle (Dump Sub)*

### III.1.2. Etage de moteur:

L'étage moteur ou bien la section motrice se compose d'un rotor en acier et un stator en élastomère (élastique-polymère) collé au corps du moteur. Le stator moulé a un profil multilobé hélicoïdal sur toute sa longueur. L'hélice a son pas en sens inverse des aiguilles d'une montre. Le rotor a un profil usiné se mariant parfaitement aux lobes du stator, mais avec un lobe en moins, et évidemment le même pas d'hélice. L'assemblage stator / rotor crée une cavité puisque le rotor a un lobe de moins.

La pression hydraulique de la boue force cette dernière à s'écouler à travers la cavité hélicoïdale, ce qui oblige le rotor à tourner par rapport au stator [2].



*Fig. III.3. Composition d'un Etage moteur (Section motrice)*

### **Remarque**

Le rotor est une pièce hélicoïdale (hélice externe) fabriquée en acier inoxydable.

Le stator est un élastomère moulé en forme d'hélice interne, avec une spiresupplémentaire

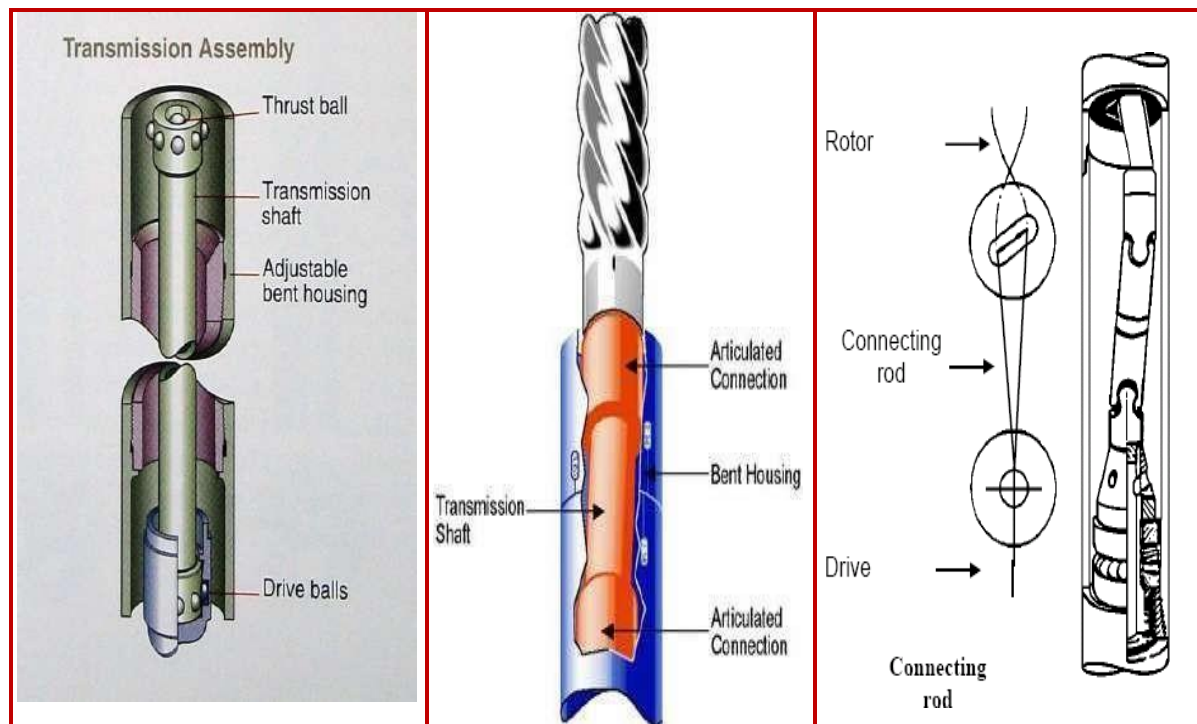
Par rapport au rotor.

Le rotor et le stator correspondent étroitement et engendrent des cavitésétanches les une des autres.

### **III.1.3. Joint de cardan:**

Une transmission (joint de cardan) qui transmet le couple et la vitesse de rotation produits par la section motrice à l'arbre de sortie (drive shaft). Cette transmission doit éliminer les mouvements du rotor (qui sont légèrement excentriques) par rapport au stator, et délivrer uniquement un mouvement concentrique à l'arbre de sortie. De plus elle doit être capable d'absorber et de transmettre la poussée vers le bas engendrée par la section motrice, et de permettre au rotor de rester correctement aligné par rapport à l'axe du stator, et en fin de supporter une certaine excentricité dans le cas d'un housing présentant une déflexion (bent housing). La transmission peut être constituée d'une seule pièce (Flex coupling) en alliage de titane ou d'un axe rigide avec une rotule (Universal joint) à chaque

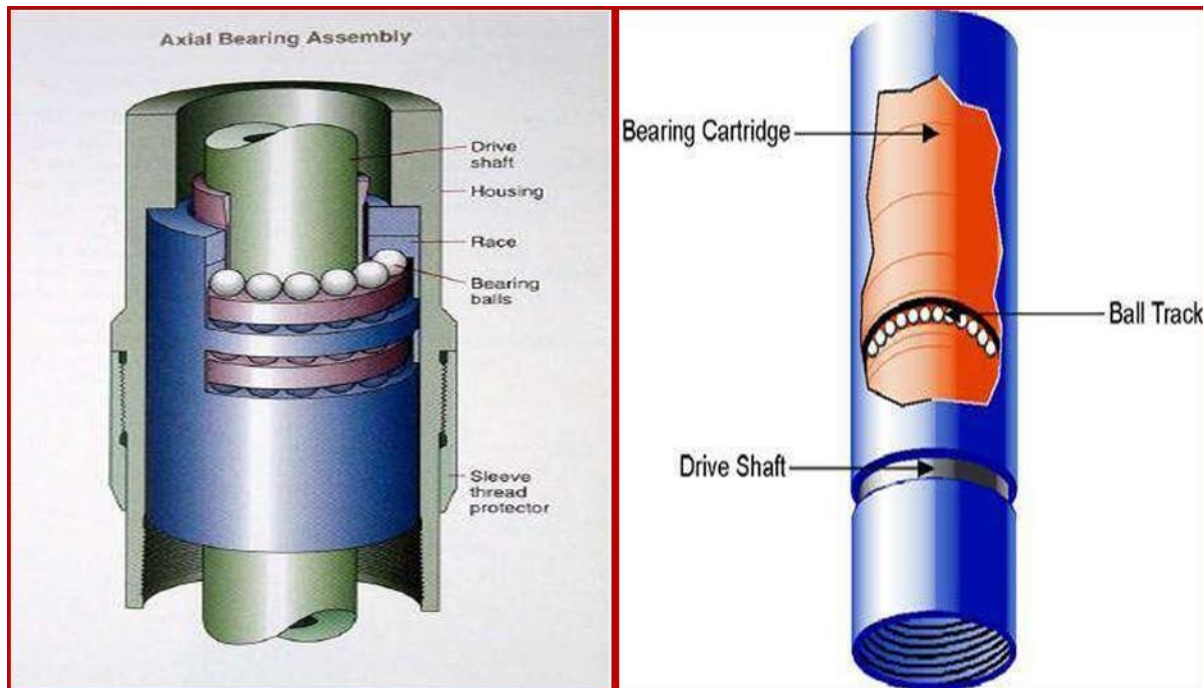
Extrémité [2].



*Fig. III.4. Cardan de transmission (Transmission Assembly)*

#### III.1.4. Etage des roulements (bearing section):

Il est constitué de roulements axiaux et radiaux qui supportent l'arbre de transmission et transfèrent les efforts de manière à ce que l'étage moteur ne soit pas sous contrainte. Ces roulements sont lubrifiés, Soit en étant enfermés dans des logements étanches remplis d'huile (série S), Soit par le fluide de forage lui-même (série M) et dans ce cas de figure on utilise des coussinets encarbure de tungstène pour réduire le flux du liquide de forage. Le système de roulements adopté influe sur la longévité du moteur, le poids maximal applicable sur l'outil et enfin la distance entre l'outil et le Bent housing. Plus que l'étage moteur, c'est l'étage "sensible" duquel dépend la durée de vie du moteur [2].



*Fig. III.5. Composition d'un Etage de roulement (bearing section)*

### III.2. Principe de fonctionnement :

Quand le fluide de forage est pompé à travers le moteur en remplissant la première cavité qui se présente, une montée de pression apparaît entraînant la rotation du rotor et permettant le passage du fluide dans la cavité voisine. Le fluide progresse alors de cavité en cavité entraînant ainsi une rotation régulière du rotor. Cette action se traduit par une conversion d'énergie hydraulique contenue dans le fluide de forage en énergie mécanique de rotation. La vitesse de rotation est proportionnelle au débit à travers le moteur. Les moteurs de fond fonctionnent correctement dans une plage de débit donnée, indiquée par le constructeur.

A débit constant et dégagé du fond, la perte de charge à travers le moteur est constante. Elle augmente quand l'outil atteint le fond et avec elle la pression de circulation.

Le poids sur l'outil est directement proportionnel à cet accroissement de pression appelé "delta P" du moteur [2].

### III.3. Considérations opérationnelles:

Les PDM sont des équipements assez fragiles, particulièrement les stators et sections d'appui. Cela crée donc quelques contraintes opérationnelles. La vie d'un PDM peut diminuer grandement si des précautions ne sont pas observées. Les paramètres fournis par le fabricant doivent être scrupuleusement observés [3].

#### III.3.1. Débit et Perte de charge :

Les moteurs de fond fonctionnent correctement dans une plage de débit donnée, indiquée par le constructeur. A débit constant et dégagé du fond, la perte de charge à travers le moteur est constante. Elle augmente quand l'outil atteint le fond et avec elle la pression de circulation. Le poids sur l'outil est directement proportionnel à cet accroissement de pression appelé "delta P" du moteur [3].

#### III.3.2. Limitations d'utilisation et les problèmes pratiques :

Les moteurs de fond sont des outils relativement fragiles, en particulier leurs stator et roulements. Ceci entraîne quelques limites de fonctionnement. La durée de vie d'un moteur peut être dramatiquement réduite si ces limites ne sont pas respectées [3].

- **Couple réactif :**

La rotation de l'arbre est obtenue par le passage du fluide de forage à travers le rotor/stator. Pendant le forage l'outil de forage rencontre une résistance qui se traduit par un couple, et le moteur a alors tendance à tourner en sens inverse en raison du débit qui continue à l'actionner, jusqu'à atteindre un état d'équilibre. Ce phénomène est appelé couple réactif. Son amplitude dépend à la fois du type d'outil de forage, de la puissance du moteur et de la formation forée. Si le couple réactif est trop fort, il deviendra difficile de contrôler le tool-face et donc la trajectoire. Ceci peut aller jusqu'à l'impossibilité de diriger le puits et donc de forer [3].

- **Calage :**

Si un poids excessif est appliqué à l'outil de forage, le moteur calera (*stall-out*) c'est à dire stoppera brutalement de tourner. Des calages répétitifs risquent d'endommager le moteur, en particulier son stator, et doivent être évités. Le calage est en général dû à un excès de poids sur l'outil, lui-même dû à un excès de "delta P". Il peut également être dû à une usure du moteur résultant en une perte de puissance et une impossibilité de forer [3].

**Remarque :**

En cas de calage le foreur doit dégager l'outil du fond, remonter quelques mètres en stoppant la circulation, puis redémarrer la circulation et reprendre le fond doucement en n'excédant pas le "delta P" nominal [3].

- **Chute de pression à l'outil de forage :**

La perte de pression à travers l'outil de forage affecte le débit de circulation et donc la quantité de fluide traversant les roulements et donc leur lubrification. Il est donc quelquefois nécessaire de limiter cette perte de pression en utilisant soit des duses de gros diamètre soit un outil sans duses [3].

- **Bouchage :**

Dans les formations tendres ou dans les formations où l'accumulation de déblais est un problème, le moteur peut avoir tendance à se remplir et se boucher. Ce problème peut être résolu par l'introduction d'une valve anti-retour entre l'outil et le moteur [3].

- **Quantité de solides dans le fluide de forage :**

Un excès de solides dans le fluide de forage aura un effet abrasif accélérant l'usure du stator et même du rotor.

- **Température :**

Les élastomères constituant les stators supportent mal les hautes températures réduisant la durée de vie des moteurs. Cependant des élastomères dits "haute température" sont apparus dans les années récentes repoussant les limites d'utilisation des moteurs [3].

- **Boues à l'huile :**

De même les boues à base d'huile ont un effet corrosif sur les élastomères et réduisent la durée de vie des moteurs. Là aussi des progrès récents améliorent les performances des moteurs [3].

- **Durée de vie des outils de forage :**

La durée de vie des outils de forage à molettes est limitée par un nombre total de rotations déroulements et donc inversement proportionnelle à la vitesse de rotation des outils. Un outil utilisé avec un moteur à grande vitesse verra sa durée de vie réduite, limitant la longueur forale en une seule descente [3].

### III.4. Caractéristiques d'un PDM :

Ces moteurs sont caractérisés par trois paramètres principaux

#### III.4.1. Le nombre de lobes :

Le plus courant est 1/2 lobes, c'est à dire lobe pour le rotor et 2 lobes pour le stator. Des multi lobes sont aussi employés (3/4, 5/6 et même 9/0) [4].

En augmentant le nombre de lobes, on obtient :

- Un couple plus élevé
- Une vitesse de rotation plus faible
- Une diminution de l'efficacité
- Une diminution de la durée de vie

Rotor/stator configuration	1/2	3/4	5/6	9/10
Length (ft)	21	22,2	23,1	23,5
Weight (Ib)	2100	2350	3290	3400
Maximum pressure drop across bit (psi)	500	1000	1500	1500
Flow rate (gpm)	250-450	325-500	350-600	200-650
Speed range (rpm)	55-135	65-160	90-185	230-332
Maximum pressure drop across motor (psi)	250	360	390	800-1000
Maximum torque (ft Ib)	1160	2100	4200	4500-6000
Maximum power output at max. rpm and torque (hp)	54	73	128	211

*Tableau 01. Comparaison entre les configurations des moteurs de fond*



*Fig.III.6. Configurations des moteurs de fond*

### III.4.2. L'excentricité et le diamètre du rotor :

Par construction, le stator est de forme intérieure sinusoidale, la section étant composée de deux demi-cercles, de diamètre **D**, dont la distance entre centres est **4e** réunis par deux parallèles tangentes aux cercles.

- **D** étant le diamètre du rotor.
- **E** étant l'excentricité du rotor.

Toute augmentation du diamètre du rotor et de son excentricité entraîne une augmentation de la section des alvéoles donc une augmentation de la pression différentielle admissible pour l'alvéole ce qui se traduit par une augmentation du couple et de la puissance disponible [4].

### III.4.3. Nombre d'étages :

L'augmentation du nombre d'étages permet d'accroître la perte de charge totale admissible par le moteur donc le couple et la puissance de sortie [4].

## III.5. Les MWD (Measurement While Drilling):

Les premiers MWD sont apparus dans les années 70, apportant au forage dirigé l'un des instruments qui allait lui permettre une évolution sans précédent, en particulier le développement du forage horizontal et de ses séquelles. Ils mesurent et transmettent l'inclinaison, l'azimut et le tool face, à l'aide de capteurs ultra sensibles, accéléromètres et des magnétomètres, leur conférant une précision inégalée par les instruments de mesure classiques (totco) [3]. Les paramètres mesurés sont transmis vers la surface après avoir été codés sous forme binaire. Deux systèmes de transmission sont utilisés :

- La transmission par impulsions à travers le fluide de forage ("mud pulses")
- La transmission électromagnétique.

### III.5.1. Composition d'un MWD :

Les composants d'un MWD sont :

#### a) Le(s) étage(s) de mesures :

A leur origine les MWD ont été conçus pour fournir les mesures nécessaires aux opérations de déviation et sont donc équipés de capteurs permettant les mesures d'inclinaison et d'azimut, et de tool-face si le système est indexé à l'outil de déviation [3].

## **b) L'étage de télémétrie :**

L'étage de télémétrie a pour fonction de transmettre les mesures depuis le fond de trou vers la surface.

Deux systèmes de télémétrie sont couramment utilisés :

- La transmission par impulsions à travers le fluide de forage ("*mud pulses*")
- La transmission électromagnétique utilisant les formations en tant que conducteur. Pour être transmis les paramètres mesurés doivent préalablement être transformés en information binaire [3].

### **b.1) Télémétrie par impulsions à travers le fluide de forage :**

Le principe consiste à créer des impulsions dans le fluide de forage, à l'aide d'un système mécanique appelé "*pulser*". Ces impulsions sont :

- Soit des dépressions (impulsions négatives)
- Soit des surpressions (impulsions positives)

Ces impulsions se transmettent à travers le fluide à l'intérieur du train de tiges et sont mesurées en surface par l'intermédiaire d'un capteur de pression installé sur la ligne d'injection. Divers systèmes sont utilisés, plus ou moins performants dans leur capacité de transmission. Les systèmes à impulsions sont très dépendants du fluide de forage ou la mousse [3].

### **b.2) Transmission électromagnétique :**

Un courant électrique est injecté dans la formation et mesuré en surface. Ce type d'outil a l'avantage d'être totalement indépendants du fluide de forage. Ils peuvent donc transmettre en permanence (y compris pendant les arrêts de circulation) ou dans les puits forés en dépression. Les possibilités d'opération de ces outils sont limitées par la résistivité des formations traversées [3].

**c) L'étage de puissance :**

Les différents composants d'un MWD nécessitent une alimentation électrique fournie soit :

- Par des batteries
- Par une turbine entraînant un alternateur
- Une combinaison batteries – turbine.

**✚ Les avantages:**

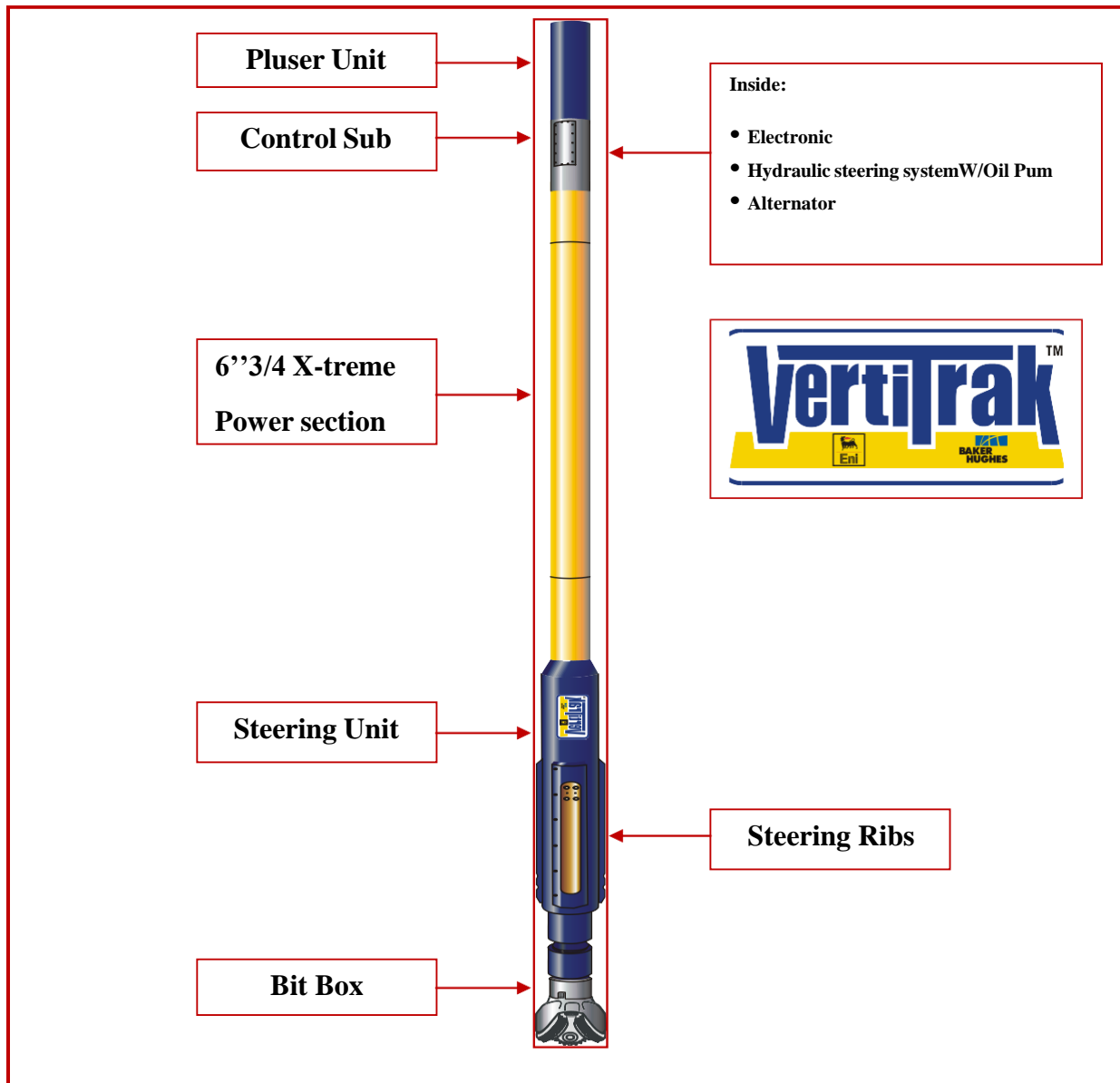
- ✓ Le forage par le PDM en mode rotary permet de garder le puits relativement vertical, ce qui minimise le temps de sliding.
- ✓ La rotation de la garniture permet de diminuer le risque de coincement par pression différentielle.
- ✓ Un bon nettoyage du puits dû à la rotation de la garniture.

**✚ Les inconvénients:**

- ✓ Les performances peuvent être affectées par le stick slip.
- ✓ La nécessité de forer en mode sliding afin de contrôler la trajectoire ce qui cause la réduction de l'avancement, et la perte de temps dans le reforge de l'intervalle foré en sliding après le passage en mode rotary.

### III.6. Introduction:

Les travaux de recherches ont débuté avec l'idée de créer un système de forage qui nous permet de réaliser des puits distants de 8 m et dont la profondeur que d'atteindre 3000 m, afin d'éviter le croisement entre ses puits. Dans les années 1990, la création du VertiTrak a prouvé son efficacité en forant des profils parfaitement verticaux. Le VertiTrak a été développé pour forer des formations avec des pendages élevés (high dip angle) de 30 à 60° ou l'outil de forage (BHA conventionnelle) [5].



*Fig. III.7. Composition du VertiTrak.*

### III.6.1. Description :

Le VRT est un nouveau système de moteur intégré avec un MWD, il permet un contrôle continu de l'inclinaison, il incorpore une nouvelle section de puissance avec rendement élevée et une technologie pour commander la direction de la garniture. [5].

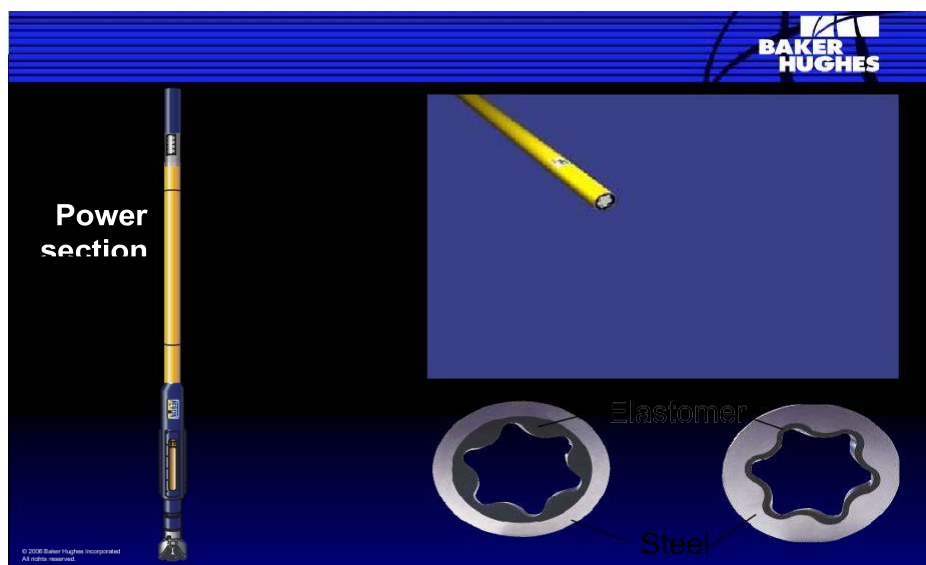
#### a) Steering Head:

Constitue de deux parties :

- **Drive Sub** : c'est la partie mobile de VertiTrak qui permet la rotation de l'outil de forage.
- **Steering Ribs** : Il est Constitue de trois ribs qui sont localisés dans l'étage deroulement (bearing housing). Les pistons hydrauliques sous les ribs sont actionnés par des pompe qui peuvent produire des forces latérales de ,5 à 3 tonnes pour chaque ribs. Afin de maintenir le vertical du puits. Selon le diamètre du puits, les ribs sont échangeables [5].

#### b) Power Section

Elle contient de rotor et stator et un système de transmission qui permet de transforme le mouvement de rotation du rotor d'un mouvement excentrique en un mouvement concentrique [5].



*Fig. III.8. Power Section*

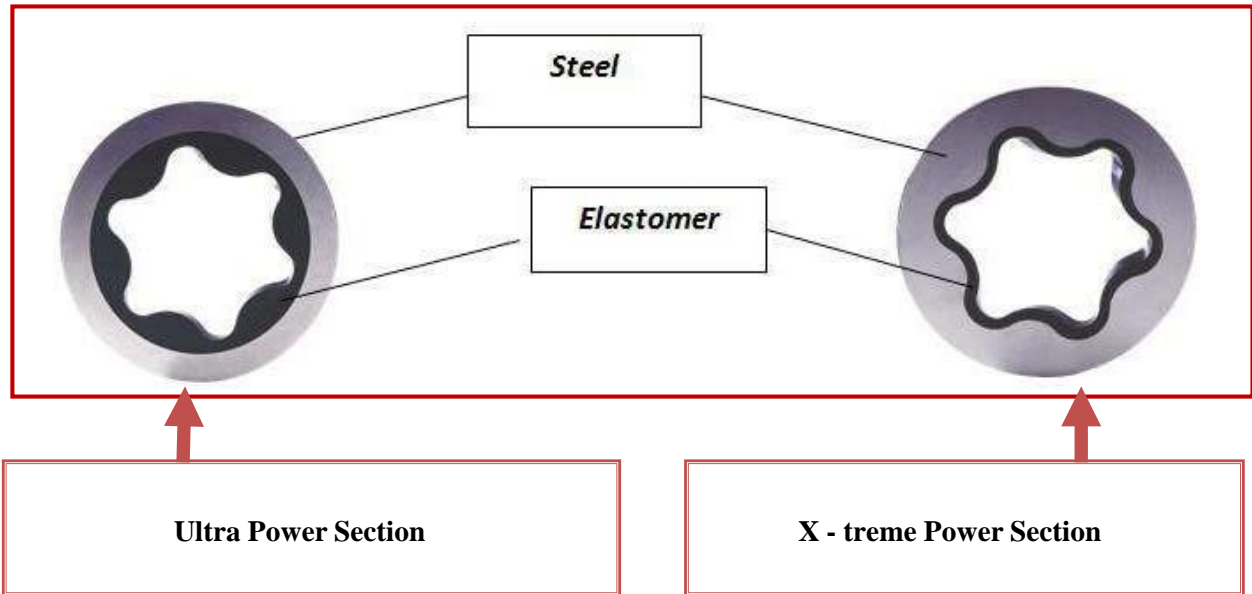


Fig. III.9. Différence entre ancien section motrice et X - treme Power Section

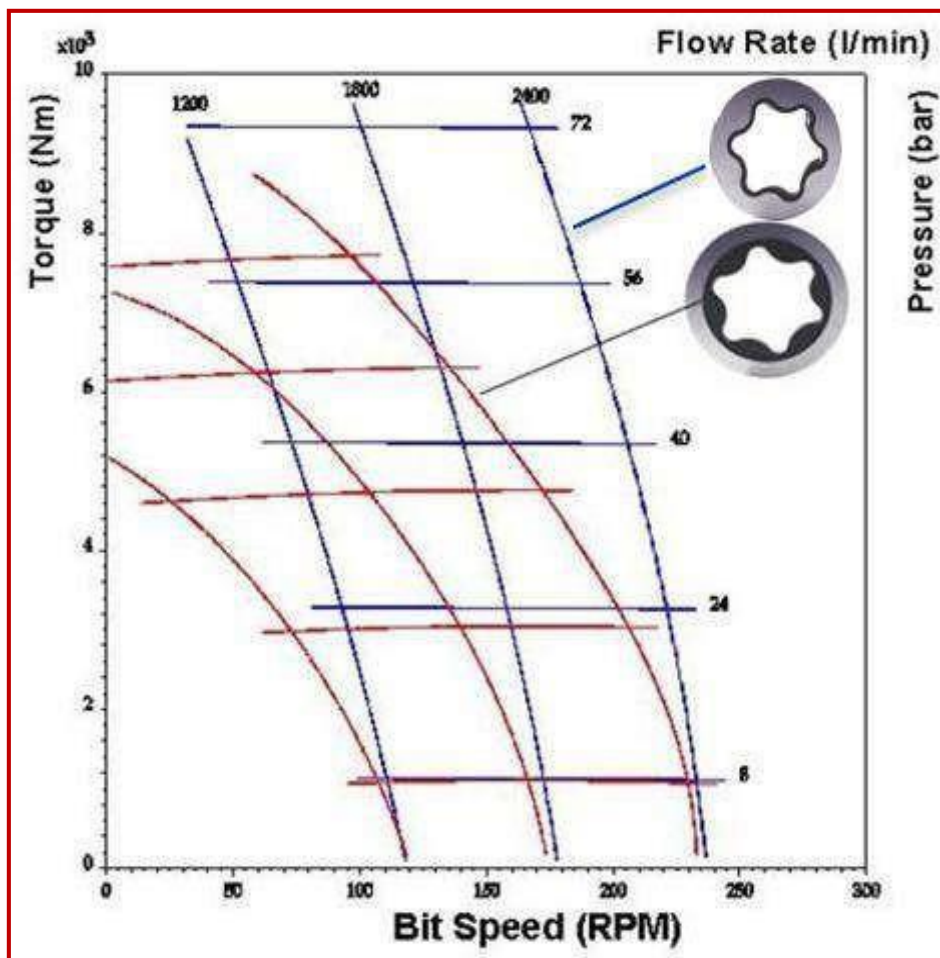
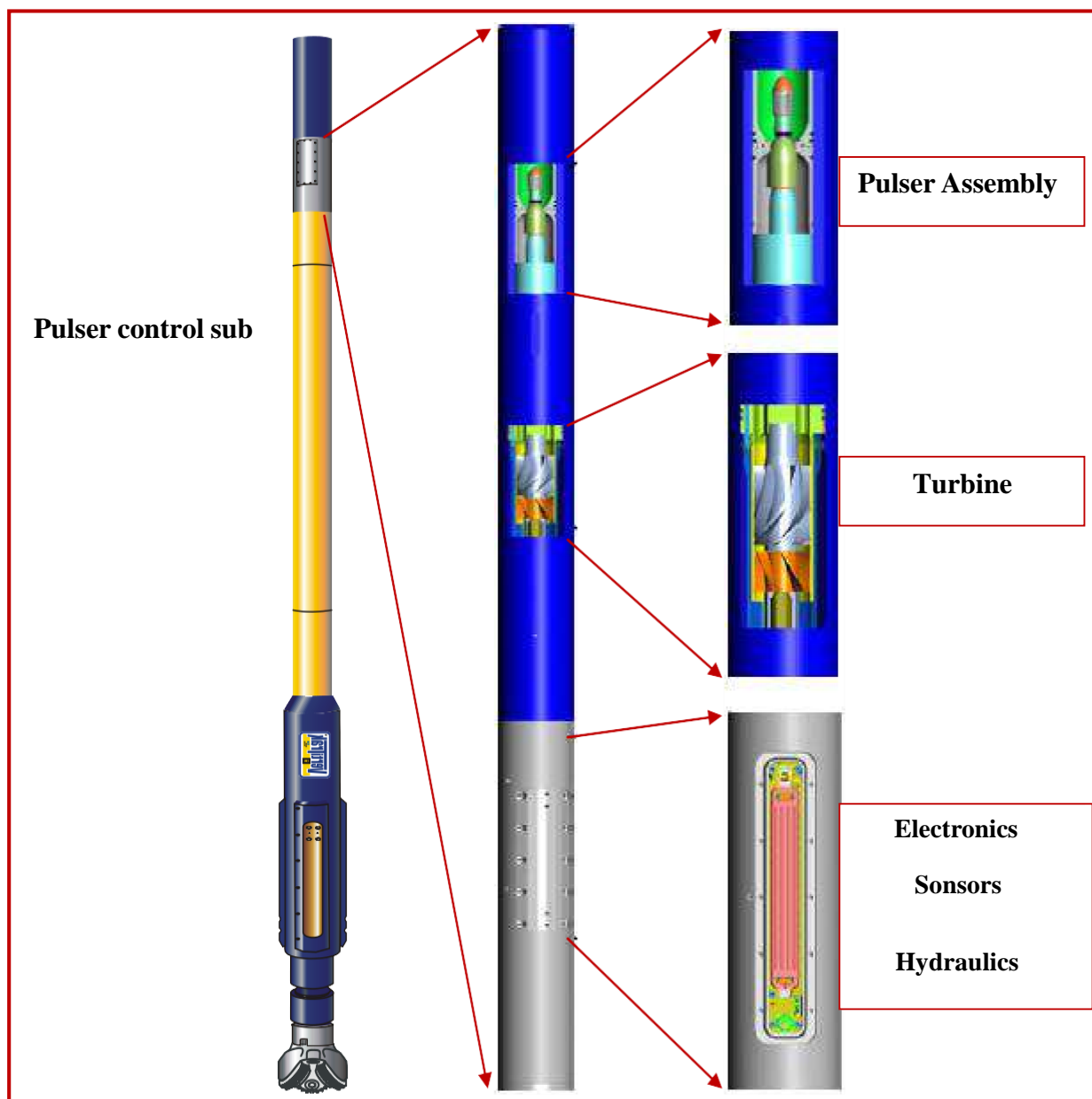


Fig. III.10. Performance de section motrice de VertTrak.

### c) Contrôle sub :

Contient les parties suivantes :

- **Turbine et alternateur** : sert à alimenter le système électronique.
- **Système électronique** : permet de prendre les mesures d'inclinaison, d'azumith
- **Système hydraulique** : permet de générer la force nécessaire pour pousser les ribs.
- **Système de pulse** : sert à transformer des mesures sous forme de pulse à travers la boue de forage [5].



*Fig. III.11. Contrôle sub et l'unité de pulsation*

### III.7. Principe de fonctionnement du VertiTrack :

Dès que le système électronique de MWD enregistre une valeur d'inclinaison différent de zéro. La pompe actionne automatiquement les pistons hydrauliques situe dernier les ribs. Ces derniers sont actionnés par une force de ,5 à 3 tonnesqui pousser les ribs vers les parois de puits, l'outil revient à la verticale. Le système de commande fonctionne automatiquement, sans intervention de la surface, le circuit hydraulique et l'électronique maintient le puits vertical. Lesparois du trou dans des formations tendres sont souvent cavées lorsqu'elles soumises aux chocs des Ribs. Des ingénieurs ont déterminé que la qualité du puits est souvent affectée par la rotation de train de tige. Pour garder une bonne verticalité du puits, le système a été désigné pour fonctionner seulement en **mode sliding** sans rotation de Le BHA [5].

### III.8. Mode opératoire :

Il existe deux modes opératoires du VertiTrak :

#### *a) Streeing mode :*

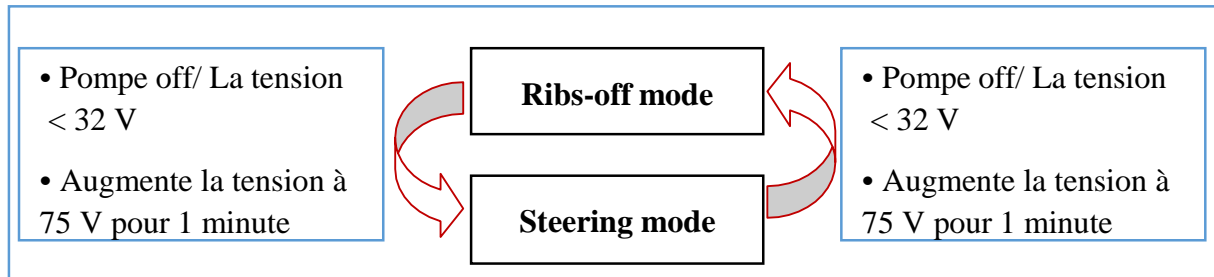
Dans ce mode, ou 2 Ribs du VertiTrak sont entièrement rétractés et l'autre Ribs est ouvert pour pousser l'outil à la verticalité. Dans ce mode, il n'Ya pas de rotation et torque de la table de rotation (top drive) (mode sliding) pour nepas endommager les Ribs en position ouvertes. S'il Ya un problème dans le puits qui nécessite une courte rotation de BHA de la surface on peut le faire avec ce mode. Si le problème nécessite une longue rotation on passe directement au Ribs off mode pour ne pas endommager les Ribs [5].

#### *b) Ribs off mode :*

Dans ce mode, les Ribs sont rétractés, le VertiTrak est incapable d'orienter etde garder la verticalité. Elles utilisée dans les opérations de Reaming et Back Reaming et dans le contrôle du puits et lors de l'opération de remontée de l'outil à la surface [5].

### III.8.1. Réglage du mode à partir de la surface :

Pour changer le mode il faut descendre la tension au-dessous de **32V** correspond à un débit de **600 L/mn**, puis maintenir la tension à **75V** correspond à un débit **200 L/mn** pendant une minute. Le changement du mode fait automatiquement [5].



### III.9. Forage avec la BHA conventionnelle (Forage Rotary):

Le choix de la garniture de fond se fera en fonction du diamètre du puits, du poids à appliquer sur l'outil de la trajectoire. Il faut veiller à utiliser des garnitures de fond aussi courtes que possible afin de réduire le couple, la friction, les pertes de charge annulaires et les risques de rupture liés au travail de cette partie de la garniture en compression. Une transition doit être aménagée entre les tiges et la garniture de fond afin de minimiser les risques d'endommagements par fatigue. Lorsqu'une garniture fore d'une profondeur  $H_1$  à une profondeur  $H_2$  plusieurs problèmes peuvent se présenter :

- La forme du trou varie constamment. L'érosion latérale, l'érosion hydraulique, les défauts de la formation empêchent le trou de rester un cylindre parfait ;
- La courbure du trou et par conséquent l'angle change sous l'effet de la BHA elle-même, les pendages, les failles, les changements de strates ou toute autre raison géologique,
- Le comportement mécanique de la formation change : certaines formations peuvent avoir une réponse rigide, élastique, plastique ou viscoplastique à l'effort induit par les contacts avec l'outil, les stabilisateurs ou les masse-tiges
- Les efforts internes à la formation, et ainsi sa réponse à l'attaque latérale ou frontale de l'outil varient constamment.
- Les vibrations et des chocs sur les parois du trou apparaissent avec des amplitudes et des fréquences diverses.

Toutes ces influences sont difficiles à quantifier car le manque de données précises, et les lois physiques applicables.

Dans le cas du diamètre du trou, par exemple, lorsque le "caliper" est descendu, de nombreux facteurs ont pu changer la géométrie du puits :

- Les chocs des tiges ont pu altérer les parois du trou ;
- Des réactions physico-chimiques entre la boue et les formations ont pu faire gonfler des argiles
- L'érosion hydraulique a provoqué des cavages ;
- L'évolution des contraintes internes de la formation a pu modifier la forme du trou ;
- Les outils et stabilisateurs ont une agressivité latérale qui attaque les parois du trou.

A moins que le caliper ne montre un trou parfaitement calibré, il est presque impossible de prédire quel était le diamètre correct à prendre en compte au moment du choix des garnitures.

Et pourtant, il s'agit d'un paramètre important. Mais une chose peut être connue parfaitement, la garniture elle-même. Les lois générales de l'élasticité et de la mécanique ont prouvé être des outils utiles à l'analyse du comportement mécanique d'une garniture. Quelles que soient les conditions du trou et de sa géométrie, l'existence ou non des failles, des pendages, ou de changements de formation, il est toujours possible de comparer deux BHA différentes afin de choisir la plus rigide ou la plus flexible. Les analyses à posteriori des puits déjà forés où toutes les données mesurables ont été recueillies permettent de partager le puits en zones de comportement normal ou anormal. Pour cela, on a besoin de la description précise de la garniture (y compris l'outil), des diagraphies de surface (avec lithologie, avancement, poids sur l'outil, rotation, couple), des données de déviation précises, (les pendage-mètres, et les calipers) [5].

Le premier pas est d'établir une carte d'identité des garnitures, avec une description précise de leur composition et des conditions dans lesquelles elles sont descendues, Le second pas est d'analyser leur comportement théorique suivant leurs réactions à toutes les variations de paramètres possibles, et Le troisième pas est de comparer le comportement théorique au comportement réel, et ainsi d'être capable de diviser le puits en plusieurs parties, tendances normales et prévisibles, et tendances anormales.

C'est la seule façon de savoir si un comportement non désiré observé sur un puits donné est dû à, un mauvais choix de la garniture, et des conditions spécifiques à manipuler soigneusement.

Cependant, il est toujours possible de définir des critères pour définir une BHA optimum et d'utiliser notre savoir actuel pour sélectionner la meilleure BHA qui remplira ces conditions.

### III.9.1. Types des BHA:

#### a) Garnitures lisses (slick assembly):

La plus simple des garnitures est dite "lisse" (Slick assembly). Elle consiste

**1 outil - 1 NMDC ou MWD - 1 DC ou NMDC - n DC - ...**

L'application de la théorie pendulaire permet les considérations lorsque le train de tiges est suspendu (pas de poids sur l'outil), seule la force pendulaire est appliquée à l'outil. Elle tendrait à ramener le puits au vertical, et quand l'application d'un poids introduit une flexion et rapproche le point de tangence de l'outil, diminuant donc force pendulaire et créant une force axiale poussant l'outil. La résultante de ces forces est difficilement prévisible, dépendant à la fois du poids et de la rigidité des éléments inférieurs [5].

#### b) Garnitures pour chute de l'inclinaison ou pendulaires:

Une chute d'inclinaison est souvent difficile à réaliser ou à contrôler, en particulier aux faibles inclinaisons. Une chute d'inclinaison a peu de chance de réussir dans les formations dures. Ce devrait être évité dans la mesure du possible. L'effet de chute sera d'autant meilleur que la force pendulaire est forte, il faut donc repousser le point de tangence aussi loin que possible de l'outil. La garniture de chute la plus courante consiste à intercaler dans les masses tiges un stabilisateur (*string* plein trou), à 15 à 20 mètres au-dessus de l'outil. Si une garniture de chute ne produit pas l'effet escompté, diverses tentatives peuvent être faites pour améliorer le résultat par la diminution de poids sur l'outil et la rotation [5].

Les garnitures les plus Utilisées sont les suivantes :

**1 outil + 1 NMDC ou MWD 9m + 1 DC ou NMDC 9m + Stab stg fg + DC 9m + Stab stg fg + n DC ...**

**1 outil + 1 NMDC ou MWD 9m + NMDC courte 6m + Stab stg fg + n DC ...**

**1 outil + 1 NMDC ou MWD 9m + Stab stg fg + 1 DC ou NMDC 9m + Stab stg fg + n DC ...**

Avec des stabilisateurs pleins trous, les garnitures en partante la 5<sup>ème</sup> vers la 1<sup>ère</sup> sont de plus en plus descendante [5].

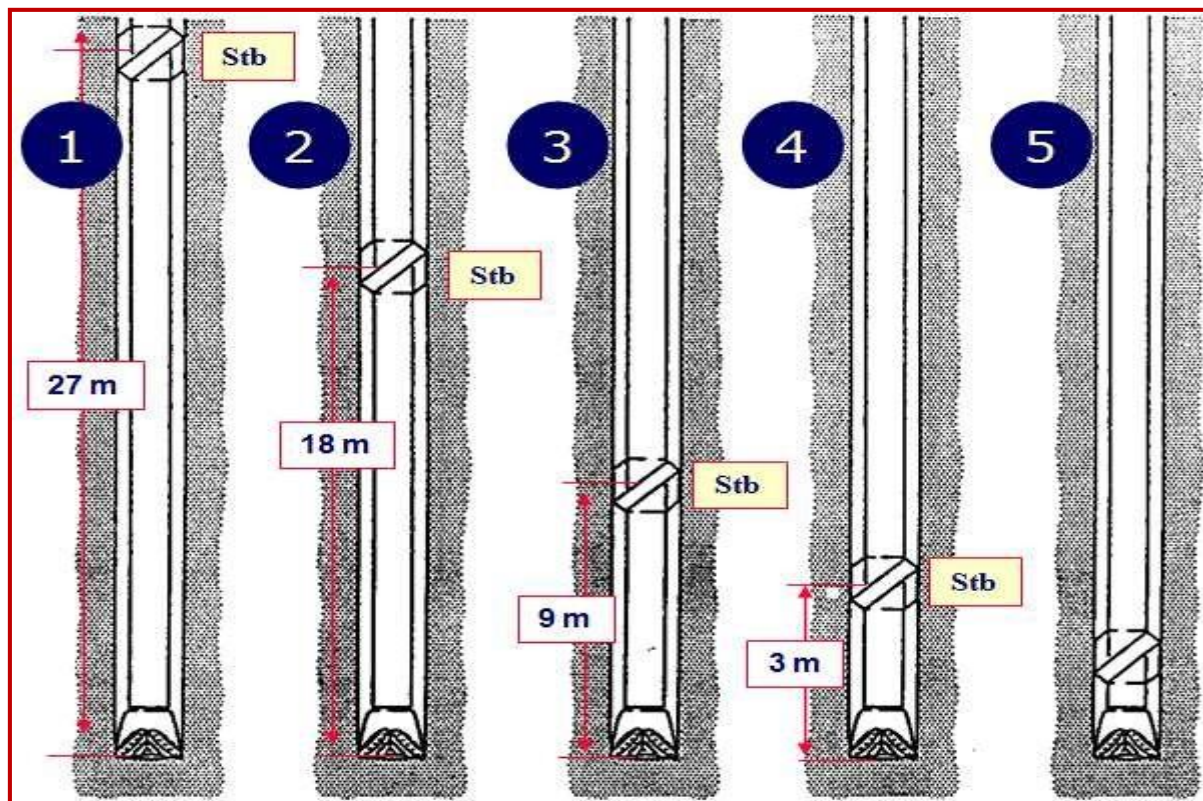


Fig. III.12. Garniture de drop off.

### c) Garniture de maintien de l'inclinaison (Packed-hole assembly):

L'inclinaison d'un puits peut être maintenue à l'aide d'une garniture dite "stabilisée" (Packed-hole assembly), combinaison de plusieurs stabilisateurs et éléments tubulaires arrangés de manière à obtenir une résultante latérale nulle ou négligeable. La composition de base d'une telle garniture consiste un stabilisateur *Near-bit* (plein trou, rarement sous dimensionné), plusieurs stabilisateurs *string* (plein trous ou sous dimensionnés) et des éléments tubulaires (drill-collars, MWD, etc.) les reliant de manière à obtenir un ensemble rigide, mais aussi suffisamment souple pour, par exemple, permettre de compenser une tendance à la chute. Les garnitures les plus utilisées sont dites:

- "Trois points" un *Near-bit* et deux stabilisateurs *string*.
- "Quatre points" un *Near-bit* et trois stabilisateurs *string* [5].

Les garnitures les plus utilisées sont les suivantes :

**1 outil + NB.fg + 1 DC courte 2 à 3m+ Stab stg fg + MWD ou NMDC + NM.stb.fg + NMDC 9m + stb.fg + DC 9m + Stab stg fg + n DC ...**

**1 outil + NB.fg + 1 DC courte 2 à 3m+ Stab stg fg + MWD ou NMDC + NM.stb.fg**

+NMDC 9m + stb.fg + DC 9m + Stab stg fg + n DC ...

1 outil + NB.fg + MWD ou NMDC + NM.stb.fg + NMDC 9m + stb.fg + DC 9m + nDC...

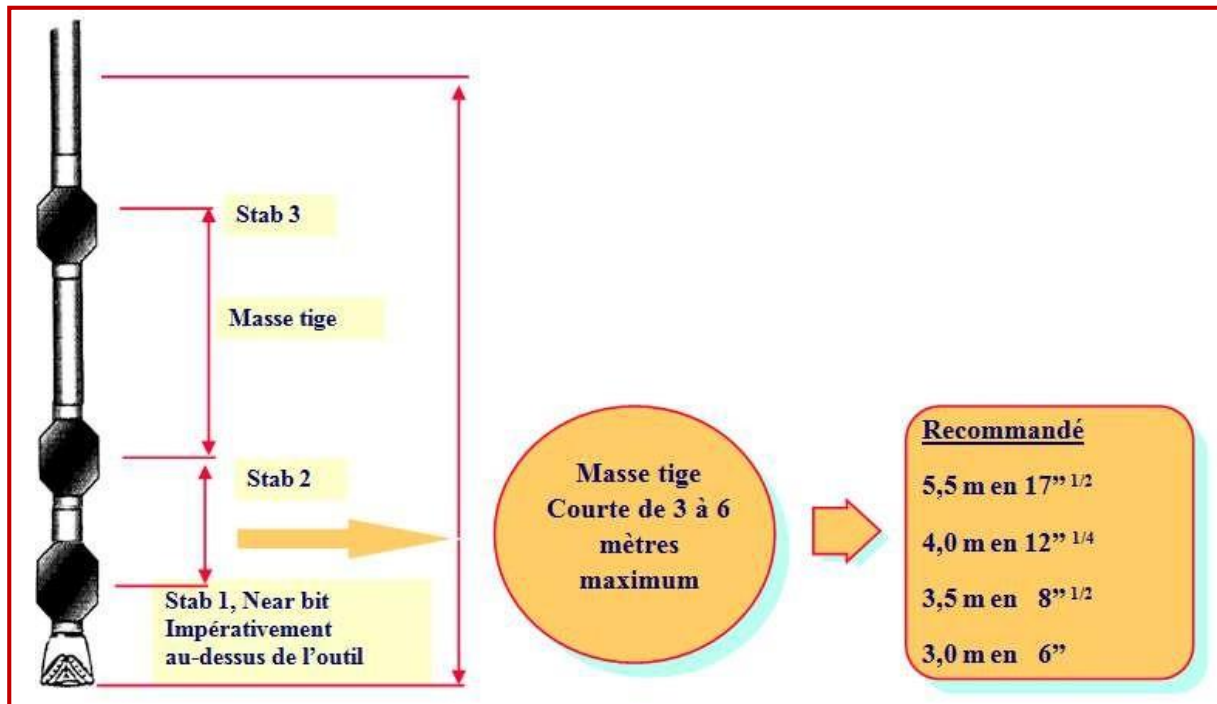


Fig. III.13. Garniture de maintien de l'inclinaison (Packed-hole assembly)

### III.10. Procédure de forage de la Phase 8''<sup>1/2</sup>:

D'après la procédure de forage de RN, la phase 8''<sup>1/2</sup> est forée par packed hole assembly [6].

#### III.10.1. BHA utilisé:

Description	No of Joints	OD (inch)	ID (inch)	Connection	
				Bottom	Top
PDC Bit	1	8,5			4'' <sup>1/2</sup> REG P
8'' <sup>7/16</sup> NB Stab	1	8,4375	2,813	4'' <sup>1/2</sup> REG B	4'' IF B
SHDC	1	6,5	2,813	4'' IF P	4'' IF B
8'' <sup>7/16</sup> Stab	1	8,4375	2,813	4'' IF P	4'' IF B
1 x DC	1	6,5	2,813	4'' IF P	4'' IF B
8'' <sup>7/16</sup> Stab	1	8,4375	2,813	4'' IF P	4'' IF B
6 x DC	6	6,5	2,813	4'' IF P	4'' IF B
Jar / Flex Joint	1	6,5	2,5	4'' IF P	4'' IF B

2 x DC	2	6,5	2,813	4" IF P	<b>4" IF B</b>
X Over	1	6,5	2,813	4" IF P	<b>4''<sup>1/2</sup> IF B</b>
15xHWDP Body	15	5	3,125	4'' <sup>1/2</sup> IF P	<b>4''<sup>1/2</sup> IF B</b>
HWDP T. J.		6,5	3,125		
DP G105 Body	Surface	5	4,276	4'' <sup>1/2</sup> IF P	<b>4''<sup>1/2</sup> IF B</b>
DP G105 T. J.		<b>6,5</b>	<b>3,25</b>		

*Tableau 02.BHA utilisé*

### III.10.2. Paramètres de forage:

<b>WOB (tonne)</b>	<b>RPM (tr /mn)</b>	<b>Débit (l/mn)</b>
<b>9-12</b>	<b>150 – 200</b>	<b>1700-2200</b>

*Tableau 03. Les paramètres de forage.*

### III.10.3. Caractéristique de la boue:

<b>Densité</b>	<b>Viscosité (second)</b>	<b>Y<sub>P</sub> (lb/100ft<sup>2</sup>)</b>
<b>1,10 - 1,40</b>	<b>35 - 40</b>	<b>12 - 14</b>

*Tableau 04.Les caractéristiques de la boue.*

# Chapitre IV

## Etude Comparative

#### **IV. Présentation de l'échantillon des puits étudiés :**

Le forage des puits verticaux de la région de Rhourd nous rencontre souvent des problèmes du maintien de la verticalité surtout dans la phase 8 ½ où l'outil tend à se dévier et peut créer des problèmes ce qui fait son étude obligatoire.

Pour cela et afin de pouvoir déterminer le moyen le plus approprié pour le forage de la phase 8 ½ on a pris en considération seulement les puits forés récemment à cause du manque des données des puits forés antérieurement (RN 08 foré en 1998), au total un échantillon de 9 puits, dont 6 puits de Rhourde Nous centre et 3 puits de Rhourde Nous Sud-est.

Parmi ces puits 5 ont été entièrement forés avec des PDM conventionnelles (RN111, RN110, RNSE102, RNSE103, RNSE104), et 4 puits forés avec le VertiTrak (RN 112, RN 113, RN 117, RN 116).

Les 9 puits de l'échantillon ont été forés en 53 runs parmi lesquels 36 runs de PDM, et 7 runs de VertiTrak.

Ces runs totalisent 7345 m forés en 2854,55 heures ce qui donne un avancement moyen de 2,95 m/h et une longueur moyenne de 262,32 m par run.

Les données de l'échantillon sont représentées en détaille dans le tableau suivant :

TYPE DE MOTEUR	Nom de puits	Run N°	Heurs de forage	Intervalle foré	ROP	Nom de l'outil	Remonté
PDM	<b>RN110</b>	1	67,88	370	5,45	DSX8	<b>descente du moteur</b>
		2	8 ,48	54	1,89	DSX8	<b>changement de la BHA</b>
		3	62, 4	87	1,4	DSX8	<b>changement de l'outil</b>
		4	35,4	34	0,96	TD530P6H	<b>changement de l'outil</b>
		5	62, 7	253	1,56	FM3734SDBS	<b>descente de la turbine</b>
	<b>RNSE 102</b>	1	98,47	363	3,68	HC407Z	<b>chute de ROP</b>
		2	92,33	3	1,22	HCD508Z	<b>défaillance de MWD</b>
		3	06,43	372	3,49	KH8 3	<b>panne du moteur</b>
	<b>RNSE 103</b>	1	94,23	258	2,73	MA6 6PX	<b>chute de ROP</b>
		2	5 ,67	63	1,21	FM3845Z	<b>chute de ROP</b>
		3	8 ,22	237	2,91	MA74PX	<b>défaillance de MWD</b>
		4	97,44	236	2,42	MKS56DG	<b>chute de ROP</b>
		5	28,78	54	1,87	MKF39DG	<b>défaillance de MWD</b>
	<b>RNSE 104</b>	1	35, 4	4 6	3,07	MA6 6PX	<b>chute de ROP</b>
		2	8,73	285	2,4	FM3743Z	<b>chute de ROP</b>
VertiTrak	<b>RN112</b>	1	00,9	554	5,49	HCR506ZX	<b>chute de ROP</b>
		2	38,09	3 9	2,31	HCD508Z	<b>chute de ROP</b>
		3	70,49	3 3	4,44	HCD508Z	<b>chute de ROP</b>
	<b>RN113</b>	1	73,88	354	4,79	FM3743	<b>chute de la pression</b>
		2	64,3	6	2,5	MA9 3PX	<b>chute de ROP</b>
		3	97,7	402	4,11	MA9 3PX	<b>chute de ROP</b>
	<b>RN 116</b>	1	95, 2	468	4,92	DSR8 M	<b>panne du moteur</b>
		2	3,28	45	3,39	M909	<b>panne du moteur</b>
		3	80,66	64	2,03	M909	<b>panne du moteur</b>
		4	08,9	338	3,1	MKF58JD	<b>descente de la turbine</b>
	<b>RN 117</b>	1	34,87	452	3,35	KH8 3	<b>chute de ROP</b>
		2	66,82	455	2,73	KH8 3	<b>panne du moteur</b>
	<b>3</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>0,96</b>	<b>KH8 3</b>	<b>descente de la turbine</b>	

*Tableau 05. Présentation de l'échantillon des puits étudié.*

## **IV.1. Analyse des données de l'échantillon :**

Comme il a été précisé précédemment le but de cette étude est de déterminer le moyen le plus approprié pour la réalisation de la phase 8<sup>1/2</sup> dans le champ de Rhourd Nouss et ça dans le but de garder la verticalité du puits, et de réaliser un bon profil du puits en essayant de maximiser la rentabilité économique du forage en minimisant les coûts. Pour cela ; on analysera la déviation et les performances réalisés par chaque type de moteur. En fin ; une analyse des coûts de forage sera effectuée pour déterminer le moyen le plus économique et le plus rentable.

### **IV.1.1. Analyse de la déviation:**

#### **a) Puits forés à l'aide de PDM conventionnelle:**

##### **RN111 :**

Le forage débute à la cote 2240m dans le Lias Argileux avec une garniture rotary et un outil PDC.

Dans le Silurien A2, l'inclinaison du puits est contrôlée par des Survey totco.

A 2596m, l'inclinaison est de .5deg. A la cote 2692m, l'inclinaison est de 3deg, une troisième Survey totco prise dans le Silurien M2 montre une inclinaison de 6deg à 274

m. À ce moment il a été décidé de descendre une garniture directionnelle composée d'un moteur et MWD afin de ramener le puits à la verticale. L'utilisation du moteur a permis de ramener l'inclinaison à 2.2deg dans le silurien argileux.

A 2938m, la garniture de forage s'est coincée. Après plusieurs tentatives infructueuses pour la libérer, il a été décidé de procéder au back off puis au Fuhsing.

Une partie de la garniture a pu être récupérée en surface, il a donc été nécessaire de procéder à un Side-Track à 2626m.

Une fois le Side Track est terminé le forage vertical reprend avec un décalage des étages stratigraphiques probablement dû au pendage des formations. Le maintien du puits à la verticale reste problématique puisqu'à 2960m, malgré 50% de sliding, l'inclinaison augmente de 2.6 à 4.6 deg en 9m, ce qui représente un Buid Up Rate de 3.2 deg/30m. À 3020m, dans le Silurien Argileux, le taux élevé de sliding a permis de ramener le puits à une inclinaison de 2deg. La fin de la section est annoncée à 3356m. Au total, le forage de la section aura duré 57 jours avec un ROP moyen de 2,47 m/h. 9 runs auront été nécessaires le forage de la section.

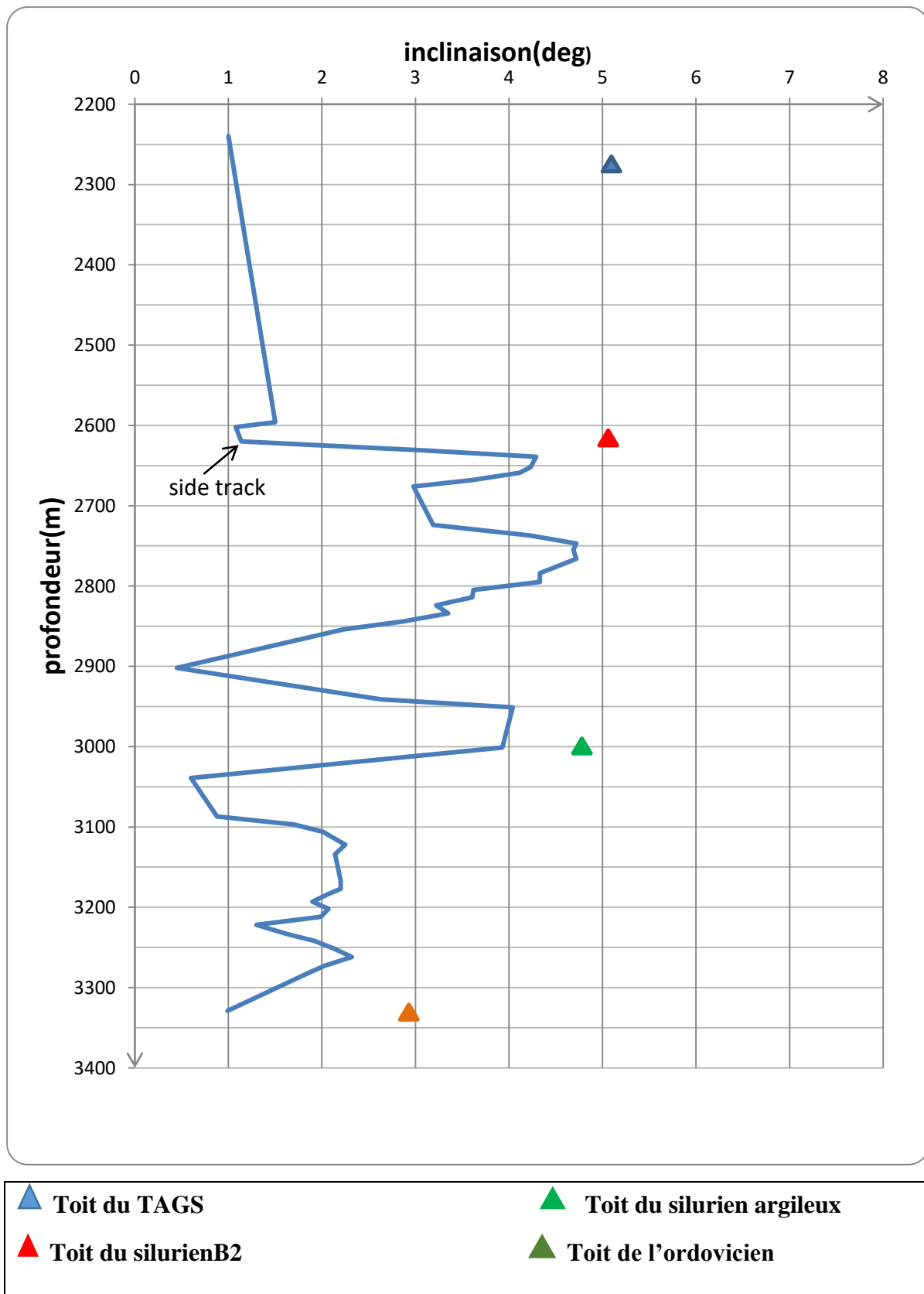


Fig. IV.1. l'inclinaison en fonction de la profondeur.

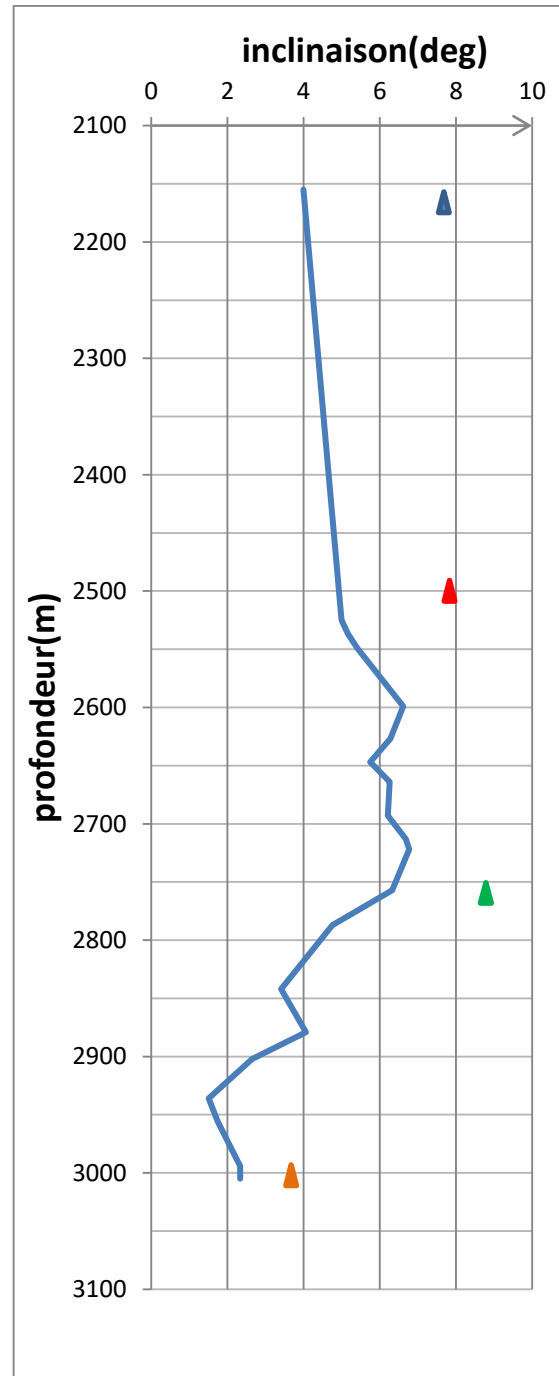
**RN 110:**

Le forage débute à la côte de 2155m dans le Lias Argileux avec une garniture rotary. A 2525m, une survey au totco est prise et révèle une inclinaison du puits de 5 deg.

Il a été décidé à ce moment de descendre une garniture directionnelle composée d'un moteur et d'un MWD afin de ramener la trajectoire du puits à la verticale. Malgré les tentatives pour réduire l'inclinaison, celle ci augmente jusqu'à 7deg à 2757,

Lorsque le Silurien Argileux est atteint, on remarque une diminution de l'inclinaison jusqu'à 2°.

Au total, le forage de la section supérieur de la phase 8 ½ aura duré 27 jours avec un ROP moyen de 2,19 m/h, 5 runs auront été nécessaires pour finir cette section dont 4 runs directionnels. L'inclinaison moyenne était 0,41° avec une inclinaison maximale de 1,72°.



- ▲ Toit du TAGS
- ▲ Toit du silurien B2
- ▲ Toit du silurien argileux
- ▲ Toit de la dalle de m'kratta

*Fig. IV.2. L'inclinaison en fonction de la profondeur*

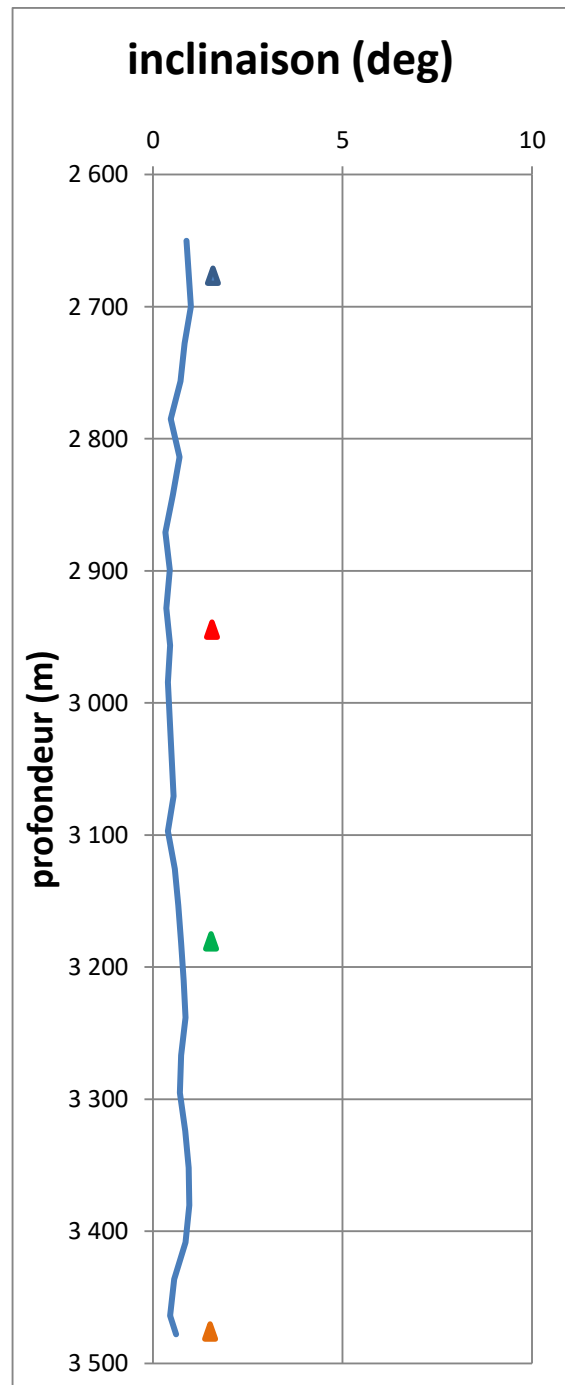
**RNSE 102 :**

Le forage débute à la côte 2650 m dans le lias argileux, l'inclinaison a été  $0.88^\circ$  ; le moteur a permis de la garder inférieure à  $1^\circ$  jusqu'à la fin de la section qui est annoncé à la cote de 3498 m avec une inclinaison de  $0,61^\circ$ .

L'inclinaison moyenne était  $0,65^\circ$  avec une inclinaison maximale de  $1^\circ$ .

Le PDM a permis de forer la partie supérieure de la phase 8<sup>n1/2</sup> jusqu'à l'Ordovicien, soit 850 m, durant 15 jours avec un ROP moyen de 2,85 m/h.

Au totale trois run étaient suffisant pour forer la partie supérieure de la phase 8<sup>n1/2</sup>



- ▲ Toit du trias
- ▲ Toit du silurien
- ▲ Toit silurien argileux
- ▲ Toit de l'ordovicien

*Fig. IV.3. L'inclinaison en fonction de la profondeur*

**RNSE 103 :**

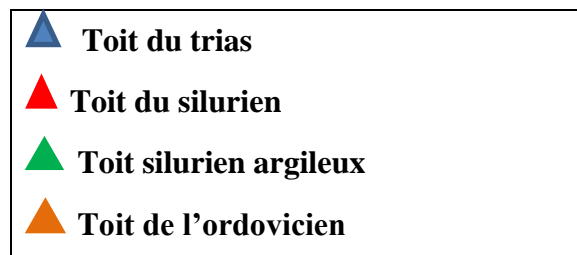
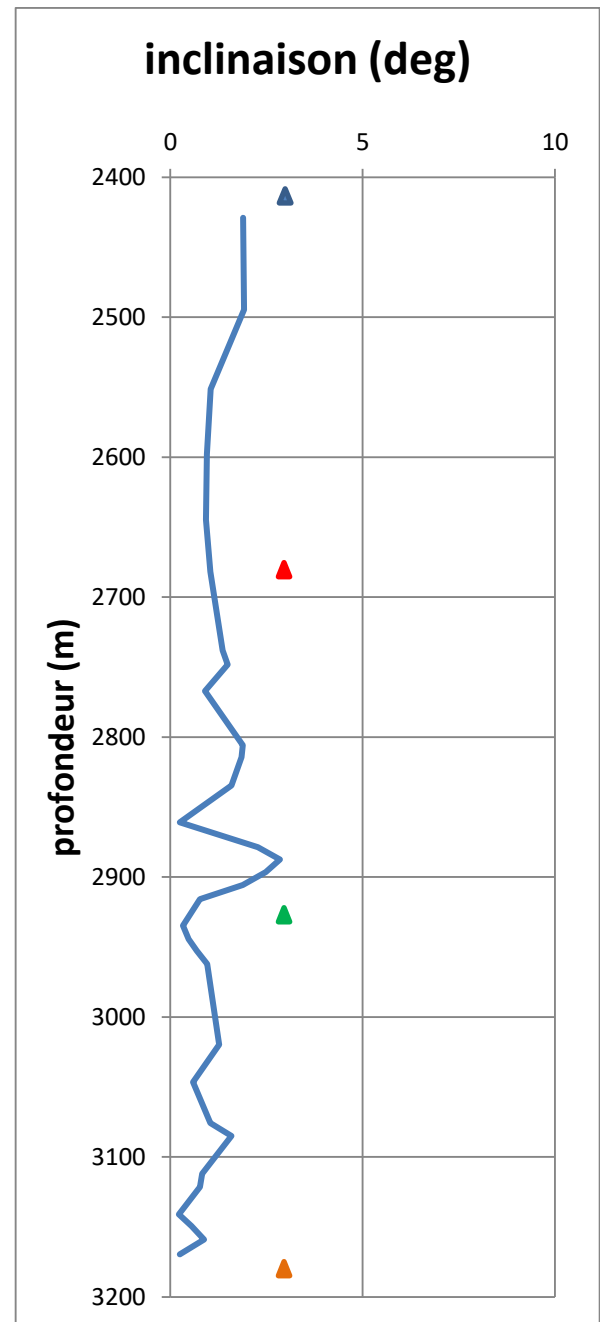
Le forage débute à la côte 2446 m dans le lias argileux, l'inclinaison était de  $1.89^\circ$  ; à la cote de 2598 m le moteur a permis de la réduire à  $0.95^\circ$ , pour ensuite rester au-dessous de  $1,5^\circ$  jusqu'au silurien ou on rencontre des problèmes de contrôle de la trajectoire, l'inclinaison atteint  $2,85^\circ$ .

La fin de section est annoncée à la côte de 3194 m avec une inclinaison de  $0,25^\circ$ .

L'inclinaison moyenne était  $1,13^\circ$  avec une inclinaison maximale de  $2,85^\circ$ .

Le PDM a permis de forer la partie supérieure de la phase  $8^{1/2}$  jusqu'à l'Ordovicien, soit 748 m, durant 22 jours avec un ROP moyen de 2,39 m/h.

Au totale trois runs étaient suffisant pour forer la partie supérieure de la phase  $8^{1/2}$ .



*Fig. IV.4. L'inclinaison en fonction de la profondeur*

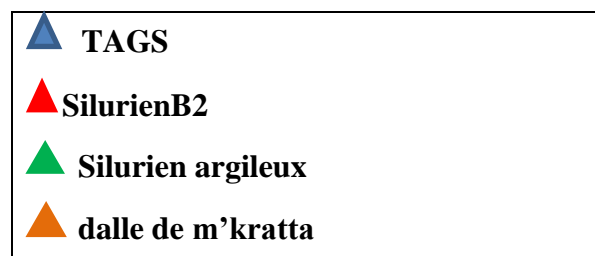
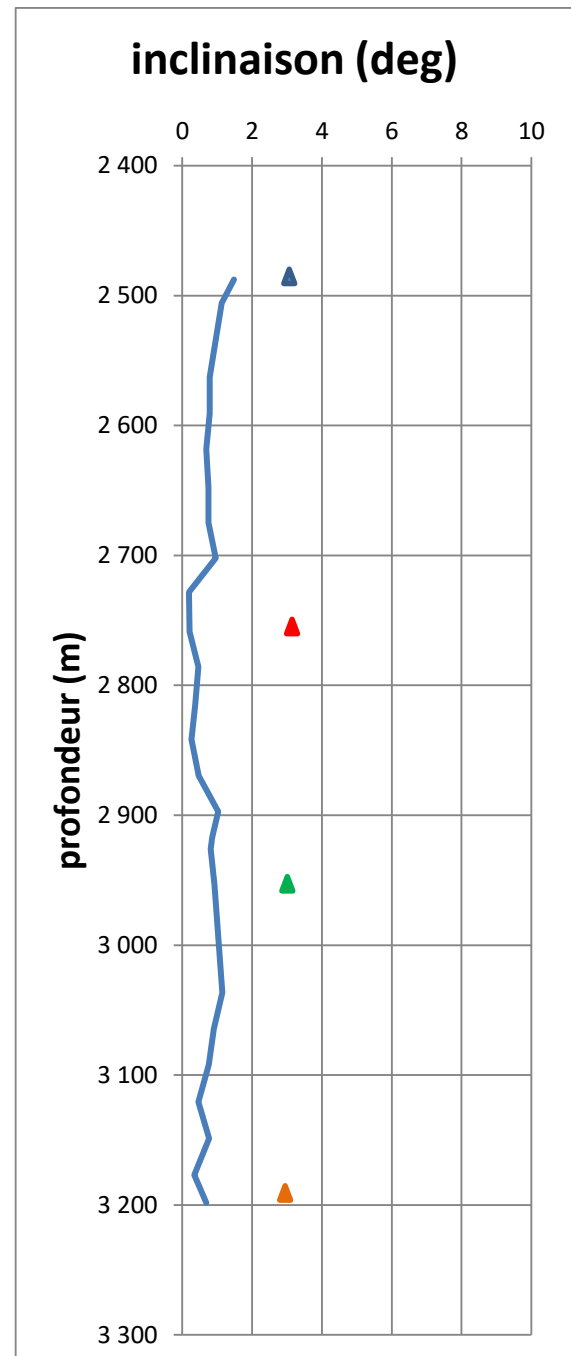
**RNSE 104 :**

Le forage débute à la côte 2513 m dans le lias argileux, l'inclinaison était  $1.48^\circ$  ; à la côte de 2563 m le moteur a permis de la réduire à  $0.79^\circ$ , pour ensuite rester au-dessous de  $1,5^\circ$  jusqu'à la fin de section qui est annoncée à la côte de 3214 m avec une inclinaison de  $0,69^\circ$ .

L'inclinaison moyenne était  $0,68^\circ$  avec une inclinaison maximale de  $1,15^\circ$  atteinte dans le silurien argileux.

L'utilisation du PDM a permis de forer la partie supérieure de la phase  $8^{1/2}$  jusqu'à l'Ordovicien, soit 748 m, durant 17 jours avec un ROP moyen de 2,71 m/h.

Au totale deux runs étaient suffisant pour forer la partie supérieure de la phase  $8^{1/2}$ .



*Fig. IV.5. L'inclinaison en fonction de la profondeur*

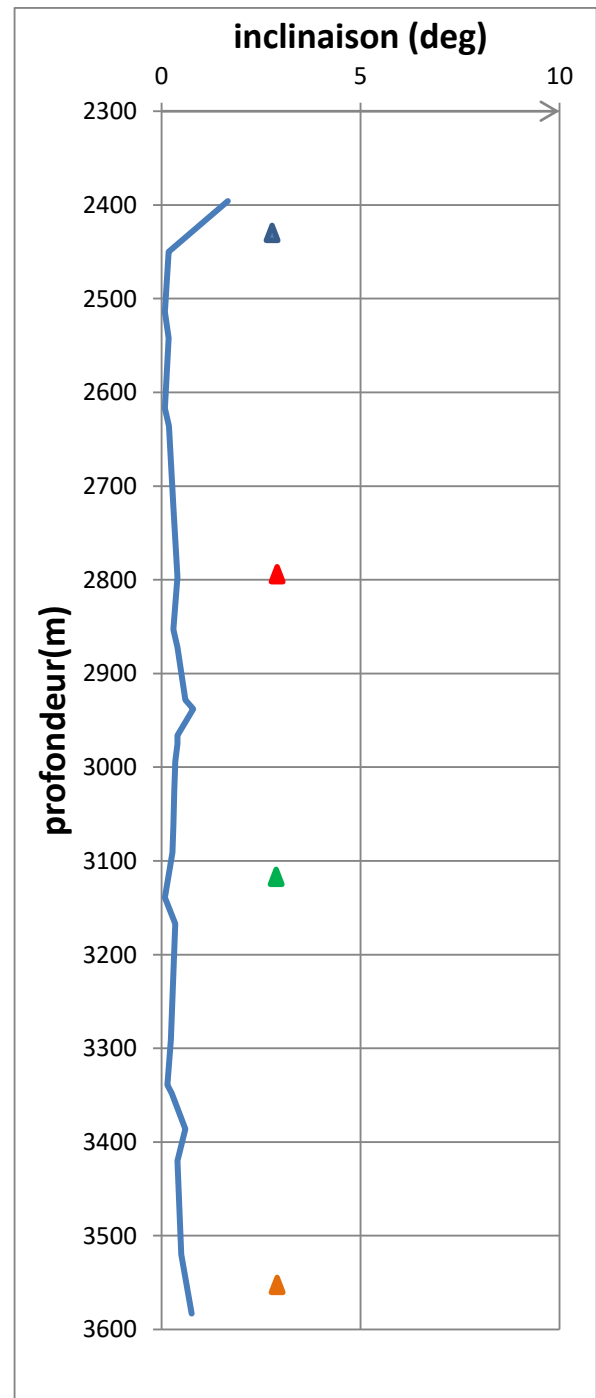
### b) Puits forés par le VertiTrak :

#### RN 112 :

Le forage débute à la côte 1923 dans le lias argileux, l'inclinaison était  $1.67^\circ$  ; à la côte de 2046 m le VertiTrack a permis de la réduire à  $0.47^\circ$ , pour ensuite rester au-dessous de  $1^\circ$  jusqu'à la fin de la section qui est annoncée à la côte de 3583 m avec une inclinaison de  $0.76^\circ$ . L'inclinaison moyenne était  $0,34^\circ$  avec une inclinaison maximale de  $0,9^\circ$ .

Le VertiTrack a permis le forage de la partie supérieure de la phase  $8^{1/2}$  jusqu'à l'Ordovicien, soit 907 m, durant 22 jours avec un ROP moyen de 2,84 m/h.

Au total trois run étaient suffisants pour forer la partie supérieure de la phase  $8^{1/2}$ .



- ▲ Toit du TAGS
- ▲ Toit du silurien B2
- ▲ Toit du silurien argileux
- ▲ Toit de la dalle de m'kratta

*Fig. IV.6. l'inclinaison en fonction de la profondeur*

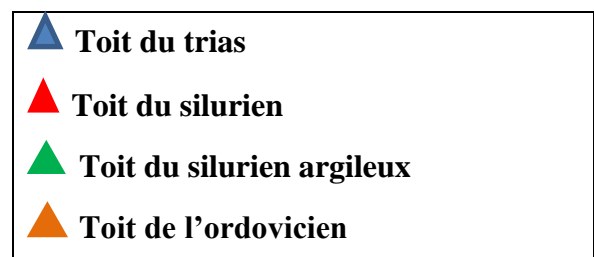
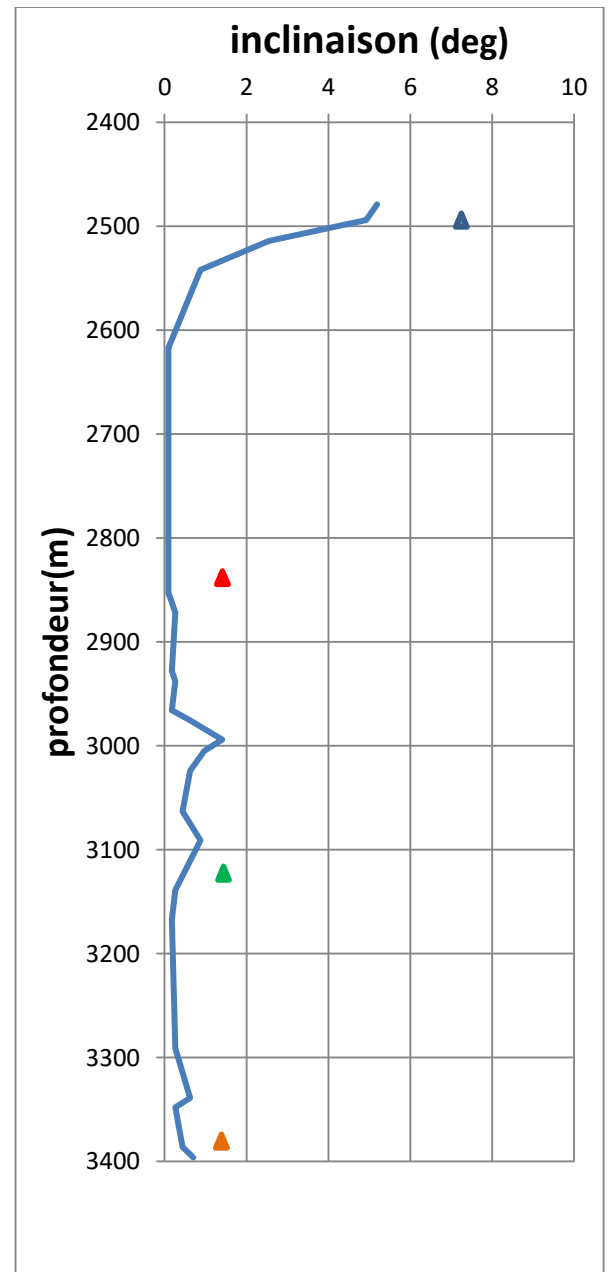
**RN 113 :**

Le forage débute à la côte 2470 dans le lias argileux, l'inclinaison était de  $5.19^\circ$  ; à la côte de 2617 m le VertiTrack a permis de la réduire à  $0.09^\circ$ , pour ensuite rester au-dessous de  $1,5^\circ$  jusqu'à La fin de la section qui est annoncée à la côte de 3404 m avec une inclinaison de  $0.76^\circ$ .

L'inclinaison moyenne était  $0,41^\circ$  avec une inclinaison maximale de  $0,41^\circ$  atteinte dans le silurien A1.

L'utilisation du VertiTrack a permis Le forage de la partie supérieure de la phase  $8^{1/2}$  jusqu'à l'Ordovicien, soit 925 m, durant 15 jours avec un ROP moyen de 3,76 m/h.

Au totale trois run étaient suffisant pour forer la partie supérieure de la phase  $8^{1/2}$



*Fig. IV.7. L'inclinaison en fonction de la profondeur*

**RN 116 :**

Le forage débute à la côte 2154 m dans le lias argileux, l'inclinaison était  $2,1^\circ$  ; à la côte de 2302 m, le VertiTrack a permis de la réduire à  $0,05^\circ$ .

Le forage s'est terminé à la côte de 3177 m avec une inclinaison de  $0,25^\circ$ . L'utilisation du VertiTrack a permis le forage de la partie supérieure de la phase 8<sup>1/2</sup> jusqu'à l'Ordovicien, soit 1023 m, durant 22 jours. Au totale quatre runs étaient suffisant pour forer la partie supérieure de la phase 8 1/2.

Le liner s'est coincé lors de sa descente à cause des problèmes d'ancrage, Après plusieurs tentatives infructueuses pour le libérer, il a été décidé de remonter la garniture et procéder au fishing. Une partie du poisson a pu être récupérée en surface, il a donc été nécessaire de procéder à un Side Track à 2166m. Une fois le Side Track est terminé le forage vertical reprend dans le TAGI. L'inclinaison a été maintenue à une valeur inférieure à  $1^\circ$  jusqu'au silurien B1 ou elle devient  $4^\circ$ , le taux élevé de sliding a permis de ramener le puits à une inclinaison de  $2^\circ$  dans le silurien A1. Dans le Silurien Argileux l'inclinaison augmente de  $2^\circ$  à  $6^\circ$  dans 100 m malgré 100% de sliding, alors il a été décidé de remonter le moteur pour descendre le VertiTrak, ce qui permet de ramener le puits à une inclinaison de  $0,7^\circ$  dans 70 m. La fin de la section est avisée à 3119 m.

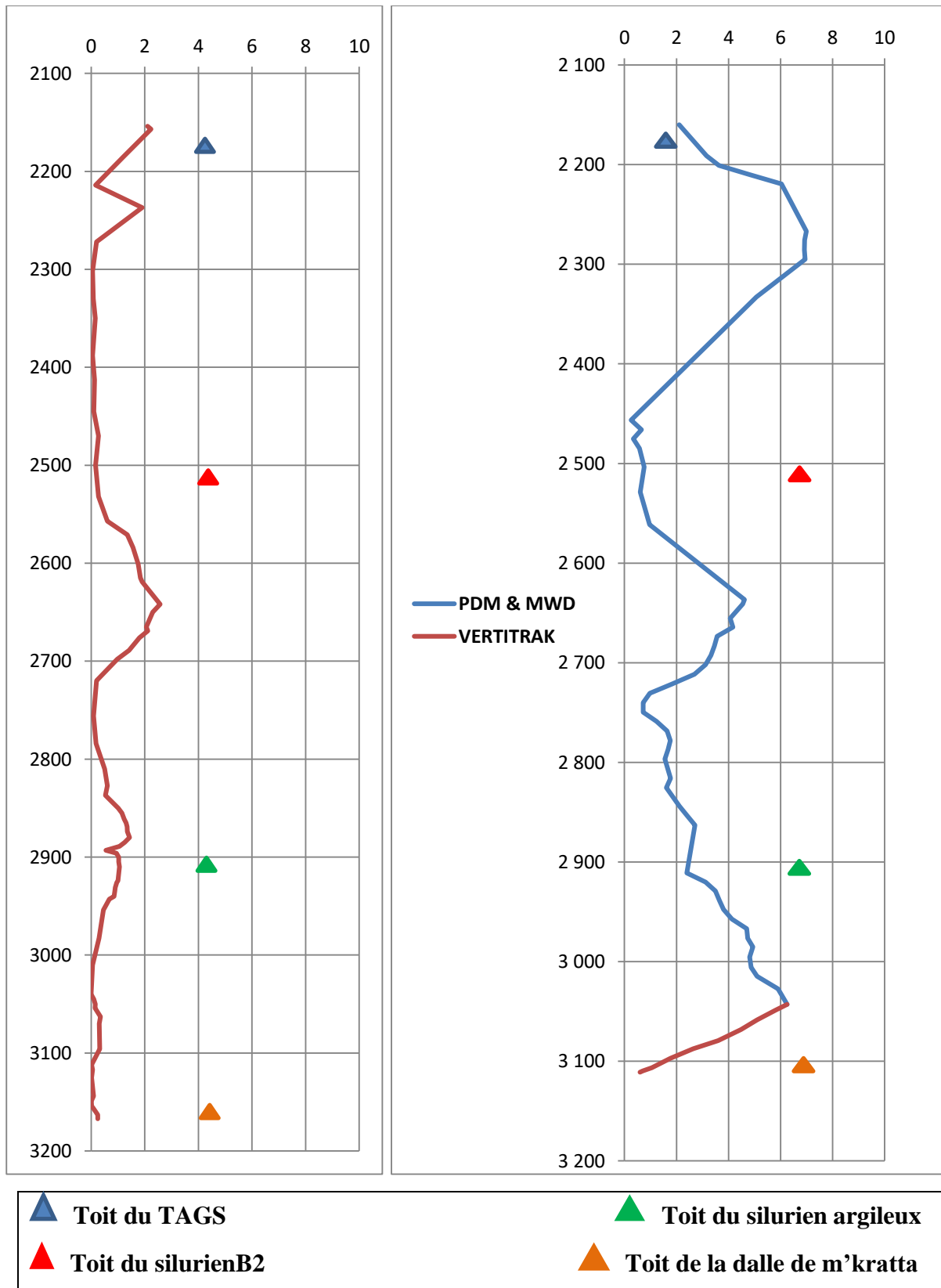


Fig. IV.8. L'inclinaison en fonction de la profondeur avant sidetrack (RN 116 a) et après sidetrack (RN 116 b)

**RN 117 :**

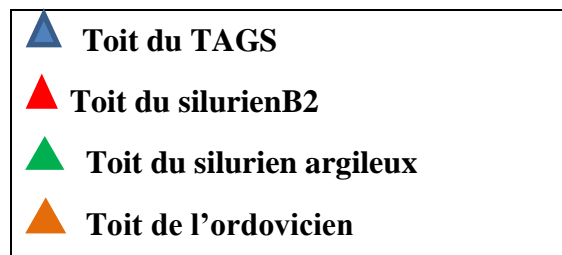
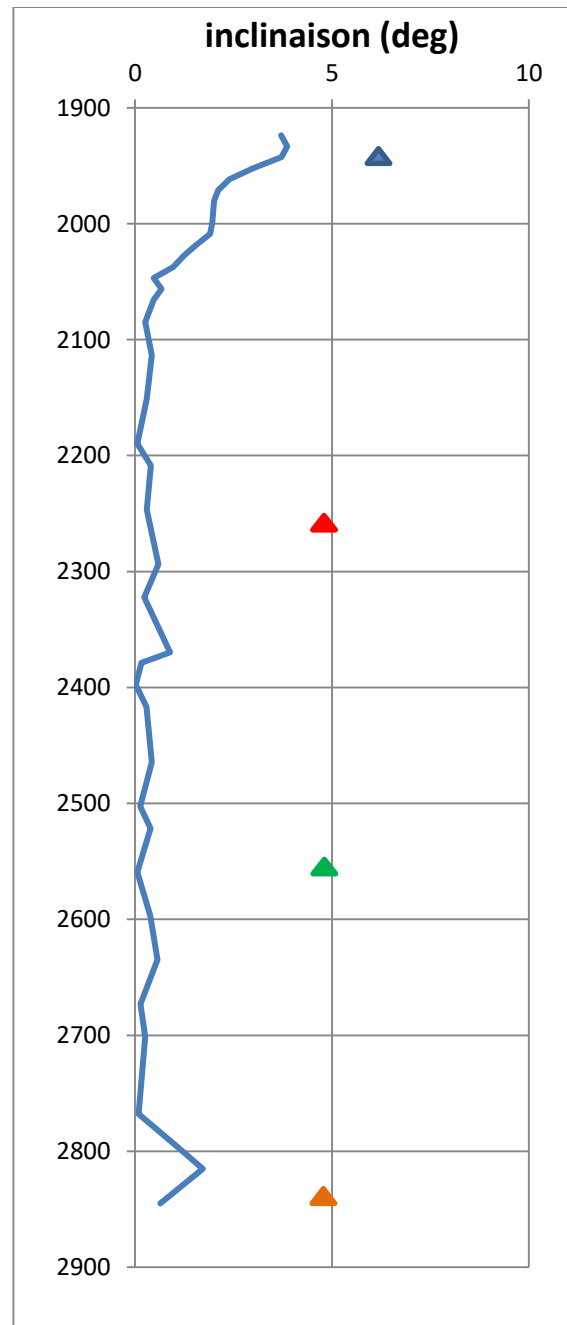
Le forage débute à la côte 1923 dans le lias argileux, l'inclinaison était de  $3.71^\circ$  ; à la côte de 2046 m, c'est-à-dire dans le trias carbonate, le VertiTrack a permis de la réduire à  $0.47^\circ$ , pour ensuite rester au-dessous de  $1^\circ$  jusqu'à 2796 m ou on observe une augmentation de l'inclinaison pour atteindre  $1,72^\circ$  à la côte de 2815 m.

La fin de section est informée à la côte de 2830 m avec une inclinaison de  $0,18^\circ$ .

L'inclinaison moyenne était  $0,41^\circ$  avec une inclinaison maximale de  $1,72^\circ$ .

Le VertiTrack a permis Le forage de la partie supérieure de la phase  $8^{1/2}$  jusqu'à l'Ordovicien, soit 907 m, durant 22 jours avec un ROP moyen de 2,84 m/h.

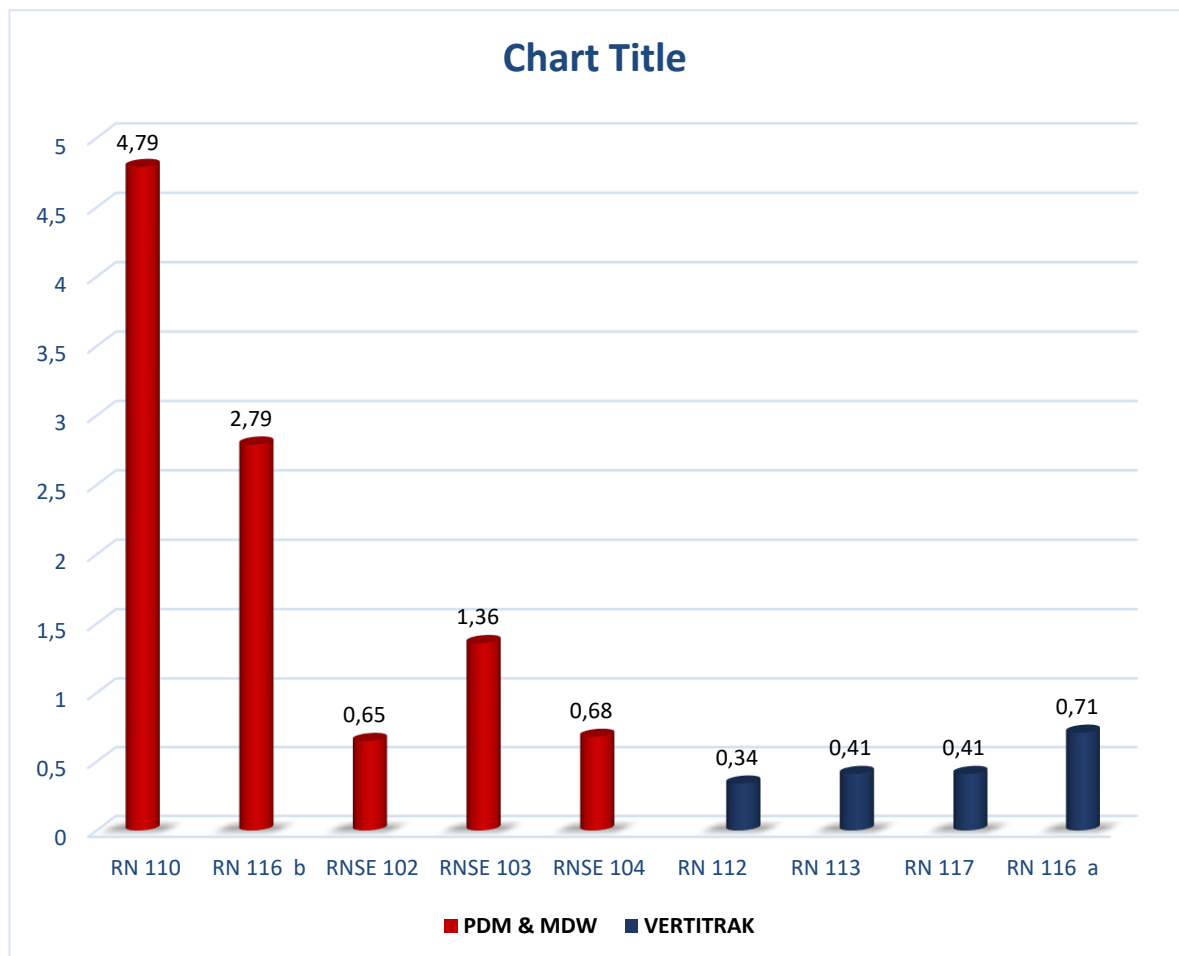
Au totale trois run étaient suffisant pour forer la partie supérieure de la phase  $8^{1/2}$ .



*Fig. IV.9. L'inclinaison en fonction de la profondeur*

**Récapitulatif :**

Type de moteur	Puits	Inclinaison moyenne	Inclinaison max
<b>VertiTrak</b>	RN 117	0,41	1,72
	RN 116 a	0,71	2,57
	RN 113	0,41	1,41
	RN 112	0,34	0,8
<b>PDM &amp; MWD</b>	RN 110	4,79	6,77
	RN 116 b	2,79	6,25
	RNSE 102	0,65	1
	RNSE 103	1,36	2,85
	RNSE 104	0,68	1,15

*Tableau 06. L'inclinaison moyenne et maximale de chaque puits**Fig. IV.10. L'inclinaison moyenne pour chaque puits*

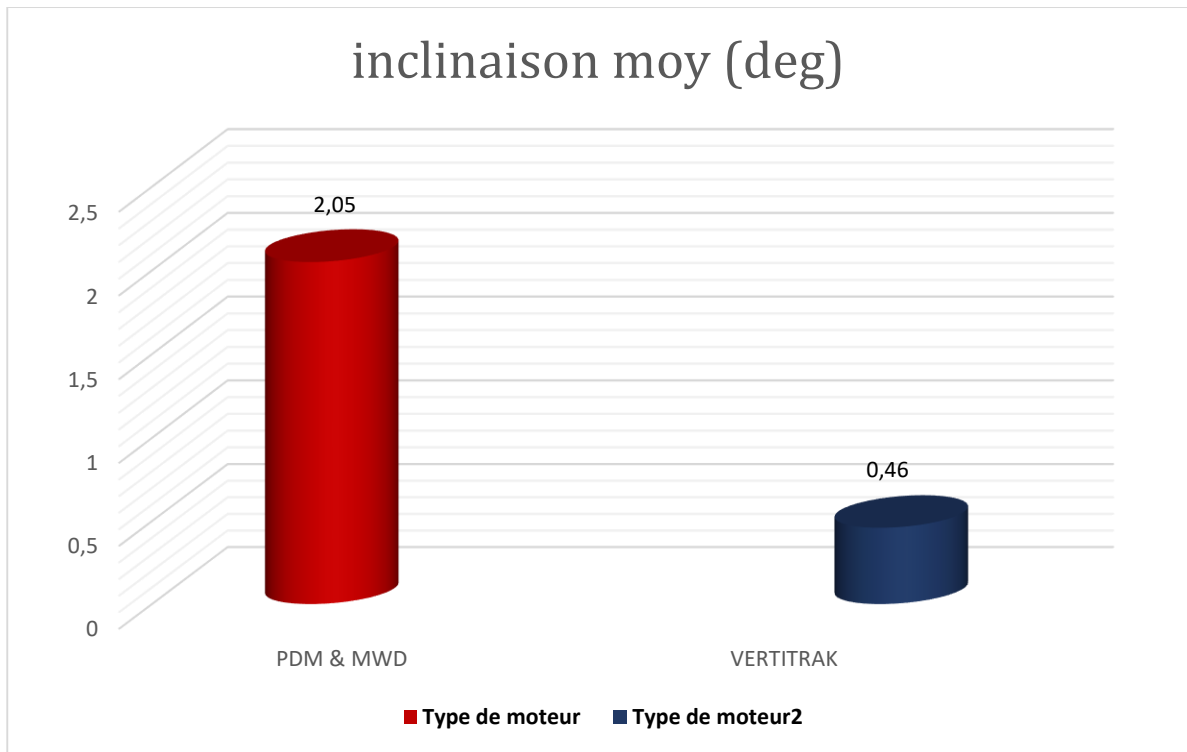


Fig. IV.11. L'inclinaison moyenne pour les 2 types de moteur.

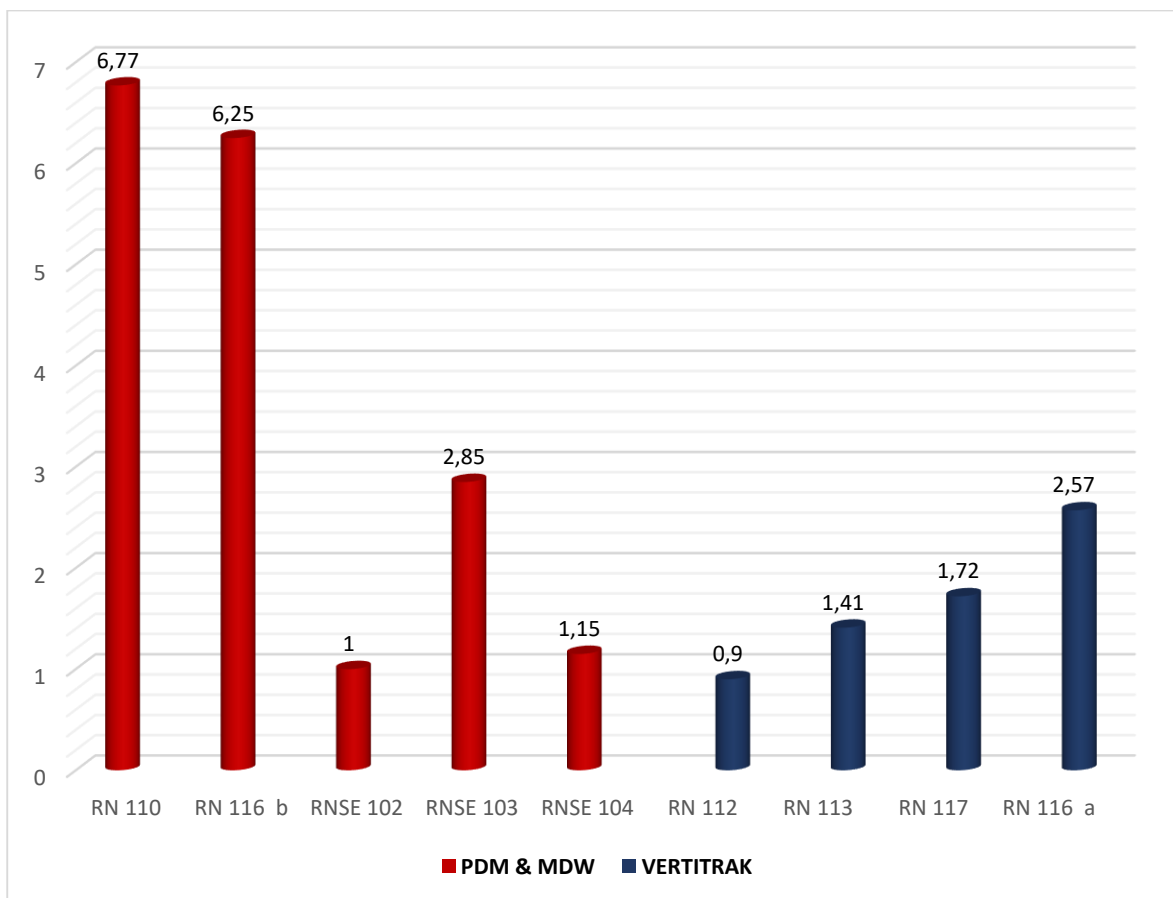
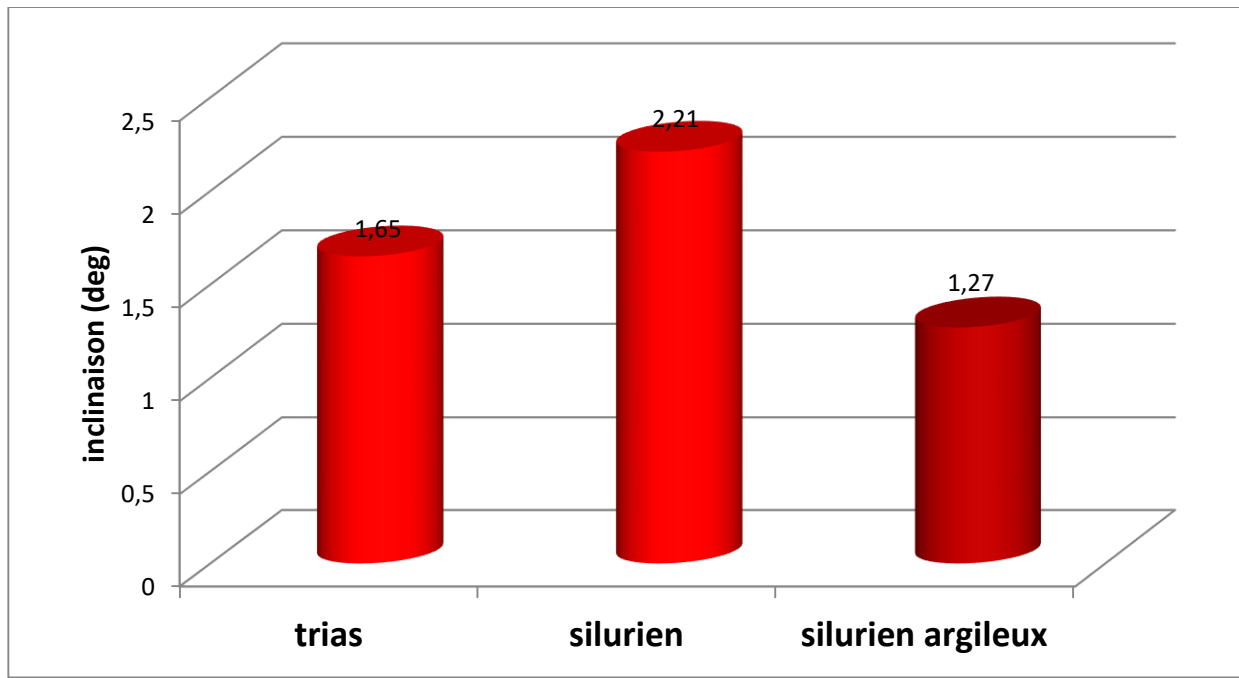
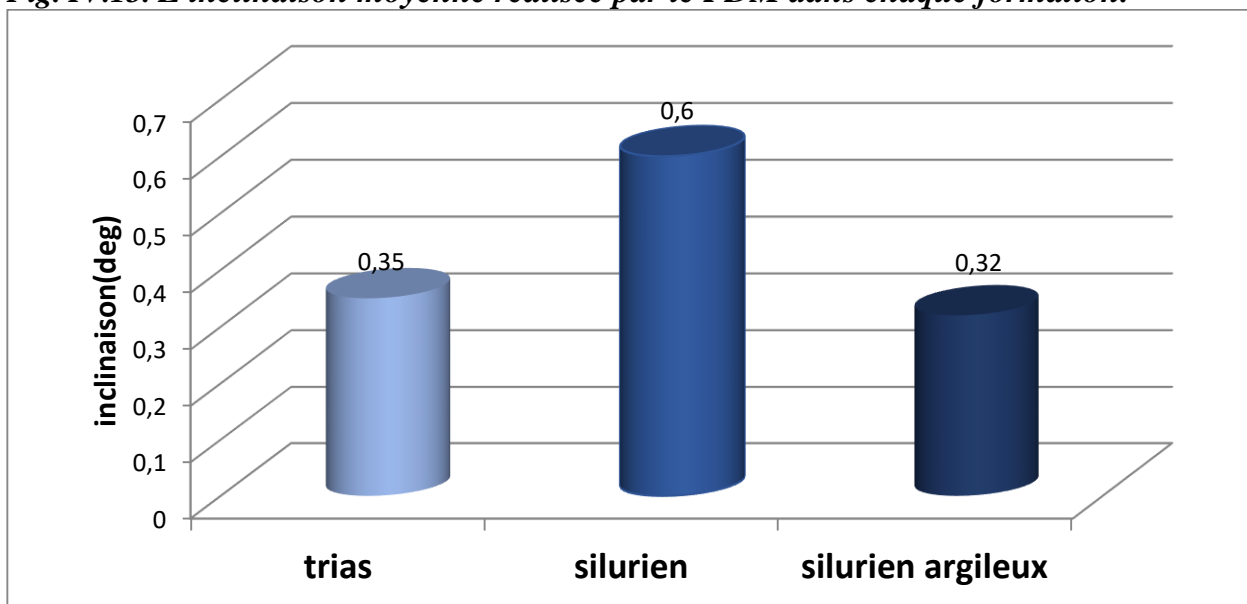


Fig. IV.12. L'inclinaison maximale pour chaque puits



*Fig. IV.13. L'inclinaison moyenne réalisée par le PDM dans chaque formation.*



*Fig. IV.14. L'inclinaison moyenne réalisée par le Vert Trak dans chaque formation*

**On remarque que:**

- L'inclinaison moyenne réalisée par le VertiTrak ( $0,46^\circ$ ) est bonne par rapport à celle réalisée par le PDM (inclinaison de  $2,05^\circ$ ).
- Le maximum d'inclinaison réalisé par le VertiTrak est de  $2,57^\circ$  dans le RN 116, d'autre part celui réalisée par le PDM est de  $6,77$  dans le RN 110.

Les tendances de puits à se dévier de la verticale se manifestent surtout dans la partie supérieure de silurien (les unités B2, B1, A2, A1, M2, M1) à cause de sa structure (alternance de grès dure et d'argile moyennement dure avec un pendage de 10-20°), mais ce n'est pas le cas dans le silurien argileux où on est arrivé à contrôler la trajectoire et à ramener le puits presque à la verticale.

### **Conclusion :**

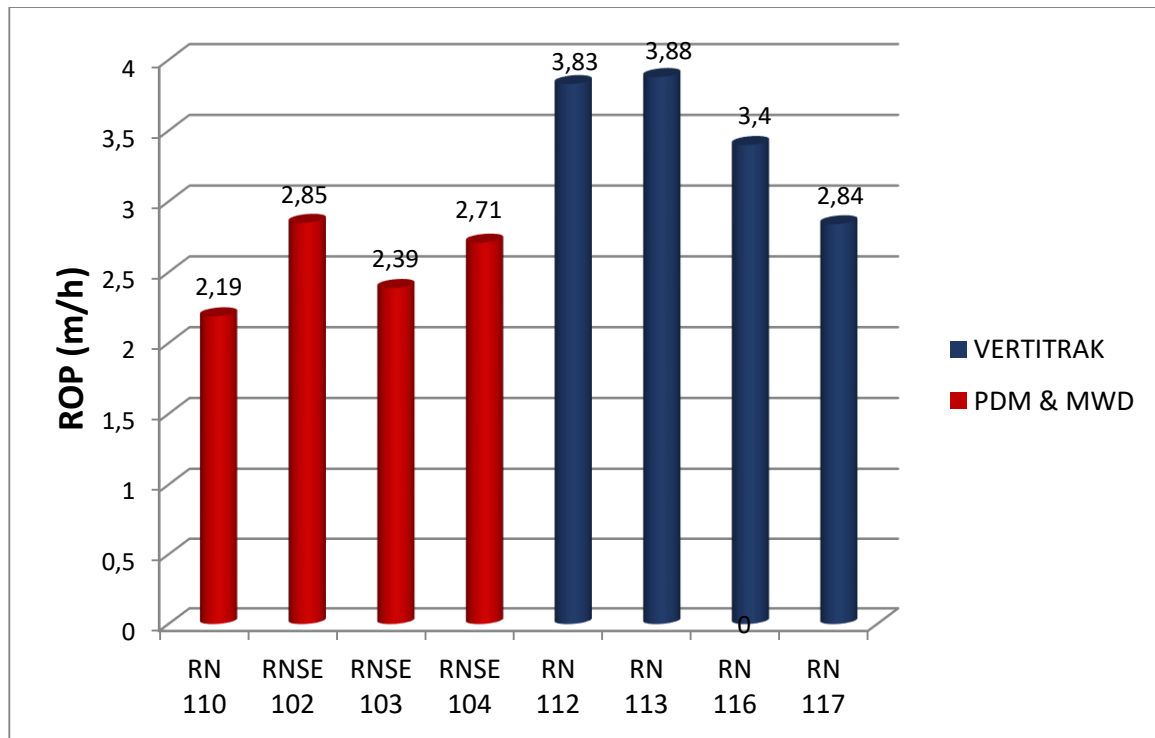
D'après les résultats de la déviation obtenus on peut conclure que Le système de forage verticale automatique est le moyen le plus efficace pour garder la verticalité du puits dans la phase 8 /2" de la région de Rhourd Nouss où il a totalement réussi en donnant une inclinaison moyenne de 0,46° avec un meilleur profil de puits (inclinaisonc de 2,57° dans tous les puits foré), et vice versa pour le PDM conventionnel qu'il a relativement réussi en donnant une inclinaison moyenne de 2,05° et un mauvais profilede puits (une inclinaison max de 6,77°), avec un grand temps de manœuvre due aux corrections de trajectoire.

### **IV.1.2. Analyse des performances :**

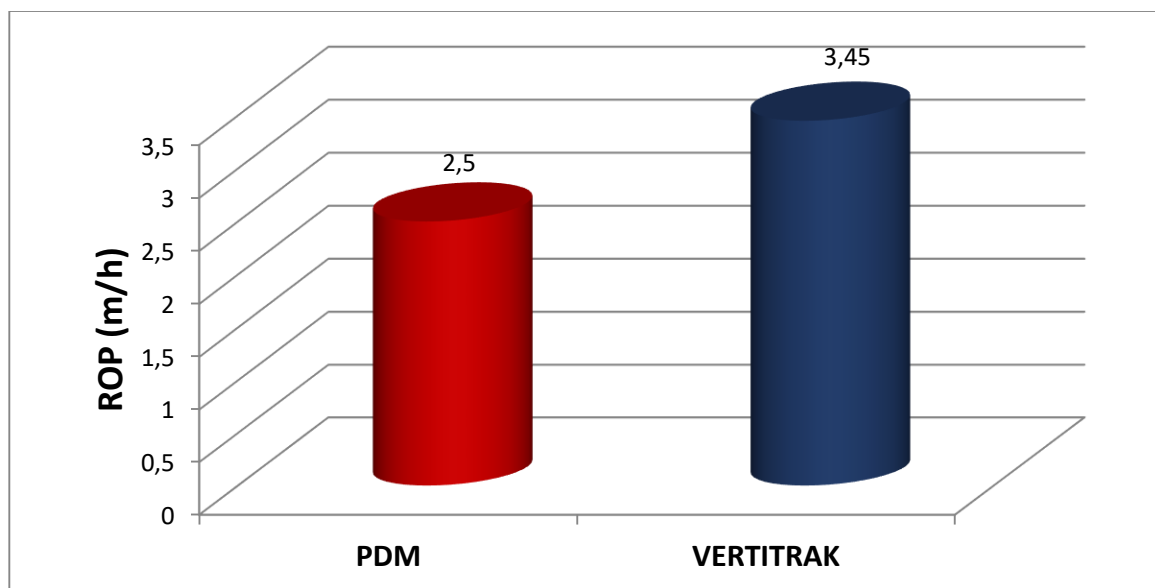
L'avancement réalisé dans chaque puits est donné dans le tableau suivant :

Type de moteur	Puits	Avancement
PDM	RN 110	<b>2,9</b>
	RNSE 102	<b>2,85</b>
	RNSE 103	<b>2,39</b>
	RNSE 104	<b>2,7</b>
VertiTrak	RN 112	<b>3,83</b>
	RN 113	<b>3,88</b>
	RN 116 a	<b>3,4</b>
	<b>RN 117</b>	<b>2,84</b>

**Tableau 07. Le ROP réalisé dans chaque puits**



*Fig. IV.15. L'avancement réalisé dans chaque puits.*



*Fig. IV.16. L'avancement réalisé par chaque type de moteur.*

**Remarque :**

- Le Vert Trak a donné un ROP plus élevé que celui donné par le PDM conventionnelle dans tous les puits forés ou il a pu atteindre 3,88 m/h.
- L'avancement moyen réalisé par le VertiTrak est de 3,45 m/h, alors que celui réalisé par le PDM est de 2,5 m/h, ce qui représente une différence avantageuse pour le VertiTrak de 0,95 m/h.

**Conclusion :**

En se basant sur les résultats des ROP obtenus on peut dire que le VertiTrak est plus performant lors du forage de la phase en vigueur, où son ROP élevé nous permet de gagner une moyenne de 11 heures chaque 100 mètres forés ce qui le donne l'avantage de forer la section en temps plus court, de pouvoir forer un intervalle plus long avant sa fatigue, et par conséquent moins de runs, et un temps de manœuvre minimal.

**IV.1.3. Analyse économique :**

Comme on l'a vu dans l'étude des performances et de déviation le VertiTrak a un certain avantage sur les PDM grâce à son avancement élevé et sa déviation modérée, mais la question qui reste posée est-ce-que cet avantage pourrait justifier l'investissement supplémentaire qu'implique l'utilisation de VertiTrak.

Pour répondre à cette question on a analysé les prix de revient du mètre foré sur plusieurs puits de l'échantillon. Certains puits n'ont pas été pris en considération en raison de problème de sidetrack. Les puits qui ont été étudiés sont au nombre de 8.

Le prix du mètre foré a été calculé en prenant en compte le prix de location de l'appareil pendant toute la durée des runs, ce qui comprend le temps de forage et de manœuvres, le prix de l'outil et le prix de l'utilisation du moteur ce dernier comprend le prix de forage, qui est calculé en fonction du nombre d'heure de circulation, de prix de location par jour, et de prix de l'opérateur qui accompagne celle-ci et qui est facturé à la journée. La formule utilisée pour ce calcul est la suivante [7] :

$$P_m = \frac{J_{run} \times P_{location\ appareil} + P_{outil} + \text{Prix du moteur}}{I}$$

**Pour le PDM :**

$$\text{prix du moteur} = J_{runs} \times (P_{opérateur} + P_{location}) + T_{circ} \times P_{unitaire}$$

Avec:

- $J_{run}$ : nombre de jours des runs incluant le temps de forage et de manœuvres.
- $T_{circ}$ : temps de circulation lors du forage avec le PDM.
- $P_{opérateur}$ : prix des ingénieurs accompagnant le moteur et le MWD.
- $P_{unitaire}$ : prix de location du moteur et de MWD par heure de circulation.
- $P_{location}$ : prix de location du moteur et de MWD par jour lors du forage.
- $I$ : longueur foré.

**Et pour le VertiTrak :**

$$\text{prix du moteur} = J_{runs} \times (P_{opérateur} + P_{location})$$

- $J_{run}$ : nombre de jours des runs incluant le temps de forage et de manœuvres.
- $P_{opérateur}$ : prix des ingénieurs accompagnant le VertiTrak.
- $P_{location}$ : prix de location du VertiTrak par jour lors du forage.

Les prix unitaires de facturation pour l'appareil, les ingénieurs, le moteur, le MWD et le VertiTrak sont dans le tableau suivant [7] :

Indication	Prix unitaire
appareille	37300,4 \$/jour
PDM	450 \$/jour
	435 \$/ hr circulation
opérateurs de PDM	2400 \$/jour
MWD	500 \$/jour
	50 \$/hr circulation
opérateurs de MWD	1000 \$/jour
VertiTrak	19348 \$/jour
opérateurs de VertiTrak	2862 \$/jour

**Tableau 08.le prix de facturation de matériel**

- Le prix journalier de l'appareil a été calculé sur la base du prix de location de l'appareil ENF 17.
- Le prix de référence du PDM est le prix en vigueur durant le mois d'Avril 2011 pour les moteurs de Schlumberger.
- Le prix de l'opérateur est celui des ingénieurs de Schlumberger.

Les données économiques des puits utilisés dans cette analyse et les résultats du calcul sont résumées dans les tableaux suivants [7]:

### VertiTrak :

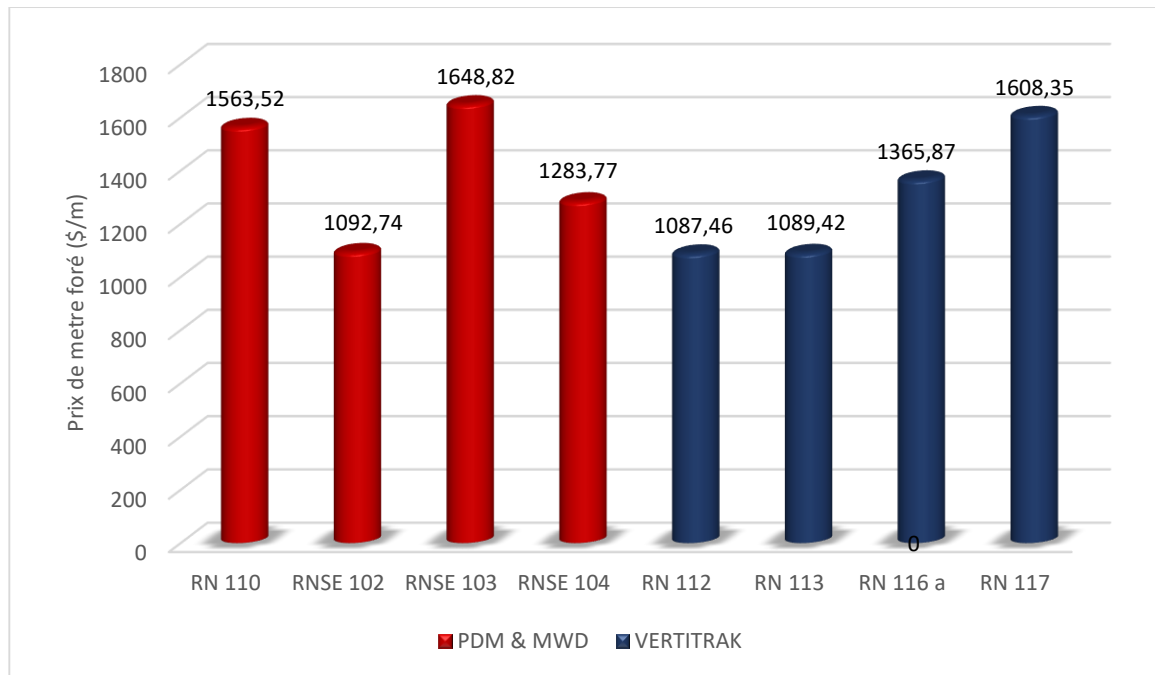
	RN 112	RN 113	RN 116 a	RN 117
<b>durée de la phase (jours)</b>	19	15	22	23
<b>métrage (m)</b>	1186	917	1015	932
<b>cout de l'appareil (\$/j)</b>	37300,40	37300,40	37300,40	37300,40
<b>cout de VertiTrak (\$)</b>	422009	333165	488642	510853
<b>cout des outils de forage (\$)</b>	159012	106330	77113	130226
<b>cout de la phase (\$)</b>	1236319,6	956836	132452 ,8	1434335,2
<b>prix de mètre foré (\$)</b>	<b>1087,46</b>	<b>1089,42</b>	<b>1365,87</b>	<b>1608,35</b>

**Tableau09. Analyse économique des puits forés par le VertiTrak.**

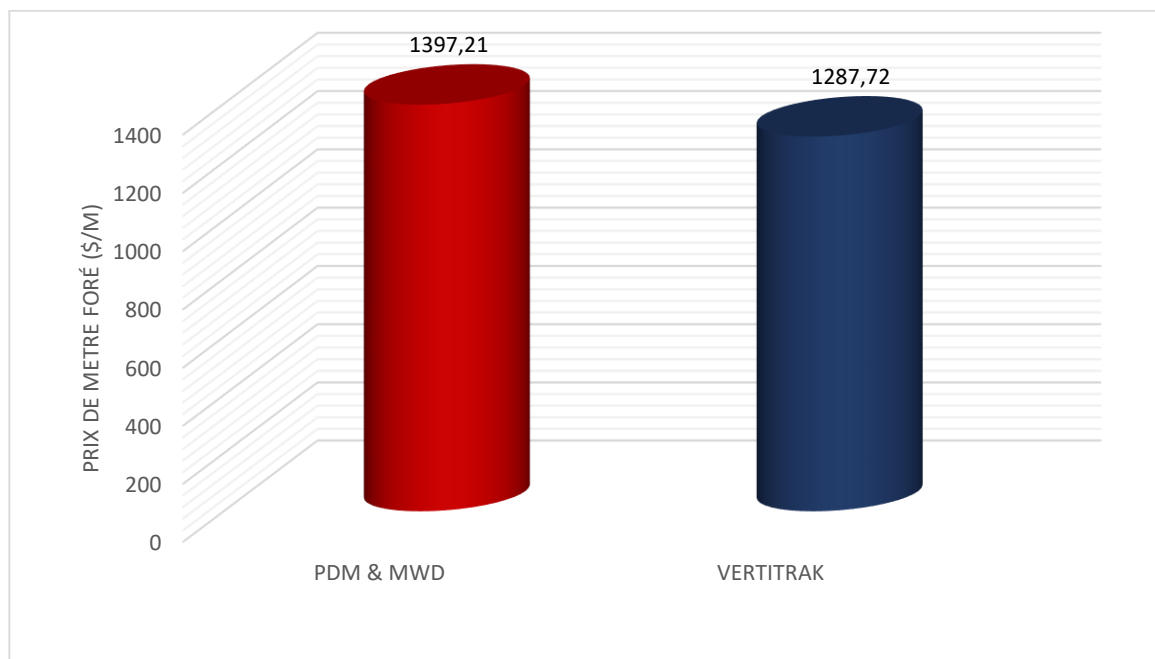
### PDM & MWD :

	RN110	RNSE 102	RNSE 103	RNSE 104
<b>durée de la phase (jours)</b>	27	15	22	17
<b>Métrage (m)</b>	898	850	748	701
<b>cout de l'appareil (\$/j)</b>	37300,40	37300,40	37300,40	37300,40
<b>cout de PDM &amp; MWD (\$)</b>	269974	210619	282270	197140
<b>cout des outils de forage (\$)</b>	26957	58705	57370	68680
<b>cout de la phase (\$)</b>	140404 ,80	928830	1260248,80	841676,80
<b>prix de mètre foré (\$/m)</b>	<b>1563,52</b>	<b>1092,74</b>	<b>1684,82</b>	<b>1283,77</b>

**Tableau 10. Analyse économique des puits forés par le PDM conventionnelle**



*Fig. IV.17. Le prix de mètre foré dans chaque puits.*



*Fig. IV.18. Prix de mètre foré pour chaque type de moteur.*

**On remarque que :**

- Le prix minimal donné par le VertiTrak est de 1087 \$/m dans le puits RN 112, et celui donné par le PDM est de 1092 \$/m dans le puits RNSE 102.
- Le VertiTrak a permis d’avoir un prix moyen du mètre foré de 1287\$/m, alors que le PDM a donné un prix moyen de mètre foré de 1397\$/m soit un prix supérieur à celui de VRT de près de 1

❖ **Conclusion Générale:**

Le forage des puits verticaux de la région de Rhourd nous rencontre souvent des problèmes du maintien de la verticalité ou l'outil tend à se dévier et peut créer des problèmes.

Les résultats obtenus par cette étude ont démontré que l'influence des formations Silurien et le pendage des couches sur le profil du puits nous a donné une inclinaison indésirable lors l'utilisation du BHA ou PDM par rapport au Vertitrak. Nous avons une bonne idée sur cette formation dans chaque puits avec de telles donnée nous avons pu établir une étude de contrôle qui a pour but de garder la trajectoire du puits pour assurer la cible.

Il apparait que le VertiTrak est plus rentable que le PDM grâce à leur avantage technique qui permet d'obtenir un avancement élevé et par conséquent d'économiser le temps de forage ce qui implique la diminution de prix de mètre foré.

 **Références:**

- [1]- “ Problèmes de trou”, Division forage, 2004 SLIMANI. A
- [2]- Le forage, technique d’exploitations pétrolières, JP. NYGUEN édition 93.
- [3]- D. Degoluer, Nacnaughton, Report on a reservoir Engineering Study of Certain Fields in Rhourde Nous Region-ALGERIA, (February 1999).
- [4]- Directional Drilling Petroleum Engineering and Development Studies.
- [5]- Baker Hughes, Drilling Engineering WORK.
- [6]- Procédure de forage de Rhourde Nous.
- [7]- Baker Hughes ; Application du VetriTrak au champ Rhourd Nous Phase 8 ½” – 6 ¾” VertiTrak 2009.

