

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSIEGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des hydrocarbures et de la chimie  
Département Gisements Miniers et Pétroliers  
Mémoire de fin d'étude  
En vue de l'obtention du diplôme :

**MASTER**

Elaboré par :

HABCHI Mabrouk

**Filière** : hydrocarbures

**Option** : Génie pétrolier : Forage des puits des hydrocarbures

**Thème** :

---

**Étude des paramètres affectant le profil normal des puits verticaux,  
l'utilisation d'un moteur PDM est-elle un remède ?**

---

**Encadré Par** :

**AZZOUG Mohamed Amine**

**Année Universitaire : 2020/2021**

# Sommaire

1. Introduction .....	6
2. Situation géologique de la région Rhourd Nouss : .....	7
2.1. Géologie : .....	7
2.2. Structure : .....	7
3. Identification de la phase 8”1/2 en question : .....	9
3.1. Pression de gisement : .....	9
3.2. Risque et conditions particulières de forage : .....	10
4. Equipements utilisés : .....	11
4.1. Stabilisateurs : .....	11
4.2. Moteur à Déplacement Positif PDM : .....	12
4.2.1. Composition : .....	12
4.2.2. Le principe de fonctionnement des moteur PDM : .....	19
4.3. Moteur avec Bent-Housing : .....	21
4.4. Système de forage vertical automatique : .....	23
4.4.1. Particularité de composition du système (VertiTrak) : .....	23
4.4.2. X-treme moteur : .....	23
4.4.3. Les bras mobiles (Steering Ribs) : .....	24
4.4.4. La pompe hydraulique : .....	24
4.4.5. La turbine et alternateur : .....	24
4.4.6. Le pulser MWD : .....	24
4.4.7. Principe de fonctionnement de système : .....	24
4.5. Les équipements de mesure : .....	26
4.5.1. Inclinomètre TOTCO : .....	26
4.5.2. MWD (Measurement While Drilling): .....	27
5. Problème de déviation : .....	29
5.1. Avant-propos : .....	29

5.2.	Explication théorique :	29
5.3.	Théorie de formation anisotrope :	29
5.4.	Théorie de la différence de vitesse d'avancement:	30
5.5.	Théorie de miniature de Whipstock :	31
5.6.	Théorie de moment aux masses tiges :	32
6.	Les causes de la déviation :	34
6.1.	Problème de formation :	34
6.1.1.	Les déformations cassantes :	34
6.1.2.	Diaclases, fissures et fentes de tension :	34
6.1.3.	Les failles :	34
6.1.4.	Déformation souples (Les plis):	35
6.1.5.	Pendage des couches :	35
6.1.6.	Contrainte due à la formation : (mécaniques, tectoniques) :	36
6.1.7.	Les alternances des formations tendres et dures :	36
6.2.	Désignation de la BHA :	37
6.3.	Le type de l'outil :	37
6.4.	Le poids sur l'outil :	38
7.	Les conséquences de la déviation :	38
7.1.	Cible non rencontré :	38
7.2.	Le coincement :	38
7.3.	Formation des Dog-Legs :	40
7.4.	La formation des Key-Seat :	41
7.5.	L'augmentation du torque et du Drag :	42
7.6.	Une mauvaise géométrie de puits :	43
7.7.	Frottement de la garniture de forage :	45
7.8.	La fatigue des tiges de forage :	45
8.	Les remèdes :	45
8.1.	L'utilisation d'une garniture appropriée :	45
8.1.1.	Garnitures lisses (Slick Assembly) :	45
8.1.2.	Garniture pendulaire :	46
8.1.3.	Garniture Packed-Hole.....	50
8.2.	L'utilisation d'un moteur PDM conventionnel :	53
8.2.1.	Mode d'utilisation :	53

8.2.2. Sélection du moteur :.....	54
8.3. Utilisation de VertiTrak : .....	56
8.3.1. Mode opératoire :.....	56
8.3.2. Réglage du mode à partir de la surface :.....	56
9. Etude comparative :.....	58
9.1. Introduction :.....	58
9.2. Présentation des puits étudiés :.....	58
9.3. Analyse des données :.....	60
9.4. Analyse de la déviation :.....	60
9.4.1. Puits forés à l'aide de PDM conventionnel :.....	60
9.4.2. Puits forés par le VertiTrak :.....	65
9.4.3. Récapitulatif :.....	70
9.4.4. Conclusion :.....	73
9.5. Analyse des performances :.....	73
9.6. Analyse économique :.....	75
10. Conclusion générale :.....	80
11. Recommandation :.....	80
12. Liste des figures :.....	82



# Remerciements

*Je tiens, tous d'abord à remercier en premier lieu et avant tous le grâce à ALLAH le tout puissant, pour m'avoir donné autant de courage, de patience et de volonté pour mener à bien ce modeste travail.*

*Je remercie infiniment tous qui m'a aidé de près et de loin d'avoir compléter ce travail et dépasser tous les obstacles.*

*Je présente mes sincères remerciements à mon adorable Encadrant Mr. AZZOUG Mohamed Amine, Enseignant, FHC-UMBB/Superviseur Forage, SONATRACH qui n'a pas cessé de me donner les conseils et les bonnes orientations et me prive pas de son temps malgré ses occupations.*

*Ma reconnaissance va aussi à tous ceux qui ont collaboré à ma Formation en particulier les enseignants du département gisements miniers et pétroliers, de la faculté des hydrocarbures et de la chimie.*

*Je tiens à remercier l'enseignant et responsable de Master Forage, Professeur MELLAÏ Abderrahmane pour son sérieux et sa formation enrichissante.*

*J'exprime également mes profonds remerciements aux membres du jury, pour avoir consenti de discuter le contenu de mon travail. J'ai eu cette chance inouïe de les avoir comme enseignants. Je leur serai toujours reconnaissante.*

*Je ne pourrais terminer sans remercier mes parents, ma famille et mes amis qui m'a soutenu et encouragé pour terminer ce travail*



# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*A celui qui a été toujours la source d'inspiration  
et de courage... merci PÈRE.*

*A celle qui a inséré le goût de la vie et le sens de  
la responsabilité... merci MÈRE.*

*A mes chères sœurs : Fatiha, et la petite Assia.*

*A mes chers frères : Djaber, Mohamed, Sadik, et Abdesalam*

*A mes chers copains de chambre : Toufik, Houssam,  
Mohamed, Issam, et Ismail.*

*A tous mes amis pour leur soutien particulièrement :*

*Halim, Haffa, Alla, Rachid,*

*Boukhalfa, Iakhdar, Zian, Azzedine, et Abdenour*

*A mes chers enseignants de lycée surtout Mr. DJENIDI Redouane*

*Mabrouk*

## 1. Introduction

L'indésirable déviation qui se manifeste particulièrement dans la phase 8"1/2 des puits de gaz de la région de Rhourd Nouss reste le premier souci de la société nationale **SONATRACH**, qui cherche toujours à atteindre l'objectif avec moins de problèmes, surtout la tortuosité des trous, Key Seat et parfois le coincement de la garniture, et cela représente un défi pour l'entreprise qui essaie toujours à les combattre en apportant des technologies permettant de minimiser leur importance.

Parmi ces technologies apportées on trouve le **Moteur à Déplacement Positif PDM** conventionnel et le système de forage vertical automatique qui ont donnés un grand privilège au forage de la section 8"1/2.

Ce succès n'aurait jamais existé sans les développements technologiques et l'ajout de certaines innovations qui ont considérablement réduit les délais et les coûts de forage des puits, tel que les outils **MWD Measurement While Drilling** qui ont permis de limiter le nombre des manœuvres nécessaires, et de réduire le coût du mètre foré. C'est pour cela, de nombreuses recherches ont été menées sur les moteurs et ont conduit au développement d'une large gamme de moteur destinée à opérer dans des différentes régions.

Ce travail vise 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, 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 des recommandations sur l'utilisation des moteurs dans cette phase.

## **2. Situation géologique de la région Rhourd Nouss :**

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

### **2.1. Géologie :**

La région de Rhourd Nouss se situe en bordure sud du bassin triasique et culmine sur le horst Rhourd 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. Rhourd 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.

### **2.2. Structure :**

L'histoire structurale de la région de Rhourd Nouss a une relation directe avec celle du môle d'Amguid. Il a d'ailleurs subi d'intenses transformations à travers les âges géologiques et a façonné à son tour une bonne partie de la plate-forme saharienne. Il est caractérisé par une grande mobilité et a fortement joué lors des différentes phases tectoniques, notamment au cours de la phase autrichienne du Crétacé.

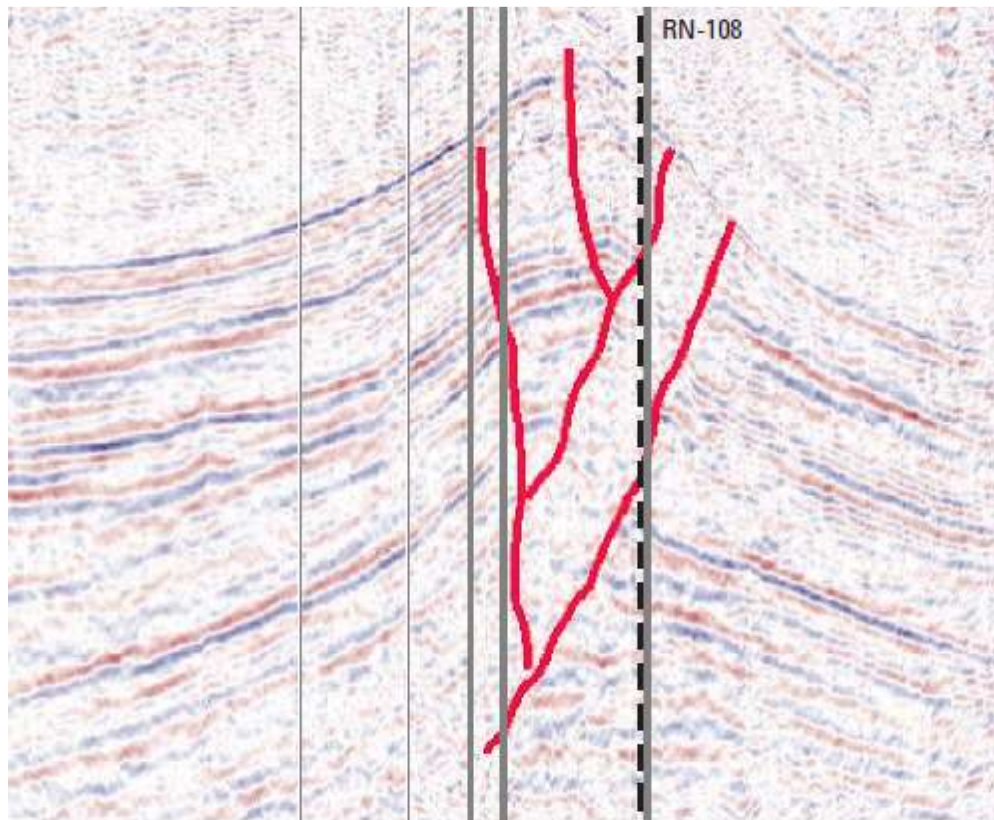
Deux directions structurales sont dominantes dans la région :

- La direction N-S qui correspond à l'orientation de la faille de Ramade et de la structure de Hamra au Sud.
- La direction NE-SO qui est dominante et est soulignée par une série d'accidents allant jusqu'au bassin de Berkine à l'Est.

L'orientation N-S est observée sur les anticlinaux de Rhourd Adra Sud, Rhourd Nouss SE, et où les structures de Draa Allal, Rhourd Nouss SO et Rhourd Adra sont associées à des accidents NE-SO. Quant à la structure très accusée de Rhourd Nouss centre, elle se situe à l'intersection d'accidents orientés suivant les deux directions, ce

qui explique probablement son ampleur exceptionnelle avec une fermeture structurale de plus de 1 000 mètres.

La figure 1 montre le type de complexité structurale apparaissant sur Rhourd Nouss. Au cours du Tertiaire, d'importantes déformations (phase atlasique) ont affecté le secteur, en particulier le long de l'axe NE-SO de Rhourd Adrra. Les accidents subméridiens ont alors joué en décrochement sénestre, et la géométrie des pièges crétacés a été modifiée.



**Figure 1: Section sismique illustrant l'aspect structural de Rhourd Nouss centre**

### 3. Identification de la phase 8''1/2 en question :

La phase 8''1/2 est prévue pour être forée en vertical à travers les formations du Trias et du Silurien. Sa longueur diffère en fonction de l'emplacement du puits. Celle-ci peut varier de 800 à plus de 1000m. Concernant le Trias, la lithologie consiste en une succession de couches d'argiles Silteuse et Dolomitique et de Grès.

Le Silurien est divisé en 2 parties : le Silurien Argilo-Gréseux et le Silurien inférieur. Ce dernier se compose principalement d'argile et se caractérise par une bonne forabilité au PDC.

Le Silurien Argilo-Gréseux consiste en une alternance de grès fins à moyens et d'argiles silteuse. L'expérience montre que cette formation est particulièrement abrasive avec des ROP variant de 1 à 2m/hr.

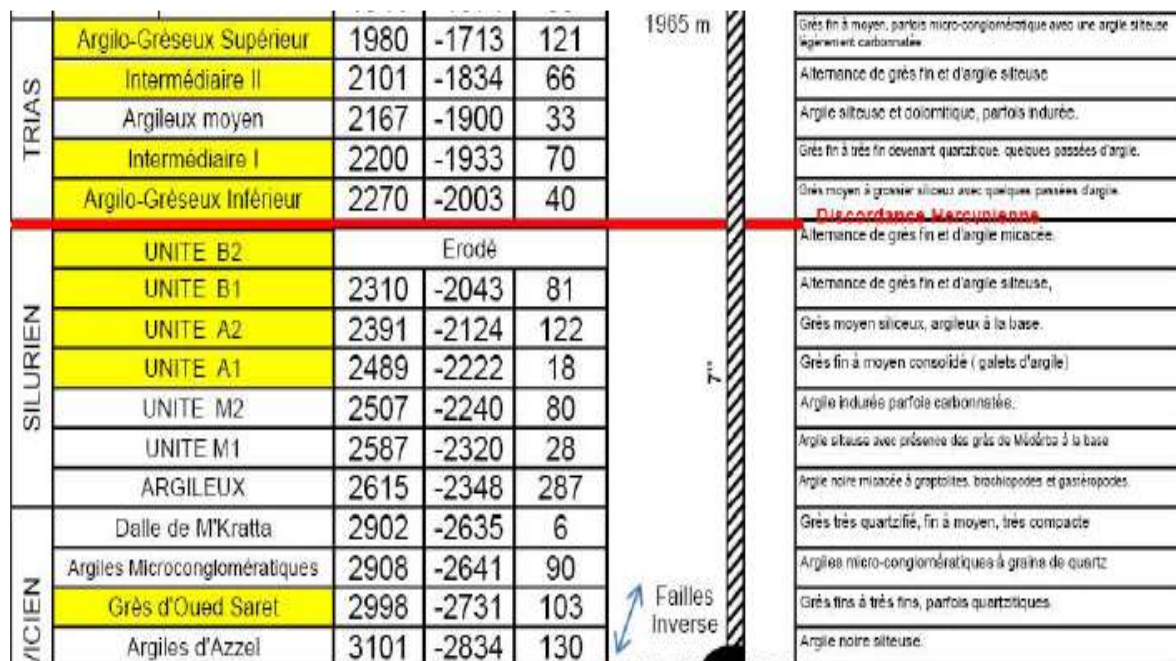


Figure 2 : fiche stratigraphique de la phase 8 1/2''

#### 3.1. 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> à - 2500 m

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

### 3.2. Risque et conditions particulières de forage :

Etant donné que certains puits forés dans la région de Rhourd Nous tel que RN-117, RN-116, RN-107 et RN-102, RN-112, ont rencontré des problèmes, notamment :

- Risques de pertes totales de boue et d'éboulements dans les formations non consolidées du Mio-Pliocene et du Sénonien Carbonaté.
- Présence, dans le Lias Salifère, de sel et d'argiles fluentes peu virulentes.
- Risques de rencontrer le Trias Intermédiaire II en lentille gréseuse isolée à la pression initiale de 300 Kg/cm<sup>2</sup>.
- Pour parer à toute éventualité, Il est primordial de garder la verticalité de ce puits à  $\pm 1^\circ$  car la déviation incontrôlée peut dépasser les  $10^\circ$  en une centaine de mètres à partir du TAGS jusqu'au fond.
- Risques de déviations incontrôlées dans l'Ordovicien et surtout au niveau de la Dalle de M'kratta, particulièrement compactée. (Problèmes observés lors du forage de la majorité des puits qui ont traversé l'Ordovicien).
- Risques de traverser des failles ou des zones fracturées lors du forage de la phase 8 1/2", précisément entre la Dalle de M'kratta et les Grès d'Ouargla.
- Risques de traverser des failles inverses de moindre amplitude dans la phase 6".
- Risques de pertes partielles ou totales et venues de gaz à haut débit lors du forage des Grès d'Ouargla.
- Risques de pertes partielles ou totales et venues de gaz avec un haut débit lors du forage des Quartzites de Hamra.
- Risques de pertes partielles ou totales lors du forage des Grès d'El atchane.

## **4. Equipements utilisés :**

Ce chapitre présente les différents équipements utilisés pour maintenir la verticalité des puits dans la région de Rhourd Nouss, commençant par les stabilisateurs, puis les moteurs de fond conventionnels et le système de forage vertical automatique. Pour finir par les équipements de mesure de déviation.

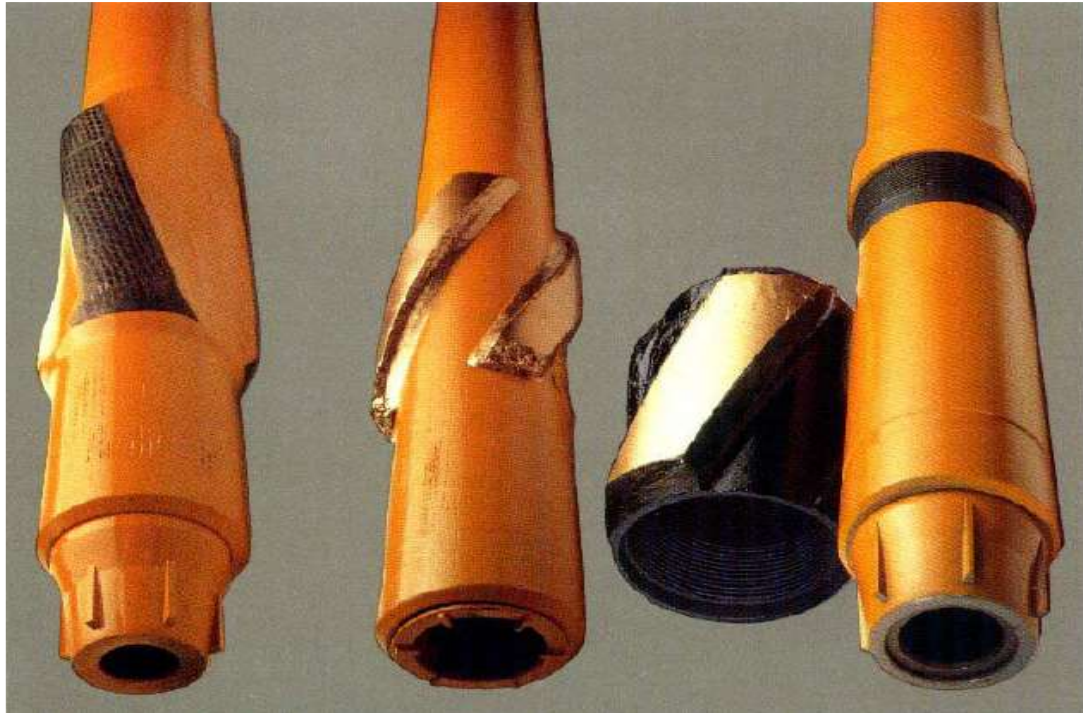
### **4.1. Stabilisateurs :**

En forage vertical, l'utilisation des stabilisateurs est l'un des moyens, de contrôle de l'inclinaison des puits, et la garder minimale. Ils sont donc largement utilisés, particulièrement en forage conventionnel.

Ces outils sont constitués par des "lames" installées sur des corps tubulaires équivalents aux masse-tiges de la même phase. Ces lames ont un diamètre égal ou légèrement inférieur à celui de l'outil de forage. Elles centrent les masses tiges dans le puits et constituent autant de point d'appuis permettant de contrôler la déformation de la garniture de forage.

Ce contrôle est obtenu en jouant soit sur le diamètre des stabilisateurs, soit sur la longueur entre lames, soit sur les deux à la fois.

Les stabilisateurs sont installés soit directement au-dessus de l'outil de forage et sont alors appelés "Near-Bit" ou plus haut dans la BHA où ils sont appelés "String".



**Figure 3 : les différents types de stabilisateur**

## **4.2. Moteur à Déplacement Positif PDM :**

### **4.2.1. Composition :**

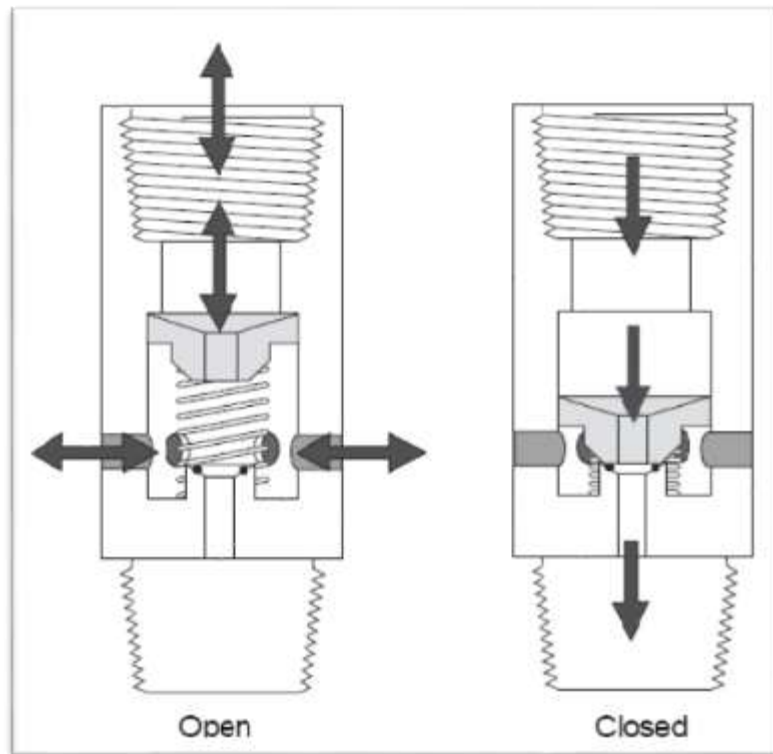
Les moteurs modernes comportent plusieurs composants, certains sont optionnelles et diffèrent d'une configuration à une autre et d'autres sont indispensables et communs à tous les PDM.

#### **4.2.1.1. Dump Valve :**

Au-dessus de la section motrice peut se placer une vanne automatique à ressort de remplissage et de vidange pendant les manœuvres de descente ou de remontée appelée Dump Valve ou by-pass. À  $\pm 30\%$  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 des PDM : au lieu de faire partie intégrante du moteur, il s'agit alors d'un Sub indépendant que l'on visse au top.

Si le concept même de la Dump Valve est extrêmement séduisant, permettant le remplissage / vidage automatique de la garniture pendant les manœuvres, la réalité est tout autre, à tel point qu'aujourd'hui la plupart des compagnies de service et des grands opérateurs pétroliers proscrivent leur utilisation. Ceci à cause du bouchage ou sifflage

fréquents des orifices latéraux lors des ajouts, et aussi à cause du phénomène du tube en U, due au sable et Cuttings contenus dans la boue de l'annulaire, à la reprise du forage une partie de la circulation est by-passée et le moteur perd sa puissance et il faut le remonter au jour. La Dump Valve est aujourd'hui très souvent remplacée par une Circulating Sub qui est une vanne à circulation inverse classique à ouverture à bille.



**Figure 4 : Dump Valve**

#### **4.2.1.2. Section motrice :**

La section motrice convertit l'énergie hydraulique du fluide de forage en puissance mécanique qui fait tourner l'outil. Ceci est accompli par l'application inverse du principe de la pompe Moineau. Le fluide de forage est pompé dans la section motrice du moteur à une pression qui provoque la rotation du Rotorpar rapport au Stator. Cette force de rotation est ensuite transmise via un arbre de transmission et l'arbre d'entraînement à l'outil.

Le Rotorest fabriqué d'acier inoxydable résistant à la corrosion. Il a généralement une mince couche de chrome pour réduire la friction et l'abrasion. Des Rotors habillés d'une couche de carbure de tungstène sont également disponibles pour réduire l'usure due à l'abrasion et à la corrosion. Certains Rotors sont percés afin de pouvoir accepter une duse de by-pass pour les applications à haut débit. Notez que ce n'est pas possible dans les très petites dimensions et les moteurs à applications spéciales.

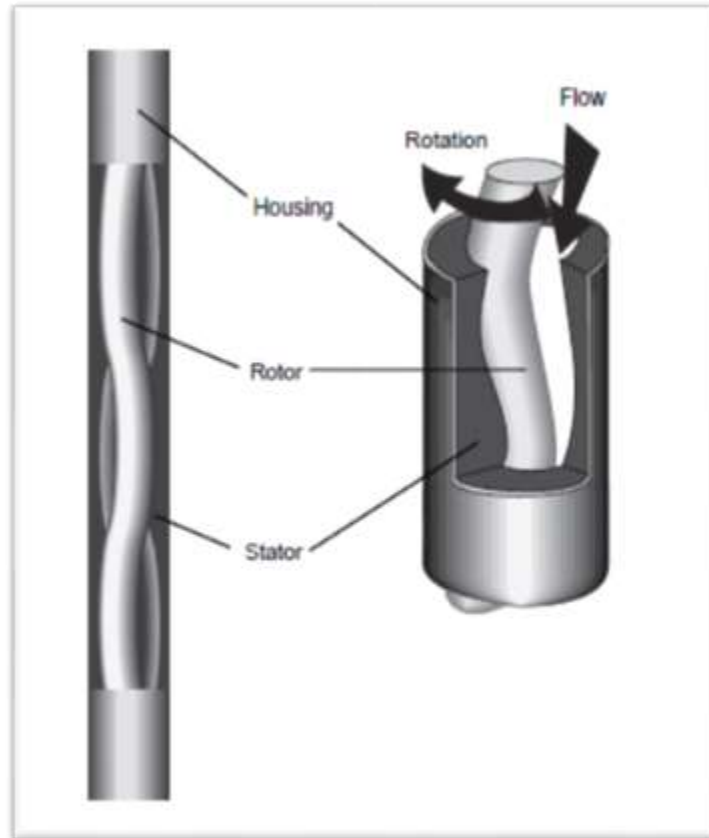
Le Stator est un tube d'acier avec une couche en élastomère (caoutchouc) moulée dans l'alésage du tube. Le revêtement est spécialement conçu pour résister à la détérioration provoquée par l'abrasion de particules contenues dans la boue.

Le Rotor et le Stator ont des profils similaires en hélice, mais le Rotor a un lobe de moins que le Stator. Dans une section motrice assemblée, le Rotor et le Stator créent une étanchéité continue à leurs points de contact, ce qui produit un certain nombre de cavités indépendantes. Lorsque le fluide (eau, boue ou de l'air) est forcé à travers ces cavités progressive, il oblige le Rotor à tourner à l'intérieur du Stator pour qu'il puisse passer à la cavité suivante. Ce mouvement du Rotor dans le Stator est appelé nutation. Pour chaque cycle de nutation fait par le Rotor dans le Stator, le Rotor tourne la distance d'une largeur de lobe. Le Rotor doit faire un cycle de nutation pour chaque lobe pour que l'outil accomplisse un tour complet. Un moteur avec une configuration à 7: 8 lobes (Rotor/ Stator) et une vitesse à l'outil de 100 tr / min aura une vitesse de nutation de 700 cycles / min.

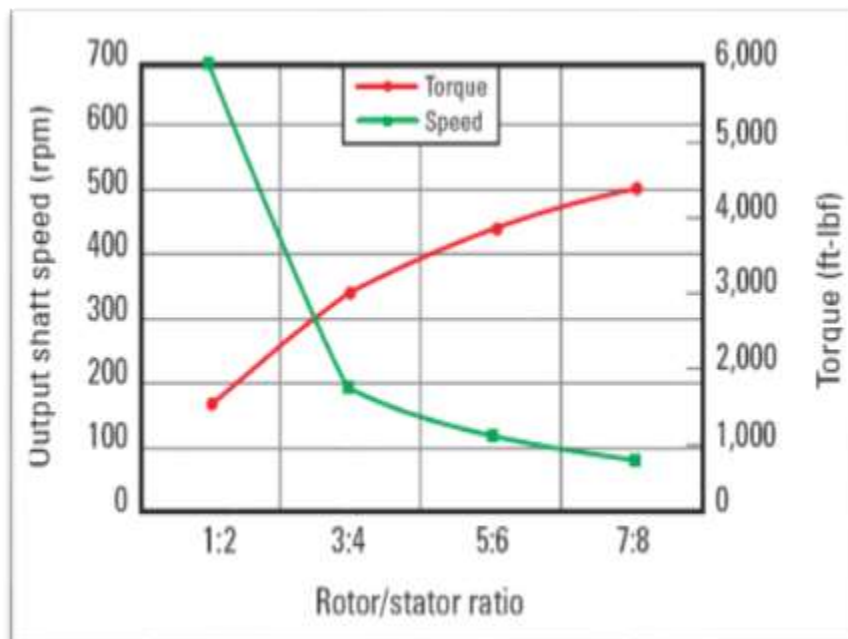
La section motrice d'un PDM est définie par le grand diamètre du Stator, le petit diamètre du Stator, l'excentricité du Rotor, le nombre de lobes et la longueur de l'étage qui est définie comme un cycle plein de l'hélice du Stator.

En prévision du gonflement des élastomères sous l'effet de la température de fond le Rotor est généralement monté en surface légèrement sous dimensionné par rapport à l'alésage du Stator. Au fond l'élastomère gonfle et l'alésage du Stator devient plus petit ce qui crée une étanchéité nécessaire à la transformation de l'énergie.

Généralement, plus le nombre de lobes est grand, plus le couple de sortie du moteur augmente et plus la vitesse ralentit. Étant donné que la puissance est définie comme la vitesse fois le couple, un plus grand nombre de lobes dans un moteur ne produit pas nécessairement plus de puissance, au contraire les moteurs avec un minimum de lobe ont un meilleur rendement car les jointures entre le Rotor et le Stator sont moins nombreuses.



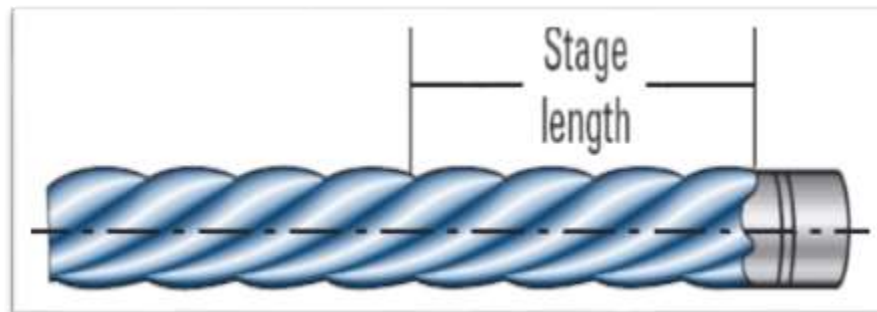
**Figure 5 : Section motrice**



**Figure 6 : Vitesse et torque en fonction du nombre de lobe**

La longueur de l'étage du Stator est définie comme la longueur axiale requise pour un lobe dont le Rotor est pivoté sur 360° le long de sa trajectoire hélicoïdale autour du corps du Stator. La longueur de l'étage d'un Rotor n'est pas équivalente à la longueur de l'étage de son Stator correspondant. Un Rotor a une longueur plus courte que celle du Stator.

Pour une longueur d'étage donnée on peut augmenter le nombre d'étage en augmentant la longueur de la section motrice. Ceci permettra d'augmenter le couple de calage et le rendement du moteur mais d'un autre coté on augmentera aussi la chute de pression et la longueur totale du moteur. La longueur totale de l'outil est limitée par des soucis de transport et de manutention sur l'appareil et le besoin de pouvoir l'incorporer dans une BHA de déviation.



**Figure 7 : La longueur d'étage**

#### **4.2.1.3. Section d'appui :**

L'arbre d'entraînement est un tube creux construit en acier rigide. Il est soutenu dans la section d'appui par les paliers de butée radiale et axiale. La section d'appui transmet la poussée et la puissance de rotation à l'outil. La plupart de débit de boue est directement transmis à l'outil par le centre de l'arbre d'entraînement.

La section d'appui d'un PDM est principalement constituée des éléments suivant:

- Roulements axiaux Off Bottom :

Ils supportent la poussée hydraulique et le poids du Rotor, bielle (joint universel), arbre moteur et outil de forage quand l'outil est suspendu et tourne librement hors du fond (Off Bottom). Ils sont normalement de type roulements à billes.

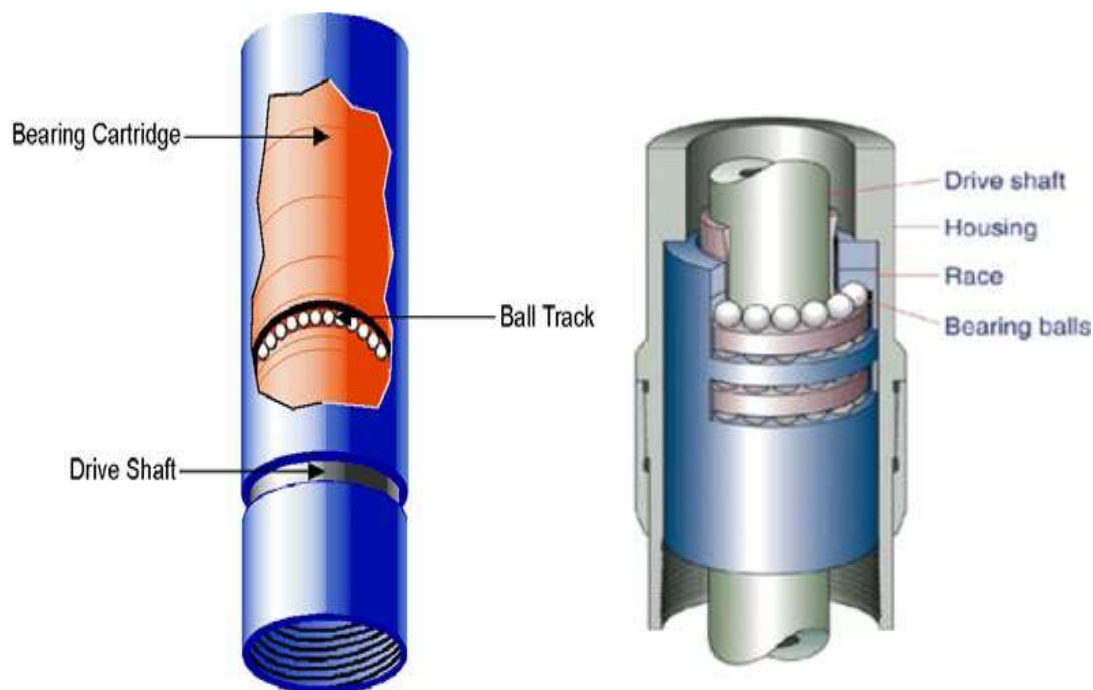
- Paliers de frictions radiaux:

Un manchon est utilisé pour les paliers de butée radiale supérieurs et inférieurs. Ils procurent le support radial à l'arbre moteur. Ils régulent également le débit de boue par l'intermédiaire du "Flow Restrictor". La boue déviée (habituellement 4 – 10%) est utilisée pour refroidir et lubrifier l'arbre et les paliers de roulements. Elle sort directement

vers l'espace annulaire au-dessus du raccord d'outil. Le pourcentage exact de boue détournée est déterminé par l'état des roulements et la chute de pression à travers l'outil. Un roulement étanche à huile est une alternative au roulement lubrifié par la boue. Il est recommandé quand des boues corrosives sont utilisées, où lorsque des LCM (lostcirculating matériel) de plusieurs dimensions sont pompés ou lorsque des pertes de charges très faible à travers l'outil sont recommandées.

- Roulements axiaux On Bottom :

Ceux-ci transmettent la charge du forage de la partie non rotative du moteur à l'outil de forage (en rotation). Ces paliers supportent la charge lors du forage. Les roulements peuvent être de type roulement à billes (Ballbearing) ou des paliers de friction en diamant (Diamond Friction Bearings) semblables à ceux des turbines. Le raccord d'outil de rotation est la seule partie externe en mouvement du moteur de fond.



**Figure 8 : Section d'appui**



**Figure 9 : Roulement d'un PDM (à billes)**

#### **4.2.1.4. Transmission :**

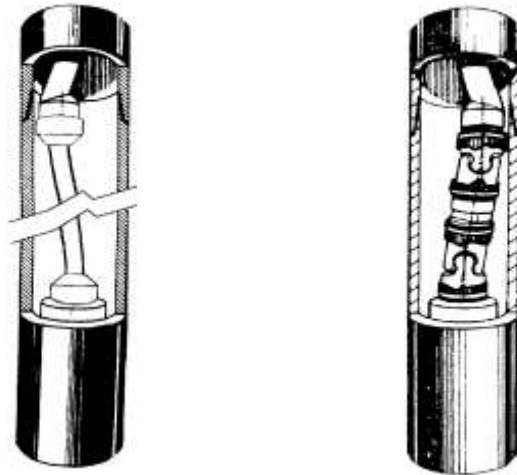
Vu que le Rotor est façonné en spirale, il ne tourne pas de manière concentrique dans le Stator. Ce mouvement doit être converti en un mouvement concentrique puis être transmis à l'outil par l'arbre moteur. Cela est accompli par un système de transmission. Il y a plusieurs types :

- **Universal joint :**

Les assemblées Universal Joint ont été utilisées par l'industrie et sont encore utilisées dans la plupart des PDM. L'ensemble consiste en deux joints universels, rempli de graisse, et scellé avec les manchons de caoutchouc résistant à l'huile pour les protéger du fluide de forage. Un inconvénient de l'Assemblée U-joint est le manque de force suffisante pour les applications à couple élevé, tels que ceux rencontrés avec les dernières générations de couple élevé PDM, en particulier lorsqu'il est utilisé avec les outils PDC. Cette faiblesse inhérente est le résultat du processus de fabrication.

- **flexible coupling**

Une évolution récente dans la technologie de raccordement ; c'est l'utilisation de l'acier ou le titane flexible "barres flexibles". Bien que des tiges flexibles sont limités par le degré admissible de flexion latérale, ils ont l'avantage de nécessiter peu d'entretien, car ils ne nécessitent pas de lubrifiants ou de manchons en caoutchouc. Le Flex Rod est désormais le standard sur la plupart des petits moteurs.



*Figure 10 : Flex Rod    Figure 11 : Universal Joint*

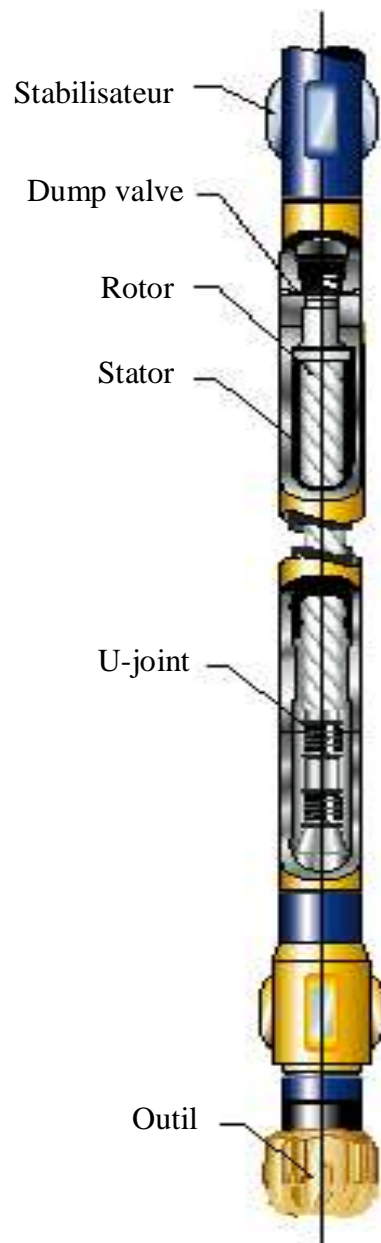
#### **4.2.2. Le principe de fonctionnement des moteur PDM :**

Les éléments clés d'un moteur de fond sont son Rotor et son Stator :

- Rotor : pièce hélicoïdale fabriquée en acier inoxydable.
- Stator : élastomère moulé en forme d'hélice interne, avec une spire supplémentaire par rapport au Rotor.

Le Rotor et le Stator correspondent étroitement et engendrent des cavités étanches les unes des autres.

Quand le fluide de forage est pompé à travers le moteur, une montée de pression apparaît entraînant la rotation du Rotor et permettant le passage du fluide dans la



**Figure 12 : Composition d'un PDM**

Cavité voisine. Le fluide progresse alors de cavité en cavité entraînant ainsi une rotation régulière du Rotor.

La vitesse de rotation est proportionnelle au débit à travers le moteur.

### 4.3. Moteur avec Bent-Housing :

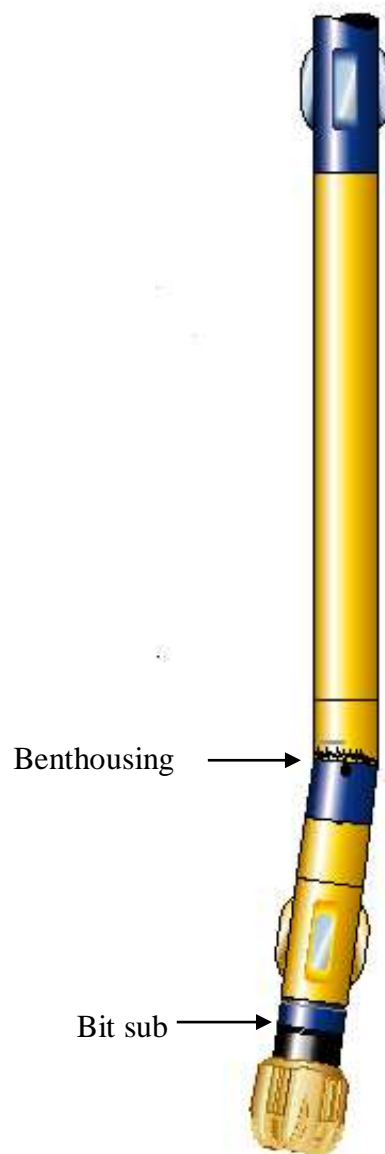
A leur origine les PDM étaient construits avec un corps droit. L'angulation par rapport au train de tiges était obtenue à l'aide d'un raccord coudé installé au-dessus du moteur habituellement de  $0.25^\circ$  -  $1.5^\circ$ . Cela incline l'axe de l'outil par rapport à l'axe du trou. La force latérale sur l'outil est considérable même pour un petit angle à cause de la distance entre le coude et l'outil.

Ils ont incorporé en suite un coude fixe situé dans la partie basse du moteur. Un stabilisateur concentrique est placé sur le logement de la section d'appui. Ce stabilisateur est toujours légèrement sous-dimensionné (par exemple  $12 \frac{1}{8}$  " dans  $12 \frac{1}{4}$  " trou). Selon la conception du PDM, ce stabilisateur peut être à chemise interchangeable en surface ou une partie intégrante de la section d'appui.

À cause du manque de flexibilité des vieux moteurs directionnels, un coude réglable en surface a été développé. Cela autorise l'ajustement de l'angle du PDM sur le planché de l'appareil de  $0^\circ$  (c.-à-d. équivalent à un moteur en ligne droite) jusqu'à  $3^\circ$ , dans les petites dimensions. Le coude permet à l'outil de changer l'inclinaison et/ou la direction du trou quand la garniture ne tourne pas et forer tout droit quand la garniture tourne. Le nombre de manœuvre est donc radicalement réduit.



**Figure 13 : Ajustement du coude.**



**Figure 14 : PDM avec Bent-Housing**

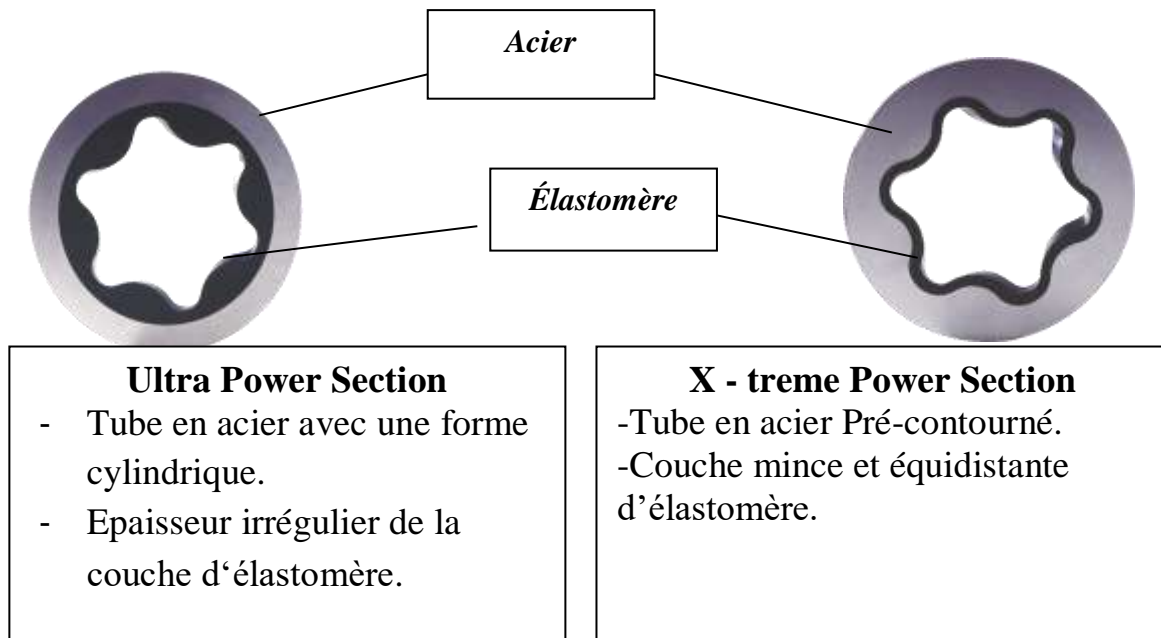
#### 4.4. Système de forage vertical automatique :

##### 4.4.1. Particularité de composition du système (VertiTrak) :

VertiTrak consiste en un moteur X-treme<sup>(1)</sup> développé par INTEQ dont la partie inférieure a été remplacée par des bras mobiles<sup>(2)</sup> conçus pour contrebalancer la Déviation naturelle de la roche. Cette contre force est produite par la pression hydraulique de l'huile générée par une pompe hydraulique<sup>(3)</sup>, elle même alimentée par une turbine<sup>(4)</sup>. Le système électronique de fond mesure toute déviation de la trajectoire verticale et ajuste automatiquement la pression sur les bras articulés pour corriger la trajectoire. L'inclinaison ainsi que d'autres paramètres de fonctionnement sont transmis en surface via le pulser MWD<sup>(5)</sup>.

##### 4.4.2. X-treme moteur :

La section motrice du moteur X-treme n'est qu'une modification de celle conventionnelle, la seule différence réside au niveau de leur Stator, plus précisément au niveau des élastomères (matière en caoutchouc) qui sont sous forme d'hélice interne d'épaisseur variable pour la conventionnelle et pour le X-treme n'est qu'un revêtement en caoutchouc d'épaisseur constante des spires du Stator. Et le schéma ci-dessous nous dévoile cette diversification entre ces deux sections.



**Figure 15 : Différence entre la section motrice conventionnelle et la section X – treme**

Cette configuration du moteur a le pouvoir de supporter une différence de pression plus élevée que celle du moteur conventionnel et par conséquent un torque et puissance considérablement plus élevés (180 KW pour le moteur X-treme et 85 KW pour le conventionnel) qui conduisent à leurs tours à l'application d'un WOB plus élevé et donc un ROP plus grand. Le torque est directement proportionnel à la différence de pression que peut concevoir le moteur. Le moteur X-treme est conçu de façon à nous offrir le torque le plus élevé possible, c'est la raison pour laquelle est préférablement choisit dans le forage.

#### **4.4.3. Les bras mobiles (Steering Ribs) :**

Sont trois bras localisés dans l'étage de roulement. Les pistons hydrauliques sous les bras sont actionnés par des pompes qui peuvent produire des forces latérales de 1,5 à 3 tonnes pour chaque bras. Afin de maintenir la verticalité du puits. Selon le diamètre du puits, les bras sont échangeables.

#### **4.4.4. La pompe hydraulique :**

Permet de générer la force nécessaire pour pousser les bras.

#### **4.4.5. La turbine et alternateur :**

Servent à alimenter la pompe hydraulique et le système électronique qui de son rôle permet de prendre les mesures d'inclinaison, de température et de la pression hydraulique.

#### **4.4.6. Le pulser MWD :**

Sert à transformer les mesures sous forme des pulse à travers la boue de forage.

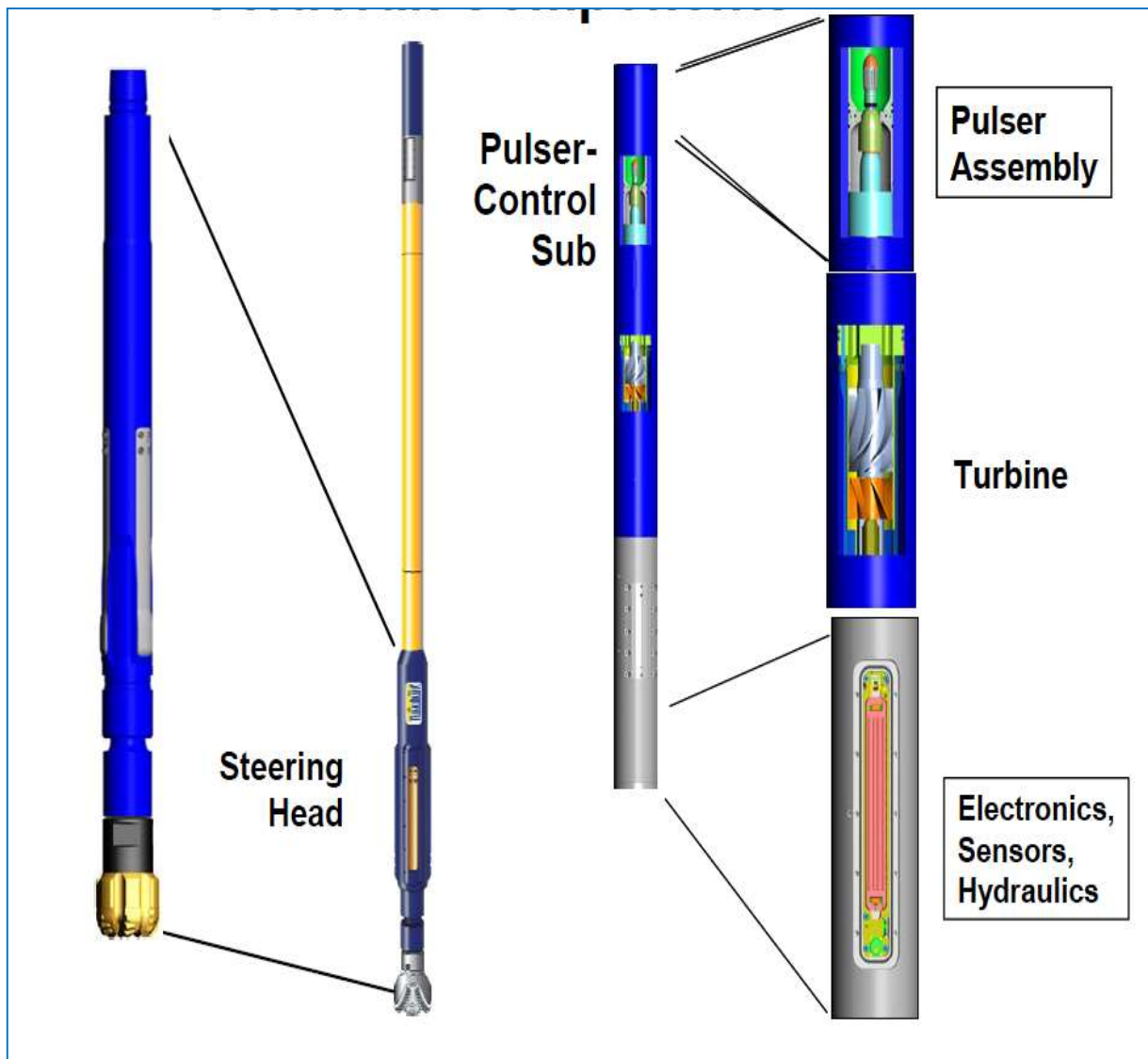
#### **4.4.7. Principe de fonctionnement de système :**

Dès que le système électronique de MWD enregistre une valeur d'inclinaison différente de zéro. La pompe actionne automatiquement les pistons hydrauliques situés derrière les bras.

Ces derniers sont actionnés par une force de 1,5 à 3 tonnes qui les repousse vers les parois du puits, l'outil revient à la verticale.

Le système de commande fonctionne automatiquement, sans intervention de la surface.

Les parois du trou dans des formations tendres sont souvent cavées lorsqu'elles sont soumises aux chocs des bras. 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 la BHA.



**Figure 16 : Composition de VertiTrek**

#### 4.5. Les équipements de mesure :

##### 4.5.1. Inclinomètre TOTCO :

Les inclinomètres sont les plus simples des instruments de mesures directionnelles en ne mesurant que l'inclinaison du puits.

Ils utilisent un pendule qui n'est affecté que par le champ gravimétrique terrestre.

Ces outils sont essentiellement utilisés pour vérifier l'inclinaison des puits verticaux.

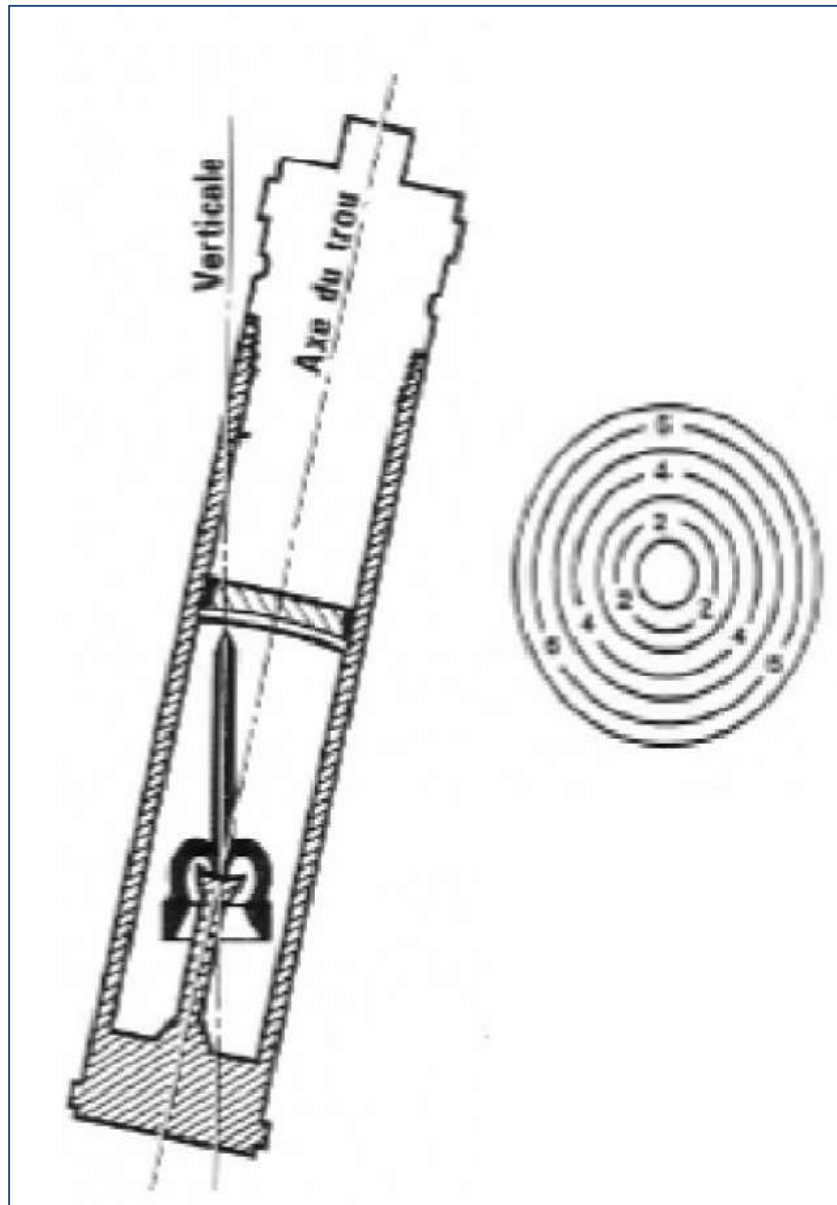


Figure 17: *Inclinometer TOTCO*

#### **4.5.2. MWD (Measurement While Drilling):**

##### **4.5.2.1. Principe de fonctionnement :**

Les premiers MWD sont apparus dans les années 70, permettant une évolution considérable du forage dirigé.

Ils sont situés en permanence au fond du puits et transmettent les informations mesurées en temps quasi réel.

Les MWD mesurent l'inclinaison et l'azimut du puits à l'aide des capteurs les plus sophistiqués, accéléromètres et magnétomètres.

Indexés à un système d'orientation ils déterminent également le tool-face.

Une seconde génération d'outils mesure des paramètres d'évaluation des formations et /ou de forage.

Ces outils sont appelés LWD (Logging While Drilling)

Les différents paramètres mesurés sont codés (numérotation binaire) et transmis en surface à l'aide de divers systèmes de télémétrie.

Ces informations sont recueillies en surface, décodées, interprétées et affichées.

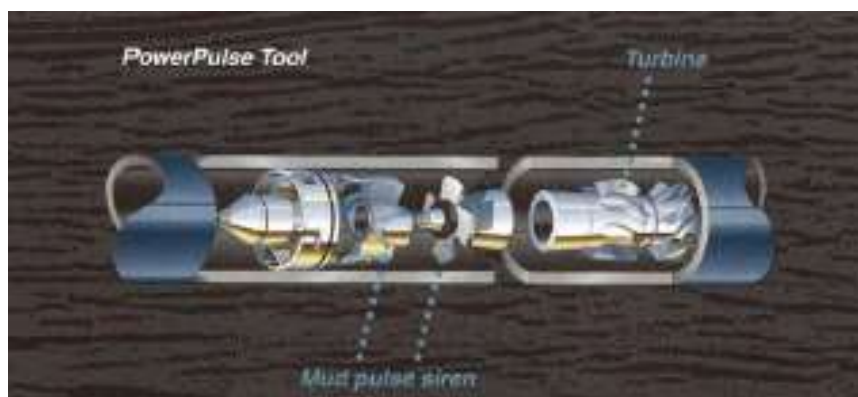
Les paramètres d'évaluation sont également mémorisés pour être récupérés lors du retour de l'outil en surface.

##### **4.5.2.2. Composition d'un MWD**

Les composants de base d'un MWD sont :

###### **Un étage d'alimentation :**

- Batteries
- Turbine / alternateur actionnée par le débit
- Combinaison des deux



**Figure 18 : L'étage d'alimentation**

**Un ou plusieurs étages de mesures :**

Paramètres de déviation	Paramètres d'évaluation	Paramètres de forage
Inclinaison	Gamma ray (orienté)	Torque
Azimut	Résistivité (orientée)	Vibrations
Tool face	Densité	
Température	Porosité	Pression annulaire

**Tableau 1 : Les étages de mesures**



**Figure 19 : Les différents étages d'un MWD**

**Un étage de télémétrie :**

L'étage de télémétrie a deux fonctions :

- 1) coder les paramètres mesurés en information binaire
- 2) transmettre cette information vers la surface par des impulsions qui 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.

## **5. Problème de déviation :**

### **5.1. Avant-propos :**

La complexité du problème de la déviation peut aller jusqu'à la perte du puits, ce qui a obligé les chercheurs à faire des études plus approfondies sur le problème afin de fournir une explication, et de déterminer ses causes, ses conséquences et ses remèdes. Ces derniers sont décortiqués dans ce chapitre.

### **5.2. Explication théorique :**

La nature et la dureté de la roche forée peuvent avoir une influence prononcée sur les tendances directionnelles, bien que dans de nombreux cas, son importance puisse être exagérée, mais le point principal est de savoir si la roche est anisotrope ou non ; Une roche isotrope est une roche qui a les mêmes propriétés et qui se comporte de la même manière, indépendamment de sa direction, la plupart des grès sont isotropes. Par contre, les roches anisotropes, telles que les schistes, n'ont pas les mêmes propriétés dans toutes les directions.

La plupart des forages de gisement de pétrole se font dans les roches sédimentaires. En raison de la nature de leur dépôt, les roches sédimentaires ont des couches ou des plans de stratifications qui font montrer un certain degré d'anisotropie.

Le forage dans des formations inclinées a montré que l'outil est obligé de forer vers une direction préférentielle liée à l'angle de pendage et la direction de la stratification. Un certain nombre de théories et de modèles ont été proposés au cours des années pour expliquer ces effets :

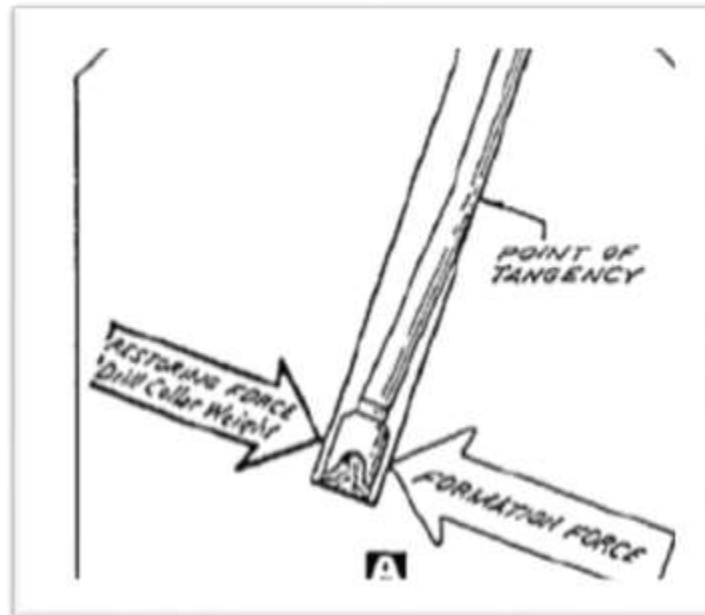
### **5.3. Théorie de formation anisotrope :**

La théorie de formation anisotrope est largement acceptée. Les études théoriques passées ont supposé que l'outil fore dans la direction de la force résultante dans les formations uniformes ou isotropes. Ceci implique que l'outil ne montre pas une direction préférentielle du forage.

On assume qu'une formation stratifiée ou anisotrope possède une forabilité parallèle différente de celle perpendiculaire, aux plans de stratification, avec le résultat que l'outil ne fore pas dans la direction de la force résultante.

Chaque formation est caractérisée par son indice d'anisotropie et son angle de pendage.

L'indice d'anisotropie ne dépend pas des propriétés spécifiques de la roche mais il est une constante empirique déterminée à partir des mesures de forage.

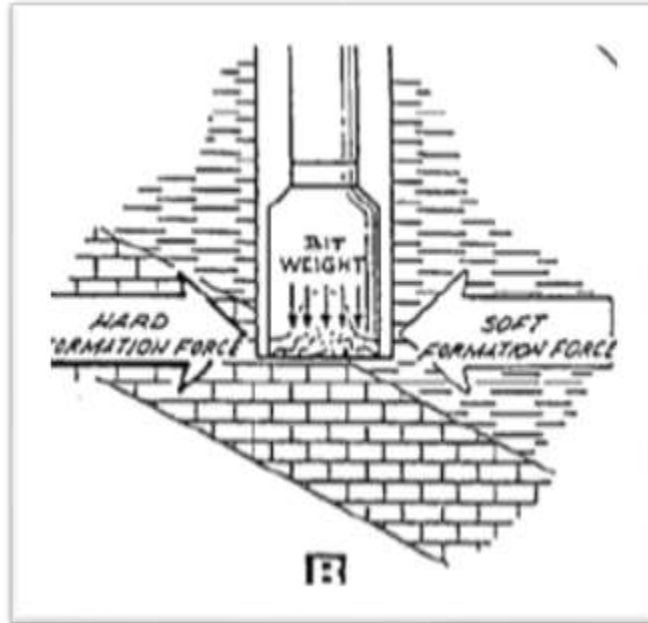


**Figure 20 : Théorie de formation anisotrope**

#### **5.4. Théorie de la différence de vitesse d'avancement :**

La théorie de la différence de vitesse d'avancement de formation cherche à expliquer le changement d'angle de puits en terme de différence de vitesse d'avancement dans les formations inclinées dures et tendre.

Probablement, l'angle de puits change parce que l'outil fore plus lentement dans la partie dure de la formation. La supposition fondamentale que le poids d'outil est réparti uniformément sur le fond du puits est inhérente à cette théorie. Elle prévoit la déviation updip lorsque l'outil fore dans une roche plus tendre et downdip dans une roche plus dure.

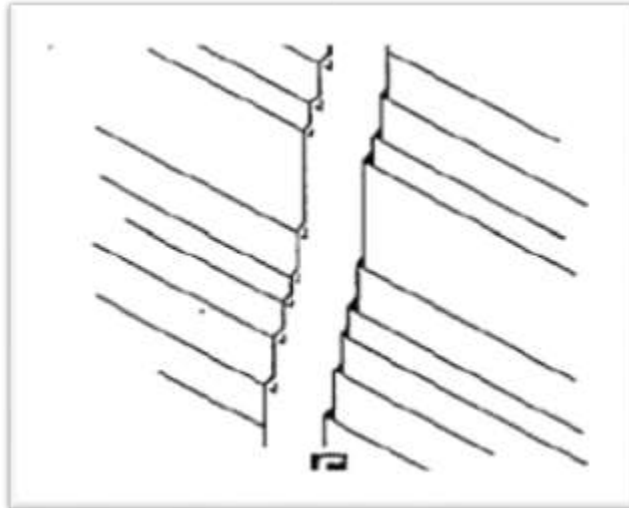


**Figure 21 : Théorie de la différence de la vitesse d'avancement**

### 5.5. Théorie de miniature de Whipstock :

La théorie de miniature de Whipstock est basée sur des expériences de forage faites par Hughes Tool Company, dans lesquelles, une formation artificielle composée de plaques de verre inclinées a été forée, donnant un puits incliné aux stratifications. Dans ces essais, les plaques ont rompu perpendiculairement aux plans de stratification, créant des miniatures de Whipstock (des escaliers miniatures).

Lorsque la roche stratifiée se fracture perpendiculairement aux plans de stratification, de tels escaliers sont créés, ce qui pourrait causer le forage updip. Cette théorie offre une explication qualitative possible à la déviation de puits dans des formations légèrement inclinées. Cependant, elle n'explique pas le forage downdip qui se produit dans des formations abruptes.



**Figure 22 : Théorie de miniatures de Whipstock.**

### 5.6. Théorie de moment aux masses tiges :

La théorie de moment de la masse tige suggère que lorsqu'un outil fore d'une formation tendre à une formation dure, le poids sur l'outil n'est pas distribué régulièrement le long du fond du puits.

Puisque, plus de poids sur l'outil est pris par la formation dure, un moment est produit 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. La variation de la force latérale n'est pas la même lorsque l'outil fore des formations tendres aux formations dures comme lorsqu'il fore des formations dures aux formations tendres et peut, par conséquent, effectuer un changement d'inclinaison de puits.



**Figure 23 : Théorie de moment aux masses tiges**

L'expérience a prouvé que la déviation se produit plus souvent dans les couches stratifiées que dans les couches épaisses homogènes. La déviation est presque toujours associée aux formations abruptes.

Les failles ou peut-être les efforts liés à la construction des failles influencent la déviation.

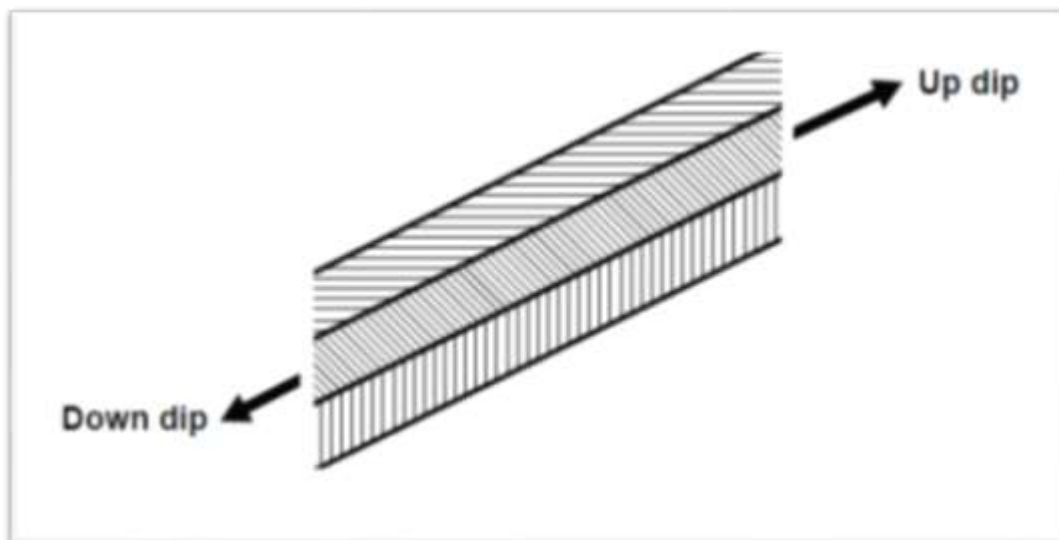
Dans l'analyse finale il n'y a pas une seule explication satisfaisante pour la déviation. Elle semble être liée à la géologie.

La déviation n'est jamais plus grande que le pendage de couche. Toutes les théories et la pratique indiquent que la déviation maximum est perpendiculaire ou parallèle au pendage de formation.

✓ **Notion d'Updip et Downdip :**

La signification du updip et downdip est illustrée sur le schéma

**Figure 24 : *Downdip et Updip***



## 6. Les causes de la déviation :

### 6.1. Problème de formation :

#### 6.1.1. Les 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.

#### 6.1.2. 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.

#### 6.1.3. 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.

La valeur du déplacement entre deux points homologues de part et d'autre est le rejet.

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.

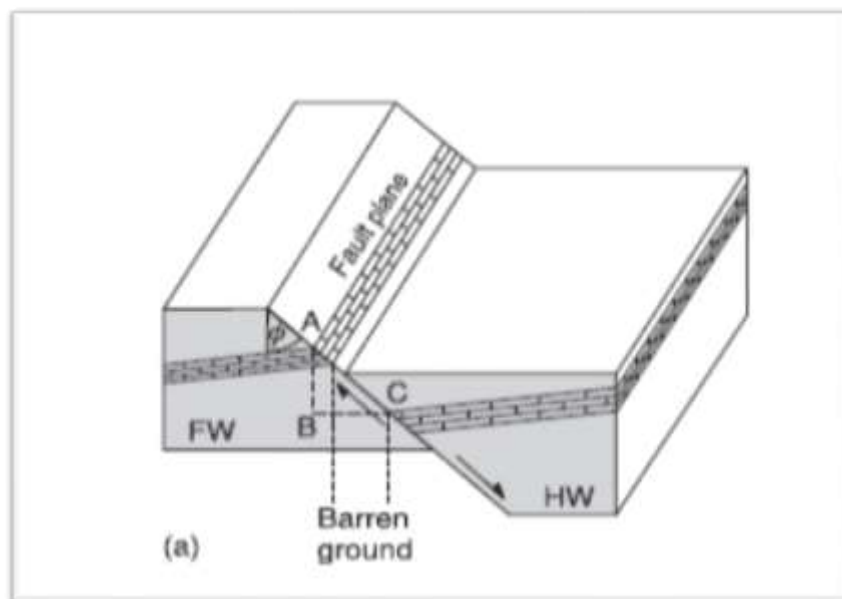


Figure 25 : les failles

#### 6.1.4. Déformation souples (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 bas, le synclinal. Un anticlinal ou un synclinal comportent un axe.

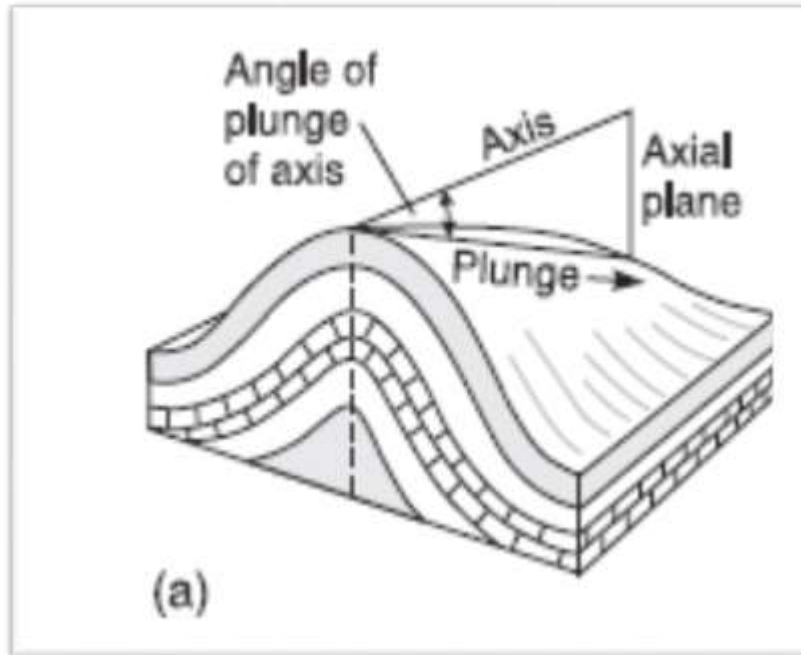


Figure 26 : le pli.

#### 6.1.5. Pendage des couches :

Le pendage des couches des terrains sédimentaires, à l'origine déposées horizontalement, est une manifestation des déformations structurales.

Il est défini par deux valeurs angulaires :

- L'azimut qui est l'angle entre l'horizontale de la couche et de la direction du Nord.
- L'angle de la ligne de plus grande pente par rapport à l'horizontale.

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 :

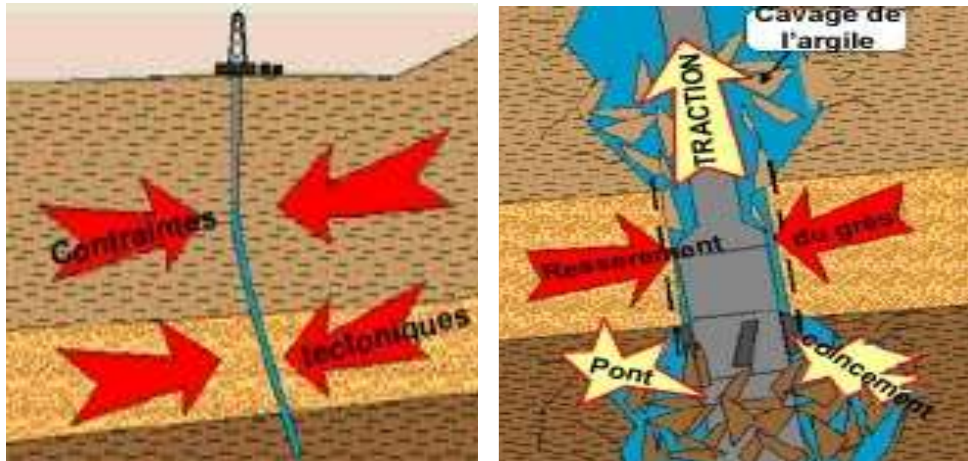
-si le pendage est inférieur à 45 degrés : le puits aura tendance à "monter" pour venir perpendiculaire au pendage.

-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.

### 6.1.6. *Contrainte due à la formation : (mécaniques, tectoniques) :*

Ce 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.



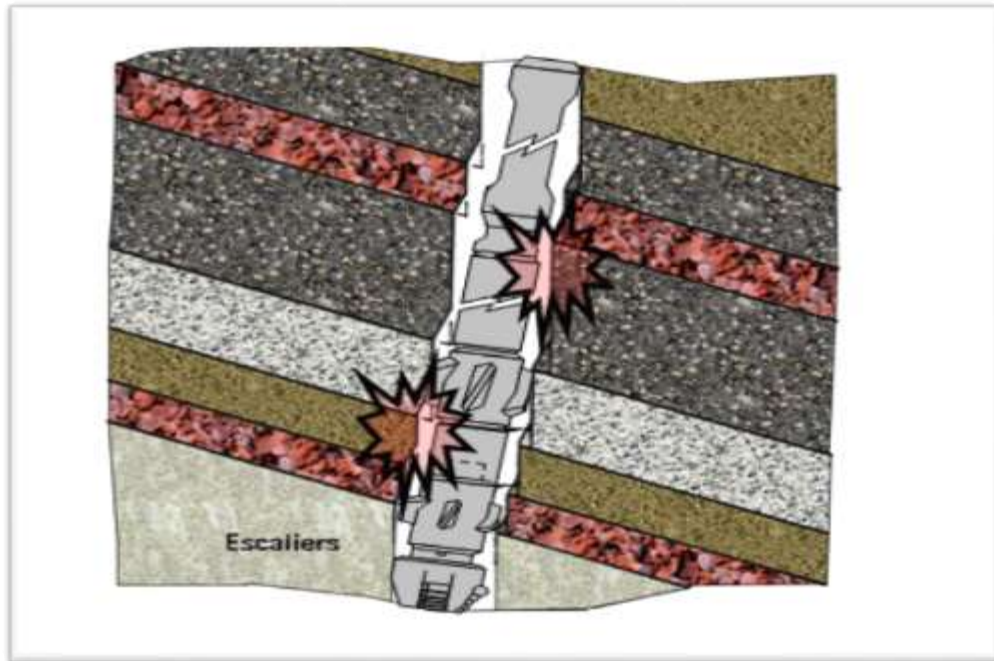
**Figure 27 : Contraintes tectoniques – Réactions et évènements**

### 6.1.7. *Les alternances des formations tendres et dures :*

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.



**Figure 28 : Les alternances de formation tendre et dure**

## **6.2. Désignation de la BHA :**

La détermination du type et la conception de la garniture de forage sont les éléments permettant de contrôler le comportement du puits.

Le comportement des garnitures conventionnelles (Rotary) est dominé par deux facteurs essentiels quelquefois antagonistes :

- la rigidité
- la création et la répartition de points d'appuis permettant d'obtenir une déformation permanente dont résultera le mouvement désiré.

## **6.3. 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.

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

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

#### **6.4. 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.

### **7. Les conséquences de la déviation :**

#### **7.1. Cible non rencontrée :**

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

#### **7.2. Le coincement :**

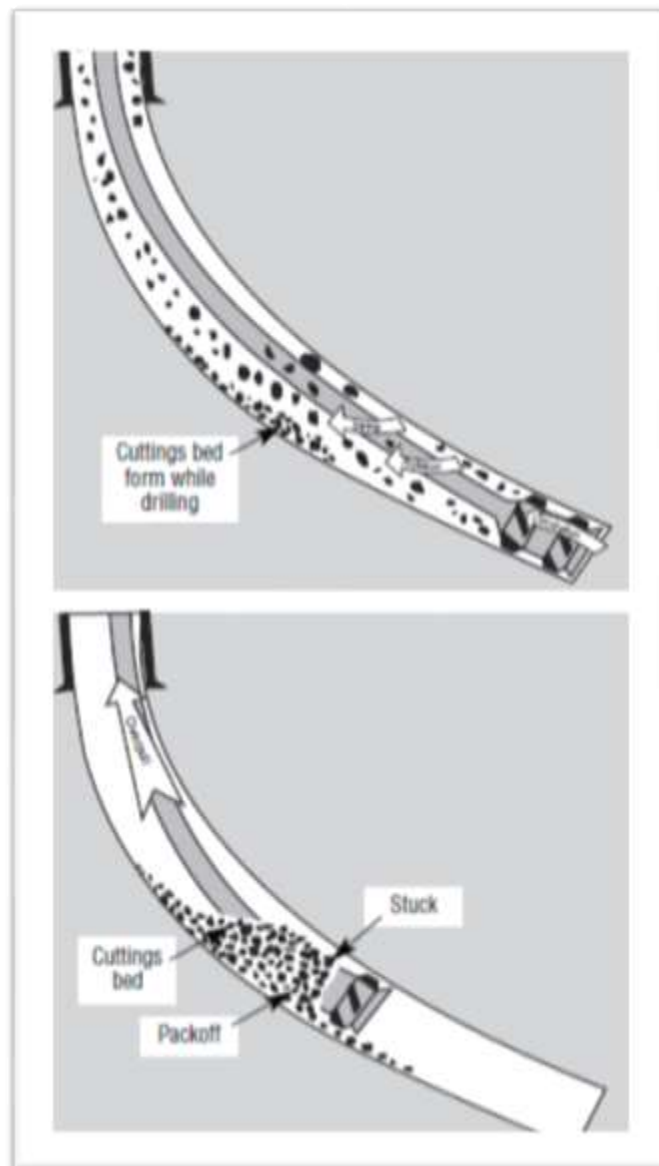
Le coincement de la garniture est l'un des problèmes de forage les plus courants et plus sérieux. Il peut s'étendre dans la sévérité de l'inconvénient mineur, qui peut augmenter légèrement les coûts à des complications principales, qui peuvent avoir des résultats sensiblement négatifs, tels que la perte de la garniture ou complètement la perte du puits.

Parmi les types de coincement dans les puits déviés il y a le coincement mécanique qu'on peut le subdiviser en deux formes :

##### **a) *Coincement par des déblais accumulés :***

Si des déblais ne sont pas enlevés du puits, ils s'accumulent dans le trou, souvent autour de la BHA, par la suite entraînant le Pack-Off dans le trou, et coller la garniture (voir le schéma 1). Ce problème est produit souvent dans les sections qui sont en contact avec les parois du trou, où des vitesses annulaires sont réduites. Dans les puits

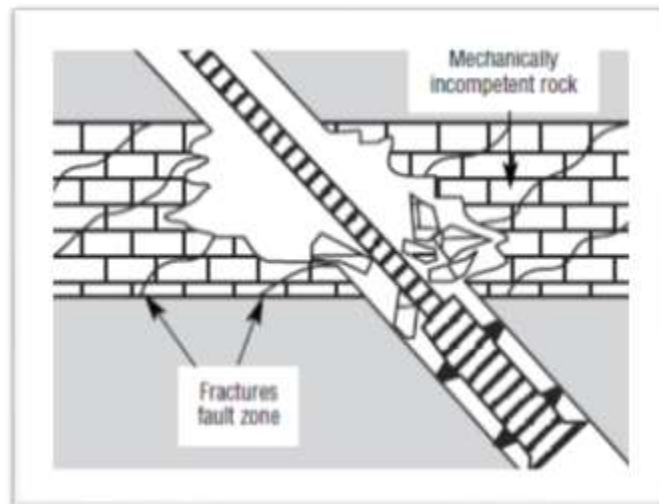
déviés, les déblais s'accumuleront du bas-côté du trou et peuvent par la suite s'effondrer en bas du trou, causant le Pack-Off.



**Figure 29 : Déblais accumulé**

**b) 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.



**Figure 30 : Formation fracturée ou faillée**

### 7.3. Formation des Dog-Legs :

Le paramètre appelé "Dog-Leg » représente un changement global (tridimensionnels) de la direction du puits, à la fois en inclinaison et en azimut. Dans la pratique nous rencontrerons donc des Dog-Legs souhaités (résultant des procédures de forage) mais aussi des Dog-Legs non souhaités (résultant de divers phénomènes géologiques ou d'erreurs de pratique de forage).

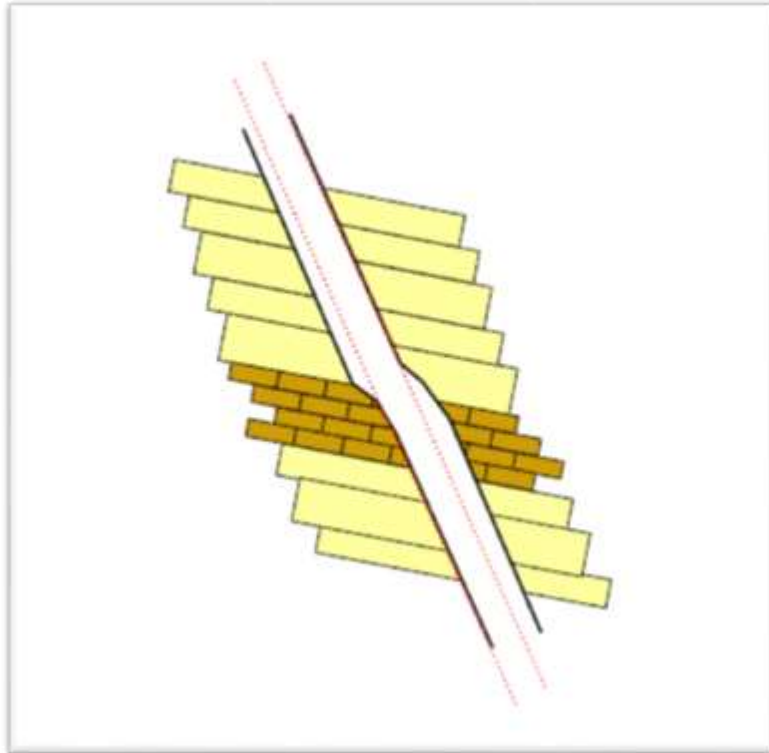
Les Dog-Legs réels seront dits :

- Dog-Leg normal (aussi appelé Dog-Leg circulaire) quand il correspond à la courbure moyenne du puits.
- Dog-Leg anormal (aussi appelé Dog-Leg abrupt) quand il correspond à un changement brutal de direction du puits.

Le Dog-Leg est exprimé en deg/10m, deg/30m ou deg/100ft.

La détermination des Dog-Legs d'un puits est essentielle car elle représente la "régularité" ou "non tortuosité" du puits. De plus la présence de Dog-Legs anormaux peut entraîner des conséquences fatales pour le puits. Il en résulte également un diamètre apparent inférieur au diamètre de forage et des difficultés potentielles pour descendre le tubage.

Un Dog-Leg anormal devrait être remarqué par le foreur (frottements répétitifs ponctuels). Autant que possible un Dog-Leg anormal devra être éliminé du puits (par exemple alésage).



**Figure 31 : Dog-Leg résultant d'une couche dure**

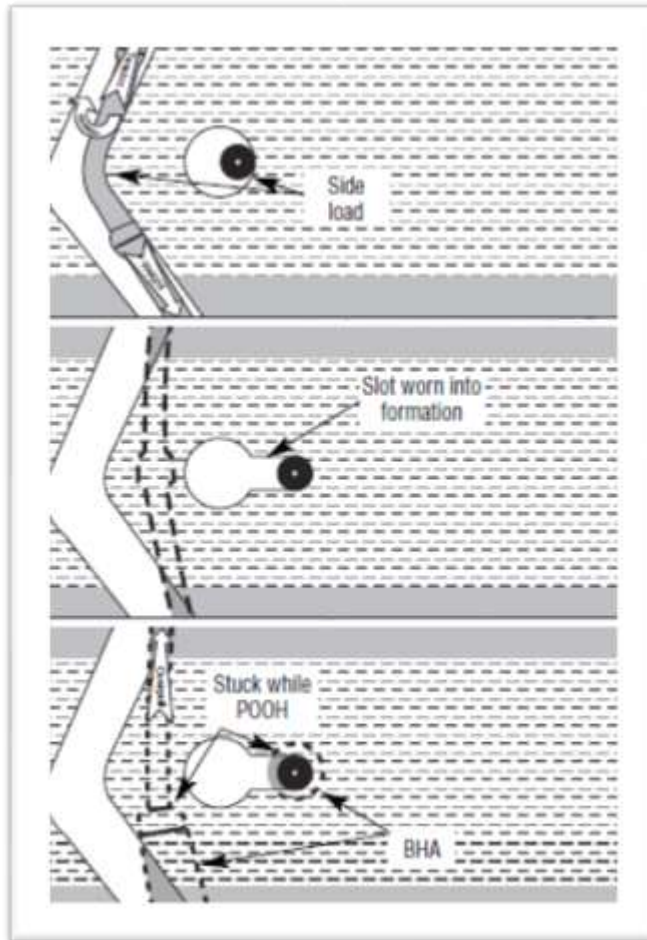
#### **7.4. La formation des Key-Seat :**

La formation d'un Key-Seat est la cause de nombreux problèmes et se termine le plus souvent par un Side-track si elle n'est pas détectée et traitée à temps.

Elle résulte du frottement du train de tiges sur la paroi du puits, creusant petit à petit un trou latéral ayant pour diamètre le diamètre du corps des tiges. Elle se produit donc de préférence dans les sections courbes du puits ou sur un Dog-Leg prononcé.

L'inconvénient major de la présence des Key-Seat c'est aussi le coincement.

Le coincement de Key-Seat se produit quand la garniture devient enfoncée dans la fente étroite de Key-Seat pendant qu'elle est tirée vers le haut puisqu'il y a des éléments dans la garniture ont des diamètres supérieurs à celles des tiges (par exemple : des masse tiges, MWD...etc.). Le collage principal de Key-Seat se produit seulement quand la garniture se déplace. La garniture peut également devenir coincée de façon différentielle après son enfoncement dans le Key-Seat. La garniture coincée dans un Key-Seat souvent peut être libérée en battant vers le bas.



**Figure 32 : Key-Seat**

### 7.5. L'augmentation du torque et du Drag :

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

Le Drag est l'augmentation du poids de la garniture lors de la remonté ou sa réduction lors de la descente.

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 :

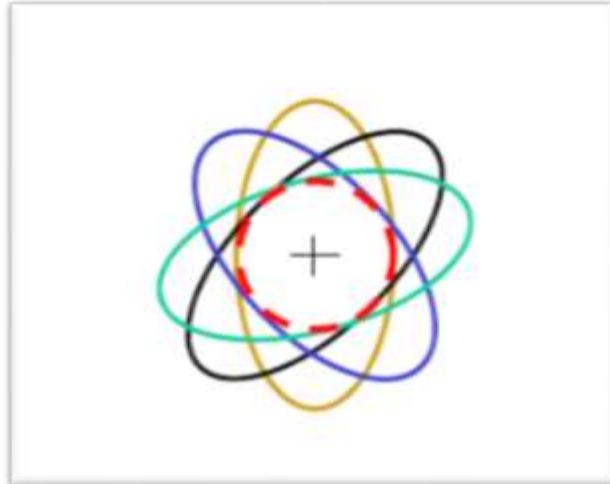
- Elles réduisent la vitesse d'avancement de l'outil en empêchant le transfert du poids WOB requis.
- Elles provoquent des Twist-Off et du survissage (Over-Torque) dans les équipements de forage.

## 7.6. Une mauvaise géométrie de puits :

Les trous déviés peuvent avoir des différentes formes :

### a) Trous ovalisés :

La plupart des trous forés en déviation sont ovalisés (la figure ci-dessous). Le grand axe de l'ovale n'a pas une direction constante.



**Figure 33 : Trou ovalisé**

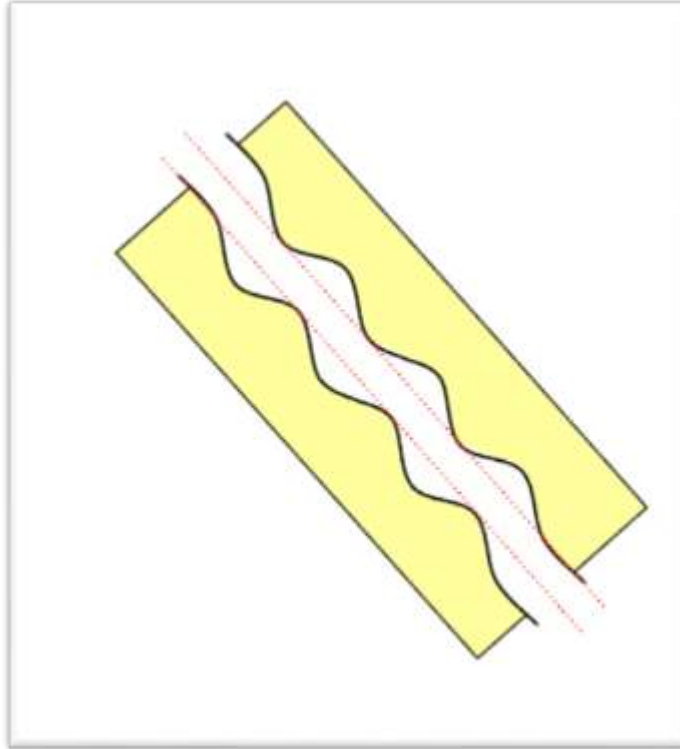
Les inconvénients majeurs de ce type de trou résultant sont un plus grand volume de puits et une modification des conditions hydrauliques.

### b) Trous spiralés :

Certains trous déviés sont spiralés ou de forme hélicoïdale (voir figure ci-dessous), le pas de la spirale pouvant être réduit à quelques mètres.

Ce phénomène se produit surtout dans les formations tendres.

Il en résulte des trous dont le diamètre apparent est inférieur au diamètre de forage, des frottements plus importants et des difficultés potentielles pour descendre le tubage.



**Figure 34 : Trou spiralé**

**c) Trous élargis :**

A longueur égale, les puits déviés ont un volume supérieur aux puits verticaux. Ceci peut résulter de différentes causes, en particulier de l'ovalisation des trous (voir ci-dessus). D'une manière générale l'élargissement du trou entraîne une plus grande consommation de fluide et une modification des conditions hydrauliques mais aussi des difficultés de centrage des tubages. Ces différentes anomalies de trajectoire peuvent aussi créer des problèmes de torque et de traction, reforage, surtout à l'outil et aux stabilisateurs. Ce n'est que dans le cas de Key-Seat très prononcé qu'il peut y avoir des tractions correspondant au top des masse-tiges (ou toute autre variation importante de section).

Les anomalies de trajectoire affectent chaque aspect de la cimentation et de la complétion d'un puits :

- Mauvais transport des Cuttings et mauvais nettoyage.
- Instabilité des parois du puits pendant la phase de production.

Dans certain cas il est possible en positionnant les stabilisateurs, d'arrondir les Dog-Legs et d'effacer un Key-Seat (Key-Seat Wiper), mais ceci ne supprime pas la cause initiale : si le Dog-Leg est important, le Key-Seat se reformera rapidement. Dans la

situation la plus grave, le puits ne pourra être rectifié que par un Side-track avant le Dog-Leg.

### **7.7. 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.

### **7.8. La fatigue des tiges de forage :**

La plupart des ruptures du train de tige sont causées par la fatigue. Elle dépend de la tension exercée sur le train de tige, de la courbure du puits et de son intensité (Dog-Leg Severity), du nombre de cycles de rotation en face des Dog-Legs.

## **8. Les remèdes :**

### **8.1. L'utilisation d'une garniture appropriée :**

Le maintien de la verticalité d'un puits peut être réalisé à l'aide de différentes garnitures, ceci dépendant principalement du type des formations traversées et de leur pendage.

- Garnitures lisses dans les formations tendres.
- Garnitures pendulaires dans les formations à faible pendage.
- Garnitures stabilisées (Packed-Hole) dans les formations dures ou moyennement dures, ou ayant un pendage important.

#### **8.1.1. Garnitures lisses (Slick Assembly) :**

La plus simple des garnitures est dite "lisse" (Slick Assembly). Elle consiste en :  
1 outil - 1 NMDC ou MWD - 1 DC ou NMDC - n DC - ...

L'application de la théorie pendulaire permet les considérations suivantes :

- 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 à la verticale.
- L'application d'un poids introduit une flexion et rapproche le point de tangence de l'outil, diminuant donc la 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.

### **8.1.2. Garniture pendulaire :**

#### **8.1.2.1. La théorie :**

Dans le début des années 50, Woods et Lubinski ont collaboré à l'examen mathématique des forces sur un outil lorsqu'il fore dans un puits incliné. Afin d'effectuer leurs calculs, ils ont fait trois hypothèses de base :

- L'outil de forage est libre de tourner mais ses mouvements sont latéralement limités.
- Les éléments de la BHA situés immédiatement au-dessus de l'outil reposent sur la paroi inférieure du puits.
- L'outil forera dans la direction dans laquelle il est poussé et non pas celle dans laquelle il est orienté.

Le principe de base est que les différentes forces appliquées à l'outil de forage lui imposent une direction et résultent en une force latérale exercée sur la paroi du puits.

Chacun des éléments de la BHA est soumis aux forces suivantes :

- Le champ gravitationnel.
- Une force axiale résultant du poids des éléments situés au-dessus.
- Des efforts de torsion.
- Sa propre résistance à la flexion.

Il en résulte :

- Une déformation des éléments.
- Des contacts avec la paroi du puits.

Le contrôle de ces déformations et points de contact permet de modifier le comportement directionnel de la garniture.

L'outil est soumis aux forces suivantes :

- Une poussée axiale (le poids sur l'outil) résultant des éléments situés au-dessus.
- Une force latérale (force pendulaire) due au poids des éléments compris entre l'outil et le premier point de contact de la garniture avec la paroi du puits.
- La réaction de la formation à ces efforts peut se décomposer en deux forces, l'une parallèle à l'axe du puits, l'autre perpendiculaire à cet axe.

La force pendulaire maximum peut s'écrire :

$$Lf = 0.5 \times (L \times LWa \times Bf \times \sin I) \text{ lbs}$$

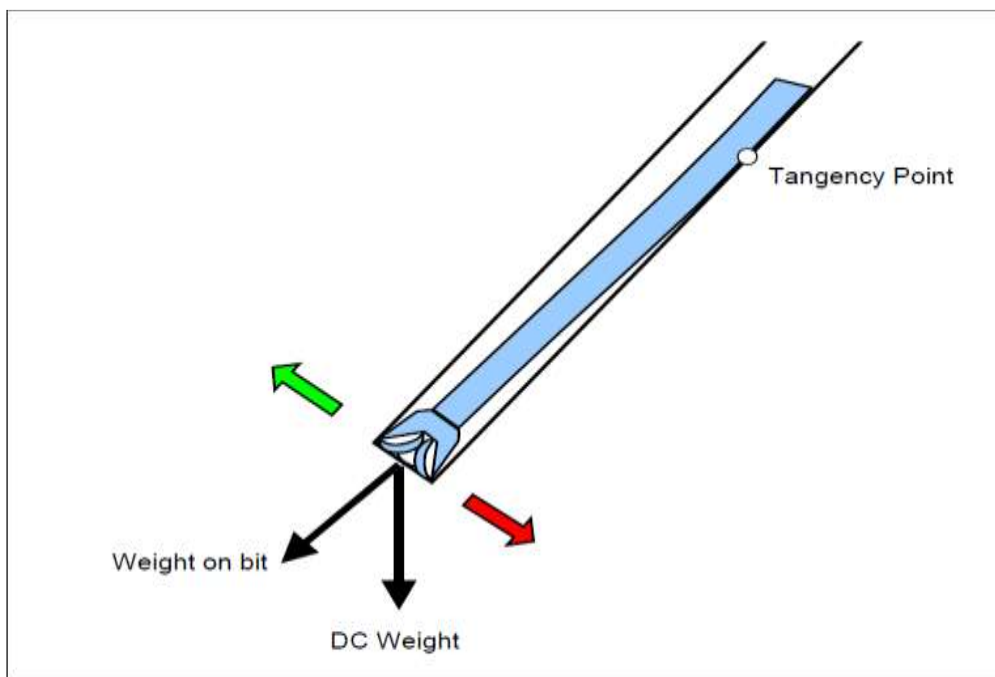
Avec :

L = Longueur des éléments situés entre l'outil et le point de contact      ft

LWa = Poids linéaire de ces éléments lbs/ft

Bf = Facteur de flottaison

I = Inclinaison locale du puits degrés



**Figure 35 : Forces à l'outil.**

Il résulte de ces différentes considérations que les facteurs suivants peuvent influencer le comportement d'une garniture :

- Le poids sur l'outil en influençant la déformation.
- La rigidité des éléments en influençant la déformation.
- L'existence et la position de points de contact.

#### **8.1.2.2. La composition :**

La garniture pendulaire est utilisée dans le forage vertical seulement comme mesure corrective pour réduire l'angle lorsque la déviation permise maximum a été atteinte.

Une chute d'inclinaison est souvent difficile à réaliser ou à contrôler, en particulier aux faibles inclinaisons.

Revenir à la verticale peut se révéler quasiment impossible avec une garniture rotary.

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.

Dans la plupart des cas, l'utilisation d'une garniture de chute provoque une forte rotation vers la droite.

Si une garniture de chute ne produit pas l'effet escompté, diverses tentatives peuvent être faites pour améliorer le résultat :

- En diminuant le poids sur l'outil.
- En diminuant la rotation.

Les garnitures les plus utilisées sont les suivantes :

Outil	Outil	Outil
MWD ou NMDC 9 m	MWD ou NMDC 9 m	MWD ou NMDC 9 m
NMDC 9 m	NMDC court 6 m	Stab string FG
Stab string FG	Stab string FG	NMDC 9 m
DC 9m	DC ...	Stab string FG
String stab FG		DC ...
DC ...		

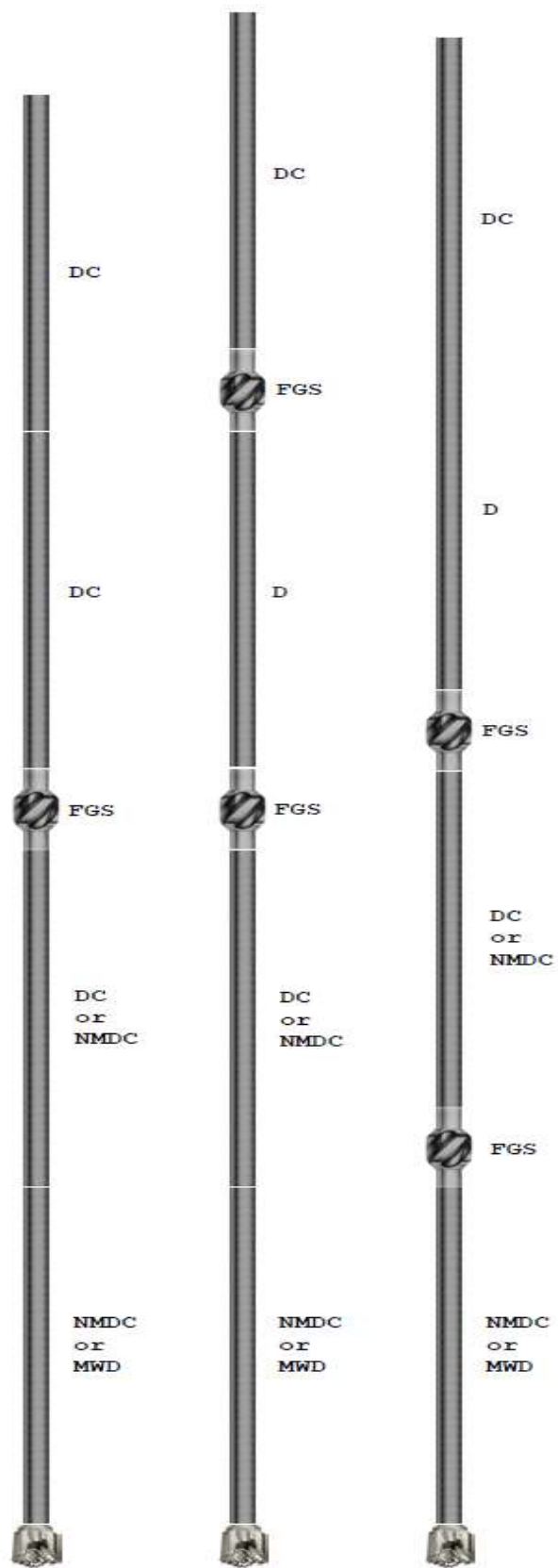


Figure 36 : Garniture pendulaire

### 8.1.3. Garniture Packed-Hole

#### 8.1.3.1. La théorie :

Cette théorie affirme que s'il y a trois stabilisateurs dans la succession juste derrière l'outil séparés par des sections courtes et rigides des masses tige, alors les trois stabilisateurs résistera, circuler une courbe et forcera l'outil pour forer une direction raisonnablement droite. Le premier des trois stabilisateurs devrait être immédiatement derrière l'outil (un stabilisateur Near-Bit) et devrait être plein trou.

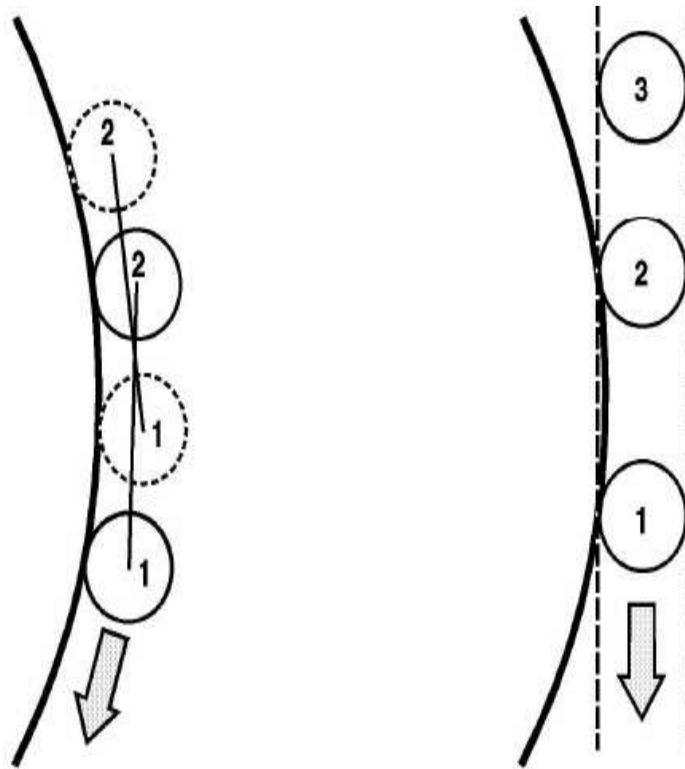


Figure 37 : Principe de la garniture Packed-Hole

Les garnitures qui utilisent ce principe s'appellent garniture Packed-Hole et sont utilisées pour forer les sections de tangente des puits directionnels, le maintien de l'angle et de la direction. Ceci devrait créer un puits bien calibré (exempte des Dog-Legs et Key Seat) ce qui permet de compléter et produire le puits sans problèmes.

#### 8.1.3.2. La composition :

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 en :

- Un stabilisateur Near-Bit (plein trou, rarement sous-dimensionné)
- Plusieurs stabilisateurs string (plein-trous ou sous-dimensionnés)
- 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.

La combinaison exacte nécessaire dépend étroitement des conditions locales :

- Inclinaison du puits
- Poids sur l'outil

Cependant l'effet d'une variation de poids reste limité avec ce type de garniture.

- Vitesse de rotation

Une augmentation de vitesse augmente la rigidité apparente.

- Type de formation

Le comportement de la garniture dépend de la formation traversée.

Ce problème doit être anticipé lorsque le forage de longues sections est prévu.

Plus que jamais, l'expérience locale est utile à la détermination de la "bonne" garniture.

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.

Les garnitures les plus utilisées sont les suivantes :

Outil	Outil	Outil
Near-bit FG	Near-bit FG	Near-bit FG
DC court 2 à 3 m	DC court 2 à 3 m	MWD ou NMDC 9 m
String stab FG	String stab FG	(NM) String stab FG
MWD ou NMDC 9 m	MWD ou NMDC 9 m	NMDC 9 m
(NM) String stab FG	(NM) String stab UG	String stab FG
NMDC 9 m	NMDC 9 m	DC 9 m
String stab FG	String stab FG	DC...
DC ...	DC ...	

Des garnitures plus sophistiquées sont quelquefois utilisées, utilisant :

- Deux stabilisateurs consécutifs
- Des masse-tiges de gros diamètre
- Des Drill-Collars carrés.

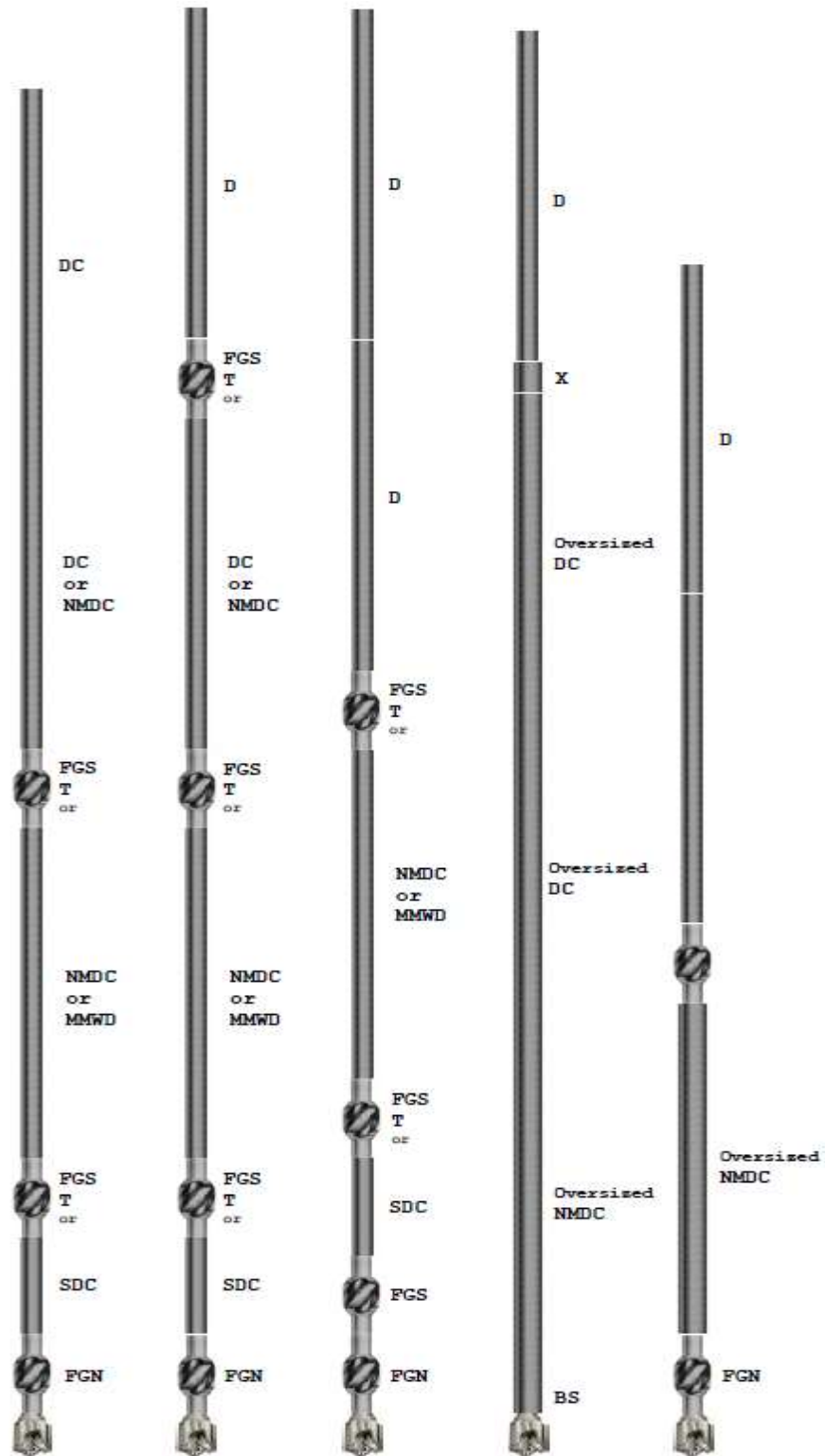


Figure 38 : Garniture Packed-Hole

## 8.2. L'utilisation d'un moteur PDM conventionnel :

### 8.2.1. Mode d'utilisation :

Une BHA directionnelle avec deux stabilisateurs et un PDM coudé montre un bon effet d'anti-déviaton lorsqu'elle travaille en mode Rotary dans les puits de faible pendage. Le mouvement giratoire de ce genre de BHA aide à éliminer la force de déviation.

Les résultats expérimentaux prouvent que ce genre de force d'anti-déviaton est beaucoup plus grand que celui du BHA pendulaire dans le même angle d'inclinaison, et diminue avec l'angle d'inclinaison du puits.

Lorsque la force de déviation causée par la formation sera plus grande que la force d'anti-déviaton l'inclinaison augmente, et une fois cette inclinaison dépasse 1 deg on passe au mode Sliding, en orientant le Tool-Face dans le sens contraire de déviation (LowSide) pour corriger la trajectoire et revenir à la verticale, et voilà plus d'explication sur ces 2 modes de forage :

#### a. *Forage en rotation :*

Un moteur coudé fore un trou surdimensionné et relativement droit lors de son utilisation en mode Rotary (garniture de forage en rotation).

Le trou est de diamètre plus faible et il présente une courbure dans les sections forées en mode orienté.

Les pires contraintes qui s'exercent sur un moteur apparaissent quand la garniture est mise en rotation, avec l'outil au fond, alors que l'on vient de forer un intervalle en mode orienté.

La rotation de la garniture dans une section courbe et de diamètre "réduit" du trou engendre des contraintes de torsion et des forces latérales pouvant aisément atteindre 3 à 8 tonnes selon le diamètre du moteur.

Les frottements résultant de cette situation peuvent entraîner des calages du moteur, et l'utilisation de la garniture au-delà des paramètres critiques.

Après une passe de forage en mode orienté, il convient donc de remonter l'outil jusqu'à atteindre la section précédente forée en rotation. La garniture peut alors être mise en rotation pour reforer l'intervalle foré en "Sliding" et poursuivre le forage en mode "Rotary".

Il est à noter que dans des formations tendres à moyennement tendres, ce reforage présente le risque de compromettre le travail directionnel effectué en mode orienté).

### ***b. Forage en mode orienté (Sliding) :***

La valeur du coude du moteur steerable doit être ajustée de façon à pouvoir réaliser le gradient de montée ou de courbure voulu.

En mode orienté, la garniture n'est pas en rotation, ce qui se traduit par l'existence d'une force de friction statique entre la garniture et les parois du trou.

Plus le déplacement horizontal du puits s'accroît, plus il est difficile de faire glisser la garniture dans le trou et forer en mode orienté devient problématique. Il faut appliquer une certaine compression à la garniture avant qu'elle ne glisse soudainement vers le bas, provoquant une brusque augmentation du poids sur l'outil, qui risque d'entraîner un calage du moteur.

Le risque de calage est particulièrement important en cas d'utilisation d'un moteur développant un couple faible (Low torque Motor) avec un outil à structure de coupe agressive.

Des calages répétés réduisent les performances de forage et rendent difficile l'orientation correcte du moteur.

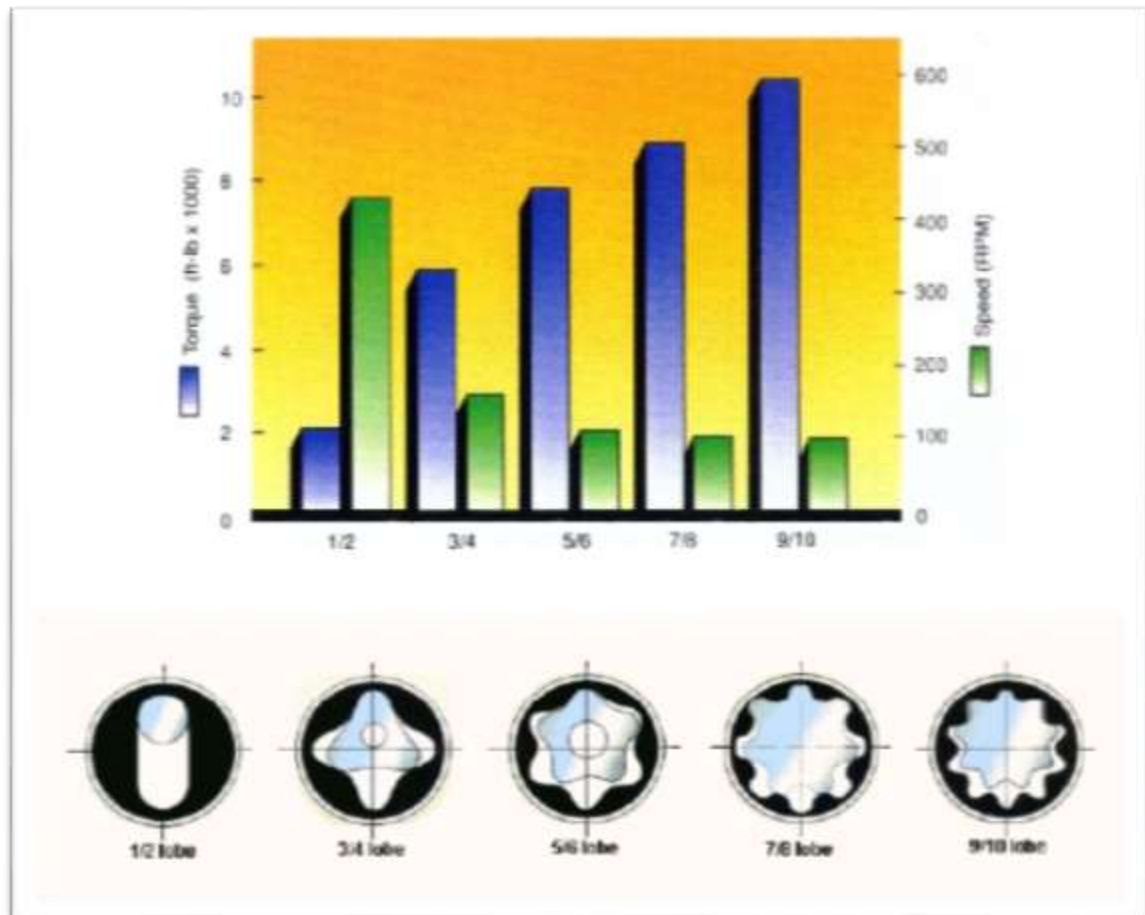
Les risques de défaillance du moteur sont accrus du fait de l'augmentation extrême de la pression et du couple lors d'un calage.

Les moteurs à section de puissance rallongée (Extended Power Section) donnent parfois des gradients de montée en inclinaison plus faibles ou plus forts que prévu à cause de leur flexion, accrue du fait de leur longueur supérieure à celle d'un moteur standard.

### ***8.2.2. Sélection du moteur :***

Trois configurations des moteurs de forage fournissent la large gamme des vitesses de l'outil et des sorties de couple exigées satisfaisant une multitude d'applications de forage. Ces configurations incluent :

- À grande vitesse / Couple Bas : moteur High Speed.
- Vitesse Moyenne / Couple Moyen : moteur Medium Speed.
- À vitesse réduite / Haut Couple : moteur Low Speed.



**Figure 39 : Différents types de moteurs / Puissance, Couple et Vitesse**

**Avantage :**

- ✓ Le forage par le PDM en mode Rotary permet de garder le puits relativement vertical.
- ✓ 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.

**Inconvénients :**

- La réduction de l'avancement due à La nécessité de forer en mode Sliding afin de contrôler la trajectoire, et la perte de temps dans le reforage des intervalles forés en Sliding après le passage en mode Rotary.

### 8.3. Utilisation de VertiTrak :

#### 8.3.1. Mode opératoire :

Le forage des puits en utilisant le VertiTrak s'effectue en deux modes :

- **Mode 1** : Steering mode
- **Mode 2** : Ribs Off mode.

##### a. Steering mode :

Dans ce mode, 1 ou 2 bras du VertiTrak sont entièrement rétractés et l'autre bras est ouvert pour repousser l'outil à la verticalité. Dans ce mode, il n'y a pas de rotation de la table (Top Drive) pour ne pas endommager les bras en position ouvertes.

S'il y a un problème dans le puits qui nécessite une courte rotation de BHA de la surface on peut la faire avec ce mode.

Si le problème nécessite une longue rotation on passe directement au Ribs off mode pour ne pas endommager les bras.

##### b. RibsOff mode :

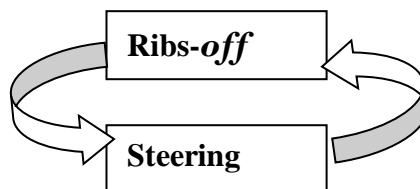
Dans ce mode, les bras sont rétractés, le VertiTrak est incapable de s'orienter et de garder la verticalité. Il est utilisé dans les opérations de Reaming et Back Reaming et dans le contrôle du puits et lors de l'opération de remontée de l'outil à la surface.

#### 8.3.2. 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 **1200l/mn** pendant une minute.

Le changement du mode se fait automatiquement.

- *Pompe off /la tension <32V*
- *Augment la tension à 75V pour 1minute*



- *Pompe off /la tension <32V*
- *Augment la tension à 75V pour 1minute*

### ***Avantage :***

- ✓ Réalisation d'un puits proche de la verticale avec une tortuosité minimale.
- ✓ Minimisation de torque et de Drag.
- ✓ Diminution de la fatigue de la garniture.
- ✓ Amélioration de la qualité du trou, ce qui permet de réaliser une bonne cimentation.
- ✓ La réduction des risques de dévissage de la garniture.

### ***Inconvénients :***

- Accroissement de possibilités de coincement par pression différentielle à cause de l'incapacité de tourner la garniture.
- Nécessite l'optimisation de débit et le pompage des bouchons de boue à viscosité élevée afin de nettoyer le puits.
- L'outil utilisé doit être convenable avec le VertiTrak.

## **9. Etude comparative :**

### **9.1. Introduction :**

Le forage des puits verticaux dans la région de Rhourd Nouss rencontre souvent le problème de la déviation indésirable surtout dans la phase 8 1/2 ou l'outil tend à se dévier, cela pourra provoquer des conséquences néfastes, d'où l'étude de ce problème et de son différent aspect est obligatoire.

Vu que le mode Rotary n'a pas permis le bon maintien de la verticalité des puits forés antérieurement dans cette région, les sociétés ont recouru à l'utilisation du moteur PDM conventionnel dans certains puits et du système de forge vertical automatique dans d'autres puits.

Cette étude essaie de déterminer le moteur le plus adapté pour le forage de la phase 8 1/2.

### **9.2. Présentation des puits étudiés :**

Afin de pouvoir déterminer le moyen le plus approprié pour le forage de la phase 8 1/2 on a pris en considération seulement les puits forés récemment à cause de manque de données des puits forés antérieurement (RN 108 foré en 1998), au totale 8 puits ont été pris, dont 5 puits de Rhourde Nouss centre et 3 puits de Rhourde Nouss Sud-est.

Parmi ces puits 4 ont été entièrement forés par des PDM conventionnels (RN110, RNSE102, RNSE103, RNSE104), et 4 puits forés par le VertiTrak (RN112, RN113, RN117, RN116).

Les 8 puits ont été forés en 35runs parmi lesquels 21runs de PDM conventionnel, et 14 runs de VertiTrak.

Ces runs totalisent 7345 m forés en 2854,55 heures ce qui donne un avancement moyen de 2,57 m/h et une longueur moyenne de 262,32 m par run.

Les données des puits sont représentées en détail dans le tableau suivant :

MOTEUR	Nom de puits	Run N°	Heurs de forage	Intervalle foré	ROP	Nom de l'outil	Remontée
PDM	RN 110	1	67,88	370	5,45	DSX811	Descente du moteur
		2	81,48	154	1,89	DSX811	Changement de la BHA
		3	62,14	87	1,4	DSX811	Changement de l'outil
		4	35,41	34	0,96	TD530P6H	Changement de l'outil
		5	162,17	253	1,56	FM3734SDBS	Descente de la turbine
	RNSE 102	1	98,47	363	3,68	HC407Z	Chute de ROP
		2	92,33	113	1,22	HCD508Z	Défaillance de MWD
		3	106,43	372	3,49	KH813	Panne du moteur
	RNSE 103	1	94,23	258	2,73	MA616PX	Chute de ROP
		2	51,67	63	1,21	FM3845Z	Chute de ROP
		3	81,22	137	1,68	MA74PX	Défaillance de MWD
		4	97,44	236	2,42	MKS56DG	Chute de ROP
		5	28,78	54	1,87	MKF39DG	Défaillance de MWD
	RNSE 104	1	135,14	416	3,07	MA616PX	Chute de ROP
		2	118,73	285	2,4	FM3743Z	Chute de ROP
	RN 116 b	1	110,91	376	3,39	DSR811M	changement de BHA
		2	30,1	118	3,92	M909PX	Changement de BHA
		3	47,26	138	2,92	DSR811M	Chute de ROP
		4	27,69	59	2,13	DSR811M	Défaillance de MWD
		5	30,26	79	2,61	DSR811M	Défaillance de MWD
6		19,42	109	5,61	KH813PX	Panne du moteur	
VertiTrak	RN 112	7	30,06	76	2,37	KH813PX	Panne du moteur
		1	100,91	554	5,49	HCR506ZX	Chute de ROP
		2	138,09	319	2,31	HCD508Z	Chute de ROP
	RN 113	3	70,49	313	4,44	HCD508Z	Chute de ROP
		1	73,88	354	4,79	FM3743	Chute de la pression
	2	64,3	161	2,5	MA913PX	Chute de ROP	

		3	97,71	402	4,11	MA913PX	Chute de ROP
	RN 116 a	1	95,12	468	4,92	DSR811M	Panne du moteur
		2	13,28	45	3,39	M909	Panne du moteur
VertiTrak		3	80,66	164	2,03	M909	Panne du moteur
		4	108,9	338	3,1	MKF58JD	Descente de la turbine
		1	134,87	452	3,35	KH813	Chute de ROP
		2	166,82	455	2,73	KH813	Panne du moteur
		3	26	25	0,96	KH813	Descente de la turbine

**Tableau1 : présentation des puits étudiés**

### 9.3. Analyse des donnés :

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" 1/2 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 moteur. En fin ; une analyse des coûts de forage sera effectuée pour déterminer le moyen le plus économique et le plus rentable.

### 9.4. Analyse de la déviation :

#### 9.4.1. Puits forés à l'aide de PDM conventionnel :

##### 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 m.

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 1/2 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 4,79 ° avec une inclinaison maximale de 6,77°.

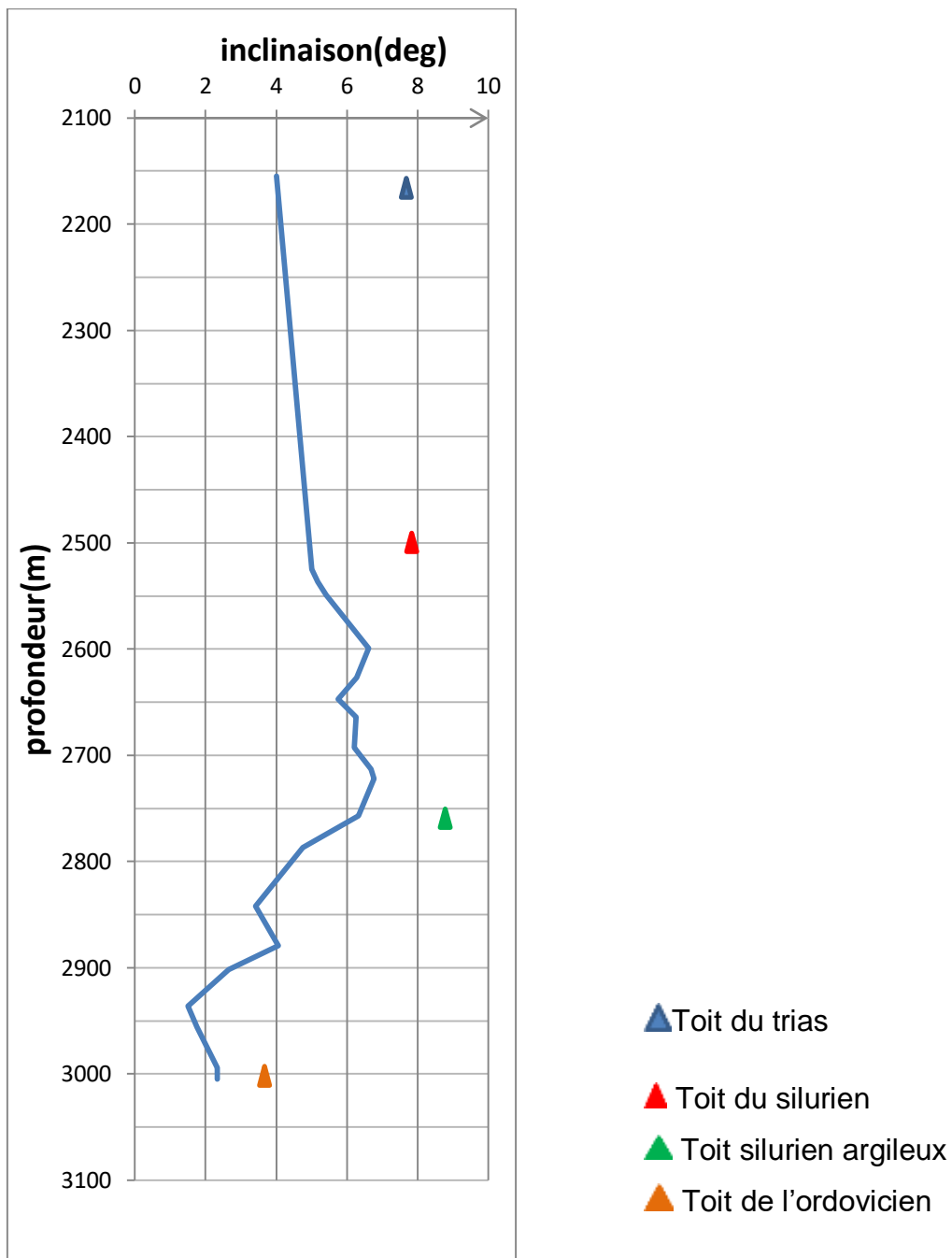


Figure 40 : L'inclinaison en fonction de la profondeur

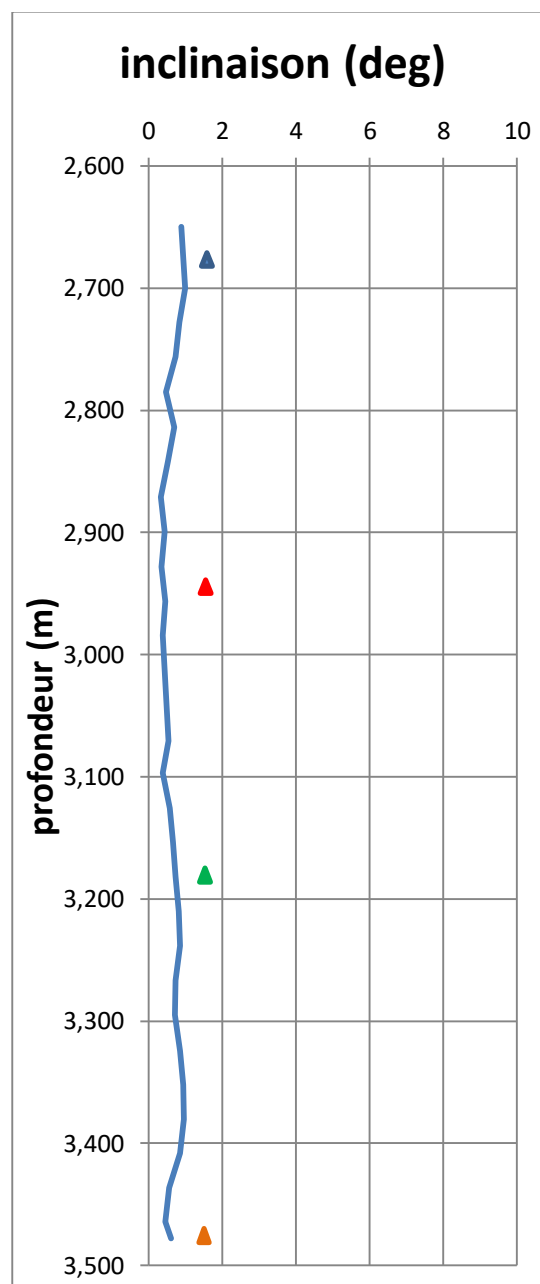
### RNSE 102 :

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

L'inclinaison moyenne était 0,65° avec une inclinaison maximale de 1°.

Le PDM a permis de forer la partie supérieure de la phase 8 ½" jusqu'à l'Ordovicien, soit 850 m, durant 15 jours avec un ROP moyen de 2,85 m/h.

Au totale trois runs étaient suffisants pour forer la partie supérieure de la phase 8 ½.



▲ Toit du trias

▲ Toit du silurien

▲ Toit silurien argileux

▲ Toit de l'ordovicien

**Figure 41 : L'inclinaison en fonction De la profondeur**

### RNSE 103 :

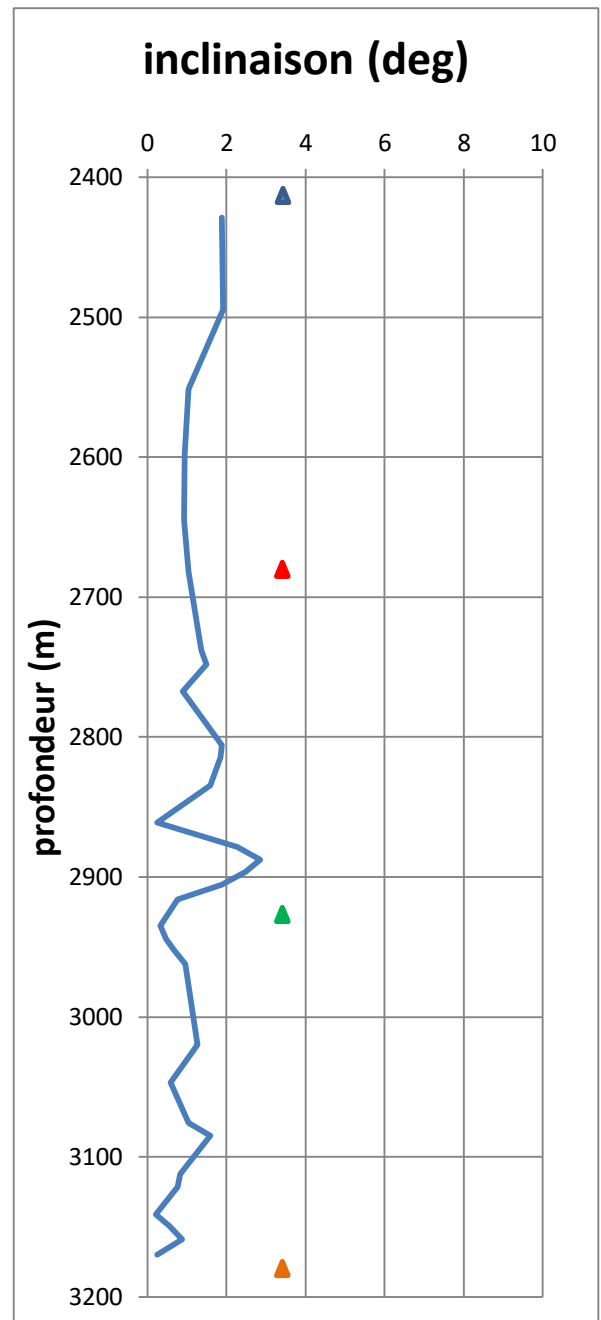
Le forage débute à la côte 2446 m dans le lias argileux, l'inclinaison était de 1.89° ; à la côte de 2598 m le moteur a permis de la réduire à 0.95°, pour ensuite rester au-dessous de 1,5° jusqu'au silurien où on rencontre des problèmes de contrôle de la trajectoire, l'inclinaison atteint 2,85°.

La fin de section est annoncée à la côte de 3194 m avec une inclinaison de 0,25°.

L'inclinaison moyenne était 1,13° avec une inclinaison maximale de 2,85°.

Le PDM a permis de forer la partie supérieure de la phase 8 ½" jusqu'à l'Ordovicien, soit 748 m, durant 22 jours avec un ROP moyen de 2,39 m/h.

Au totale trois runs étaient suffisants pour forer la partie supérieure de la phase 8 ½.



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

**Figure 42 : L'inclinaison en fonction de la profondeur**

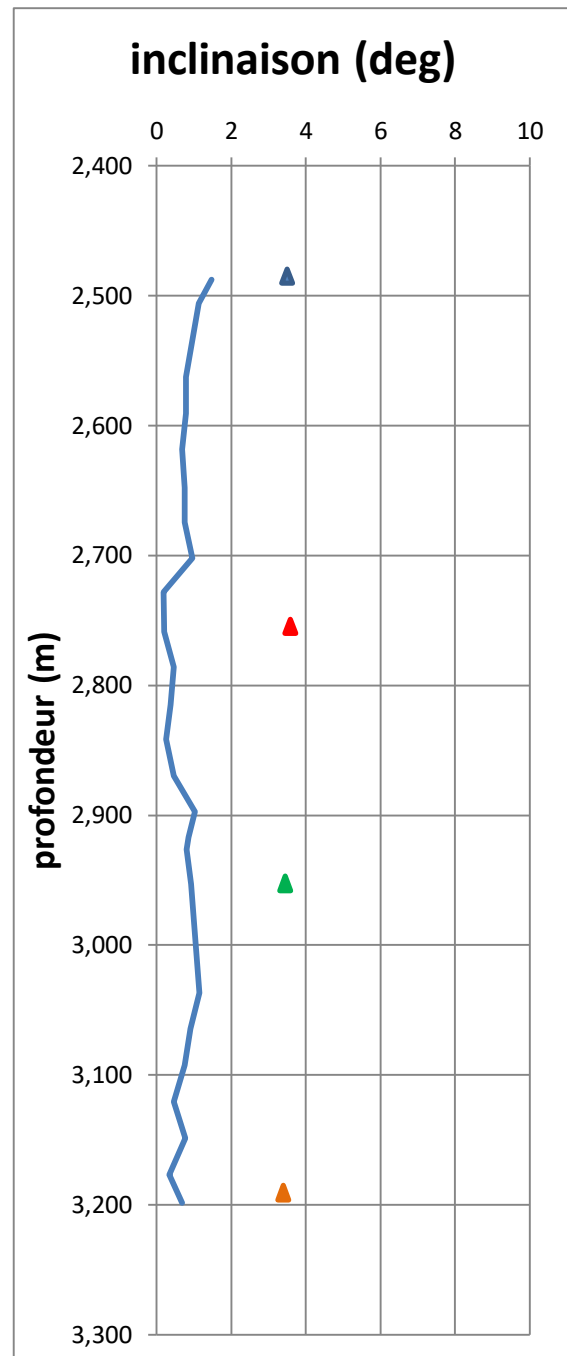
## RNSE 104 :

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 suffisants pour forer la partie supérieure de la phase 8 1/2.



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

**Figure 43 : L'inclinaison en fonction de la profondeur**

### 9.4.2. Puits forés par le VertiTrak :

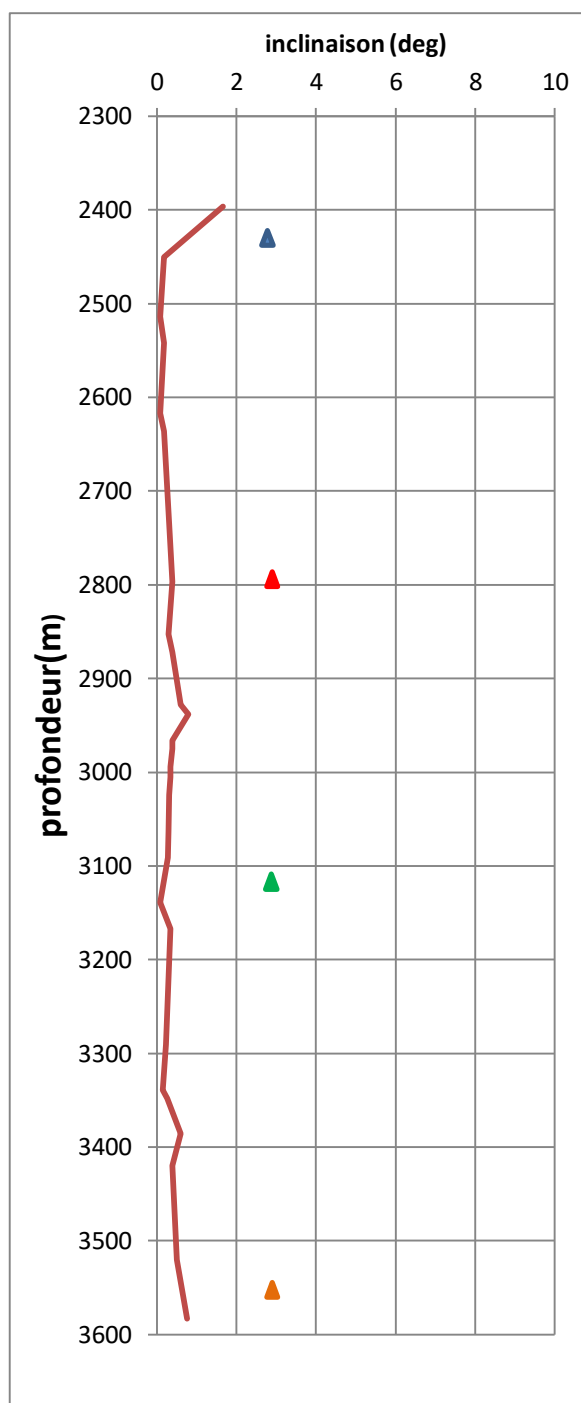
#### RN 112 :

Le forage débute à la côte 1923 dans le lias argileux, l'inclinaison était  $1.67^\circ$  ; à la côte de 2046 m le VertiTrak 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 VertiTrak 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 runs étaient suffisants pour forer la partie supérieure de la phase 8 1/2.



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

**Figure 44 : l'inclinaison en fonction de la profondeur**

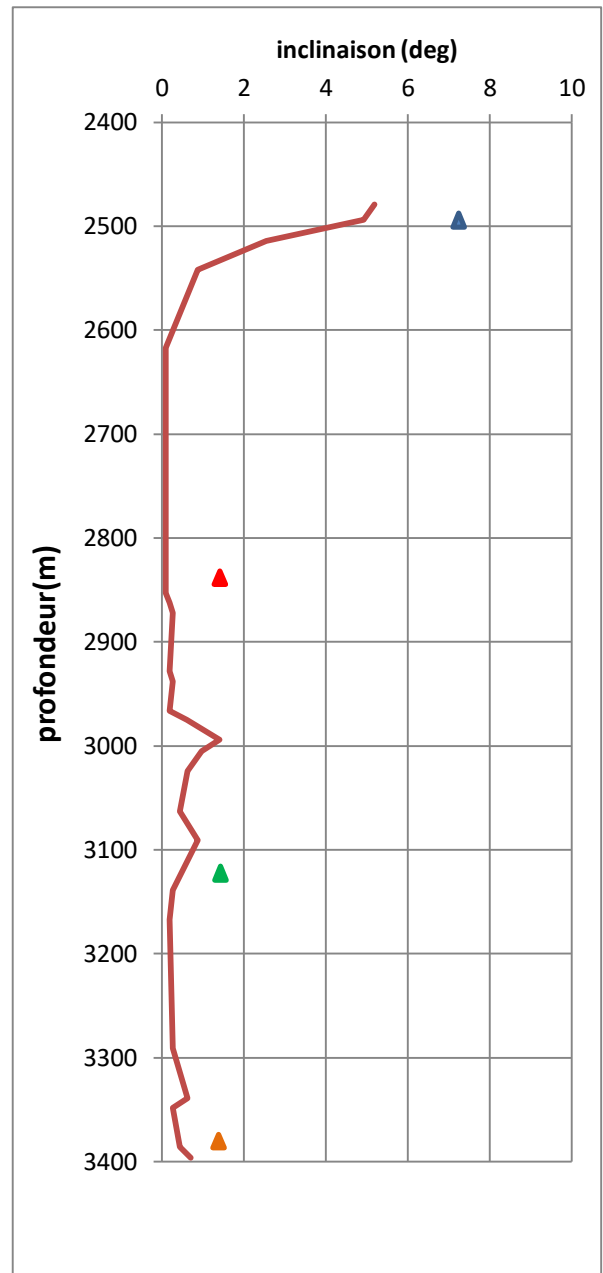
### RN 113 :

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  $1,41^\circ$  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 runs étaient suffisants pour forer la partie supérieure de la phase 8 1/2.



▲ Toit du trias

▲ Toit du silurien

▲ Toit du silurien argileux

▲ Toit de l'ordovicien

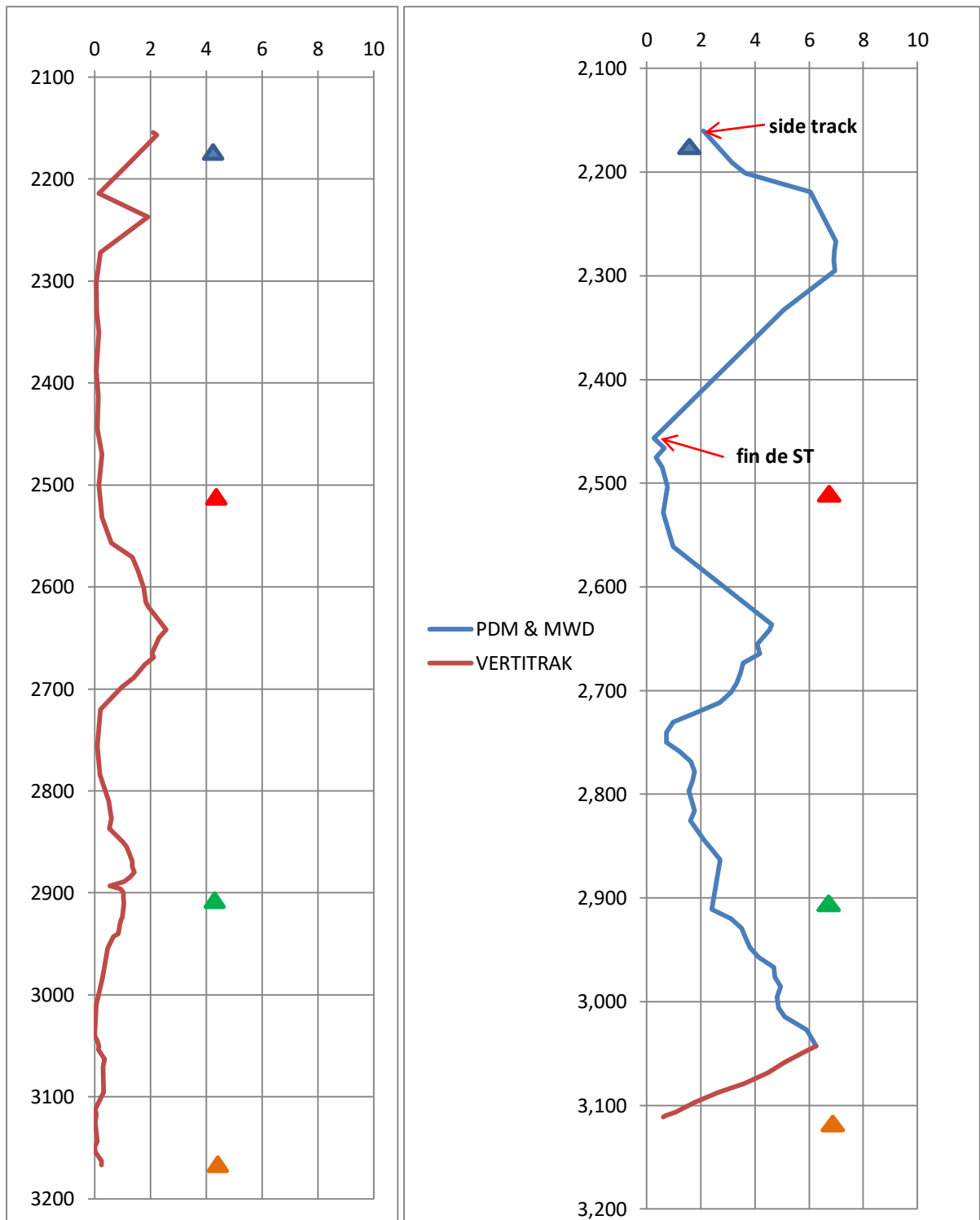
**Figure 45 : l'inclinaison en fonction de la profondeur**

**RN 116 :**

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

Le forage s'est terminé à la côte de 3177 m avec une inclinaison de 0.25°. L'utilisation du VertiTrack a permis Le forage de la partie supérieure de la phase 8 ½" jusqu'à l'Ordovicien, soit 1023 m, durant 22 jours. Au totale quatre runs étaient suffisants pour forer la partie supérieure de la phase 8 ½.

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 Sidetrack à 2166m. Une fois le Sidetrack est terminé le forage vertical reprend dans le TAGI. L'inclinaison a été maintenue à une valeur inférieure à 1° jusqu'au silurien B1 ou elle devient 4°, le taux élevé de Sliding a permis de ramener le puits à une inclinaison de 2° dans le silurien A1. Dans le Silurien Argileux l'inclinaison augmente de 2° à 6° 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° dans 70 m. La fin de la section est annoncée à 3119 m.



**Figure 46 : l'inclinaison en fonction de la profondeur avant Sidetrack (RN 116 a) et après Sidetrack (RN 116 b)**

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

## RN 117 :

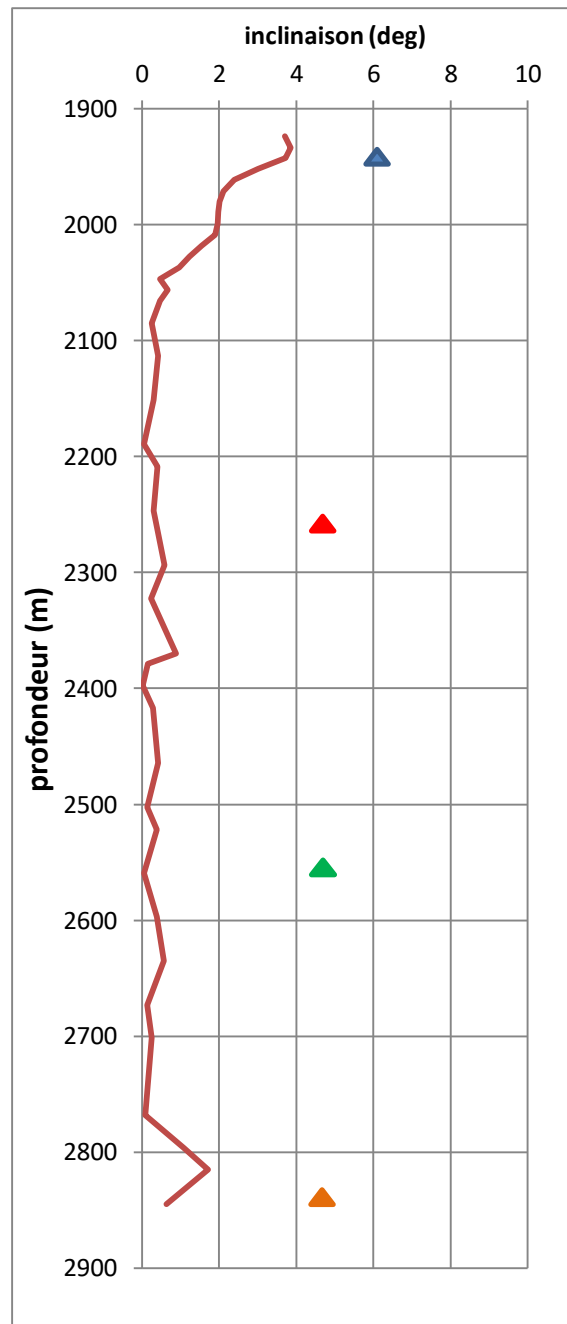
Le forage débute à la côte 1923 dans le lias argileux, l'inclinaison était de  $3.71^\circ$  ; à la côte de 2046 m, c'est-à-dire dans le trias carbonate, le VertiTrack a permis de la réduire à  $0.47^\circ$ , pour ensuite rester au-dessous de  $1^\circ$  jusqu'à 2796 m ou on observe une augmentation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

**Figure 47 : L'inclinaison en fonction de la profondeur**

### 9.4.3. Récapitulatif :

Type de moteur	Puits	Inclinaison moyenne	Inclinaison max
VertiTrak	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
PDM & MWD	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

Tableau2 : l'inclinaison moyenne et maximale de chaque puits

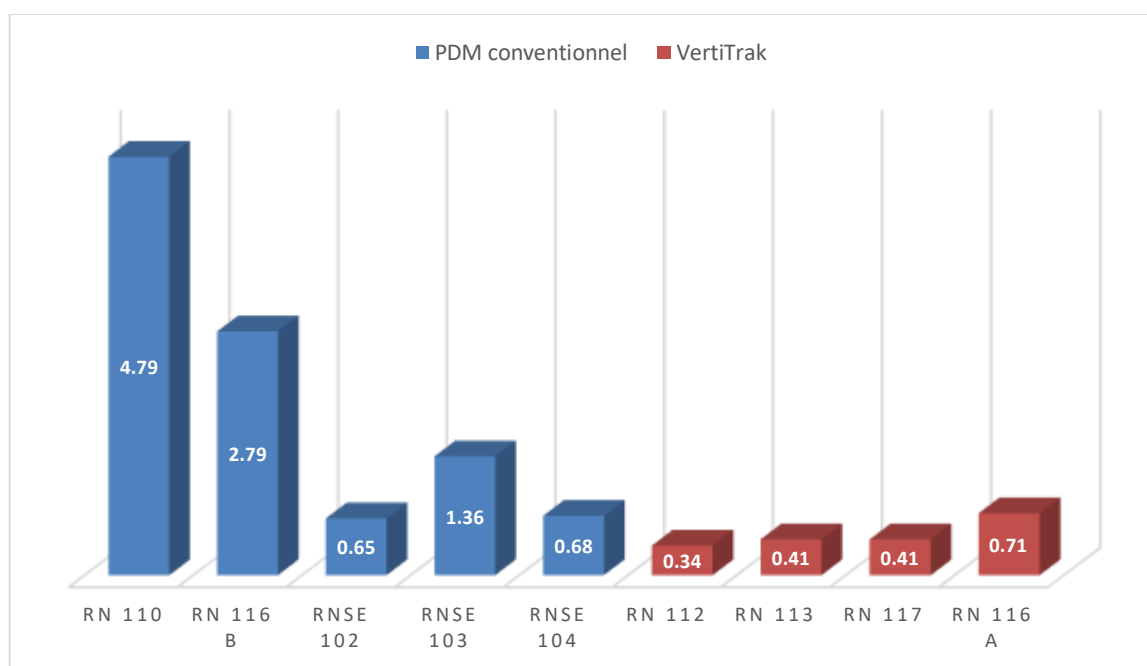
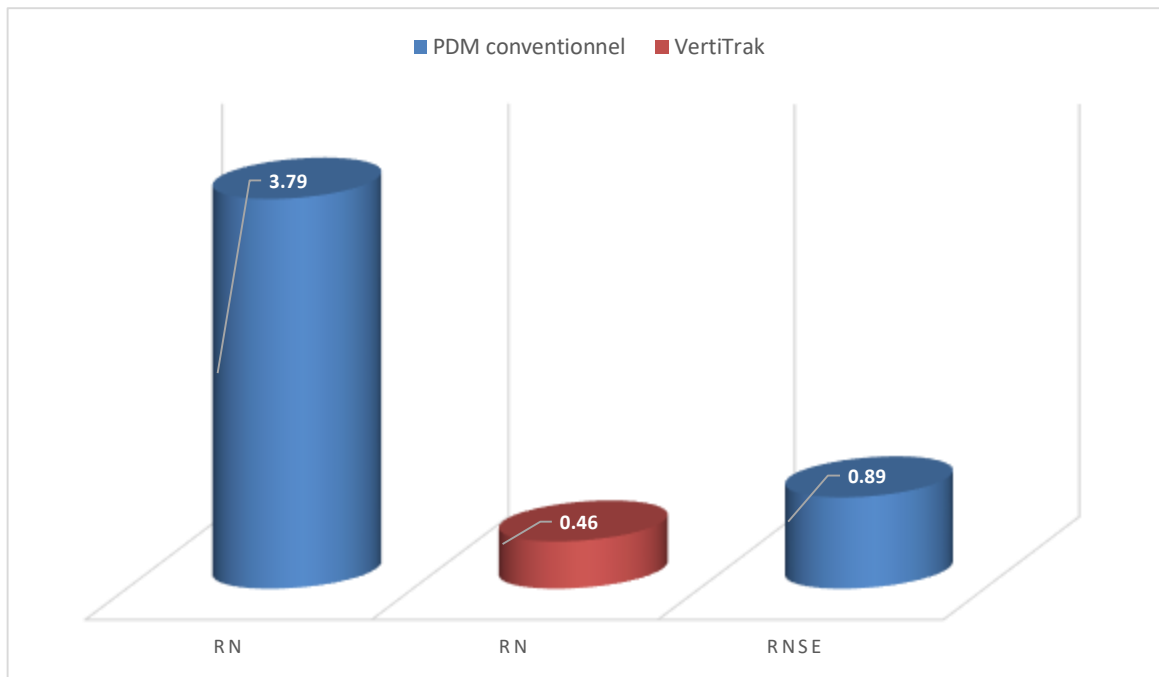
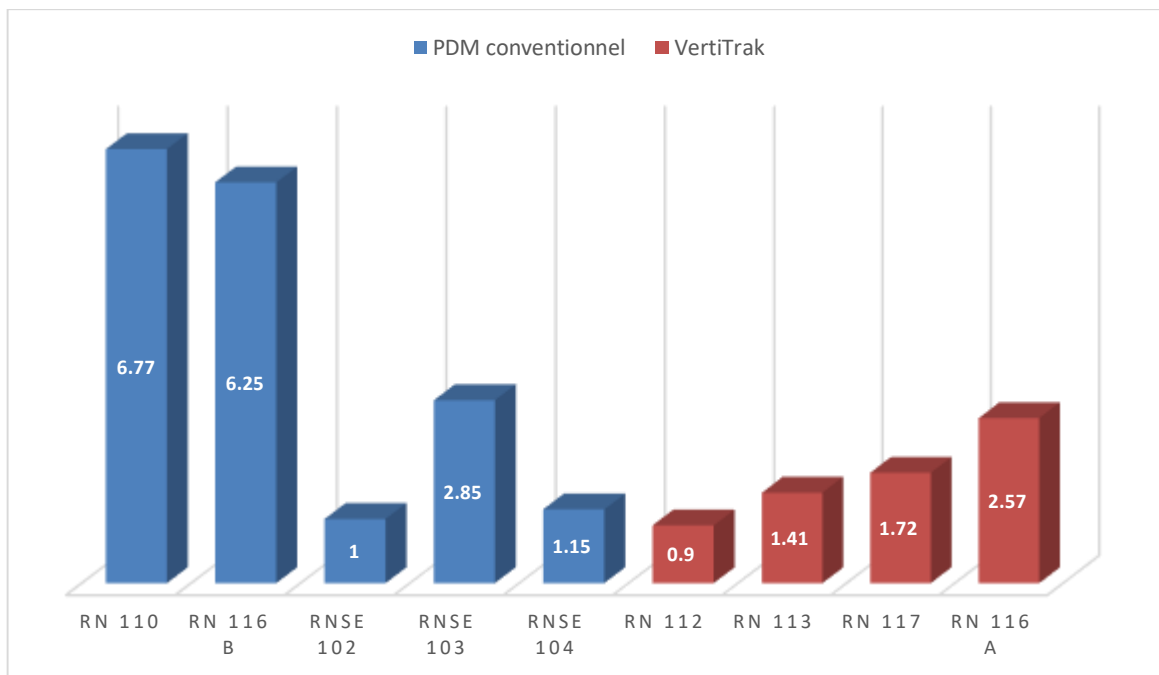


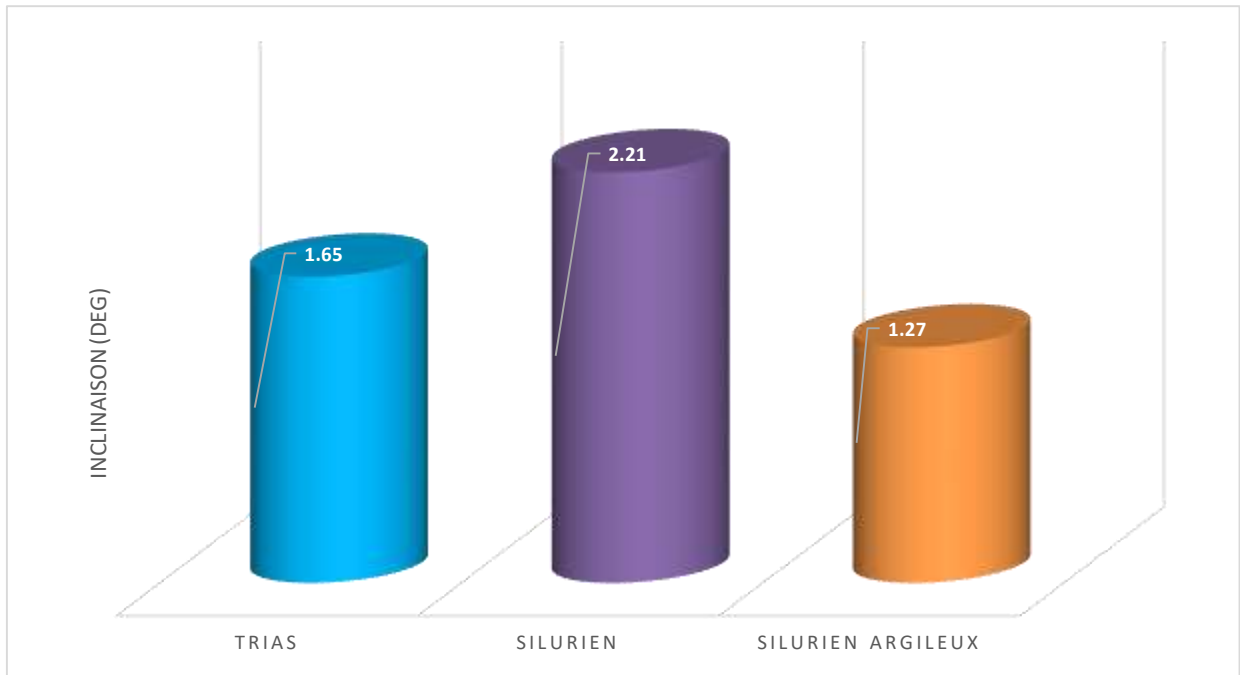
Figure 48 : l'inclinaison moyenne pour chaque puits



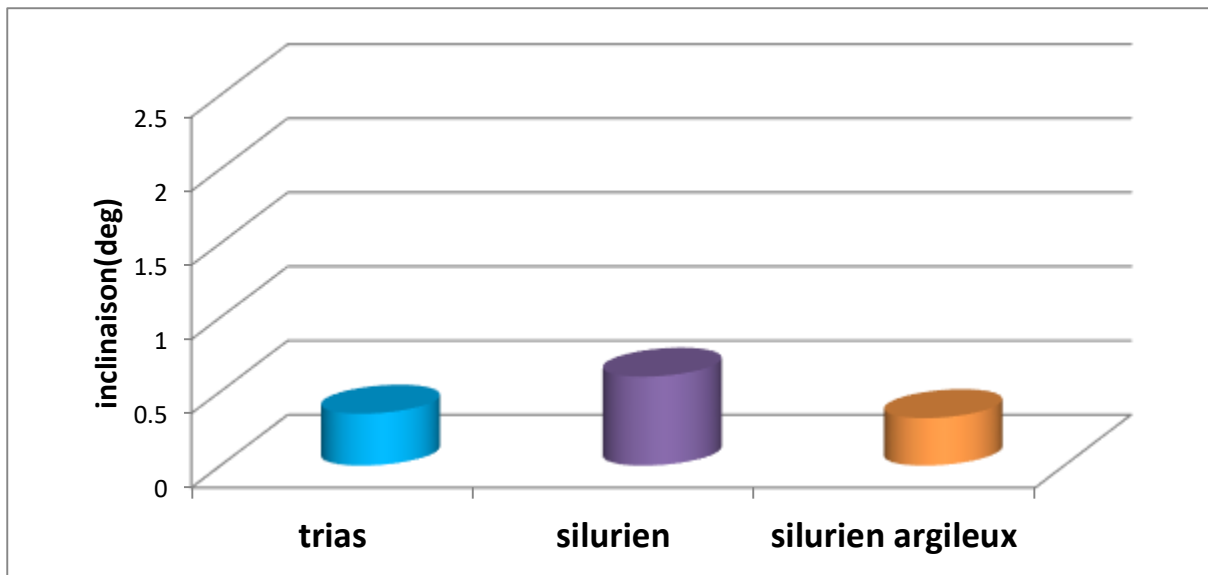
**Figure 49 : l'inclinaison moyenne donnée par chaque moteur**



**Figure 50 : l'inclinaison maximale pour chaque puits**



**Figure 51 : l'inclinaison moyenne réalisée par le PDM conventionnel dans chaque formation**



**Figure 52 : l'inclinaison moyenne réalisée par le VertiTrak dans chaque formation**

➤ **On remarque que :**

- L'inclinaison moyenne réalisée par le VertiTrak (0,46°) est bonne par rapport à celle réalisée par le PDM conventionnel (inclinaison de 3,79°) à Rhourd Nous centre.
- Le PDM conventionnel a bien maintenu la verticalité au sud-est (une inclinaison moyenne de 0,89°).
- Le maximum d'inclinaison réalisé par le VertiTrak est de 2,57° dans le RN116, d'autre part celui réalisée par le PDM conventionnel 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 grés 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.

**9.4.4. Conclusion :**

D'après les résultats de la déviation obtenus on peut conclure que Le système de forage vertical automatique est le moyen le plus efficace pour garder la verticalité des puits de centre.

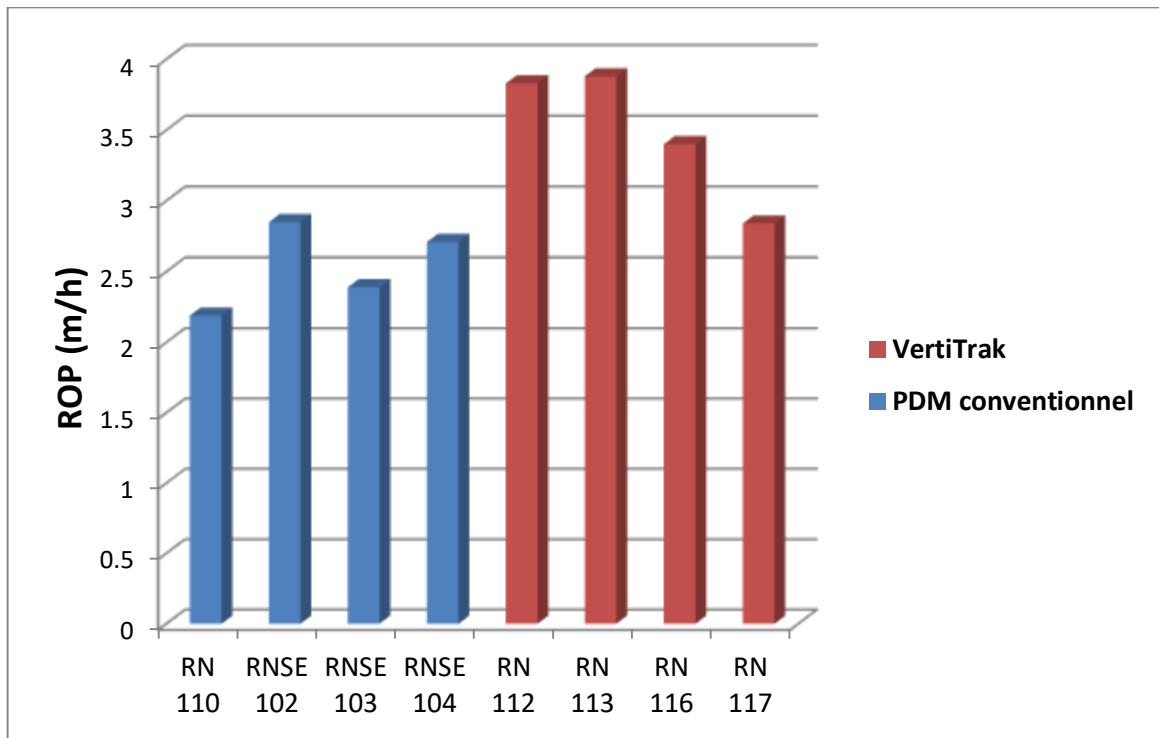
Le PDM conventionnel est un bon moyen de maintien de verticalité des puits de sud-est.

**9.5. Analyse des performances :**

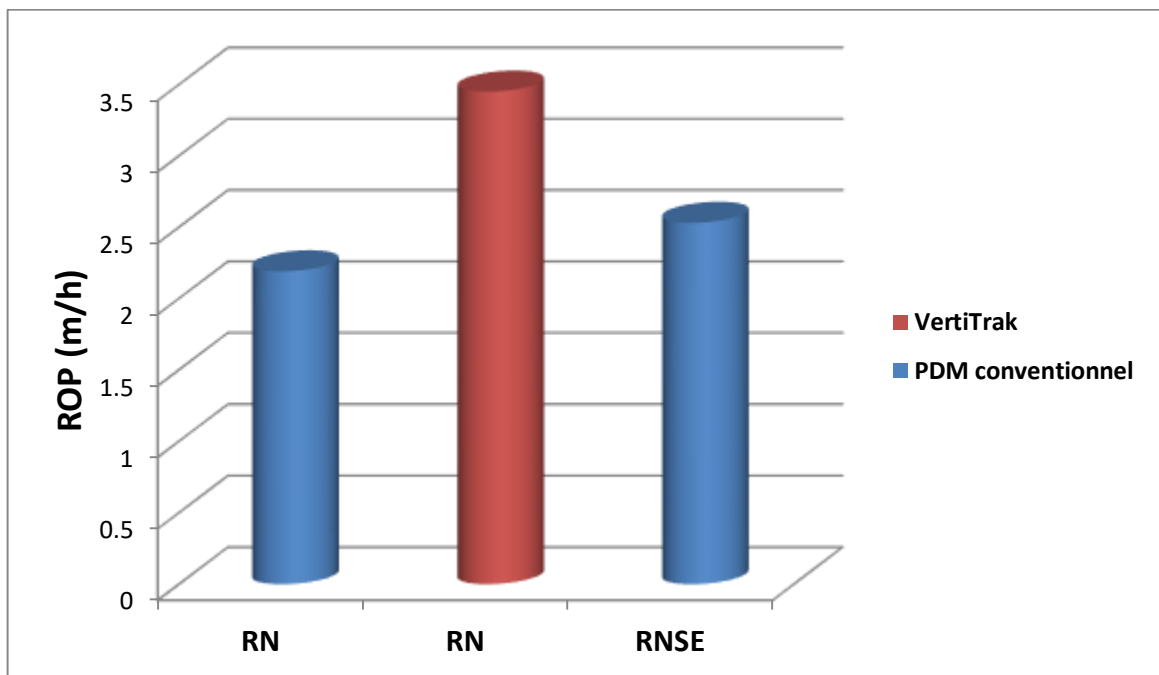
L'avancement réalisé dans chaque puits est donné dans le tableau suivant :

Type de moteur	Puits	Avancement
<b>PDM</b>	RN 110	2,19
	RNSE 102	2,85
	RNSE 103	2,39
	RNSE 104	2,71
<b>VertiTrak</b>	RN 112	3,83
	RN 113	3,88
	RN 116 a	3,4
	RN 117	2,84

**Tableau 3 : le ROP réalisé dans chaque puits**



**Figure 53 : l'avancement réalisé dans chaque puits**



**Figure 54 : l'avancement réalisé par chaque moteur**

➤ **Remarque :**

- Le VertiTrak a donné un ROP plus élevé que celui donné par le PDM conventionnel 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, tandis que celui réalisé par le PDM conventionnel au centre est de 2,19 m/h. ce qui représente une différence avantageuse pour le VertiTrak de **1, 26** m/h.

- Le PDM conventionnel a réalisé un avancement moyen de 2,53 m/h au sud-est.

➤ **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.

**9.6. Analyse économique :**

Comme on l'a vu dans l'étude des performances et de déviation le VertiTrak a un certain avantage sur le PDM conventionnel 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.

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, du prix de location par jour, et du prix de l'opérateur qui accompagne celle-ci et qui est facturé à la journée. La formule utilisée pour ce calcul est la suivante :

$$P_m = \frac{J_{run} \times P_{location\text{apareille}} + P_{outil} + P_{prix\text{dumoteur}}}{I}$$

Pour le PDM :

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

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 de l'intervalle foré.

Et pour le VertiTrak :

$$prixdumoteur = J_{runs} \times (P_{opérateur} + P_{location})$$

- $J_{run}$ : 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 :

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 4 : 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 Shlumberger.

Les données économiques des puits utilisés dans cette analyse et les résultats du calcul sont résumés dans les tableaux suivants :

➤ **VertiTrak :**

	RN 112	RN 113	RN 116 a	RN 117
Durée de la phase (jours)	19	15	22	23
Métrage (m)	1186	917	1015	932
Cout de l'appareil (\$/j)	37 300,40	37 300,40	37 300,40	37 300,40
Cout de VertiTrak (\$)	422009	333165	488642	510853
Cout des outils de forage (\$)	159 012	106 330	77 113	130 226
Cout de la phase (\$)	1236319,6	956836	1324521,8	1434335,2
Prix de mètre foré (\$)	1087,46	1089,42	1365,87	1608,35

**Tableau 5 : analyse économique des puits foré par le VertiTrak.**

➤ **PDM & MWD :**

	RN 110	RNSE 102	RNSE 103	RNSE 104
Durée de la phase (jours)	27	15	22	17
Métrage (m)	898	850	748	701
Cout de l'appareil (\$/j)	37 300,40	37 300,40	37 300,40	37 300,40
Cout de PDM & MWD (\$)	269974	210619	282270	197140
Cout des outils de forage (\$)	126957	158705	157370	68680
Cout de la phase (\$)	1404041,80	928830	1260248,80	841676,80
Prix de mètre foré (\$/m)	1563,52	1092,74	1684,82	1283,77

**Tableau 6 : analyse économique des puits foré par le PDM conventionnelle.**

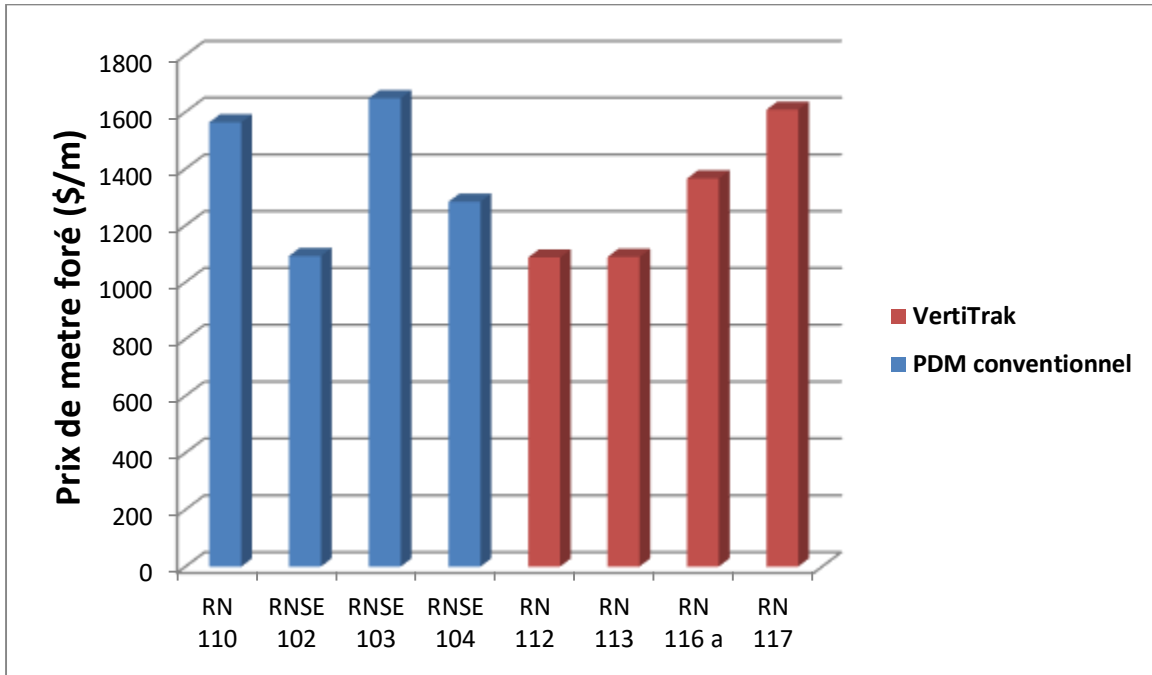


Figure 55 : le prix de mètre foré dans chaque puits

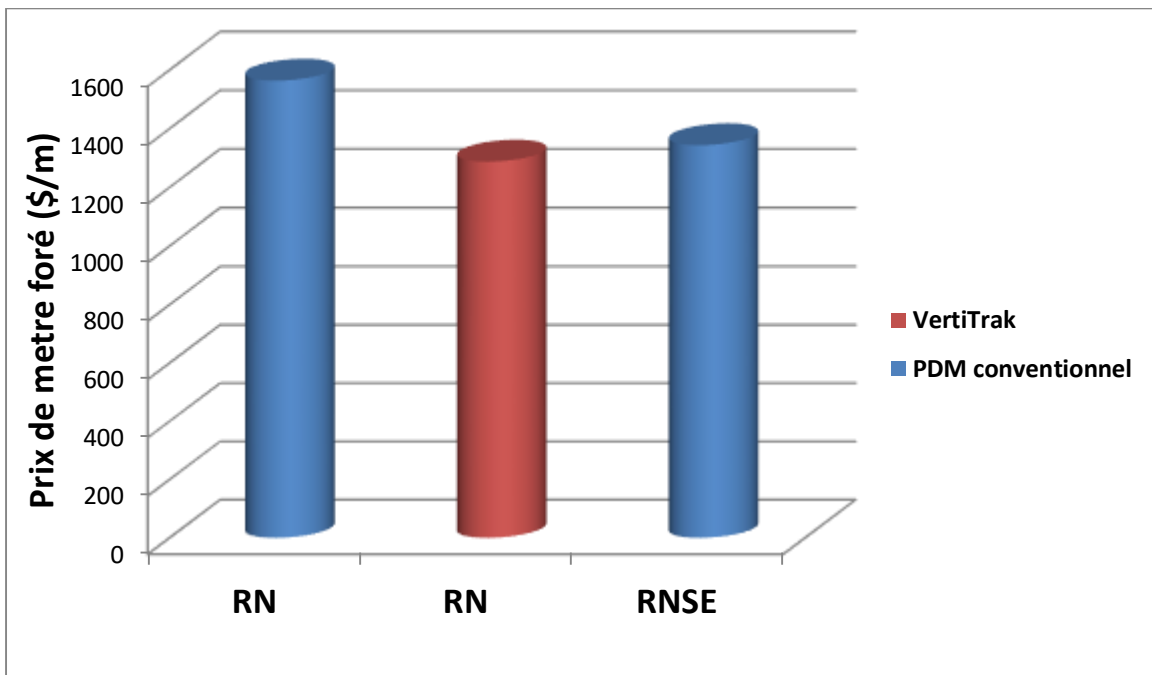


Figure 56 : prix de mètre foré pour chaque moteur

➤ **On remarque que :**

✓ Le prix minimal donné par le VertiTrak est de 1087 \$/m dans le puits RN112, et celui donné par le PDM conventionnel est de 1092 \$/m dans le puits RNSE102.

✓ Le VertiTrak permet d'avoir un prix moyen du mètre foré de 1287\$/m, alors que les PDM donnent un prix moyen du mètre foré de 1563 \$/m au centre. Soit un prix supérieur à celui de VertiTrak de près de 276 \$/m.

➤ **Conclusion :**

Il apparaît que le VertiTrak est plus rentable que le PDM conventionnel grâce à ses avantages techniques qui permettent d'obtenir un avancement élevé et par conséquent d'économiser le temps de forage ce qui implique la diminution de prix de mètre foré.

## **10. Conclusion générale :**

En fin de cette étude et à partir des différentes analyses qu'on a menées, plusieurs réalités ont été mises en évidence :

- Il n'y a pas une seule explication pour la déviation. Elle semble être liée à la géologie et la garniture de forage utilisée.
- La déviation n'est jamais plus grande que le pendage des couches.
- La déviation peut être contrôlée, mais elle ne soit jamais éliminée.
- Le PDM conventionnel est un bon moyen de maintien de la verticalité dans les régions où les tendances de déviation ne sont pas très élevées.
- Le système de forage vertical automatique VertiTrack est le moyen le plus approprié pour le forage de la section grâce à ses avantages technico-économiques.

## **11. Recommandation :**

Pour un meilleur contrôle de la déviation au centre, et une meilleure rentabilité au sud-est on recommande l'utilisation du système de forage vertical automatique VertiTrack tout en respectant ses conditions de fonctionnement, notamment le choix de l'outil le plus adapté.

# Bibliographie

- A.Slimani ; M.daddou : Formation JDF module F3, SONATRACH division forage Département Formation.
- F. Grondin : Formation JDF module M2 Tome 2, SONATRACH division forage Département Formation.
- N. Elsayed /S. Mohamed; Programme de forage RN 117; SONATRACH.
- Rapports journaliers de forage des puits : RN 110, RN 112, RN 113, RN 116, RN 117, RNSE 102, RNSE 103, RNSE 104.
- Baker Hughes INTEQ; drilling engineering workbook; 1995.
- Baker Hughes: Navi-Drill Motor Handbook, Baker Hughes Incorporated, 2009.
- Baker Hughes ; Application du VetriTrak au champ Rhourd Nouss Phase 8 ½”– 6 ¾” VertiTrak ; 2009.
- BakerHughes ; Vertical drilling systems.
- IADC Drilling Manual, eBook Version .2000.
- Jean-Paul Suzuka ; Forage dirigé Ingénierie et méthodes ; ENSPM ; 2005.
- Qinfeng Di, ShangHai University; YongDo Chang and Hejun Zhou, Tuha Petroleum Exploration & Development Beru;The Application and Evaluation of A New Vertical and Fast Drilling Technology in Tuha Oilfield; IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition; 2004.
- Rapport de fin de puits des puits suivant : « RN 110, RN 112, RN 116».
- Richard S. Carden; Robert D. Grace; horizontal and directional drilling; PETROSKILLS; 2007.
- Schlumberger; Algeria WEC; AJ TORRE & Associates; 2007.
- Schlumberger; Powerpak Steerable Motor Handbook; Schlumberger Educational Services; 2004.
- SONATRACH ; Moteur de fond PDM (positive Displacement Motors) ;

## 12. Liste des figures :

- **Figure 2: Section sismique illustrant l'aspect structural de Rhourd Nouss centre.**
- **Figure 2 : fiche stratigraphique de la phase 8 ½''**
- **Figure 3 : les différents types de stabilisateur.**
- **Figure 4 : Dump Valve**
- **Figure 5 : Section motrice**
- **Figure 6 : Vitesse et torque en fonction du nombre de lobe**
- **Figure 7 : La longueur d'étage**
- **Figure 8 : Section d'appui**
- **Figure 9 : Roulement d'un PDM (à billes)**
- **Figure 10 : Flex Rod**
- **Figure 11 : Universal Joint**
- **Figure 12 : Composition d'un PDM**
- **Figure 13 : Ajustement du coude.**
- **Figure 14 : PDM avec Bent-Housing**
- **Figure 15 : Différence entre la section motrice conventionnelle et la section X-treme**
- **Figure 16 : Composition de VertiTrak**
- **Figure 17 : Inclinomètre TOTCO**
- **Figure 18 : L'étage d'alimentation**
- **Figure 19 : Les différents étages d'un MWD**
- **Figure 20 : Théorie de formation anisotrope**

- **Figure 21 : Théorie de la différence de la vitesse d'avancement**
- **Figure 22 : théorie de miniatures de Whipstock.**
- **Figure 23 : Théorie de moment aux masses tiges**
- **Figure 24 : Downtip et Updip**
- **Figure 25 : les failles**
- **Figure 26 : le pli**
- **Figure 27 : Contraintes tectoniques – Réactions et évènements**
- **Figure 28 : Les alternances de formation tendre et dure**
- **Figure 29 : Déblais accumulé**
- **Figure 30 : Formation fracturée ou faillée**
- **Figure 31 : Dog-Leg résultant d'une couche dure**
- **Figure 32 : Key-Seat**
- **Figure 33 : Trou ovalisé**
- **Figure 34 : Trou spiralé**
- **Figure 35 : Forces à l'outil**
- **Figure 36 : Garniture pendulaire**
- **Figure 37 : Principe de la garniture Packed-Hole**
- **Figure 38 : Garniture Packed-Hole**
- **Figure 39 : Différents types de moteurs / Puissance, Couple et Vitesse**
- **Figure 40 : L'inclinaison en fonction de la profondeur**
- **Figure 41 : L'inclinaison en fonction De la profondeur**
- **Figure 42 : L'inclinaison en fonction de la profondeur**
- **Figure 43 : L'inclinaison en fonction de la profondeur**

- **Figure 44 : l'inclinaison en fonction de la profondeur**
- **Figure 45 : l'inclinaison en fonction de la profondeur**
- **Figure 46 : l'inclinaison en fonction de la profondeur avant Sidetrack (RN 116 a) et après Sidetrack (RN 116 b).**
- **Figure 47 : L'inclinaison en fonction de la profondeur**
- **Figure 48 : l'inclinaison moyenne pour chaque puits.**
- **Figure 49 : l'inclinaison moyenne donnée par chaque moteur.**
- **Figure 50 : l'inclinaison maximale pour chaque puits.**
- **Figure 51 : l'inclinaison moyenne réalisée par le PDM conventionnel dans chaque formation**
- **Figure 52 : l'inclinaison moyenne réalisée par le VertiTrik dans chaque formation.**
- **Figure 53 : l'avancement réalisé dans chaque puits**
- **Figure 54 : l'avancement réalisé par chaque moteur.**
- **Figure 55 : le prix de mètre foré dans chaque puits.**
- **Figure 56 : prix de mètre foré pour chaque moteur**