

REPUBLIQUE ALGERIANNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA



MEMOIRE MASTERIALE SUR LES MOTEURS DE FOND

PDM

TURBINE

ENCADRER PAR :
DR. NABIL TOUMI

PAR :
- B. ABDLKADER
- R. AKRAM



REPUBLIQUE ALGERIANNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
UNIVERSITE KASDI MERBAH -OUARGLA



Faculté Des Hydrocarbures et les Energies renouvelables et les
Sciences de terre et l'univers

Département de Forage et Mécanique des Chantiers Pétrolier
Présenté pour L'obtention Du Diplôme De :

MASTER

Spécialité: Génie Pétrolière

Option : Forage

Par: -ROKKABA Akram

-BENCHOHRA Abdelkader

Thème :

ETUDE SUR LES
MOTEURS DE FOND :
PDM ET TURBINE

Encadré par : Dr. TOUMI Nabil

Année universitaire : 2015/2016



ReMeRcImEnT

*Nous tenons à remercier en premier lieu DIEU
le tout puissant qui a fait que ce travail soit terminé ;*

*En achevant ce modeste travail, nous remercions
vivement notre promoteur chargé du suivi notre travail :
Dr. TOUMI Nabil
Pour ses encouragements, ses conseils et sa disponibilité.*

*Nous présentons nos chaleureux remerciements à nos parents,
nos frères et nos sœurs*

*Nous remercions également nos enseignants de notre faculté
Nos amis et toutes les personnes qui nous ont aidés
de près ou de loin à la réalisation de ce travail,*



DÉDICACE

Je didis ce modeste travail *A ceux* qui sont la source de mon *inspiration* et de mon *courage*, à qui je dois de l'*amour* et la *reconnaissance*.

☉ *A mes parents.*

☉ *A mon frère, Lotfi. A mes sœurs, Soumia et Anfal. je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*

☉ *A tout mes amis (Abdelkader, Rachid, Walid, Zaki, Salah et tous mes amis de Tebessa, Ahmed et Omar)*

☉ *Un chaleureux didicace pour LaXA*

☉ *A toute la famille Bouggueffa et benchohra ainsi qu' A tous les amis de l'université de Kasdi Merbah*



ROKKABA Akram



DÉDICACE

Je dédis ce modeste travail *A ceux* qui sont la source de mon *inspiration* et de mon *courage*, à qui je dois de l'*amour* et la *reconnaissance*.

- ☉ *A mes parents.*
- ☉ *A mes frères, Rabeh, Sadam et sons petite famille. A ma sœurs, Fatima et ses petites adorable Asmaa et Malak, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*
- ☉ *A toute ma famille Benchohra.*
- ☉ *A tout mes amis (Akram, Mohamed, Rachid, Walid, Zaki, Salah kada, et tous mes amis de Tebessa).*
- ☉ *Un didicace spécial pour : mon fr ère Tayyab, et mon amis Hocine*
- ☉ *A ma grande mère et et sa famille*
- ☉ *A toute la famille Mokhtari, roqaba, ainsi qu' A tous les amis de l'université de Kasdi Merbah*



Benchohra AEK



Sommaire :

Introduction

Chapitre I: généralité sur le forage dirigé

I : Introduction	1
I-1: Définition du forage dirigé	1
I-2 : Les applications des forages dirigés	2
I-2-1 : Puits d'interception (relief well).....	2
I-2-2 : Puits latérale (Side Track).....	3
I-3-3 : Forage dirigé pour raison géologique	4
I-2-4 : Emplacement des surfaces impraticable	5
I-2-5 : Plate forme de production à puits multiples	7
I-2-6 : Puits d'exploration multiples.....	7
I-3 : Les différents types et profil de puits	8
I-3-1 : Puits en J.....	8
I-3-2 : Puits en S.....	9
I-3-3 : Puits a double montés.....	9
I-3-4 : Puits horizontaux et a long dépôt.....	10
I-3-5 : Puits incliné a l'origine	10
I-3-6 : Puits multilatéraux	11
I-3-7 : Puits en re-entry.....	11
I-4 : Equipements de forage dirigé	12
I-4-1 : Equipements standards de forage	12
I-4-1-1 : Masse tiges.....	12
I-4-1-2 : Tige de forage	12
I-4-1-3 : Coulisserie de forage	13
I-4-1-4 : Amortisseur de vibrations	13
I-4-1-5 : Bumper subs	13

I-4-1-6 : Elargisseur.....	13
I-4-2 : Equipements spécifiques au forage dirigé	14
I-4-2-1 : Stabilisateur.....	14
I-4-2-2 : Equipements amagnétique.....	14
I-4-2-3 : Raccord d'orientation.....	15
I-4-2-4 : raccords soudés.....	15
I-4-2-5 : Outils de déflexion	15
I-4-2-6 : Equipements de mesure.....	15
I-4-2-6-1 : En temps différé.....	15
I-4-2-6-2 : En temps réel.....	15
I-5: Les puits horizontaux	16
I-5-1 : Définition	16
I-5-2 : Les avantages et les inconvénients d'un forage dirigé.....	16
I-5-2-1 : Les avantages d'un forage dirigé	16
I-5-2-2 : Les inconvénients d'un forage dirigé.....	17
I-5-3 : Les différents types d'un forage horizontal.....	17
I-5-3-1 : Les puits à long rayon (long radius).....	17
I-5-3-1-1 : Les avantages.....	17
I-5-3-1-2 : Les inconvénients	18
I-5-3-2 : Les puits à moyen rayon (medium radius).....	18
I-5-3-2-1 : Les avantages	18
I-5-3-2-2 : Les inconvénients	18
I-5-3-3 : Les puits à rayon court ou ultra court (short ultra radius).....	19
I-5-3-3-1 : Les avantages	19
I-5-3-3-2 : Les inconvénients	19

Chapitre II : Les moteurs a déplacement positives PDM et les turbines

II : Introduction	23
II-1: Les turbines	23
II-1-1 : Composition	23
II-1-1-1 : Section motrice	24
II-1-1-1-1 : Un stator	25
II-1-1-1-2 : Un rotor	25
II-1-1-1-3 : Les aubes du rotor et stator.....	26
II-1-1-2 : Section d'appui (bearing section).....	27
II-1-1-2 -1 : Les paliers auxiaux.....	27
-Palier élastomère.....	28
-Palier en PDC.....	28
II-1-1-2 -2 : Palier de friction radiaux.....	29
II-1-1-3 : Cylindre d'équilibrage des poussés	30
II-1-1-4 : Stabilisation des outils	30
II-1-2 : Principe de fonctionnement	31
II-1-3 : Caractéristique mécanique des turbines de forage	32
II-1-3-1 : La puissance.....	35
II-1-3-2 : Vitesse de rotation	36
II-1-3-3 : Couple moteur.....	36
II-1-3-4 : Le rendement.....	37
II-1-3-5 : Chute de pression.....	37
II-1-4 : Paramètre de forage avec une turbine	38
II-1-4-1 : Système hydraulique, débit et pression	38
II-1-4-2 : Propriété des boues et leurs effets sur les turboforeuses	38
II-1-4-3 : Poids sur les outils WOB.....	39
II-1-4-4 : String rotation	39

II-1-4-5 : Compensation pour charge axiale	40
II-2 : Les moteur a déplacements positives PDM	40
II-2 -1 : Composition	40
II-2 -1-1 : Dump valve	40
II-2 -1-2 : Section motrice	41
II-2 -1-3 : Section d'appui	43
II-2 -1-3-1 : Roulements axiaux off- bottom	43
II-2 -1-3-2 : Palier de friction radiaux	43
II-2 -1-3-3 : Roulement axiaux on-bottom	43
II-2 -1-4 : Transmission	44
➤ Universal joint	44
➤ Flexible coupling	44
II-2-2: Les PDM de déviation	45
a) Moteur avec bent-housing.....	45
b) Moteurs DTU (Double Tilted Unit)	46
II-2 -3 : Type de moteur de fond	46
II-2 -3 -1: Moteur low speed	46
II-2 -3 -2: Moteur medium speed	46
II-2 -3 -3: Moteur high speed	46
II-2-4: Caractéristique des PDM	46
II-2-4-1 : Chute de pression	46
II-2-4-2 : Couple vitesse de rotation d'un PDM	47
II-2-4-3 : Puissance délivré par le PDM.....	48
II-2-4-4 : Rendement du moteur.....	49
II-2-5 : Utilisation des courbes des caractéristiques	50
➤ Zone A (zone de fonctionnement nominal).....	50
➤ Zone B (zone de transmission).....	50
➤ Zone C (zone de stalle).....	50

II-2-6 : Les paramètres d'étulisation	51
II-2-6 -1 : Débit, pression différentielle.....	52
II-2-6 -2 : Couple réactif	52
II-2-6 -3 : Calage du moteur sur le fond	52
II-2-6 -4 : Usage de l'outil de forage	53
II-2-6 -5 : Sable, cuttings	53
II-2-6 -6 : Colmatant, Bouchons de ciment.....	53
II-2-6 -7: Rotor catcher (rotor retainer).....	53
II-2-6 -8: Température et boue à l'huile.....	54

Chapitre III : Présentation du champ de Hassi Messaoud

Partie I : Généralité sur Hassi Messaoud

III-I-1: Introduction	55
III-I- 2 : Situation du champ de Hassi Messaoud	55
a) Situation géographique	55
b) Situation géologique	56
III-I- 3 : Réservoirs	56
III-I- 4 : Carte des zones et numérotation des puits	57
a) Carte des zones de production à HMD.....	57
b) Zones et numérotation des puits.....	58
III-I-5 : Description de la série stratigraphie du champ de Hassi Messaoud	58
III-I-6 :Analyse des problèmes géologiques attendus au champ de HMD	66

Partie II : Etude de cas

III-II-1 : Introduction	66
III-II-2 : Présentation de l'échantillon des puits étudiés	67
III-II-3 : Analyse des données de l'échantillon	69
III-II-3-1 : Analyse de l'avancement et de la longueur des runs.....	70
a) Formation Ra D2	70
b) Formation Ra D1.....	71

c) Formation Ra ID.....	74
d) Formation du Ri	75
e) Formation du R2.....	76
f) Récapitulatif	78
III-II- 3-2 : Analyse de défaillances	80
III-II-3-4 : Analyse économique	81
III-II-3-5 : Analyse de quelque cas particuliers.....	85
a) Cas du puits OMK _Z 502	85
b) Cas du puits MD _Z 595.....	86
c) Cas du puits OML _Z 233.....	87
 Chapitre IV : Comparaison PDM / Turbine	
IV : Comparaison PDM / Turbine.....	89
IV-1 : Caractéristique de fonctionnement.....	89
IV-2 : Pratique opérationnelle et limitations.....	91
Conclusion.....	92
Résumé.....	93
Summary	97

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur le forage dirigé

Fig 1 : Profil en S d'un puits dévié.....	02
Fig2 : Puits d'interception (Relief well).....	03
Fig3 : Puits latéral (Side-track).....	04
Fig4 : Forages dirigés pour raisons géologiques.....	05
Fig5 : Emplacements des surfaces impraticables.....	06
Fig6 : Plates-formes de production à puits multiples.....	07
Fig7 : Puits d'exploration multiples.....	08
Fig8 : Puits en J.....	08
Fig9 : Puits en S.....	09
Fig10 : Puits à double montée.....	09
Fig11 : puits horizontaux et puits à long déport.....	10
Fig12 : Puits inclinés à l'origine.....	10
Fig13 : Puits multilatéraux.....	11
Fig14 : Puits en ré-entrée (Re-entry wells).....	11
Fig15 : schéma d'un puits horizontal.....	20
Fig16 : Les différents types de puits horizontal.....	21

Chapitre II : Les moteurs de fond

Fig17 : La première turbine en France 1956.....	22
Fig18 : Section motrice d'une turbine.....	24
Fig19 : Etage de turbine (rotor et stator).....	26

Fig20 : Paliers en élastomère.....	28
Fig21 : Paliers en PDC.....	28
Fig22 : Section d'appui avec palier en élastomère.....	29
Fig23 : Cylindre d'équilibrage.....	30
Fig24 : Extrémité femelle Bit Box Stabiliser + outil standard.....	31
Fig25 : Extrémité mâle + outil à longue jupe femelle.....	31
Fig26 : Courbe de caractéristiques mécaniques des turbines de forage	34
Fig27 : Variation de la puissance en fonction des débits.....	36
Fig28 : Caractéristiques mécaniques en fonction de la vitesse de rotation.....	37
Fig29 : La chute de pression en fonction du débit.....	38
Fig 30 : Dump valve.....	41
Fig31 : Caractéristique de la section motrice.....	42
Fig32 : Vitesse et torque en fonction du nombre de lobe.....	42
Fig33 : La longueur d'un étage de rotor.....	43
Fig34 : Section d'appui.....	44
Fig35 : Flex.....	45
Fig36 : Universal joint.....	45
Fig37 : La vitesse de rotation et couple de moteur en fonction de la pression différentielle..	48
Fig38 : Courbe de pression d'un PDM.....	49
Fig39 : Courbe de puissance fournie par le constructeur.....	49
Fig40 : Courbe de puissance représentée en entier	49
Fig41 : Diferentes zones de fonctionnement d'un PDM.....	51
Fig 42 : Rotor nozzle et rotor catcher (Anadrill).....	54

Chapitre III: Etude comparative

Partie I: Généralité sur Hassi Messaoud

Fig 43: Situation géographique du champ de Hassi Messaoud.....	55
Fig 44: Zones de production à Hassi Messaoud.....	57
Fig 45: Répartition des zones pétrolifères et gazifières.....	58
Fig 46: Coupe stratigraphique type de Hassi Messaoud.....	64

Partie II : Etude de cas

Fig 47: Répartition de l'utilisation des moteurs.....	69
Fig 48: Mode de forage des puits.....	69
Fig 49: Les graphes de ROP et de longueur pour chaque run.....	70
Fig 50: Les graphes de ROP et de longueur pour chaque run.....	73
Fig 51: Les graphes de ROP et de longueur pour chaque.....	74
Fig 52: Les graphes de ROP et de longueur pour chaque run.....	76
Fig 53: Les graphes de ROP et de longueur pour chaque run.....	77
Fig 54: Les graphes de ROP et de la longueur moyenne d'un run de chaque formation moteur.....	78
Fig 55: Les graphes de ROP et la longueur moyenne d'un run foré par chaque type de moteur de fond.....	79
Fig 56: Analyses de défaillance des PDM et les turbines.....	80
Fig 57: évolution du prix du mètre foré en fonction de la longueur du run.....	84

Liste des tableaux

Chapitre III : Etude comparative

N°	Tableau	Page
1	Représentation de l'échantillon de 24 puits à Hassi Messaoud	67
2	Les données des puits forés sur la formation Ra, le drain D2	70
3	Les données des puits forés sur la formation Ra, le drain D1	71
4	Les données des puits forés sur la formation Ra, le drain ID	74
5	Les données des puits forés sur la formation Ri	75
6	Les données des puits forés sur la formation R2	76
7	Les données totales représentatives de toutes les formations	78
8	Nombres et les raisons de remontée de PDM et les turbines	80
9	Analyses économiques des puits étudiés	82
10	Les caractéristiques de deux run du puits OMKz	86
11	Les caractéristiques de deux run du puits MDz 595	86
12	Les caractéristiques de deux run du puits OML _Z 233	87

Introduction :

Depuis le début de l'ère industrielle le premier souci des pays développés est d'assurer l'approvisionnement de leurs industries en énergies. Actuellement les hydrocarbures (notamment le pétrole) tiennent une place prépondérante dans la consommation énergétique mondiale, particulièrement dans les transports, et ce malgré les nombreuses recherches visant à réduire la proportion des énergies fossiles. Cependant ; les ressources en énergies fossiles ne sont pas inépuisables. C'est pourquoi les progrès technologiques ont permis et permettront encore de repousser les limites des réserves et les taux de récupération.

L'une des techniques au quelle on aboutit les nombreuses évolutions technologiques est le forage horizontal. Cette technique permet d'exploiter des ressources inaccessibles par le forage conventionnel mais aussi elle augmente considérablement le taux de récupération en retardant les percés d'eau ou de gaz et en élargissant la zone de drainage des puits.

Le monde est réalisé un grand succès, Ce succès n'aurait jamais existé sans les développements technologiques et l'apport de certaines innovations qui ont considérablement réduits les délais et les coûts de forage des puits. Parmi ces technologies celles qui ont eu le plus grand impacte sont probablement les moteurs de fond.

Ces derniers on permit d'augmenter considérablement la précision des puits, de limiter le nombre des manœuvres nécessaires, et de réduire le prix du mètre foré.

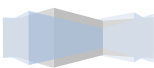
Vu à cette importance nous somme fait notre mémoire sur :

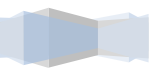
Chapitre I : *Le forage directionnel est devenu un outil très important dans le développement des gisements d'huile et de gaz, et quel sont leurs applications, les types et le matériels utilisés.*

Chapitre II : *les moteurs de fond utilisés au forage dirigé sont les moteurs à déplacement positives ou les turbines alors quels sont leurs caractéristiques compositions et fonctionnements ?*

Chapitre III : *Dans ce chapitre on va étudier comment on choisir le moyen le plus approprié pour la réalisation de la phase 6" dans le champ de Hassi Messaoud et ce dans le but d'optimiser la sécurité et la qualité de la réalisation du forage.*

Chapitre IV : *chaque moteur de fond a des caractéristiques déférentes par rapport à l'autre. Alors quels sont ces déférences ?*





I : Introduction :

Le forage directionnel est devenu un outil très important dans le développement des gisements d'huile et de gaz. L'augmentation incessante des prix et de la consommation des hydrocarbures et leur raréfaction ont dicté la nécessité de développer le forage dirigé et de l'utiliser à une plus grande ampleur que précédemment. L'aspect le plus important du forage dirigé est qu'il permet aux producteurs partout dans le monde de développer des gisements sous-marins qui n'auraient jamais pu être atteints par n'importe quelle autre méthode de manière économiquement viable et aussi de mettre en production des couches fines et peu perméables en augmentant la longueur du drain grâce aux forages horizontaux. Dans ce chapitre on réalisera une présentation de la technologie du forage dirigé actuel, sa définition, ces applications, ces différents types et profils, ces équipements, ces techniques de déflexion et ces limitations. (10)

I-1 : Définition du forage dirigé :

On l'appelle aussi le forage directionnel, dévié ou oblique ; c'est la science et l'art de dévier un puits de la vertical le long d'une trajectoire prédéterminé d'un point initial à un point final, la position de chacun d'entre eux est défini par un système de coordonnées donné, ces coordonnées servent à définir l'emplacement d'un point par rapport à l'autre mais aussi la position de chaque point dans l'espace. (9)

Un forage dirigé consiste à forer un puits pour atteindre une cible qui peut se trouver à des dizaines ou des centaines de mètre de la verticale du point de départ. Un puits dévié conventionnel est constitué d'une section verticale allant de la surface jusqu' au point d'amorce de la déviation KOP (kick off point), une section build-up qui est une section courbée permettant d'augmenter progressivement l'inclinaison du puits et de s'éloigner ainsi de la verticale, et une section droite pour laquelle l'inclinaison est fixe. Suivant le profil et le type du puits adopté, cette section peut être la dernière (cas du profil en J) ou être suivie par une section drop-off (profil en S) ou une deuxième section build-up (puits à double monté). (11)

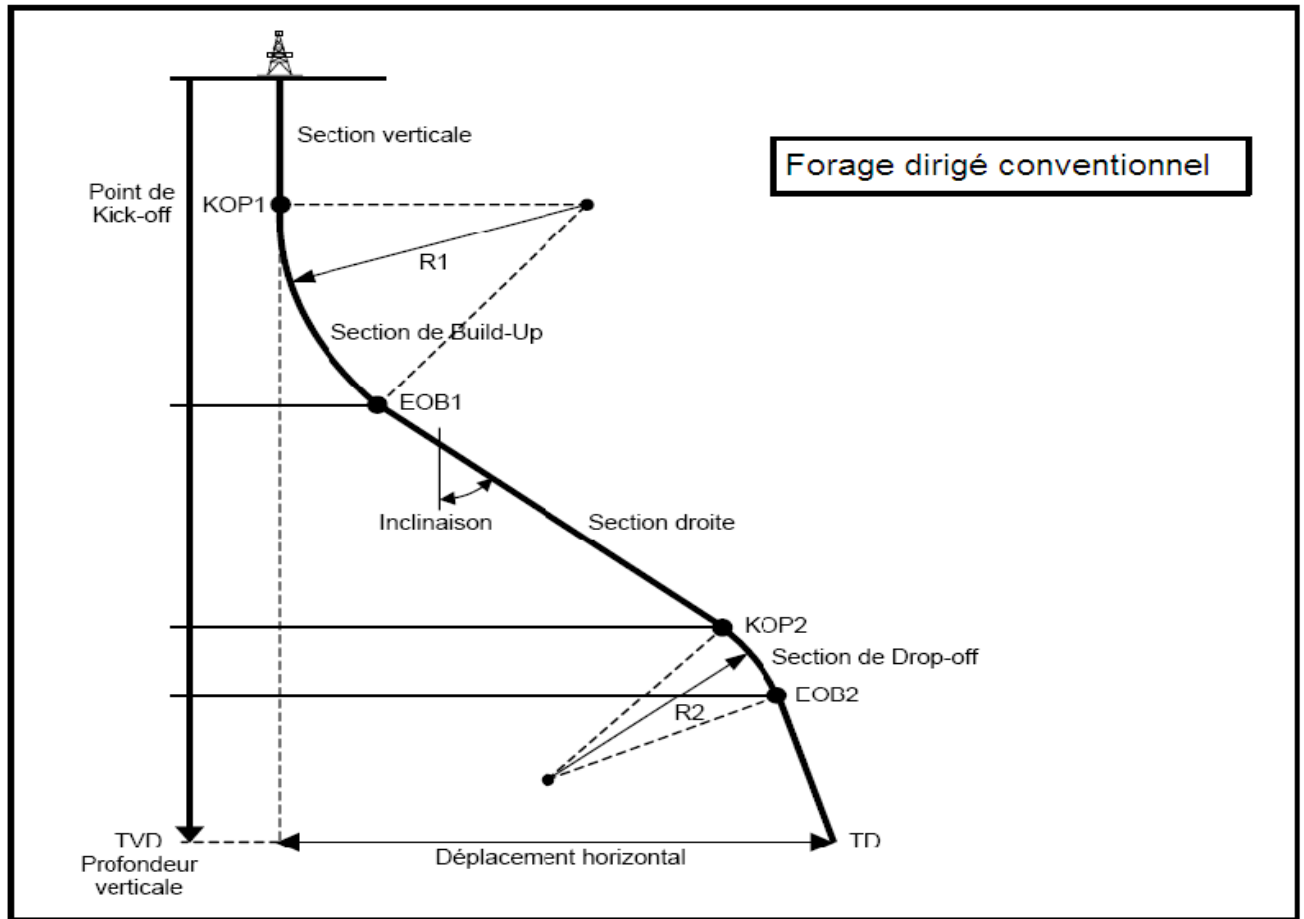


Fig 1 : Profil en S d'un puits dévié (5)

I-2 : Les applications des forages dirigés :

I-2-1 : Puits d'interception (Relief well) :

Ces puits sont destinés à approcher ou même intercepter la trajectoire d'un autre puits en éruption incontrôlable. Ils doivent être forés avec une très grande précision afin de pouvoir croiser la trajectoire du puits en éruption en vue de le tuer. C'est l'une des premières applications du forage dirigé (John Eastman en 1934). (10)

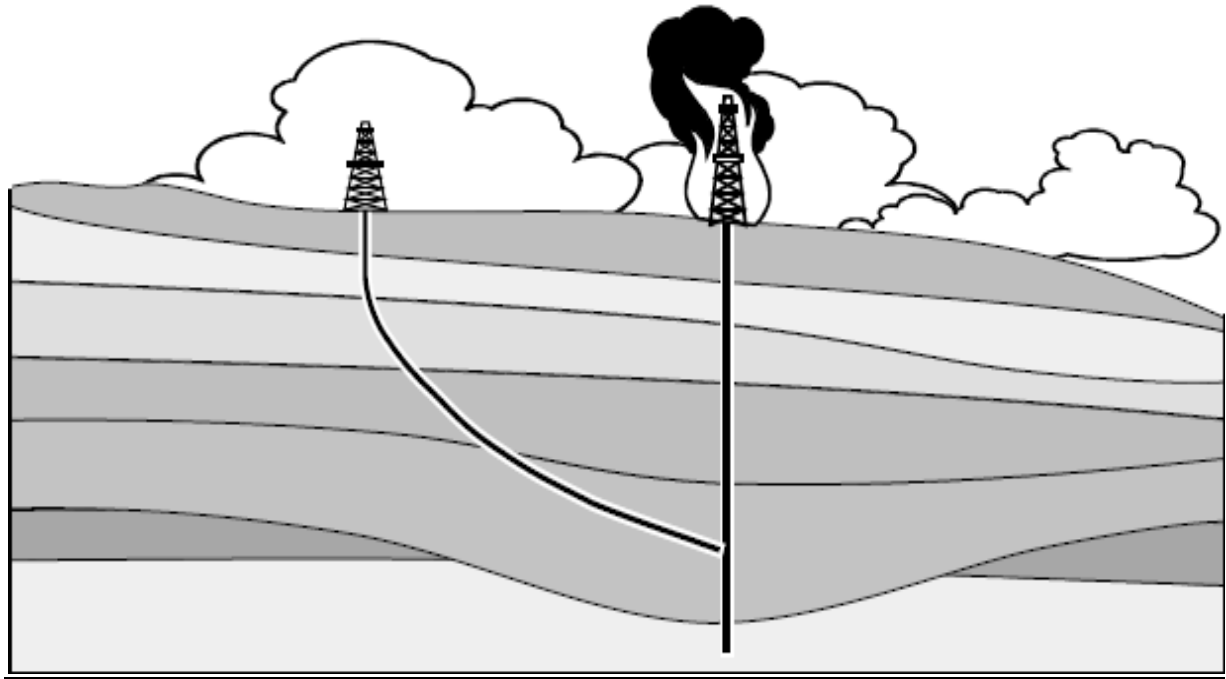


Fig2 : Puits d'interception (Relief well) (10)

I-2-2 : Puits latéral (Side-track) :

Le forage d'un puits latéral consiste à abandonner un puits en cours de forage pour le reprendre à une profondeur inférieure, soit pour des raisons techniques, soit pour des raisons géologiques, par exemple:

- à la suite d'opérations de repêchage infructueuses.
- en cas d'extrême dog-leg.
- en cas de rupture de casing.
- en cas de rencontre d'une faille imprévue. (11)

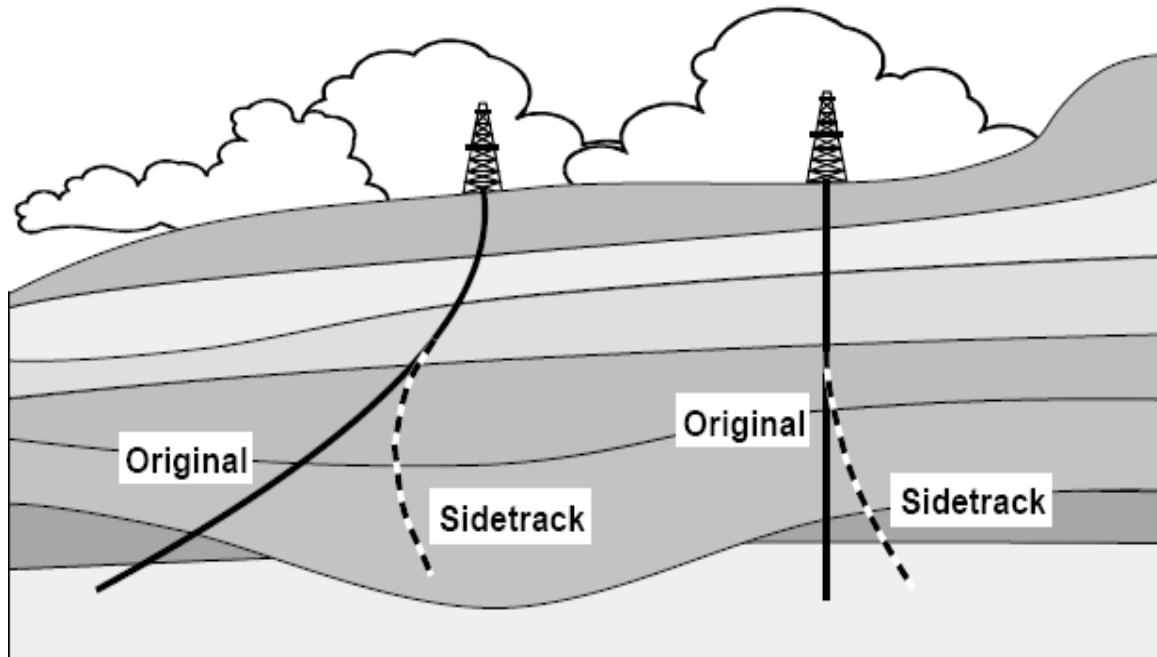


Fig3 : Puits latéral (Side-track) (10)

I-2-3 : Forages dirigés pour raisons géologiques :

- Forage à travers une faille pour améliorer le contrôle de déviation ou pour éviter de forer un puits vertical à travers un plan de la faille abruptement incliné qui pourrait glisser et tordre le tubage. (10)

- **Forage destiné à contourner un dôme de sel** : Les dômes de sel sont des pièges naturels d'hydrocarbures qui s'accumulent sous le chapeau imperméable surplombant la roche réservoir. Un forage dirigé peut être utilisé pour arriver au réservoir piégé tout en évitant les problèmes associés au forage d'un puits à travers la formation de sel.

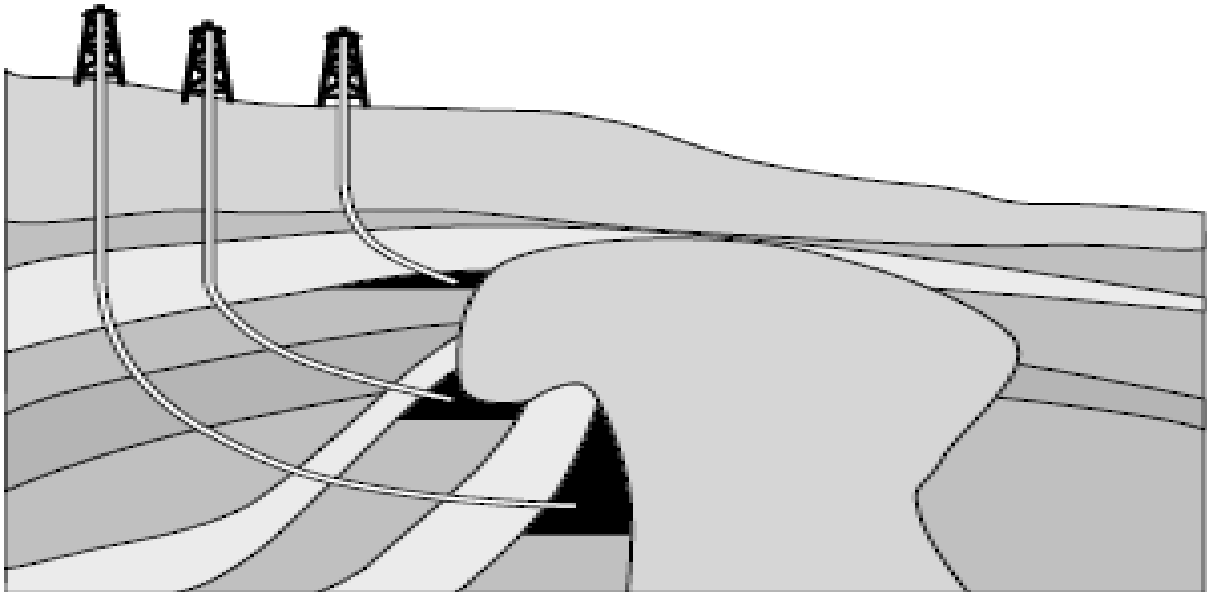


Fig4 : Forages dirigés pour raisons géologiques (10)

I-2-4 : Emplacements des surfaces impraticables :

-Forages depuis le rivage pour atteindre des réservoirs offshore : Dans le cas où un réservoir sous marin se trouve près des terres, la façon la plus économe d'exploiter ce réservoir peut être de forer des puits dévié à partir d'un appareil terrestre sur la côte.

-Forages depuis la mer pour atteindre des réservoirs situés sous une côte inhospitalière.

-Forages urbains.

-Forages en montagne.

-Forage pour l'exploitation de gisement situé sous des réserves naturelles protégées ou des zones écologiquement sensibles.(09)

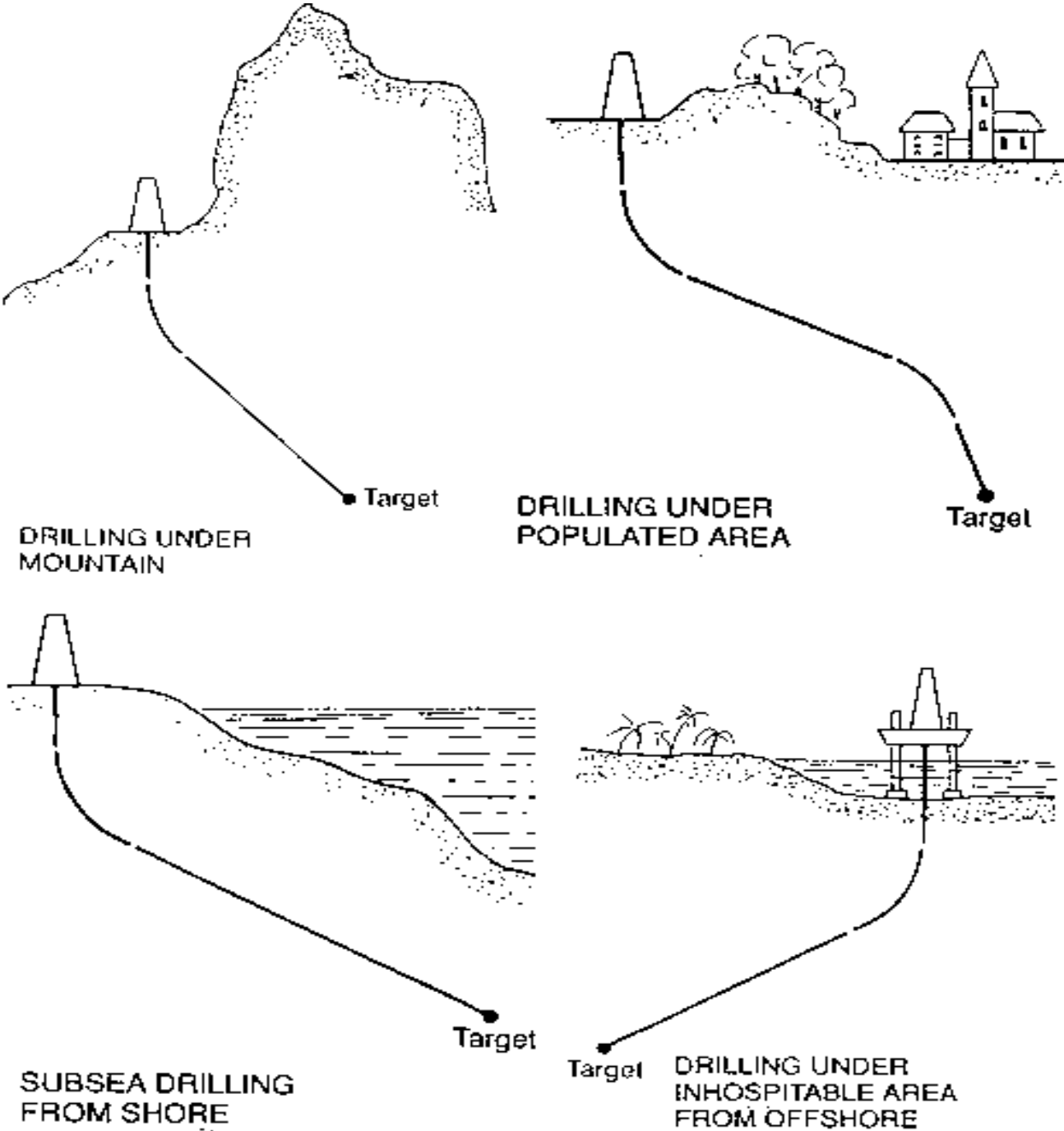


Fig5 : Emplacements des surfaces impraticables.(4)

I-2-5 :Plates-formes de production à puits multiples :

C'est l'une des plus importantes applications du forage dirigé, son intérêt réside dans le fait d'épargner les dépenses liées au développement d'un réseau de collecte coûteux et complexe.

- permettant le développement économique de réservoir offshore.
- utilisée à terre pour des raisons soit économiques, soit écologiques.(9)

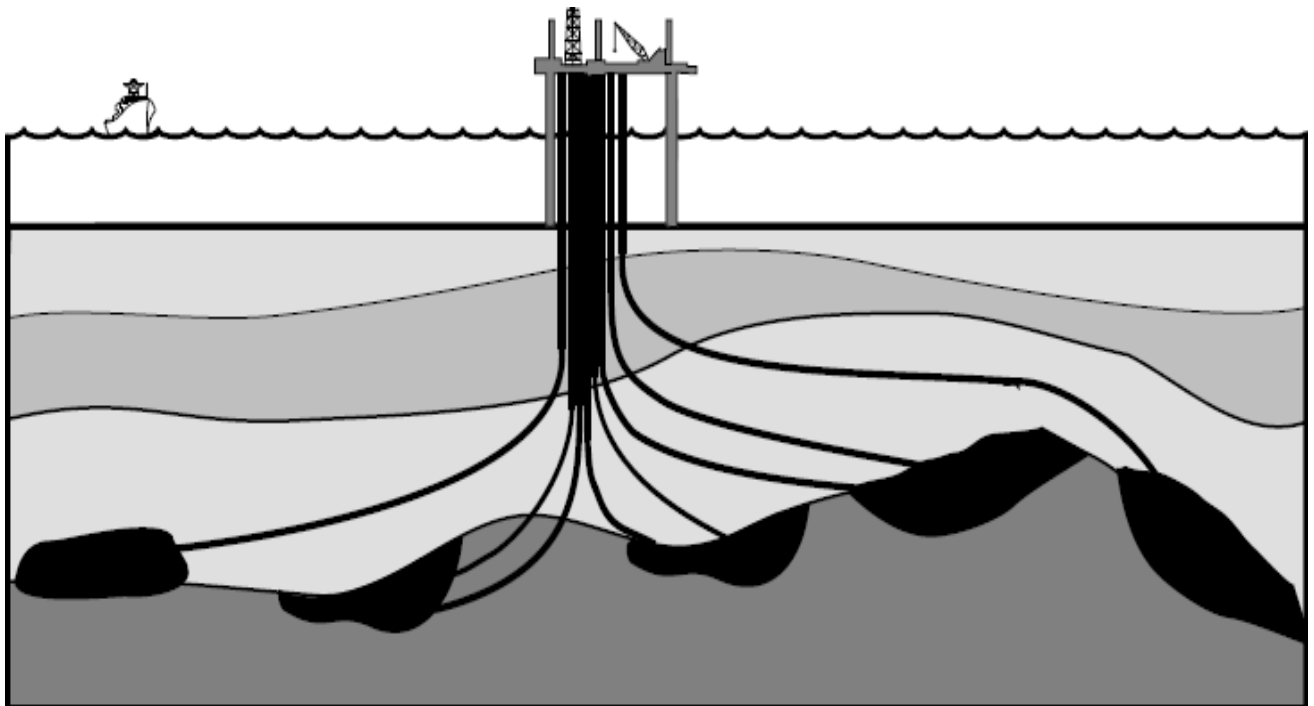


Fig6 : Plates-formes de production à puits multiples (4)

I-2-6 : Puits d'exploration multiples :

Ils permettent d'explorer un maximum de couche et une plus grande surface du champ à moindre coût et à partir d'un seul emplacement en réalisant une déviation en partant d'une certaine profondeur d'un puits fini. (11)

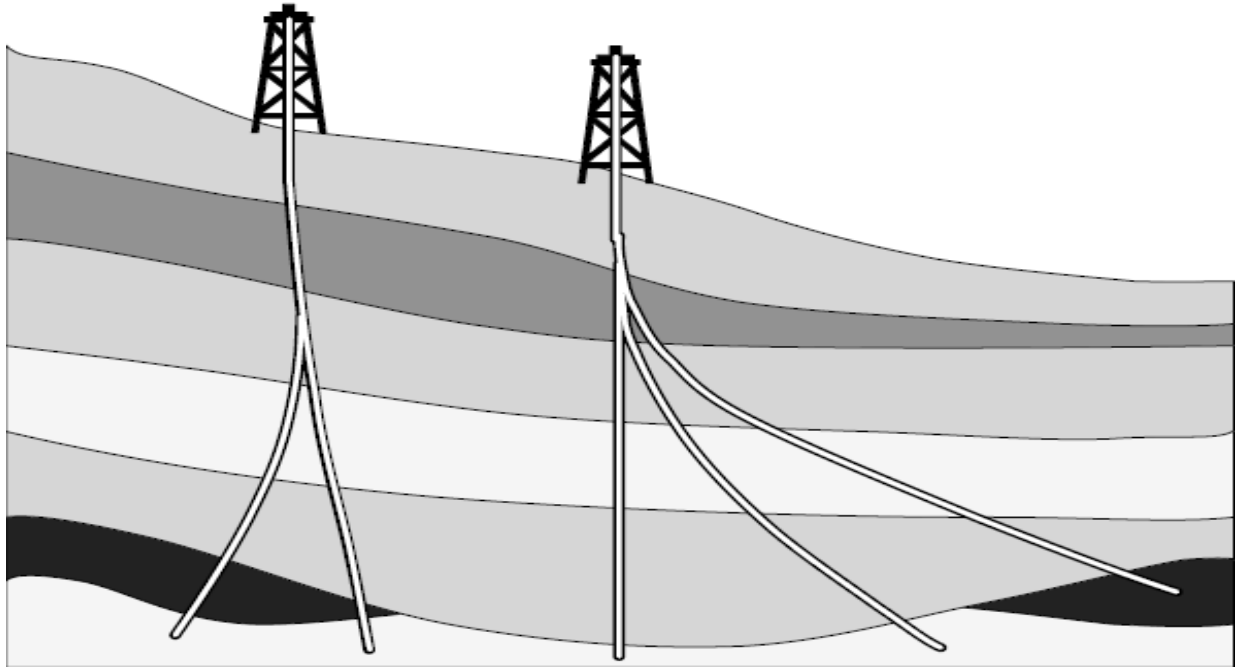


Fig7 : Puits d'exploration multiples (10)

I-3 : Les différents types et profil de puits :

La forme d'un puits entre la surface et la ou les cibles est appelée profil du puits, Autrefois limités à des profils simples essentiellement bidimensionnels, les techniques actuelles de forage dirigé permettent la réalisation de profils tridimensionnels complexes, combinant à la fois des variations d'inclinaison et d'azimut. (5)

Les profils classiques sont:

I-3-1: Puits en J :

La forme la plus simple et la plus commune des puits déviés. Ils débutent par une phase verticale, suivie d'une phase de montée et se terminent par une phase rectiligne.

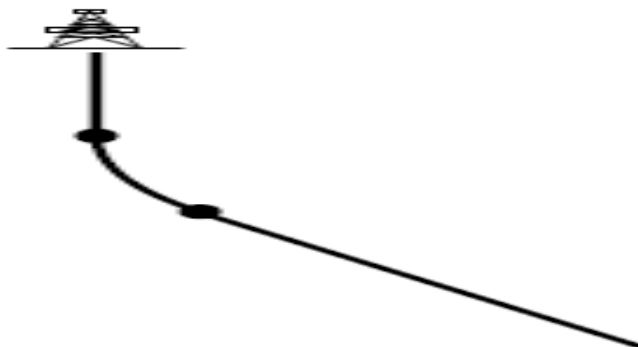
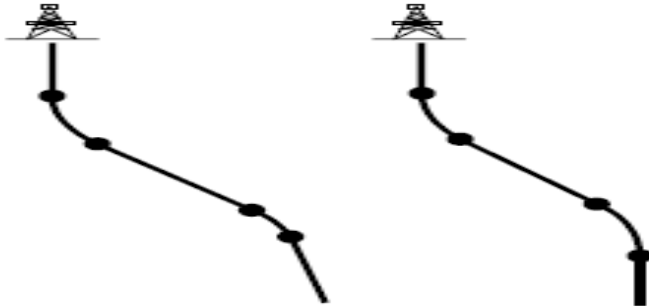
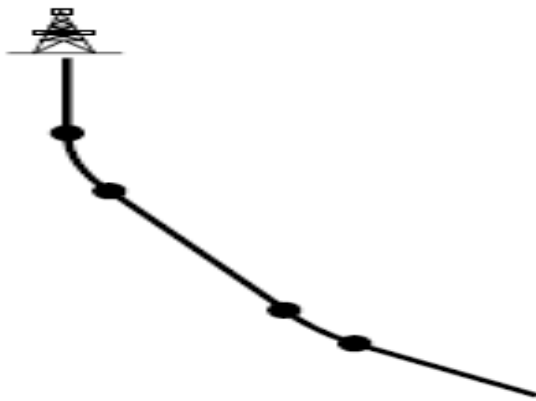


Fig8 : Puits en J (9)

I-3-2 : Puits en S :

D'une forme légèrement plus élaborée, ces puits commencent comme un puits en J, mais se terminent par une chute en inclinaison, quelquefois jusqu'à la verticale, le plus souvent pour des considérations de production (installation de la pompe).

**Fig9 : Puits en S (9)****I-3-3 : Puits à double montée :****Fig10 : Puits à double montée (9)**

Au contraire des puits en S, ces puits se terminent par une seconde montée en inclinaison et donc avec une inclinaison importante.

I-3-4 : Puits horizontaux et puits à long déport (extended reach ou long reach wells):

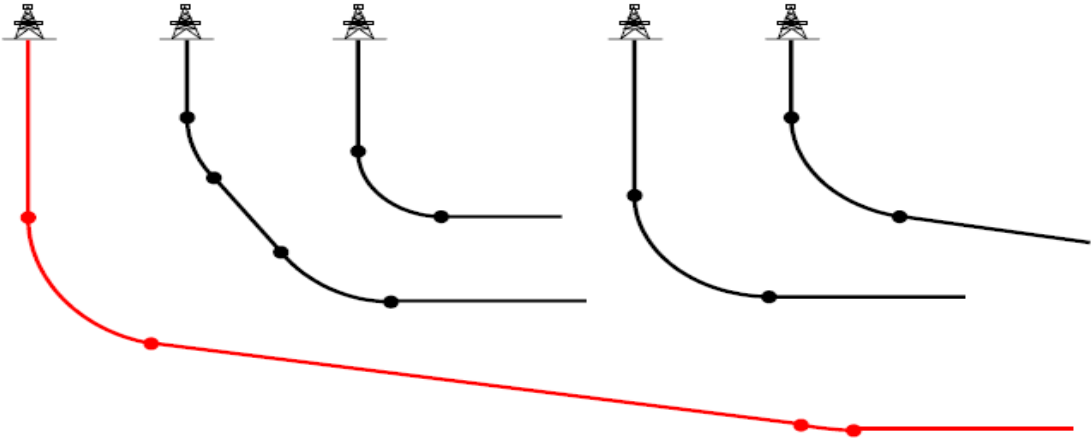


Fig11 : puits horizontaux et puits à long déport (10)

I-3-5 : Puits inclinés à l'origine :

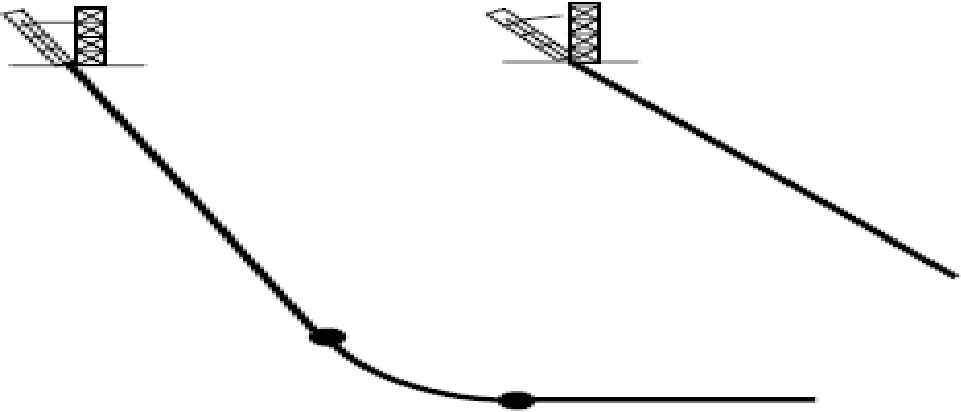
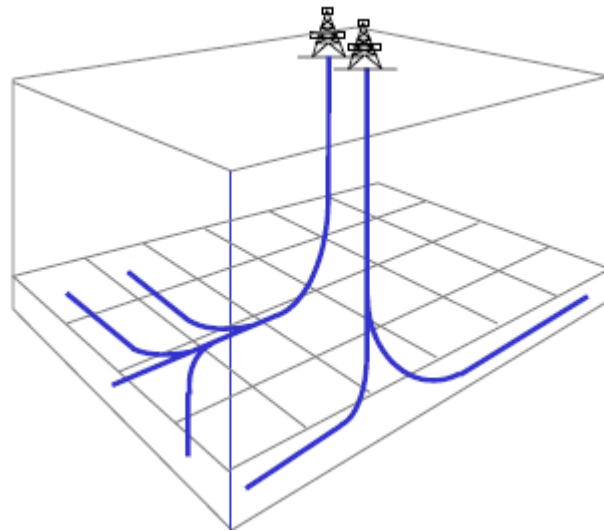
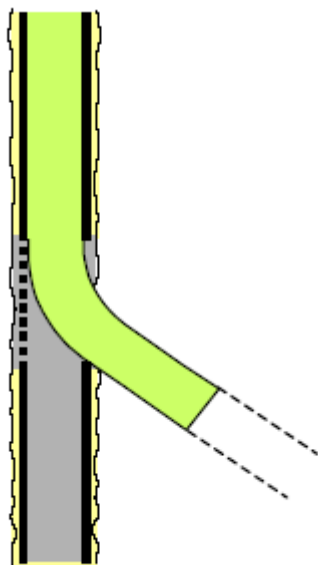


Fig12 : Puits inclinés à l'origine (10)

I-3-6 : Puits multilatéraux :**Fig13 : Puits multilatéraux (10)****I-3-7 : Puits en ré-entrée (Re-entry wells) :**

Cette technique utilisée intensivement depuis les années 80 consiste à abandonner le fond d'un puits existant (vertical ou dévié) pour forer latéralement un nouveau puits, celui-ci se terminant souvent par un drain horizontal.

Cette technique permet de faire l'économie du forage et des équipements de la partie supérieure du puits.

**Fig14 : Puits en ré-entrée (Re-entry wells) (10)**

I-4 : Equipements de forage dirigé :**I-4-1 : Equipements standards de forage :**

- Masse-tiges
- Tiges de forage
- Coulisses de forage
- Elargisseurs
- Amortisseurs de vibrations

I-4-1-1 : Masse-tiges :

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

En forage vertical ou avec une inclinaison limitée leurs buts essentiels sont:

- de fournir le poids nécessaire sur l'outil de forage sans avoir à mettre à contribution les tiges de forage (le point neutre est localisé dans les masse-tiges).
- de procurer une certaine rigidité à proximité de l'outil de forage

Différents types de masse-tiges sont utilisés:

Masses tiges lisses (Slick DC)

Masse-tiges spiralées (spiraled DC)

Masse-tiges carrées

Masse-tiges asymétriques

Masse-tiges articulées

I-4-1-2 : Tiges de forage :

Les tiges de forage sont, en nombre, les principaux éléments du train de tiges les différents types des tiges sont :

- Tiges standards (Drill-pipes - DP)

- Tiges lourdes (Heavy weight drill pipes - HWDP)
- Tiges de compression (compressive drill pipes) : elles sont aussi appelées aussi "tiges de services"
- Tiges lourdes spiralées

I-4 -1-3 : Coulisses de forage :

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

Les coulisses de forage sont des accumulateurs d'énergie. Cette énergie peut être de nature mécanique (ressorts) ou hydraulique (bain d'huile). On rencontrera donc trois types de coulisses:

- les coulisses mécaniques
- les coulisses hydrauliques
- les coulisses hydromécaniques

I-4-1-4 : Amortisseurs de vibrations (Shock absorbers) :

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

Leur utilisation augmente la durée de vie des outils de forage et celle des composants du train de tiges.

I-4 -1-5 : Bumper subs :

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

Ils peuvent être utilisés en tant qu'amortisseurs de vibrations.

I-4-1-6 : Elargisseurs :

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

- les élargisseurs à bras fixes, Destinés à élargir un puits jusqu'au diamètre permis par la section précédente.
- les élargisseurs hydrauliques (à bras mobiles).

destinés à élargir un puits à un diamètre supérieur à celui de la section précédente (tubée ou non). (5)/(9)/(10)

I-4-2 : Equipements spécifiques au forage dirigé :

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

I-4-2-1 : Stabilisateurs

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

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".

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

- lames soudées
- lames intégrales
- à chemise
- à chemise non rotative

La forme des lames varie également:

- lames droites
- lames spiralées à droite
- lames spiralées à gauche

I-4-2-2 : Equipements amagnétiques :

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

Ces matériaux amagnétiques peuvent être:

- de l'aluminium
- des aciers inoxydables de haute qualité

- des alliages tels que le "Monel" (70% nickel + 30% cuivre)

Les équipements amagnétiques les plus courants sont:

- des masse-tiges
- des masse-tiges courtes
- des tiges de forage compressives
- des tiges de forage
- des stabilisateurs
- des raccords

Et bien sur les équipements de mesure eux-mêmes:

- MWD
- steering tools

I-4-2-3 : Raccords d'orientation:

Les raccords d'orientation sont conçus pour recevoir une chemise. Ils sont habituellement fabriqués en acier amagnétique en raison de leur proximité par rapport au compas ou aux magnétomètres.

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

I-4-2-4 : Raccords coudés :

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

I-4-2-5 : Outils de déflexion :

Les outils de déflexion sont souvent appelés "Whipstock" du nom de leur inventeur.

Un Whipstock est un sabot d'acier dont la surface intérieure est concave et sur laquelle viendra s'appuyer l'outil de forage, ainsi obliger de riper vers la paroi et de sortir du puits initial.

I-4-2-6 : Equipements de mesure :

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

I-4-2-6-1 : en temps différé: l'information est remontée avec l'outil lui-même

I-4-2-6-2 : en temps réel: l'information est transmise du fond vers la surface par l'intermédiaire d'un système de télémétrie

Outils de mesures en temps différé :

Ils sont composés:

- d'un ensemble de capteurs de mesures
- d'un système d'horlogerie capable de déclencher les mesures et leur enregistrement après un délai programmé
- d'un système d'enregistrement

On distingue les:

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

Outils de mesures en temps réel :

Ils sont composés:

- d'un ensemble de capteurs de mesures
- d'une électronique de contrôle
- d'un système de télémétrie

On distingue les

- Steering tools
 - MWD et LWD
 - Gyroscopes (5)/(6)/(9)/(10)

I-5 : Les puits horizontaux :

I-5-1 : Définition :

Le forage horizontal constitue l'évolution normale du forage dirigé. Ceci signifie que la procédure standard de forage et les principes du forage directionnel sont développés et poussés à leurs limites extrêmes pour atteindre des inclinaisons très élevées. Parallèlement ; des nouvelles techniques et procédures de forage ont été et sont toujours développées spécifiquement pour les puits horizontaux. (6)

Un puits horizontal est un puits directionnel qui se termine par un drain ayant une inclinaison proche de 90° et qui est comprise entre 80 et 100°. Le puits s'éloigne progressivement de la verticale qui passe par la tête du puits suivant une trajectoire et un rayon de courbure prédéfini pour enfin arriver à forer le réservoir horizontalement. (5)

I-5-2 : Les avantages et les inconvénients d'un forage horizontal :

I-5-2-1 : Les avantages d'un forage horizontal :

- permet la reprise d'un puits commercialement inexploitable
- permet l'augmentation de la productivité ainsi le taux de récupération de l'or noire
- dans les forages offshore ou les dépenses semblent amplifiées y a que le forage horizontal par lequel ces dernières peuvent être récompensées en un temps vraiment réduit par rapport au forage vertical
- limiter le nombre de puits à forer dans la zone

I-5-2-2 : Les inconvénients d'un forage horizontal :

Comme il a des avantages, il a aussi des inconvénients que nous citons :

Les surcouts :

- Contrairement aux forages verticaux, le cout d'un forage horizontal pourrait dépasser de 20 à 30% le cout d'un forage vertical suite l'utilisation obligatoire et en permanence d'un moteur de fond et les instruments de mesures (MWD, LWD).

- La grande profondeur d'un forage horizontal par rapport au forage vertical nécessite un temps plus grand qui est lui-même accompagné d'un cout plus important

Les risques opératoires :

- L'endommagement du réservoir par la boue de forage, avec un skin qui est très important.

- La difficulté d'atteindre les objectifs géologiques prévisionnels.

- Un autre problème dû à la complétion « open hole » est l'éboulement des parois, et l'accumulation des sédiments pendant la production.

- Difficultés de descendre des liners crépines (drain trop lent)

- Difficultés de descendre des ECP (Isolations des venues de gaz ou d'eau)

- Les pertes de boue des puits fores en over-balance sont très considérables (11)

I-5-3 : Les différents types d'un puits horizontal :

La finalité est évidente réaliser un puits horizontal ou sub-horizontal dont 3 cas peuvent être distingué à savoir :(11)

I-5-3-1 : Le puits à long rayon (long radius) :

Utilisant des rayons de courbure excédent 200m (gradient $\leq 3\text{deg}/10\text{m}$)

I-5-3-1-1 : Les avantages :

Les puits LR ont plusieurs avantages. Ils sont plus faciles à forer et ne nécessitent que des équipements de forage classique. Comme souvent l'inclinaison du puits peut être obtenue puis maintenue avec des garnitures rotary, il n'est pas nécessaire d'utiliser un moteur. Non seulement on utilise des tiges et des casings standard, mais en plus le coût journalier du service de déviation est typiquement moins élevé que pour un puits medium ou short radius.

Les puits long radius permettent de forer des drains horizontaux plus longs (1500 m et plus), et d'atteindre des points très éloignés (extended reach) grâce à leur dog leg severity plus faible et donc les frottements et torques engendrés moindres.

Enfin ces puits permettent de descendre le matériel nécessaire à tous types de diagraphies électriques différées conventionnelles, tous les types de complétion, stimulation, workover, équipement gas lift.

I-5-3-1-2 : Les inconvénients :

Ces puits ont également leurs revers. La longueur du rayon de courbure nécessite un rig plus puissant muni d'un top-drive, de pompes puissantes et d'une capacité de traitement et stockage de la boue plus importante. De plus la longueur accrue de l'open-hole augmente les risques de coincement, kick, détérioration des parois, pouvant exiger la pose de tubages supplémentaires. Le contrôle de la TVD est moins précis du fait du grand éloignement entre le démarrage du puits et la cible, encore que ce facteur devienne de moins en moins significatif avec l'emploi de MWD précis permettant la corrélation des marqueurs en temps réel. Enfin les puits long radius ne sont pas envisageables sur des permis (leases) de petite surface car le grand déport engendré pour arriver à 90° est trop important au regard de la dimension du bloc considéré.

I-5-3-2 : Le puits à moyen rayon (medium radius) :

Utilisant des rayons de courbures compris entre 80 et 200m ($3\text{deg} \leq \text{gradient} \leq 7\text{deg}$)

I-5-3-2-1 : Les avantages :

Les puits MR diffèrent des longs et short radius sous bien des aspects. Comparés aux longs radius, ils sont plus précis dans l'atterrissage à l'horizontale mais génèrent davantage de frottements et de torque. Par contre, comparés aux puits short radius, ils sont moins précis dans l'atterrissage à l'horizontale mais génèrent moins de frottement et de torque. Autres avantages des puits MR :

- on peut utiliser indifféremment des MWDs de diamètres conventionnels (MWD collars) ou repêchables de petit diamètre (1 3/4" OD) ainsi que des moteurs de navigation (steerable);
- on peut forer des drains de longueur importante (jusqu'à 1500 m) et carotter de façon conventionnelle;
- on peut descendre des casings et des complétions classiques.

I-5-3-2-2 : Les inconvénients :

Le torque et le poids disponibles à l'outil seront sans doute plus faibles car le gradient de build up d'un puits MR est supérieur à celui d'un LR.

Aussi la construction du profil d'un puits medium radius a-t-elle évolué. De nos jours la tendance est de démarrer le puits comme un long radius de façon à réduire le gradient de build up dans la partie supérieure du puits. Après la section tangente le profil est réalisé comme un medium radius normal, ce qui permet de forer avec moins de couple et de frottements que dans un puits de profil 100 % medium radius. Et ceci est accompli sans perte de précision dans l'atterrissage ni perte sensible de déport horizontal.

Si le diamètre du puits est $\leq 6 \frac{1}{8}$ ", les options sont limitées en ce qui concerne LWD, complétion, wireline et workover.

I-5-3-3 : Le puits à rayon court ou ultra court :

Avec des rayons de courbure pouvant atteindre 5 à 6 mètres, seulement réalisable avec des équipements spécifiques.

Ils peuvent être:

- à build-up simple (une seule montée en inclinaison de 0 à 90 degrés).
- à build-up multiple (deux sections de montée ou plus, séparées par des sections droites dites "tangentielles")

I-5-3-3-1 : Les avenages :

Plus précis encore en déplacement vertical que les puits LR ou MR, les puits SR sont attractifs sur de petits permis ou de petites lentilles dont la position précise est connue. Forés à partir de puits déjà existants, les puits short radius sont moins chers à recompléter puisque l'infrastructure est déjà en place (tête de puits, tubages, génie civil, pipeline). De plus le kick-off-point KOP est généralement situé sous le contact des fluides, ce qui signifie moins de risque de mauvaise isolation entre les fluides que dans un puits LR ou MR.

I-5-3-3-2 : Les inconvénients :

Les puits SR nécessitent des équipements de forage spéciaux (flexibles ou articulés) souvent lents à manier, moins résistants que les équipements standard, et non conformes aux recommandations API (davantage de chance de laisser quelque chose dans le puits). Ils requièrent également des moteurs, MWDs et BHAs articulés. La vitesse d'avancement des outils est faible, et un nombre très important de manœuvres est nécessaire pour changer outil ou BHA. Parce que spécifique la garniture est onéreuse.

De plus la longueur du drain est souvent inférieure à 150m (300m maxi), sans possibilité de carottage ou de logging. Enfin les puits SR ne peuvent être complétés qu'en open hole, ou bien avec des complétions articulées.

La technologie short radius évolue rapidement. Baker Inteq est en train de développer un moteur court non articulé, donc plus fiable et plus puissant. Schlumberger travaille sur des outils de type LWD permettant le logging de ces puits.

Et les trois figures ci-dessous nous montrent respectivement les différents types de puits ainsi la notion de la déviation en général et l'horizontalité en particulier (9)/(10)/(11)/(5)

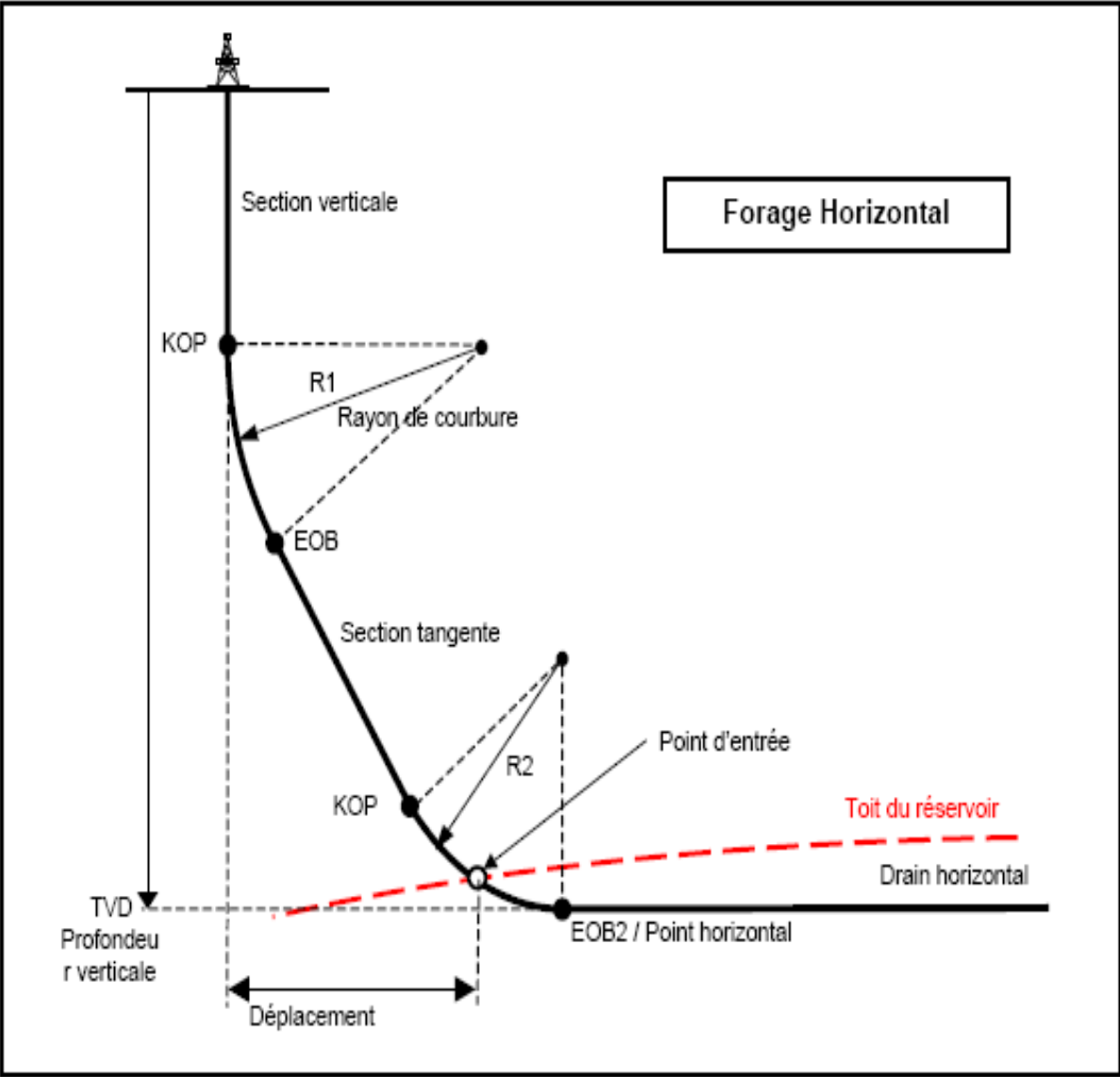


Fig15 : schéma d'un puits horizontal (9)

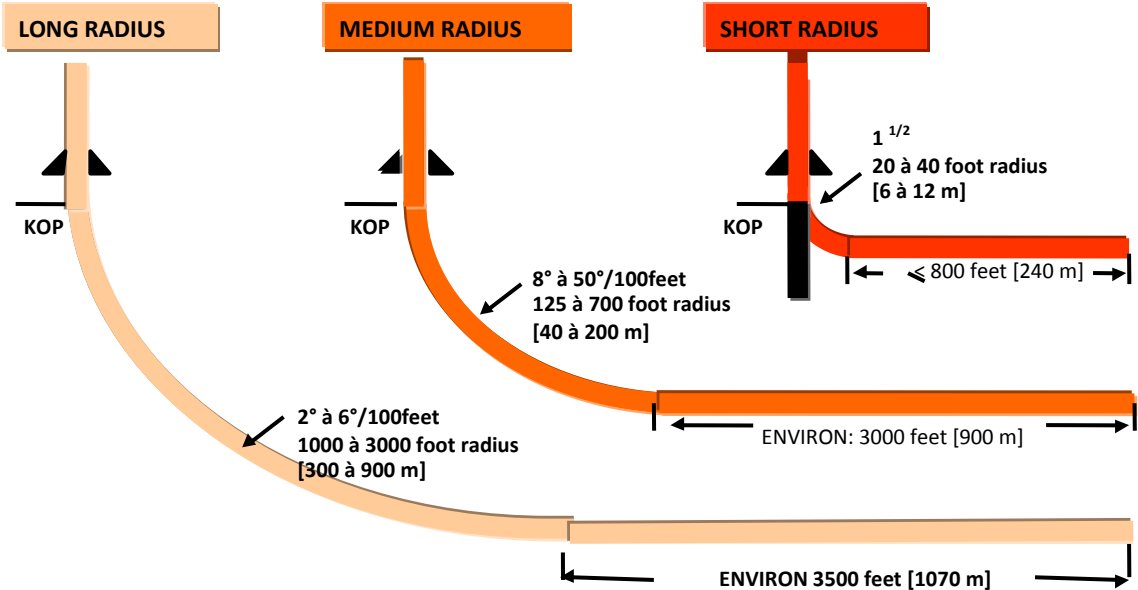
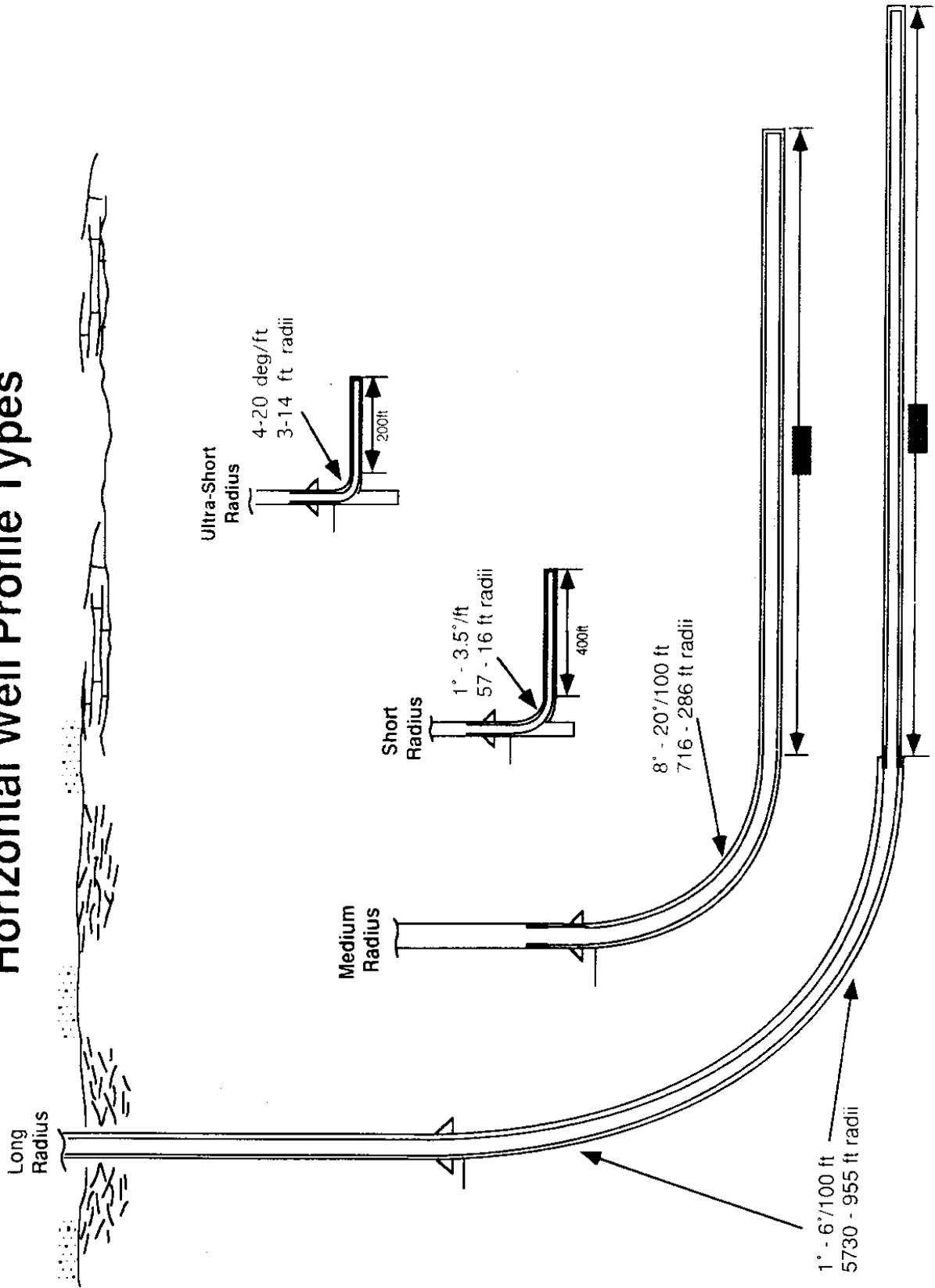


Fig16 : Les différents types de puits horizontal (9)

Horizontal Well Profile Types



II : Introduction :

Les moteurs de fond désignent principalement soit des PDM (positive displacement motors), moteurs volumétriques qui ne sont autres que des pompes Moyneau à l'envers, soit des turbines. Ils convertissent la puissance hydraulique, transporté par le fluide de forage, en une énergie mécanique de rotation. Cette conversion a lieu directement au-dessus de l'outil de forage. Les pertes et les problèmes liés à la rotation du train de tige en particulier dans les dog legs sont ainsi éliminés. (1)

L'idée d'utiliser des moteurs de fond animé par le fluide de forage pour faire tourner l'outil directement n'est pas une idée nouvelle, Le premier brevet pour un turboforage été déposé en 1873 soit 30ans avant l'introduction du forage rotary dans l'industrie pétrolière. Ce pendant il faudra attendre 1924 pour voir les premières applications pratiques de ce concept lorsque des ingénieurs russes et américains testèrent des turbines de forage sur le terrain, ces premiers testes n'étaient pas concluant et les recherches ne continueront que du coté russe pour aboutir 1934 à une première turbine utilisable. Ces outils continueront à se développer à telle point que dans le milieu des années 1950 près de 80% des puits forés en union soviétique avec des turbines. Une licence pour la fabrication d'un outil russe a été accordée à une compagnie d'ingénieur française, Neyrpic, en 1956. Neyrpic est le prédécesseur à Sii-Neyrfor qui représente plus de 90% de ventes Turbodrill mondiales pour l'instant, (en dehors du marché Russe). (2)

Le développement des moteurs PDM a commencé dans la fin des années 1950. Le développement initial était le résultat d'un brevet américain déposé par W. Clark en 1957. (10)

Ce moteur de fond été basé sur le travail original d'un ingénieur français, René Monineau, sur des pompes. Le travail initial aux États-Unis a aboutie à des PDM à un seul lobe qui ont connu un très grand succès. Depuis cette époque il y a eu plusieurs versions de PDM développées et présentées. Aujourd'hui on dispose d'une très large gamme de PDM avec des caractéristiques différentes et pouvant opérer dans différent milieux.

Pour des raisons naguères techniques (flexibilité, longueur et coude intégré) et aujourd'hui essentiellement commerciales, les PDMs sont plus employés que les turbines dans le forage dirigé. Dans cette partie nous essayerons de voir la composition de chaque type de moteur, leur principe de fonctionnement et leur domaine d'utilisation. (7)

II -1: Les turbines :

Le fluide de forage (boue, eau...) est pompé à haute vitesse à travers la section motrice qui à cause de l'angle des aubes de chaque rotor et stator (les quelles formes un étage), entraîne la rotation du rotor et par conséquent l'arbre du moteur. L'énergie cinétique de l'écoulement de la boue de forage est ainsi convertie à travers rotor et le stator (étage) en énergie mécanique de rotation. (6)

II-1-1: Compositions:

Une turbine est constituée d'une section motrice composée de plusieurs étages, une section d'appui et un arbre de transmission pour faire tourner l'outil. Un "étage" consiste en un rotor et

stator de profil identique. Les stators sont stationnaires, fixés au corps de la turbine, et dévient le flux du fluide de forage sur les rotors qui sont fixés à l'arbre de transmission. Comme les rotors sont forcés à tourner, l'arbre de transmission est aussi forcé à tourner, entraînant la rotation de l'outil.(2)

II-1-1-1 : Section motrice :

Une turbine de forage peut avoir une ou plusieurs sections motrices, selon les exigences de puissance. Les sections sont numérotées à partir de celle du haut, c'est-à-dire la section du dessus est désignée "TS1" et la section motrice intermédiaire "TS2." Toutes les sections sont composées d'un grand nombre d'étages de turbine, (typiquement 75 à 125 par section). (2)

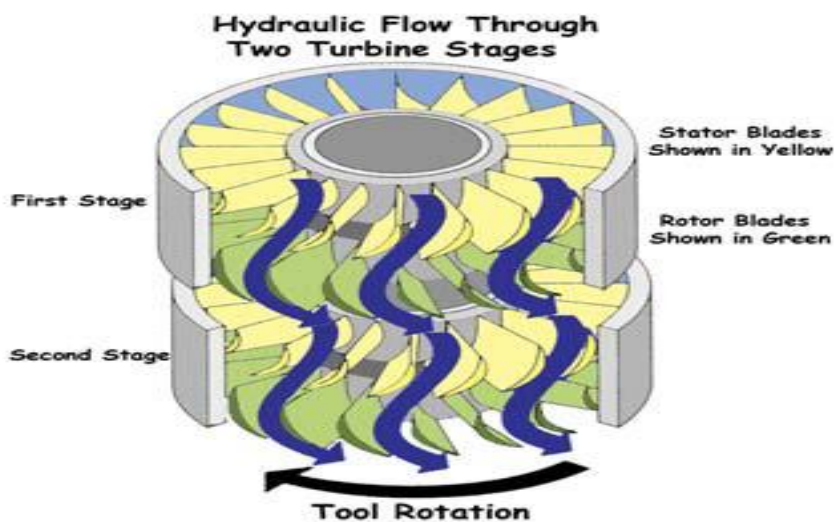


Fig18: Section motrice d'une turbine (10)

L'étage de turbine est la machine de base de conversion de l'énergie dans une Turboforeuse. Ils sont empilés les uns sur les autres dans la section motrice. La somme des puissances délivrées par tous les étages qui composent une turbine est égale à la puissance de la turbine elle-même. La puissance fournie par la turbine peut donc être modifiée en changeant le nombre d'étages incorporés. Ceci signifie qu'en augmentant le nombre d'étage, la capacité de la turbine augmente. Cependant en réalité ceci augmentera l'énergie hydraulique exigée par la Turboforeuse pour délivrer une telle puissance.(10)

-Etage de turbine :

Un étage de turbine est composé de :

II-1-1-1-1 : Un stator : il est pressé de manière très serrée et colle parfaitement à l'intérieur du corps de la Turbine et ne peut pas tourner par rapport au corps. Ce serrage est très important. Si un stator pouvait tourner quand il reçoit un courant de fluide, il dissiperait l'énergie hydraulique contenu dans celui ci. Le serrage prévient aussi les fuites de fluide entre le stator et le corps de la turbine le long de la paroi. Les fuites dissipent l'énergie hydraulique lorsqu'elles sont possibles.(

La fonction du stator est de collecter le flux semi - turbulent entrant à l'étage, de le réintroduire en courant laminaire, et diriger ce courant "amélioré" dans le rotor. Pour diriger le courant dans le rotor, la direction du courant est changée d'axial à semi-radial exigé par le rotor pour forcer la rotation. L'efficacité du stator est déterminée par:

- le degré au quel le courant axial est redirigé en un courant radial.
- L'ampleur à la quelle les conditions de l'écoulement laminaire sont rétablies dans le courant de décharge du rotor.
- L'importance des turbulences de sillage auto générées en aval des lames du rotor.(2)

II-1-1-1-2 : Un rotor : il est fixé à l'arbre de rotation de la turbine. Il reçoit le courant de fluide oblique (semi - radial) sortant du stator. Ce courant imprime un mouvement de rotation à l'arbre de la turbine. Les rotors (en dehors du rotor du dernier l'étage) déchargent le fluide directement à l'entrée du stator de l'étage suivant.

L'efficacité du rotor est dépendante de la forme des lames et du degré au quel le courant à travers le rotor est laminaire. Comme avec le stator, l'ampleur des turbulences de sillage auto générées est aussi importante. Des larges turbulences à la sortie du rotor entraineront d'importantes turbulences au rotor de l'étage suivant et par conséquent une baisse du rendement de l'étage en question. (7)

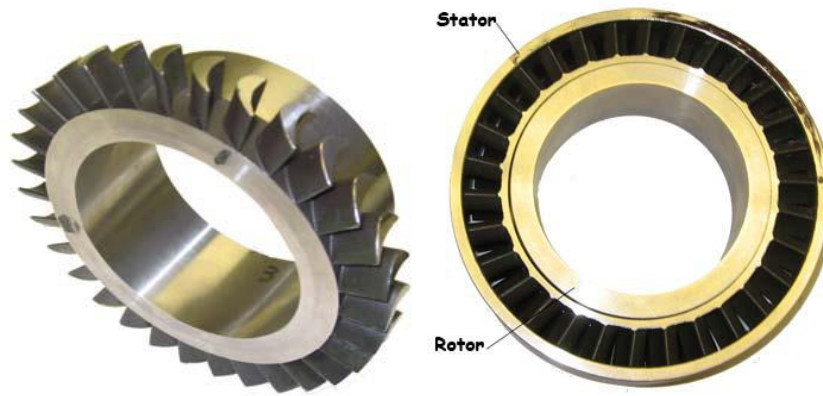


Fig19 : étage de turbine (rotor et stator) (7)

II-1-1-1-3 : Les aubes du rotor et stator : À première vue, les aubes des rotors et stators peuvent paraître très semblables. Tous les deux sont un arrangement d'aubes, disposées radialement autour de l'axe vertical de la turboforeuse. Cette similitude suggère un fonctionnement semblable des deux, mais il en est rien en réalité. Le profil de l'aube du stator est conçu pour éliminer les turbulences de l'écoulement. L'efficacité globale de la turbine s'améliore de manière significative avec la réduction des turbulences. Les lames du stator changent aussi le sens d'écoulement indépendamment du fait qu'il soit laminaire ou turbulent de sorte à ce que l'écoulement sortant de chaque lame agisse tangentiellement au diamètre du rotor.

Dans le rotor, l'intention est de créer une force, tout comme dans une aile d'avion cette force résulte des différences de pression entre le dessus et le dessous de l'aube. Ces pressions poussent du côté inférieur de la lame et tirent du côté supérieur et causent le mouvement de rotation autour du centre du rotor. Il y a toujours des turbulences à la sortie d'une aile. Celles-ci sont appelées les turbulences de sillage. La turbulence de sillage du stator perturbe l'écoulement d'admission du rotor et celle du rotor perturbe l'écoulement d'admission du stator de l'étage suivant. La plus grande partie des recherches actuelles sur les lames de turbine sont destinées à minimiser leurs turbulences de sillage. (2)

L'importance de la force agissant sur les rotors est influencée par la forme des aubes et leur angle d'attaque par rapport à l'écoulement du fluide. L'angle d'attaque influence également la turbulence de sillage, des angles d'attaques plus élevés produisent des plus grandes et plus longues turbulences de sillage.(7)

Plusieurs modèles de section motrice ayant différents types d'aubes sont mis à disposition par les fabricants. Sii-Neyrfor par exemple emploie trois géométries d'aubes différentes: MK1, cette géométrie fournit une chute de pression constante indépendamment de la vitesse de rotation. Ces aubes ont le plus grand rendement de la gamme, Ils sont principalement employés pour le forage des puits verticaux. Les géométries MK2 et MK3 présentent une diminution de la pression en surface lorsque la vitesse de rotation diminue mais leur rendement est inférieur à celui des aubes MK1, ces géométries fournissent plus d'indication sur l'état de l'outil et sont employées dans la

plupart des applications directionnelles. La géométrie MK3 diffère principalement du MK2 dans la résistance de la structure accrue permettant son utilisation dans les environnements à haute pression et débit.

Les aubes de turbine, comme les ailes d'avion, peuvent décrocher. Le décrochage est une situation en laquelle des turbulences extrêmement élevées sont créées dans les rotors avec comme conséquence une importante chute de puissance. Le décrochage des aubes peut être provoqué par un angle d'attaque excessif et/ou par un débit de fluide trop faible pour un profil d'aube particulier. Les aubes plus fortement incurvées tolèrent des débits inférieurs sans décrochage mais tendent à créer de plus grandes turbulences de sillages. Au décrochage, la pression différentielle chute, les turbulences sont maximales et la puissance fournie est sensiblement réduite. Le profil des aubes choisies doit éviter le décrochage dans les débits de l'intervalle de fonctionnement normal de la turbine. (7)

II-1-1-2: Section d'appui (bearing section):

Le flux hydraulique à haute pression dont la direction change à deux reprises dans chaque étage de turbine crée une très grande poussée qui exige un support. Les stators ont beaucoup plus de charge de poussée à supporter que les rotors, parce que une grande partie de la poussée hydraulique dans un rotor est employée comme énergie motrice pour provoquer la rotation de l'arbre de la turbine. (2)

Comme les stators sont fixés au corps de la turbine, les forces de poussée sont complètement supportées et ne présentent pas des obstacles. La résultante radiale de la poussée hydraulique dans les stators est directement transférée au corps de la turbine, puis aux murs du puits via aux stabilisateurs. La résultante radiale elle aussi, passe directement dans le corps et devient un complément au poids sur l'outil.

Bien qu'elles soient moins importantes, les forces de poussée sur les rotors sont plus difficiles à supporter en raison de la mobilité des rotors. Le manque de support pour ses charges dans les rotors mènera à leur déplacement et provoquera des défaillances catastrophiques. Les supports des charges de poussée sur les rotors est un problème majeur lors de la conception d'une turbine. La charge radiale est initialement supportée par l'arbre, ensuite transférée au corps grâce à des paliers de friction radiaux. La composante axiale agissant sur les rotors est supportée par le nombre adéquat de butée et de roulement contenu dans un compartiment spécial situé au dessous de la section motrice. (10)

II-1-1-2-1: Les paliers axiaux : Avec la turbine off-bottom, le poids du rotor de la turbine avec la poussée hydraulique axiale crée une force axiale vers l'outil. Quand on fore, le poids sur l'outil crée une force réactive qui s'oppose à la charge axiale. Dans la plupart des cas, le poids sur l'outil est inférieur à la poussée axiale, et la force résultante est orientée vers l'outil. En tout cas, les roulements et la réaction de WOB doivent équilibrer les charges de la poussée. Les roulements axiaux comprennent des composants fixes, et un composant rotatif qui est fixé à l'arbre, (comme un rotor). Les composants fixes et rotatifs sont alternés et empilés dans la section d'appui, et tournent

les un contre les autres. Le nombre des éléments a empilé est fonction des forces de poussée prévue dans les étages de la turbine mais aussi de la nature des matériaux constituant ces éléments.

Il existe plusieurs types de roulement, ils peuvent être des roulements à billes ou des paliers de friction en élastomère, métal ou même PDC. Le système de roulements adopté influence la longévité du moteur, le poids maximal applicable sur l'outil, et enfin la distance entre l'outil et le bent housing. Dans les turbines modernes on opte les plus souvent pour des paliers en élastomère ou en PDC :

- paliers en élastomère : (parfois appelé roulements en "caoutchouc"), sont composés d'un palier fixe en élastomère et acier, et un élément rotatif en acier avec

revêtement en oxyde de chrome sur la surface d'appui. Ces roulements fournissent une bonne résistance à l'abrasion et d'excellentes propriétés de résistance au choc. Le matériau est exposé à des dommages thermiques par des températures supérieures à 320 ° F (160 ° C). (2)

- palier en PDC : les butées en PDC (polycristallin diamant compact) ont une résistance très élevée à l'abrasion, et peuvent opérer à de très haute température (450 ° F / 233 ° C est le maximum actuel), et sont en mesure de soutenir très grandes charges axiales, les PDC ont une très haute résistance à la compression et peuvent soutenir des grandes charges axiales par unité de surface. Les PDC ont un faible coefficient de frottement, sont insensibles à tous les produits chimiques ou naturels de la boue qui pourrait circuler en cours de forage, et fonctionner sans problème à des températures très élevées. Les capacités de charge et le faible coefficient de frottement contribuent efficacement, à réduire au minimum la longueur de l'outil, en minimisant le nombre de palier nécessaire, et prolonger sa durée de vie. Leur principal défaut est leur prix plus élevé que tous les autres types.



Fig20 : Paliers en élastomère (10)



Fig21 : Paliers en PDC (10)

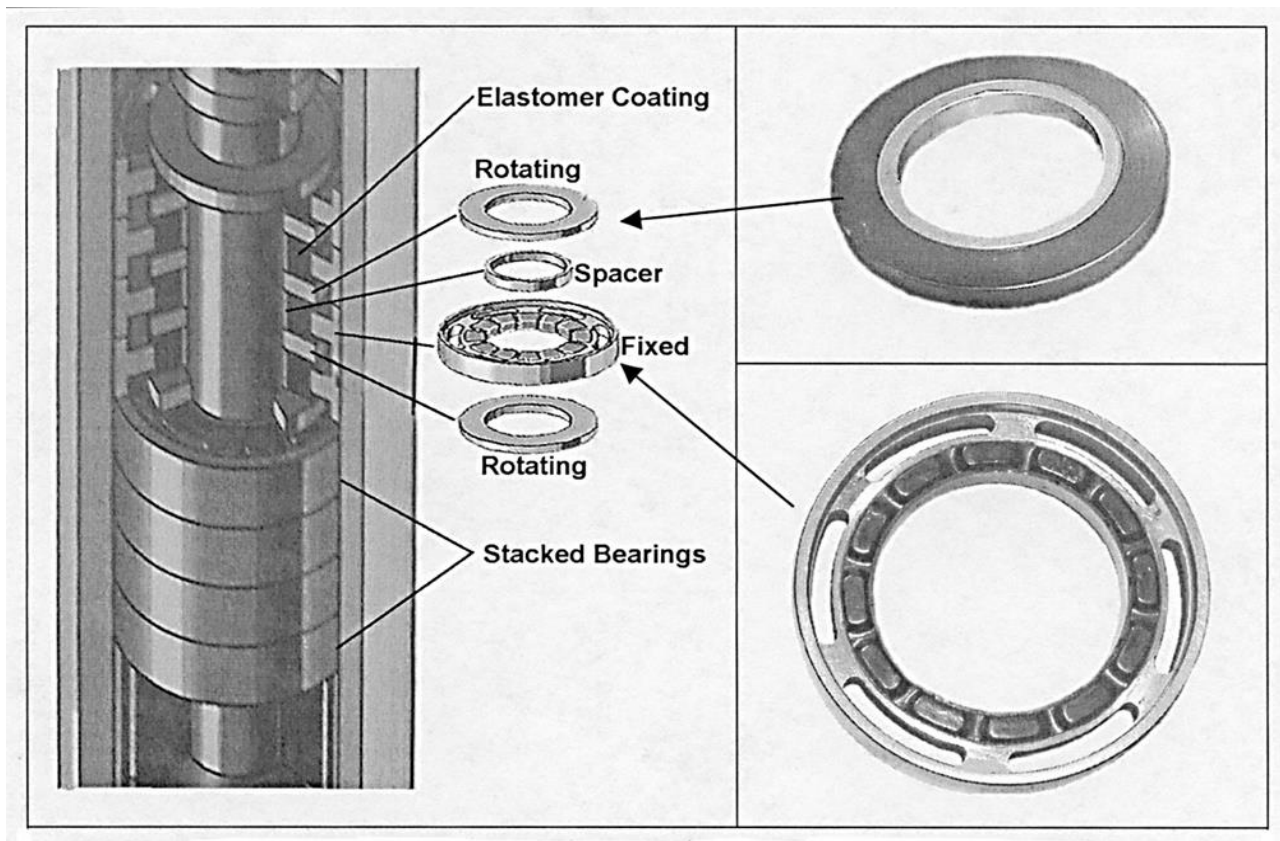


Fig22 : Section d'appui avec palier en élastomère (7)

II-1-1-2-2: paliers de friction radiaux : Les roulements radiaux supportent les charges transversales (côté à l'autre) qui peuvent être appliquées à une turboforeuse et permettent de maintenir le centrage latéral des pièces tournantes. Deux types de roulements radiaux sont utilisés dans une turboforeuse, roulements radiaux inférieurs et roulements radiaux intermédiaires. Un palier radial inférieur unique est installé au bas de la section d'appui de l'outil. Un certain nombre de paliers radiaux intermédiaires sont répartis à travers l'outil pour supporter les charges transversales. Ils sont installés selon les besoins, dans les sections motrices et d'appui, afin de parvenir à un centrage latéral des composants tournants (principalement rotors de turbine, butées et l'arbre d'entraînement).

À l'exception du palier radial inférieur, directement au-dessus de l'outil, les roulements radiaux sont refroidis et lubrifiés par le fluide hydraulique qui les traverse. En sortant des butées, la plupart du flux entre dans la tige de transmission, en passant par trois orifices d'entrée, pour être transféré à l'outil. Une petite partie du flux est détournée pour lubrifier et refroidir le palier radial inférieur. Ce flux est en suit rejeté dans l'espace annulaire. Le courant latéral doit être minimisé pour éviter une réduction significative de l'écoulement à l'outil. Un dispositif de compensation de pression appelé labyrinthe est donc installé au dessus du palier radial inférieur pour égaliser la pression dans le boîtier du palier inférieur à celle de l'annulaire, la suppression de la pression

différentielle limite généralement le débit de lubrification des paliers radiaux de quelques pour cent du débit total. (5)

II-1-1-3 : Cylindre d'équilibrage des poussées (balance drum) : Situé au top de la section motrice, le cylindre d'équilibrage des poussées réduit les charges axiales sur la section d'appui (bearing section) en diminuant la poussée hydraulique vers le bas jusqu'à 70 %. Le cylindre d'équilibrage égalise la pression au top de l'arbre moteur (drive shaft) de la

turbine avec la pression dans l'annulaire. Cet équilibre est réalisé grâce à un cheminement de la boue à travers un micro-annulus entre l'axe du rotor et l'annulaire. On a besoin donc de moins de paliers de roulement, et la section d'appui est plus courte : le bénéfice est une efficacité du moteur accrue.

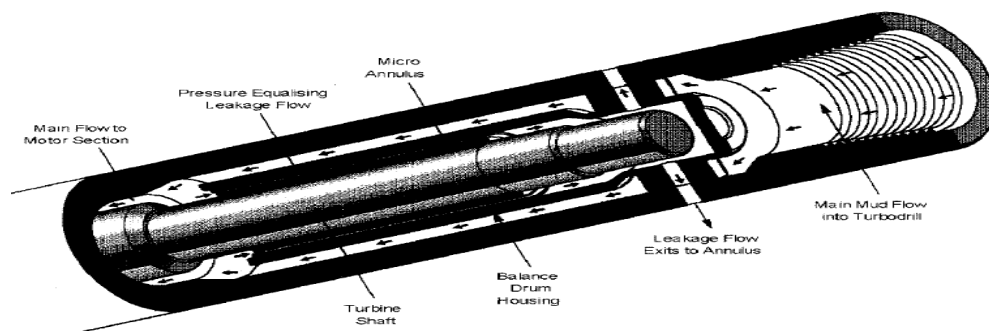


Fig23 : Cylindre d'équilibrage des poussées (balance drum) (7)

II-1-1-4: Stabilisation des outils: Tous les moteurs de fond (PDMs et turbines) présentent un jeu radial entre l'arbre et le corps du moteur. Ce jeu radial permet à l'outil de s'écarter latéralement pendant le forage s'il n'est pas proprement stabilisé. Ce mouvement radial conduit à forer un trou en spirale.

L'utilisation d'un outil avec une longue jupe, ou bien avec un near bit, est une solution acceptable pour les moteurs d'avancement, en stabilisant correctement l'outil.

Mais la distance du bend à la face d'attaque de l'outil est un paramètre important qui doit être aussi court que possible.

NEYRFOR a breveté deux solutions concernant l'extrémité de l'arbre de sortie de la turbine afin de stabiliser l'outil sans accroître cette distance :

-Bit box stabiliser BBS : dispositif stabilise l'extrémité de l'arbre sans accroître la longueur totale du moteur, et permet d'utiliser des outils standard à jupe courte. Le BBS donne des trous d'excellente qualité dans les formations non abrasives, et par là même permet à la turbine de glisser là où un PDM ne peut pas. Cependant cette solution n'est pas applicable à des formations abrasives : le bord d'attaque du stabilisateur BBS alèse la spirale créée par l'outil à jupe courte, et s'use rapidement; le BBS devient sous dimensionné. (2)



Fig24 : Extrémité femelle Bit Box Stabiliser + outil standard (2)

-Filetage mâle et outil à longue jupe de stabilisation femelle : cette configuration élimine l'écart entre l'outil et le stabilisateur, inhibant le phénomène d'usure.



Fig25 : Extrémité mâle + outil à longue jupe femelle (7)

II-1-2: Principe de fonctionnement:

La Turboforeuse convertit l'énergie contenue dans le fluide hydraulique (boue), sous la forme de pression et de débit, en énergie mécanique sous forme de rotation. Cette conversion a lieu dans les étages de la turbine, (un étage comprend un rotor et un stator), situés dans la section motrice. La puissance fournie par la turbine est composée des puissances fournies par tous les étages de la turbine (généralement 75 à 125 par section), dans une ou plusieurs sections motrices. Plus précisément, l'énergie emmagasinée dans le fluide hydraulique, est convertie en vitesse de rotation et en couple. La vitesse de rotation de la turbine est proportionnelle au débit du fluide hydraulique. Le couple lui est une fonction du débit de fluides hydrauliques, la densité du fluide hydraulique (poids de la boue), et le nombre des étages employé dans la turbine. (7)

La conversion d'énergie est caractérisée par les relations suivantes :

$$\text{puissance hydraulique(HP)} = \frac{\text{chute de pression} \times \text{debit}}{1714}$$

$$\text{puissance mécanique(HP)} = \frac{\text{couple(ft/lbs)} \times \text{vitesse de rotation(rpm)}}{5252}$$

$$\text{puissance mécanique} = \text{puissance hydrolique} \times \eta$$

$$\text{vitesse de rotation(rpm)} = \frac{\text{puissance mécanique} \times 5252}{\text{couple(ft/lbs)}}$$

$$\text{couple(ft/lbs)} = \frac{\text{puissance mécanique} \times 5252}{\text{vitesse de rotation(rpm)}}$$

Comme le montre ces relations, la vitesse de rotation et le couple de sortie de la turbine sont inversement proportionnels. Les turboforeuses fonctionnent en général à haute vitesse de rotation, ce qui implique que le couple est généralement assez faible. La puissance mécanique fournie par la turbine étant constante et égale à la puissance entrée (hydraulique), moins les pertes. Ces pertes peuvent être caractérisées par le rendement η qui est le rapport entre la puissance consommée par la turbine et la puissance fournie.

En pratique, la puissance fournie par la turbine est modifiée en changeant le débit du fluide, la densité de la boue ou la chute de pression à travers la turbine. Comme suggéré au-dessus, la puissance produite peut aussi être modifiée en ajoutant ou enlevant des étages de la turbine. Finalement, en changeant la nature des caractéristiques des aubes des étages de la turbine, on change la vitesse et moment de rotation fournis par celle-ci. Les caractéristiques des aubes n'affectent pas la puissance produite si on ignore le rendement.

II-1-3 : Caractéristiques mécaniques des turbines de forage :

Chaque type de turboforeuse est évalué à un débit donné appelé débit nominal. Les caractéristiques mécaniques sont mesurées et décrites au débit nominal. Les caractéristiques aux autres valeurs de débit sont généralement calculées sur la base des valeurs mesurées du débit nominal. Calcul des vitesses de rotation, des couples de sortie, puissance, efficacité de l'outil, et la chute de pression à travers une turbine de forage est discutée ci-dessous.

Turboforeuse utilise des aubes de turbine axiales pour convertir l'énergie hydraulique (pression et de débit) en énergie mécanique qui peut être appliquée à l'outil sous la forme de couple.

Le couple développé par la Turboforeuse atteint son maximum au calage. Le couple de calage, (T_0), donné en ft-lb, est égal à: (5)

$$T_0 = \eta_m \frac{nw(1 - \varepsilon)Q^2}{g\lambda\pi b} (\tan\beta)$$

Avec:

η_m = rendement mécanique

n = Nombre d'étages de la turbine

w = la densité des fluides en (lb/ft³)

ε = coefficient de perte de fluide

Q = débit de fluide (ft³/sec)

g = accélération de la gravité (32.2ft/sec²)

λ = coefficient de contraction des fluides (dans le cas des fluides compressibles)

b = largeur de pale de rotor (m)

β = angle de sortie des pales de rotor et le stator

Le couple de la turbine peut être augmenté en augmentant le nombre d'étages de la turbine (n), en augmentant le débit de fluide (Q) ou en augmentant l'angle de sortie (β) des aubes de turbine.

Le couple, (T), diminue à mesure qu'augmente la vitesse de rotation et ceci d'après la relation suivante:

$$T = T_0 \frac{(1 - N)}{N_R}$$

Avec :

N est la vitesse de rotation,

N_R est la vitesse d'emballement.

La vitesse d'emballement est donnée par :

$$N_R = \frac{120(1 - \varepsilon)Q}{\lambda(\pi D)^2 b} (\tan\beta)$$

Comme le montre la courbe ci dessous, le couple diminue à partir d'un maximum de T_0 au calage à zéro à la vitesse d'emballement, (N_R). Les valeurs de couple total pour une turboforeuse sont directement proportionnelles au nombre d'étages de la turbine.

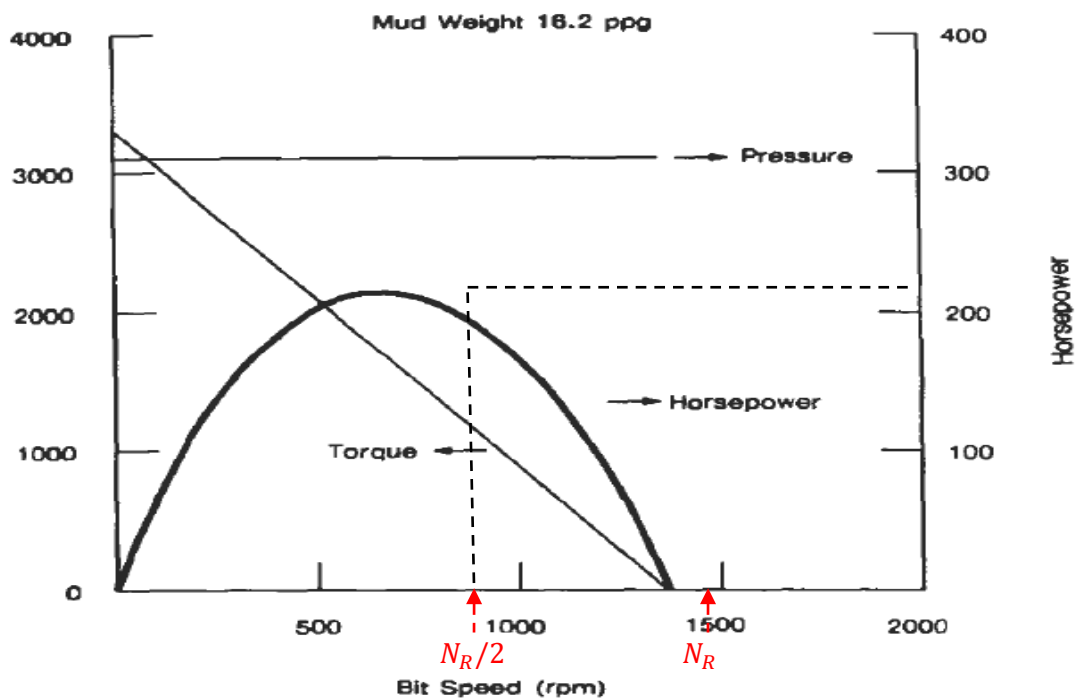


Fig26 : Courbe de caractéristiques mécaniques des turbines de forage (10)

Comme on peut le voir la turbine fournit le maximum de puissance à la moitié de sa vitesse d'emballement.

La vitesse d'emballement des turboforeuses varie généralement entre 800 et 2000tr/mn. Ainsi, la puissance maximale est généralement livrée à des vitesses de 400 à

1000 tr / min. Ces grandes vitesses de rotation réduisent considérablement la durée de vie des outils à molette; des outils PDC et diamant sont généralement utilisés avec les turbines.

Après que les caractéristiques de fonctionnement de la turbine ont été déterminées pour un débit donné, (Q), et une densité de fluide hydraulique donnée (w). Les caractéristiques de fonctionnement pour les autres débits et densité de fluides peuvent être calculées comme suit: (7)

$$F' = F\lambda \left(\frac{Q'}{Q}\right)^2 \dots (1)$$

$$\Delta P' = \Delta P\lambda \left(\frac{Q'}{Q}\right)^2 \dots (2)$$

$$P' = P\lambda \left(\frac{Q'}{Q}\right)^3 \dots (3)$$

$$S' = S \left(\frac{Q'}{Q}\right)^2 \dots (4)$$

Avec:

λ = Rapport entre les densités de fluide (w'/w)

F' , F = poussées hydrauliques verticales sur les rotors de la turbine

$\Delta p'$, Δp = chute de pression à travers la turbine.

P' , P = puissance

S' , S = vitesse de rotation

T' , T = torque

Revoir brièvement les relations entre la vitesse de rotation, le couple et la puissance peut, à ce stade être utile. Il faut garder à l'esprit, quand on étudie la vitesse, couple et puissance, que chaque type de turboforeuse a été étudié à un débit

donné, défini comme «débit nominal ». Les caractéristiques mécaniques sont mesurées au débit nominal. En utilisant la mesure (nominale), les valeurs prévues pour les autres débits que le débit nominal sont calculés en fonction de la valeur nominale.

II-1-3-1: Puissance : La puissance délivrée par une turboforeuse est égale au couple de sortie multiplié par la vitesse de rotation. La puissance est donc proportionnelle au cube du débit.

La puissance nominale est définie comme la puissance maximale délivrée au débit nominal. Le couple et la vitesse de rotation correspondant sont appelés couple nominal et vitesse nominale. Pour un débit donné, puissance est égale à zéro au calage, à zéro à la vitesse de rotation d'emballage et la puissance maximale est obtenue lorsque la vitesse de rotation est la moitié de la vitesse d'emballage. À ce stade, le couple développé est la moitié de couple produit au calage.

En règle générale, le fonctionnement de turboforeuse se déroule dans une gamme quasi-maximum de puissance. Les courbes suivantes représentent la puissance de sortie d'un type de Turbodrill. Les courbes telles que celles-ci sont disponibles pour chaque modèle de Turbodrill.

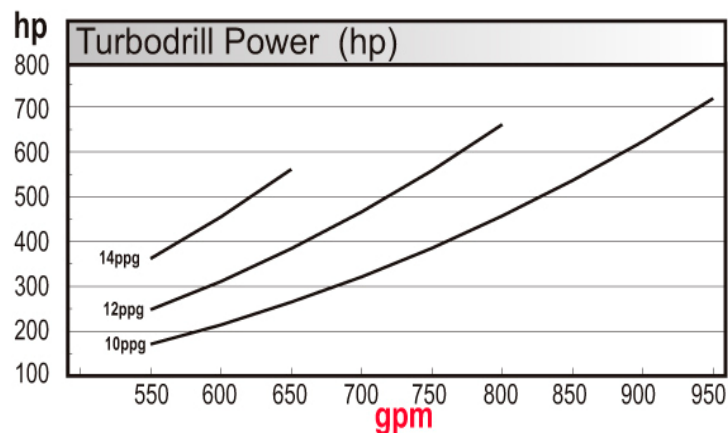


Fig27 : Variation de la puissance en fonction des débits

L'équation de puissance (3, ci-dessus) montre que la puissance de sortie de turboforeuse peut être augmentée si en augmentant la densité de boue et / ou en augmentant le débit de boue. Les équations 1-5 sont importantes, car les mécanismes des fluides dans la Turboforeuse sont compliqués et les performances des outils ne peuvent pas être prédites avec précision à partir des équations théoriques. En conséquence, les diverses caractéristiques d'une turboforeuse donnée doit être mesurées à plusieurs reprises sous différentes conditions. Avec les valeurs mesurées, les équations (1-5) peuvent alors prédire les caractéristiques dans d'autres conditions d'utilisation sur le terrain.

II-1-3-2: Vitesse de rotation : La vitesse de rotation de la turbine est directement proportionnelle au débit de l'écoulement du fluide hydraulique. Dans la pratique, pour un débit donné, la vitesse réelle dépend du couple exercé par la formation sur l'outil. La vitesse varie donc entre la vitesse d'emballement en l'absence de couple appliqué par l'outil, (outil au dessus du fond), à zéro lorsque le couple appliqué par l'outil est égal ou supérieur au couple maximum (couple de calage).

II-1-3-3: Couple moteur : Turboforeuse est un outil auto-régie qui a une caractéristique de travail préféré, qui dépend de la valeur du couple nécessaire à l'outil de forage. Le couple moteur est proportionnel au carré du débit de la boue, de la densité de la boue et au rayon des aubes de turbine. Le couple d'entraînement d'un outil particulier est directement proportionnel au nombre d'étages de la turbine. Pour un débit donné, le couple moteur varie de zéro avec l'outil au dessus du fond (vitesse d'emballement) à une valeur maximale lorsque la turboforeuse est calée.

Au débit nominal, le couple de sortie est appelé «couple nominal ». Généralement, la gamme des couples de sortie d'un outil est calculée en fonction du couple nominal. Le couple nominal est d'environ la moitié de la valeur du couple de décrochage.

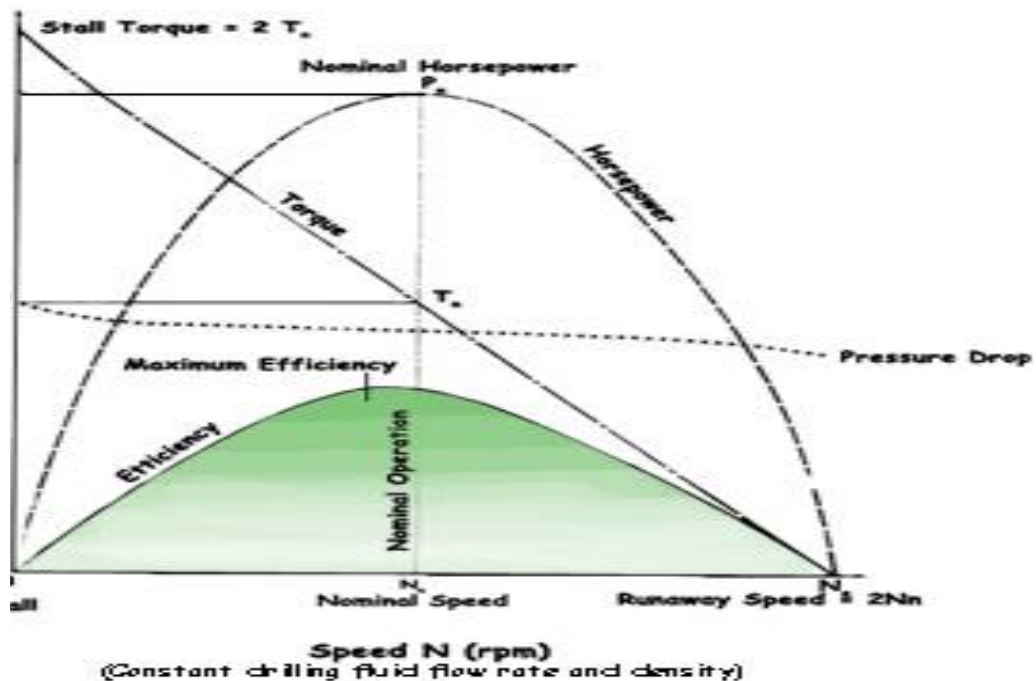


Fig28 : Caractéristiques mécaniques en fonction de la vitesse de rotation

II-1-3-4: Le rendement : Le rendement d'une turboforeuse est le rapport entre l'énergie mécanique produite, (puissance fournie par la turbine), et l'énergie hydraulique absorbée à partir des fluides hydrauliques. Les courbes de rendement et de puissance ont des formes proche l'une de l'autre dans lesquels un maximum d'efficacité correspond généralement à une vitesse légèrement inférieure ou supérieure à la vitesse nominale.

Le type des lames utilisées dans une turboforeuse donne un rendement théorique de 65% à 70%. Ces valeurs ne prennent pas les pertes par frottement dans les roulements en considération. En prenant en considération les pertes par frottement, l'efficacité est en général, d'environ 60% en fonction de divers facteurs tels que la vitesse de rotation de la garniture, le débit de boue, l'usure des roulements et les caractéristiques de la boue.

II-1-3-5: Chute de pression: La chute de pression hydraulique à travers une turbine est proportionnelle au carré du débit du fluide hydraulique à la sortie de l'outil, à la densité de la boue, et au nombre d'étage. En matière d'information la chute de pression est essentiellement indépendante de la vitesse de rotation de l'outil. Les courbes suivantes représentent la chute de pression à la sortie d'un modèle donné de Turbodrill. Les courbes telles que celles-ci sont fournies par les fabricants pour chaque configuration ou modèle de la gamme. (7)

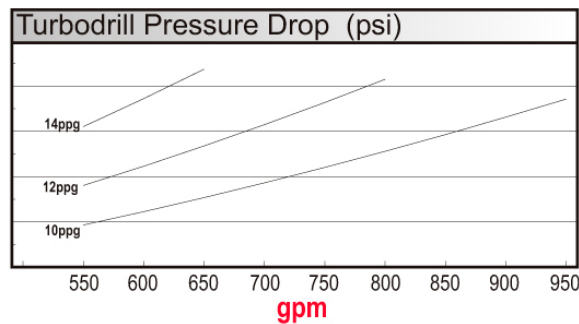


Fig29 : La chute de pression en fonction du débit (7)

II-1-4 : Paramètres de forage avec une turbine :

II-1-4-1 : Système hydraulique, débit et pression : Pour obtenir la puissance maximale à partir d'une turbine, un débit maximum de fluide hydraulique doit être fourni à l'outil. En pratique, le débit peut être estimé selon le processus suivant:

- 1- Déterminer le maximum de débit des fluides pour assurer un nettoyage optimal du trou,
- 2- Etablir le débit maximal autorisé par la turboforeuse à la densité de boue prévue, et vérifier qu'il est en compatibilité avec le débit calculé à l'étape 1
- 3- Calculer la baisse de pression totale à travers la garniture, la turboforeuse, l'outil, et l'annulaire en fonction des débits établis à partir de l'étape 1, et le poids de la boue prévu,
- 4- Vérifier que les pompes peuvent fournir le débit. Si les pompes à boue sont incapables de fournir les débits de l'étape 1, les calculs seront renouvelés sur la base de débit maximal qui peut être maintenu.

5-Établir la taille appropriée des chemises de la pompe. Lorsque c'est possible, choisir la taille des chemises de la pompe qui permettent de faire tourner la turboforeuse à l'aide d'une seule pompe tout en maintenant la deuxième pompe en réserve. Dans le cas d'une défaillance de la pompe, les opérations peuvent se poursuivre avec la seconde pompe de forage. La capacité appropriée des pompes à boue et la taille des chemises sont la clé du turboforage à haut performance.

II-1-4-2 : Propriétés des boues et leurs effets sur les Turboforeuses :

-Densité de la boue et Turboforeuse : Il n'y a pas de limite à la densité de la boue qui peut être utilisée en conjonction avec une turboforeuse. La chute de pression à travers la garniture complète, y compris la turboforeuse est une fonction de la densité de la boue. Le débit doit être réduit à mesure que la densité augmente pour éviter l'endommagement de la turbine. La puissance fournie varie en fonction de la densité de la boue. Pour une pression en tête donnée, la puissance délivrée diminue lorsque la densité augmente.

-Viscosité de boue et Turboforeuse : Lorsque l'écoulement à travers une turboforeuse est 100% turbulent, on peut supposer que la chute de pression à travers l'outil serait indépendante de la viscosité de la boue. En pratique, la viscosité peut affecter de manière significative la chute de pression. Des chutes de pression jusqu'à 15% plus élevées sont mesurées pour les boues à base d'huile les plus visqueuses que pour les boues à base d'eau les moins visqueuses.

-Type de boue et Turboforeuse : Tout type de boue peut être utilisé avec une turboforeuse. Comme certaines boues sont plus abrasives et / ou plus corrosives que d'autres, des roulements résistants à la corrosion / abrasion peuvent être requis pour l'utilisation en conjonction avec certaines boues.

-Produit colmatant (LCM) et Turboforeuse : Des LCM fins peuvent être pompés à travers une turboforeuse sans problèmes. Mais des LCM à des concentrations plus élevées ou des LCM moyens à grossiers peuvent pas toujours être circulés. Dans tous les cas il est nécessaire de se référer à la fiche technique fournie par le fabricant de la turbine pour les informations portant sur les LCM tolérés par leur matérielle et leurs concentrations.

-Teneur en sable dans la boue : Comme avec tous les composants du train de tiges, les Turboforeuses sont soumises à l'abrasion. La teneur en sable dans les fluides de forage doit toujours être contrôlée conformément aux pratiques standards de l'industrie.

-H₂S et Turboforeuse : L'endommagement de l'acier et les autres composants de la turbine par le H₂S contenu dans les fluides de forage est moins important que pour la plupart des autres équipements de fond et ne devrait présenter aucun problème de fonctionnement ou de longévité pour la turbine.

II-1-4-3 : Poids sur les outils (WOB) : Lors du forage des formations dures, la vitesse de rotation élevée des turboforeuses produit des taux de pénétration élevés avec des poids sur l'outil relativement faibles. Le poids total autorisé sur l'outil est fonction de l'énergie hydraulique disponible; des niveaux plus élevés de l'énergie hydraulique permettent l'augmentation du WOB.

En raison de la réduction du WOB exigé pour la turbine, le turboforage exige une garniture moins lourde que le forage rotatif. De nombreux avantages découlent d'une BHA allégée:

- Réduction des temps de manœuvre,
- Réduction du pitonnage lors des manœuvres,
- Capacité accrue pour la traction.
- Réduction de la détérioration des parois lors du forage,
- Réduction des frottements lors des manœuvres,
- Moins de problèmes de calage.

II-1-4-4 : String Rotation : Lors du turboforage la garniture doit tourner sauf lors des changements de direction ou d'azimut. La vitesse de rotation de la garniture est ajoutée à la vitesse de rotation de l'arbre de la turbine pour obtenir la vitesse de rotation de l'outil. Quand la garniture tourne, les frottements contre la paroi du puits sont réduits. En conséquence, le poids sur l'outil est

presque entièrement transféré à l'outil. Rotation augmente également l'efficacité du stabilisateur et permet d'éviter le calage. La vitesse de rotation est adaptée aux conditions de trou de façon à aboutir un couple minimum à la table de rotation. Si les conditions ne permettent pas la rotation, la turbine ne peut plus être stabilisée et des précautions doivent être prises pour empêcher le calage.

II-1-4-5 : Compensation pour charge axiale : Quand l'outil est off-bottom (au dessus du fond), le poids de l'arbre d'entraînement ainsi que des rotors de turbine et 100% de la poussée axiale doit être supportés par les paliers des butées axiales. Il n'y a pas de force de réaction au WOB qui compense la charge axiale sur les paliers de butée. En conséquence, les flux à travers une turboforeuse off-bottom doivent être réduits pour éviter la surcharge des butées axiales. La réduction du débit réduit la composante verticale de la poussée hydraulique appliquée aux rotors. Le débit maximum admissible pour les turbines off-bottom est fourni par le constructeur de l'outil. (2)/(7)/(10)

II-2: Les PDM (Positive Displacement Motors)

Les moteurs de fond appelés aussi moteurs à déplacement positif sont devenus les outils sans lesquels le forage dirigé n'aurait pu évoluer aussi rapidement dans ces dernières années. Ils dérivent de la "pompe à cavité progressive" inventée par le Français "Moineau" en 1934, inversée dans les années 50 pour en faire des moteurs, depuis en évolution continue. (10)

II-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.

II-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 remontée appelé dump valve ou by-pass. A $\pm 30\%$ 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 PDMs : 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, du 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.

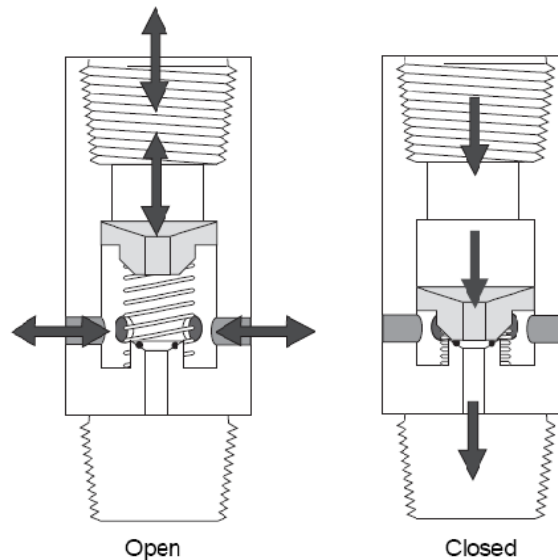


Fig. 30 : Dump valve (7)

II-2-1-2: Section motrice:

La section motrice convertit l'énergie hydraulique du fluide de forage en puissance mécanique qui fait tourner le trépan. 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 rotor par rapport au stator. Cette force de rotation est ensuite transmise via un arbre de transmission et l'arbre d'entraînement à l'outil.

Le rotor est fabriqué d'acier inoxydable résistant à la corrosion. Il a généralement une mince couche de chrome pour réduire la friction et à l'abrasion. Des rotors de habillé 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 (DH), le petit diamètre du stator (ID), l'excentricité du rotor (e), le nombre de lobes et la longueur de l'étage qui est définie comme un cycle plein de l'hélice du stator.

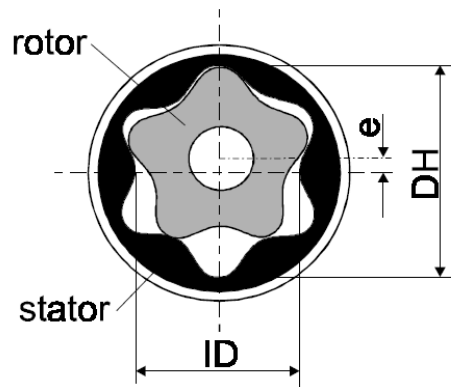


Fig. 31 : Caractéristique de la section motrice

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 que le stator 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. Etant 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.

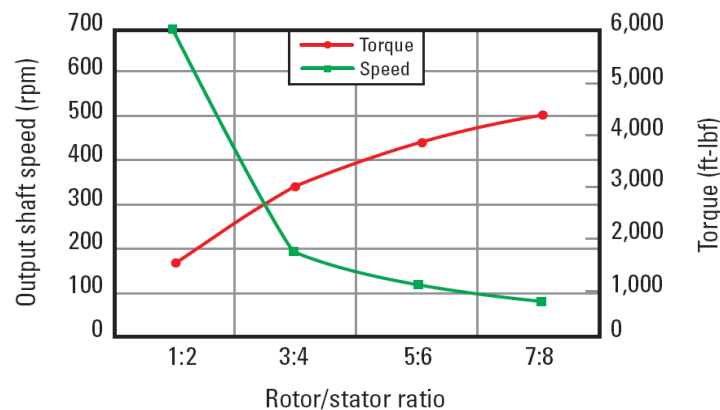


Fig. 32 : Vitesse et torque en fonction du nombre de lobe

La longueur de l'étage du stator est définie comme la longueur axiale requise pour un lobe dans le stator 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. L'équation qui décrit la relation générale entre la longueur des étages du rotor au stator est donnée comme suit :

$$\text{étage du rotor} = \frac{n + 1}{n} * \text{étage du stator}$$

Avec :

n : nombre de lobe du rotor.

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'incorporé dans une BHA de déviation.

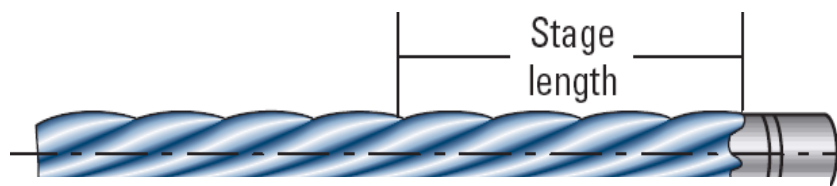


Fig. 33 : La longueur d'un étage de rotor (10)

II-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 du 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 (lost circulating 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.

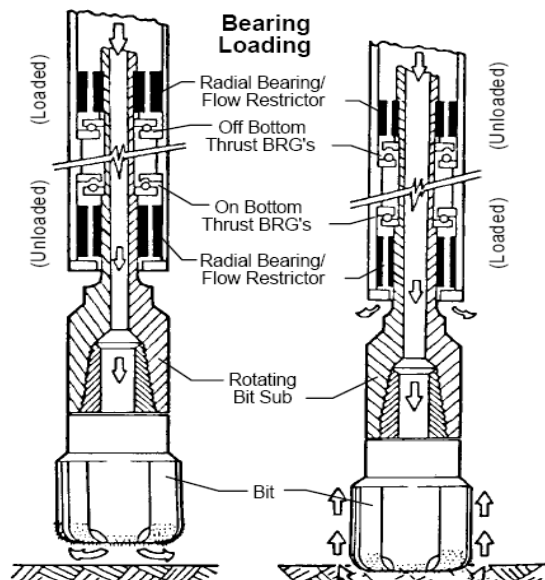


Fig. 34 : Section d'appui (7)

II-2-1-4: Transmission:

Vu que le rotor est façonné en spirale, il ne tourne pas de manière concentrique avec le rotor. 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 a été 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. (7)/(10)

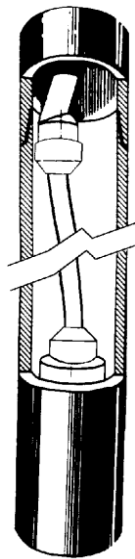


Fig. 35 : Flex (10)

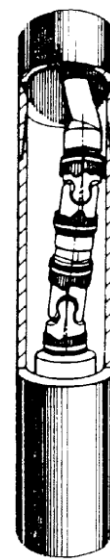


Fig. 36 : Universal joint (10)

II-2-2: Les PDM de déviation :

Les moteurs coudés multilobés à la fois solides et fiables représentent la majorité des moteurs de déviation. Il existe deux configurations principales de moteur manœuvrable:

a) 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° - 1.5° . 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° (c.-à-d. équivalent à un moteur en ligne droite) jusqu'à 3° , 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 est tournée. Le nombre de manœuvre est donc radicalement réduit.

Le prochain développement sera des coudes réglables au fond. Ceux-là sont maintenant en développement par certains constructeurs.

b) Moteurs DTU (Double Tilted Unit) :

Ce type de moteur orientable a été élaboré par Christensen (Nortrak DTU). Au lieu d'un seul coude sur le corps du PDM, il possède un bent housing ayant deux tilts angles dans le même plan mais opposés à 180°. L'angle DTU est l'angle résultant calculé à partir des deux angles d'inclinaison opposés. Selon la taille du PDM et le dogleg souhaité, l'angle DTU varie de 0,13 ° à 0,78 °. Un stabilisateur sous dimensionné est monté sur le corps de la section d'appui. Ce stabilisateur peut être intégré ou à chemise interchangeable.

En raison de leur rigidité (un coude réglable n'est pas possible) et de leur réaction imprévisible dans certaines situations (par exemple, lorsque on essaye de réduire l'inclinaison aux alentours de l'horizontal), le système DTU a été remplacé par la conception simple de PDM à coude orientable. (9)/(6)

II-2-3 : Types de moteur de fond :**II-2-3 -1 : Moteurs low speed :**

L'utilisation de coudes réglables avec des sections motrices à haut couple de sortie et faible vitesse de rotation rend le moteur à low speed idéale pour une utilisation dans des applications de forage dirigé y compris les puits horizontaux et des puits dans des formations à problèmes. Le couple de sortie élevé des sections motrices multilobes réduit efficacement la longueur des moteurs, permettant leur utilisation spécialisés dans diverses applications y compris le forage à court rayon.

II-2-3 -2 : Moteurs medium speed :

Les caractéristiques de fonctionnement des moteurs à vitesse moyenne permettent un réglage fin des paramètres de fonctionnement et des taux de pénétration tout en maximisant la vie de l'outil et le temps au fond, réduisant ainsi les coûts. Les Applications pour les moteurs à vitesse moyenne sont le forage dirigé et droit, forage d'extension et le forage de performance.

II-2-3 -3 : Moteurs high speed :

Les caractéristiques opérationnelles des moteurs high speed les rendent aptes à être utilisés dans les rectifications et les side tracks des applications où le contrôle directionnel précis permet l'établissement efficace de l'orientation nécessaire.

Les moteur low, medium et high speed peuvent être utilisés dans des applications de moteur droit ou orientable en fonction des paramètres de fond et les exigences opérationnelles. (6)/(7)

II-2-4: Caractéristiques des PDM :**II-2-4-1: Chute de pression :**

Lorsque la boue est pompée à travers un moteur de fond qui tourne librement au dessus du fond (c.-à-d qu'il ne fait pas de travail) une certaine perte de pression est nécessaire pour surmonter les forces de frottement entre rotor et stator et causer la rotation du moteur. Cette perte de pression et la vitesse de rotation correspondante sont proportionnelles au débit. Leurs valeurs sont connues pour chaque taille et type de PDM. La perte de pression à vide ne dépasse généralement pas 100psi.

Quand l'outil touche le fond et un WOB de forage est appliqué, la pression de pompage augmente. Cette augmentation de la pression est normalement appelée la pression différentielle du moteur ($P_{\text{onbottom}} - P_{\text{offbottom}}$). Le couple moteur est directement proportionnel à la pression différentielle. Cette pression différentielle est nécessaire pour pomper un volume de boue donné à travers le moteur pour effectuer un travail utile. Elle est aussi appelée la chute de pression à travers le moteur (P_{motor}). Pour un moteur multilobe, elle peut être de 500 psi ou même plus.

Il ya une valeur maximale recommandée de pression différentielle du moteur. À ce stade, le couple optimal est produit par le moteur. Si le WOB dépasse ce point, la pression de pompage augmente très rapidement. Si P_{motor} augmente au delà d'un point la paroi du stator est déformée, l'étanchéité rotor / stator est rompue et la boue coule directement sans faire tourner le rotor. La pression de pompage ne varie plus lorsque du poids supplémentaire est appliqué. On dit alors que le moteur est calé (stal out). Plus l'usure des roulements du moteur est importante, plus il est facile de caler le moteur. Il est recommandé de ne pas délibérément caler le PDM lorsqu'on atteint le fond, même si cela indique la pression de calage. Le moteur peut être endommagé, même après un seul calage. Un moteur PDM calé devrait être rapidement relevé du fond et les pompes arrêtées. Un endommagement majeur du moteur se produira, si la boue est pompée en continu à travers le moteur qui ne tourne pas.

Il est évident que, si la pression de pompage lors du forage avec un moteur est proche du maximum admis par le circuit de pompage, le calage du PDM peut conduire au déclenchement de la soupape de sécurité "pop-off valve". Ceci doit être pris en compte dans l'élaboration du programme hydraulique.

II-2-4-2: Couple et vitesse de rotation d'un PDM :

La vitesse et le torque fournis par le moteur dépendent très largement des caractéristiques de la section motrice. Les lobes sur un rotor et stator agissent comme une boîte à vitesses. Pour un diamètre de moteur donné plus leur nombre augmente, plus le couple de sortie du moteur augmente et la vitesse de rotation de l'arbre de sortie diminue. La longueur de l'étage influence aussi le torque et la vitesse de rotation en déterminant l'angle d'inclinaison de la spirale du rotor. Plus l'étage est court plus cet angle est important ce qui réduit la force perpendiculaire à l'axe longitudinal du rotor et le volume des cavités dans chaque étage. Il en résulte une réduction de la production de couple et une augmentation de la vitesse de rotation du moteur. Inversement une plus grande longueur d'étage, produit une diminution de l'angle de pas, résultant en une augmentation du couple et une diminution de la vitesse. Pour une longueur d'étage et un nombre de lobe donné le nombre d'étage augmente aussi le torque produit par le moteur sans tout fois réduire la vitesse de rotation.

Le couple délivré par la section motrice est proportionnel aussi à la différence de pression à travers cette section d'où l'augmentation de pression visible en surface lorsque l'on met du poids sur l'outil. Le couple maximum est limité par la résistance mécanique de l'élastomère du stator. Ou cette résistance mécanique est affaire de compromis. En effet l'élastomère doit être suffisamment rigide pour résister à l'abrasion des solides de la boue, mais en même temps il doit être suffisamment flexible pour procurer une étanchéité sous pression entre le rotor et le stator. La vitesse de rotation elle est proportionnelle au débit du fluide de forage pour une configuration de lobes donnée.

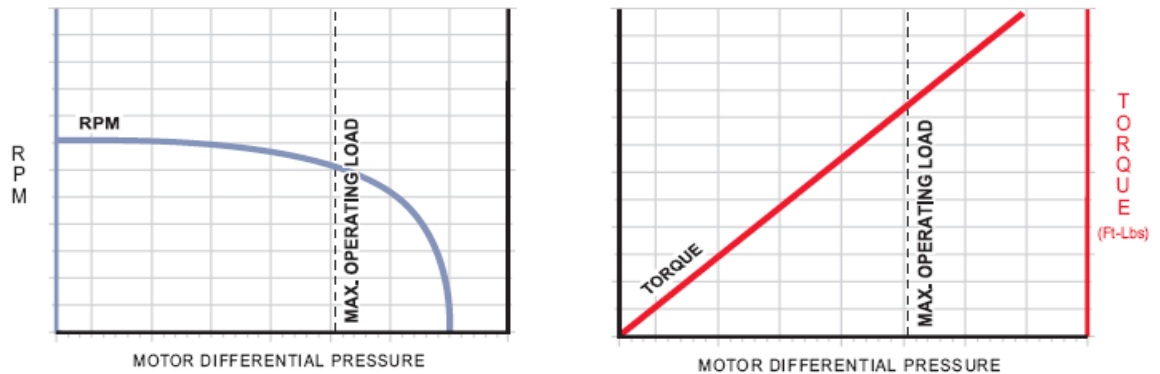


Fig. 37 : La vitesse de rotation et couple de moteur en fonction de la pression

II-2-4-3: Puissance délivrée par le PDM:

Tout comme dans le cas de la turbine, la puissance du moteur est définie comme étant la puissance mécanique produite par la section motrice, c'est une fonction du couple produit et de la vitesse du moteur (RPM). La puissance à une pression donnée est calculée en utilisant la valeur du couple et la valeur correspondante de la vitesse pour cette pression à un débit spécifique.

Les puissances maximums ne devraient pas être calculées en utilisant la valeur de couple de calage (où il n'y a aucune rotation de l'outil de forage) ou en utilisant la vitesse de rotation maximale (Off-bottom) où il n'y a aucune production de couple à l'outil.

La formule suivante nous permet de déterminer la puissance mécanique du moteur en HP (Horsepower) :

$$\text{Puissance Mécanique} = \frac{\text{Output RPM} \times \text{Output Torque}}{5252}$$

Où le couple est donné en : Ft-Lbs.

Des études récentes ont montré que la courbe de puissance est une parabole et ne pas une courbe lisse vers le haut, comme on le pensait initialement. Cela signifie que si le PDM est utilisé à 50% -60% de la pression différentiel maximale admissible par la section motrice, les mêmes performances devraient être atteintes que lorsqu'ils fonctionnent à 90% de la pression différentiel. La première situation est beaucoup mieux, car elle donne une plus grande marge avant le calage. Cela devrait déboucher sur une vie du moteur beaucoup plus longue.

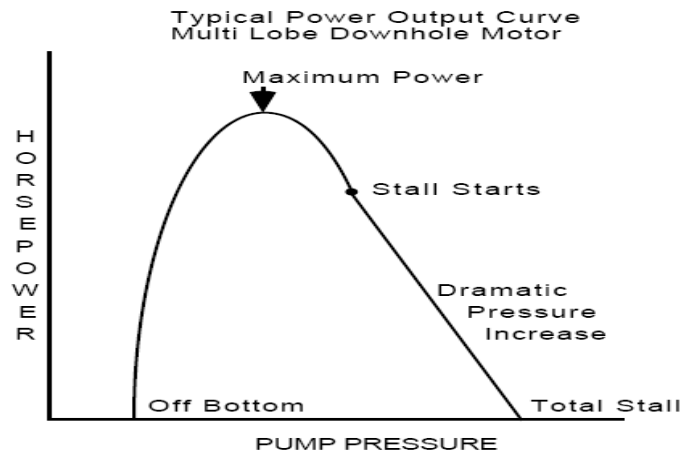


Fig. 38 : Courbe de pression d'un PDM

Cependant, les courbes fournies par les constructeurs ne représentent la puissance que dans le domaine d'utilisation normale du PDM et ne vont pas jusqu'au calage du moteur. Ces courbes de puissance ne sont pas des multiples exacts du couple maximal et de la vitesse maximale de sortie, mais ils sont plus représentatifs des résultats pratiques. Il est recommandé que la pression différentielle de fonctionnement dans les conditions normales de forage ne dépasse pas 80% du maximum autorisé, le maximum étant la valeur de pression différentielle correspondant à la puissance maximale.

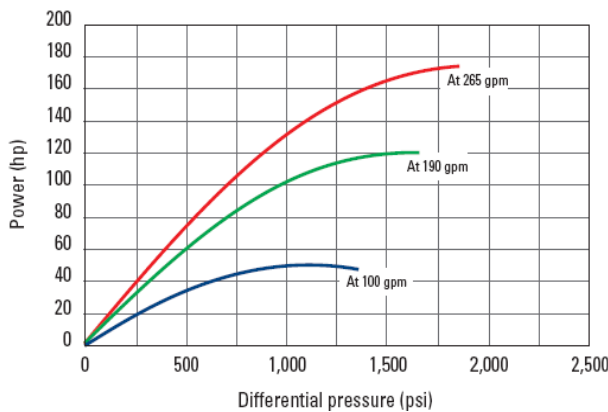


Fig.39 : Courbe de puissance fournie par le constructeur

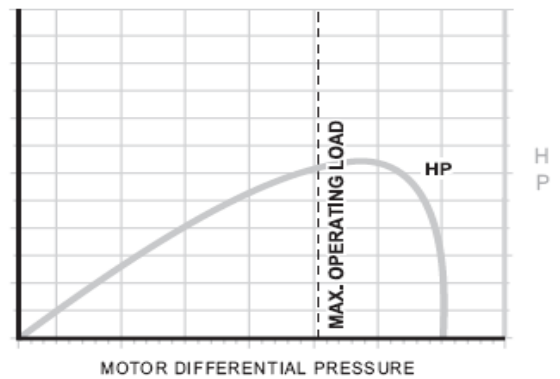


Fig. 40 : Courbe de puissance représentée en entier

II-2-4-4: Rendement du moteur

Le rendement d'un moteur relie les puissances hydrauliques (débit et pression) fournies au moteur aux puissances mécaniques correspondantes (couple et RPM) produites par le moteur. Le rendement du moteur à une différence de pression spécifique est obtenu en divisant la valeur de la

puissance mécanique fournie par le moteur et la valeur de la puissance hydraulique correspondante consommée. Il est donné par la formule suivante:

$$E = \frac{32.64 \times T \times S_r}{q_m \times p_d}$$

La perte de l'étanchéité entre rotor et stator réduit sévèrement le rendement du moteur c'est pourquoi le rendement des PDMs est sérieusement affecté aux températures de puits élevées en raison de l'altération de l'élastomère. Il varie aussi en fonction des caractéristiques de la section motrice ainsi il augmente avec l'augmentation de la longueur d'étage et diminue avec l'augmentation du nombre de lobe. (3)/(7)/(10)

II-2-5 : Utilisation des courbes de caractéristiques :

➤ **Zone A - " zone de fonctionnement nominale " :**

Pour chaque moteur la puissance indiquée et les niveaux de couple produits dans la zone de fonctionnement nominale sont proportionnés pour réaliser l'avancement exigés tout en maintenant le contrôle directionnel.

Maintenir la pression différentielle de fonctionnement et le torque, la vitesse de rotation et les puissances résultant dans cette zone maximisera la fiabilité et la longévité des composants du moteur et réduiront au minimum la tendance du moteur à caler.

Les températures de fond élevées affectent l'ajustement entre l'élastomère du rotor et le stator, ceci a comme conséquence le surchargement de l'élastomère. Pour réduire au minimum les charges sur l'élastomère de stator tout en fonctionnant à des températures élevées, la différence de pression maximale qui peut être appliquée à travers le moteur est réduite. Ceci déplace la ligne " de charge de fonctionnement maximum " vers la gauche sur le graphique.

Zone B - " zone de transition " :

Les différents paramètres de fond agissent sur le moteur, individuellement ou en association, et peuvent produire des conditions défavorables pour le fonctionnement du moteur. Ceci inclue aussi bien les effets de la température de fond et des produits chimiques du fluide de forage, que l'interaction dynamique de l'outil de forage et la formation. Quand les paramètres de fond agissent défavorablement ils peuvent produire une zone de fonctionnement où il y a une tendance pour l'usure accélérée des composants de moteur. Dans cette zone, il y a également une tendance pour le calage. Les opérations dans cette zone peuvent parfois être caractérisées par des difficultés pour maintenir les paramètres de fonctionnement du moteur constants.

Si les conditions de fond sont optimales, la zone de transition n'est pas prise en considération et la zone de fonctionnement nominale (' A ') se prolonge à la charge de fonctionnement maximum indiquée.

➤ **Zone C - " zone de stalle " :**

Cette zone représente l'apparition du calage du moteur. Quand le calage se produit la charge appliquée par l'outil de forage excède le couple et la puissance maximum qui peuvent être

produits par le moteur, les paramètres d'emploi spécifiques étant appliqués à ce moment-là. Le couple résultant monte rapidement et demeure à une valeur maximum tandis que la vitesse de rotation (RPM) décroît rapidement et tend à zéro.

Lorsque le moteur cale la rotation de l'outil est arrêtée et le rotor devient bloqué dans le stator. Pendant le calage de moteur, la différence de pression de fonctionnement à travers le moteur et le couple résultant peuvent monter approximativement à 70% au-dessus du couple de fonctionnement indiqué de maximum.

L'application continue de la rotation de la garniture et le pompage du fluide de forage pendant le calage du moteur mène à certains dommages de rotor/stator et augmente la possibilité des dommages associés à des composants du moteur. (10)

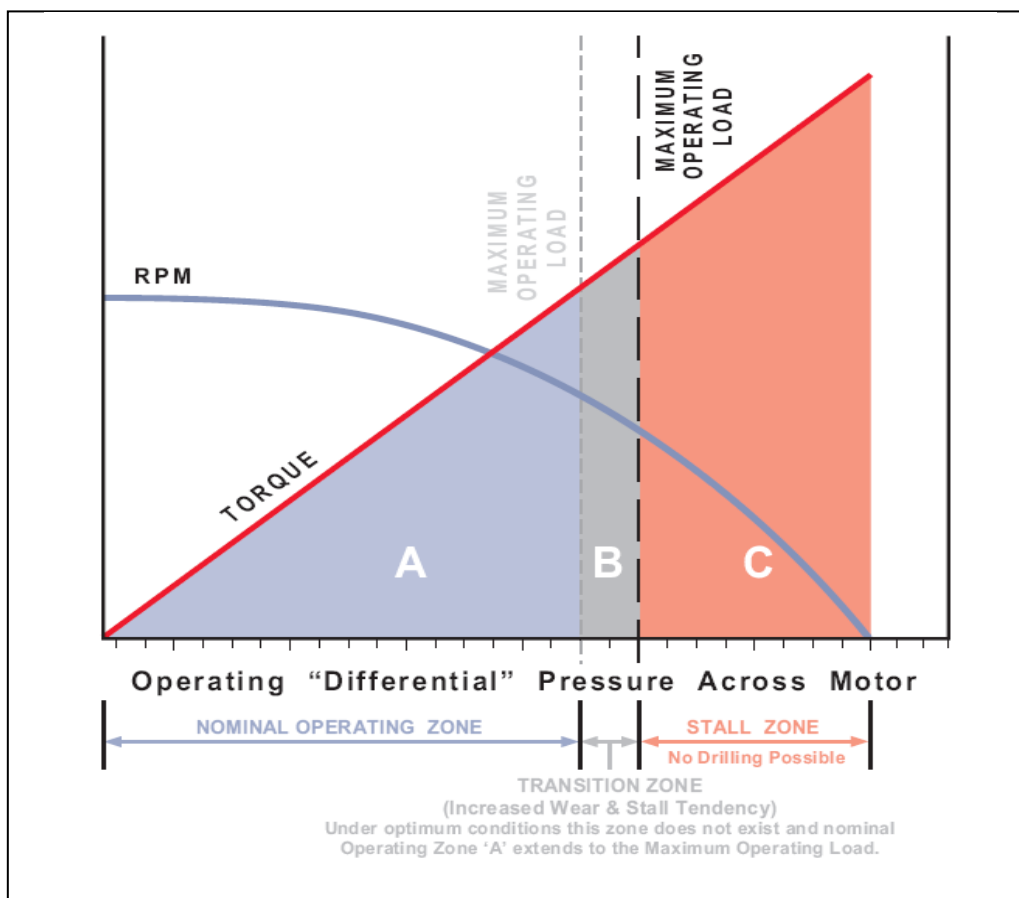


Fig. 41 : Diferentes zones de fonctionnement d'un PDM (10)

II-2-6: Les paramètres d'utilisations:

Les PDMs sont des équipements assez fragiles, particulièrement les stators et sections d'appui. Cela crée donc quelques contraintes opérationnelles. La vie d'un PDM peut diminuer grandement si des précautions ne sont pas observées.

Les paramètres fournis par le fabricant doivent être scrupuleusement observés.

II-2-6-1: Débit, pression différentielle:

Un moteur donné ne marche convenablement que dans un range de débits indiqué par le fabricant. De par son principe basé sur l'étanchéité continue entre rotor et stator, une certaine pression est nécessaire pour vaincre la résistance à la rotation : cette pression qui déclenche la rotation de l'arbre est la pression "sans charge" (no-load pressure), de 150 à 300 psi selon les moteurs.

Quand on circule avec le moteur au-dessus du fond, la perte de charge à travers le PDM est constante. La pression off-bottom est la somme de la 'pression sans charge' et de toutes les autres pertes de charge du système de circulation. Lorsque l'on pose l'outil sur le fond, la résistance à la rotation crée une augmentation de torque et donc de pression au standpipe. Pour un débit et un WOB donnés, on appelle cette pression de surface 'P on-bottom'.

La différence entre pressions on et off bottom est la "pression différentielle" du moteur, proportionnelle au couple pour faire tourner l'outil.

Si on augmente WOB, la résistance à la rotation s'accroît, et il faut une plus grande pression différentielle pour la vaincre. Le poids sur l'outil WOB est directement proportionnel à la pression différentielle du moteur.

En maintenant la pression en surface constante à débit constant, on applique donc un couple et un WOB constant sur l'outil. La progression de l'outil s'accompagne d'une baisse de pression aussitôt compensée par l'opérateur en remettant du poids.

La pression différentielle est de l'ordre de 250 à 850 psi suivant les moteurs, et doit être maintenue entre 50 % et 80 % de la pression différentielle maximum indiquée par le constructeur car au-delà le moteur risque de caler facilement. Généralement la pression différentielle maximale en forage équivaut à la moitié de la pression différentielle de calage.

II-2-6-2: Couple réactif:

La rotation est obtenue par l'action de la boue sur le rotor hélicoïdal. Si l'outil était maintenu dans une position fixe, la boue agirait de la même manière mais cette fois sur le moteur, en le faisant tourner dans le sens opposé. C'est le couple réactif qui est égal au couple à l'outil en forage, dont l'importance dépend du type d'outil et de la formation.

Trop de couple réactif peut rendre le contrôle du tool face difficile et même rendre la poursuite du forage impossible.

II-2-6-3: Calage du moteur sur le fond :

Si on applique un poids trop important sur l'outil ou lors d'un changement de formation, le couple requis à l'outil peut dépasser la capacité de couple de sortie de la section motrice : le moteur cale (stall out), c'est-à-dire que la rotation de l'arbre s'arrête brutalement, résultant en une brusque augmentation de pression au travers du moteur.

La boue essaie de forcer son chemin entre rotor et stator sans toutefois parvenir à faire tourner l'arbre : l'élastomère du stator subit ainsi d'énormes contraintes et peut se retrouver déformé de

façon permanente. Des calages répétés endommagent le moteur (revêtement du stator surtout, et roulements).

Ce phénomène est immédiatement visible en surface, car accompagné d'une forte augmentation de pression (plusieurs 102 psi, selon les moteurs). L'opérateur doit réagir immédiatement, lever la garniture et arrêter les pompes. La reprise du forage se fait en redémarrant la circulation et en abaissant l'outil sur le fond doucement.

Si le moteur cale fréquemment, soit le poids sur l'outil doit être réduit, soit le moteur est usé et a perdu sa puissance :

a) Dusage de l'outil de forage:

La perte de charge à travers l'outil affecte la quantité de fluide circulant à travers les roulements et paliers, et donc leur lubrification. Il faut donc s'assurer préalablement avec l'opérateur de déviation que le dusage optimisé de l'outil tricône / PDC ou le TFA de l'outil diamant prévu dans le programme est compatible avec les recommandations du fabricant.

D'une façon générale il faut $250 \text{ psi} < \Delta P_{\text{OUTIL}} < 2000 \text{ psi}$.

b) Sable, cuttings :

La teneur en sable et en solides de formation (low gravity solids) de la boue doit être réduite au maximum à cause de l'abrasion rapide du stator. Les valeurs maximum admissibles sont 2% de sable et 4% de LGS.

Dans les formations tendres, ou sur les fonds de trou chargés en fills/cuttings ou difficiles à nettoyer, l'outil et le moteur peuvent se boucher. Il faut placer dans ce cas un clapet anti-retour (float valve) entre l'outil et le moteur, et/ou entre le moteur et le MWD.

c) Colmatant, bouchons de ciment:

Les colmatants constituent un danger potentiel évident.

Une partie du flot (5-10%) passe par les roulements/paliers. En réduisant la quantité de fluide, les colmatants réduisent leur lubrification et refroidissement.

Si les colmatants sont trop gros ou mal mixés, le moteur sera complètement bouché.

Seuls les colmatants moyens ou fins peuvent être pompés sans risque de dommage ou de bouchage pour le moteur, à condition qu'ils soient mixés soigneusement. Lors du choix des LCMs, outre la taille, il faut tenir compte de la forme, de la composition chimique et de l'abrasivité.

Les recommandations pour dimension LCM maximale sont:

LCM $\leq 1/4''$ pour moteur 4-3/4'' et plus grand

LCM $< 3/16''$ pour moteur 3-7/8'' et 3-1/8.

Si l'on anticipe le pompage de LCM/ciment ou de circuler à des débits élevés, il est préférable de mettre un circulating sub conventionnel à la place de la dump valve.

d) Rotor catcher (rotor retainer):

Parfois en cours de forage, le rotor et la partie basse du PDM (kick-off sub) se désolidarise de la partie supérieure du moteur. Ce peut être la conséquence d'un violent à-coup de torque (survissage et déboîtement au niveau du KOS) ou d'un mauvais contrôle du retour à gauche en se dégageant du fond (dévissage au niveau du KOS).

Le repêchage du rotor et du kick-off sub est extrêmement délicat car il est très difficile de coiffer le rotor avec un overshot, de par sa forme hélicoïdale et sa surface traitée au chrome.

Pour éviter cette situation critique, il suffit que le sommet du rotor soit muni d'un rotor catcher, sorte de galette située sous le rotor nozzle, qui vient s'asseoir sur l'élastomère du stator en cas de dévissage du KOS : ainsi on remonte en ne laissant rien dans le puits.

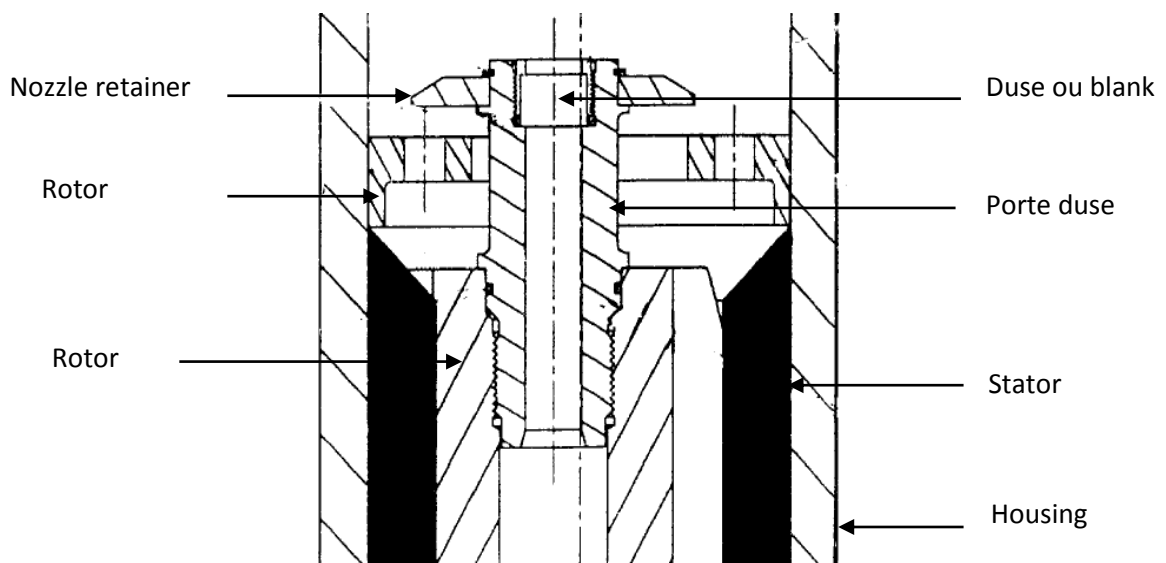


Fig.42: Rotor nozzle et rotor catcher (Anadrill) (7)

e) Température et boues à l'huile:

L'efficacité et la puissance des PDMs reposent entièrement sur l'étanchéité entre le rotor métallique et le stator élastomérique. Or les élastomères (nitriles synthétiques butyle ou acryle) gonflent et durcissent avec la température, altérant ainsi leur capacité à faire étanchéité. Le fonctionnement / rendement des PDMs est donc sérieusement affecté aux températures de puits élevées. Les moteurs standards sont conçus pour travailler jusqu'à $\pm 125^{\circ}\text{C}$, et au-delà il faut des élastomères spéciaux ($\pm 160^{\circ}\text{C}$).

Enfin les élastomères des stators sont \pm sensibles aux boues à l'huile, et en particulier aux composants aromatiques qu'elles contiennent.

Une des mesures de l'agressivité d'une boue à l'huile sur l'élastomère du stator est son point d'aniline. Ce dernier est la température la plus basse à laquelle des volumes égaux d'aniline (un composé aromatique) et d'huile se mélangent complètement. Plus le point d'aniline d'une boue est bas par rapport à la température prévue en circulation, plus la boue attaquera le stator.

Le point d'aniline doit être $> 60^{\circ}\text{C}$, soit une présence de composants aromatique $< 10\%$. Il faut donc considérer la température au fond du puits en circulation, et éviter les boues à base de diesel.

Capitre III : Etude comparative :

Partie I : généralité sur Hassi Messaoud :

III-I-1 : Introduction :

Le gisement de Hassi Messaoud, situé dans le bassin de Oued Mya a été découvert en 1956 et mis en exploitation en 1958, plusieurs années après la mise en production du champ de Hassi Messaoud, on a pu constater que des ensembles de puits se comportent de manière indépendante les uns par rapport aux autres, d'où la définition des zones dont les pressions moyennes évoluent de manières différentes.

III-I-2 : Situation du Champ de Hassi Messaoud :

a) Situation géographique :

Le champ de Hassi Messaoud se situe à 650 km Sud / Sud-est d'Alger et à 350 km de la frontière tunisienne. Sa localisation en coordonnées Lambert Sud Algérie est la suivante:

X = [790.000 - 840.000] Est,

Y = [110.000 - 150.000] Nord,

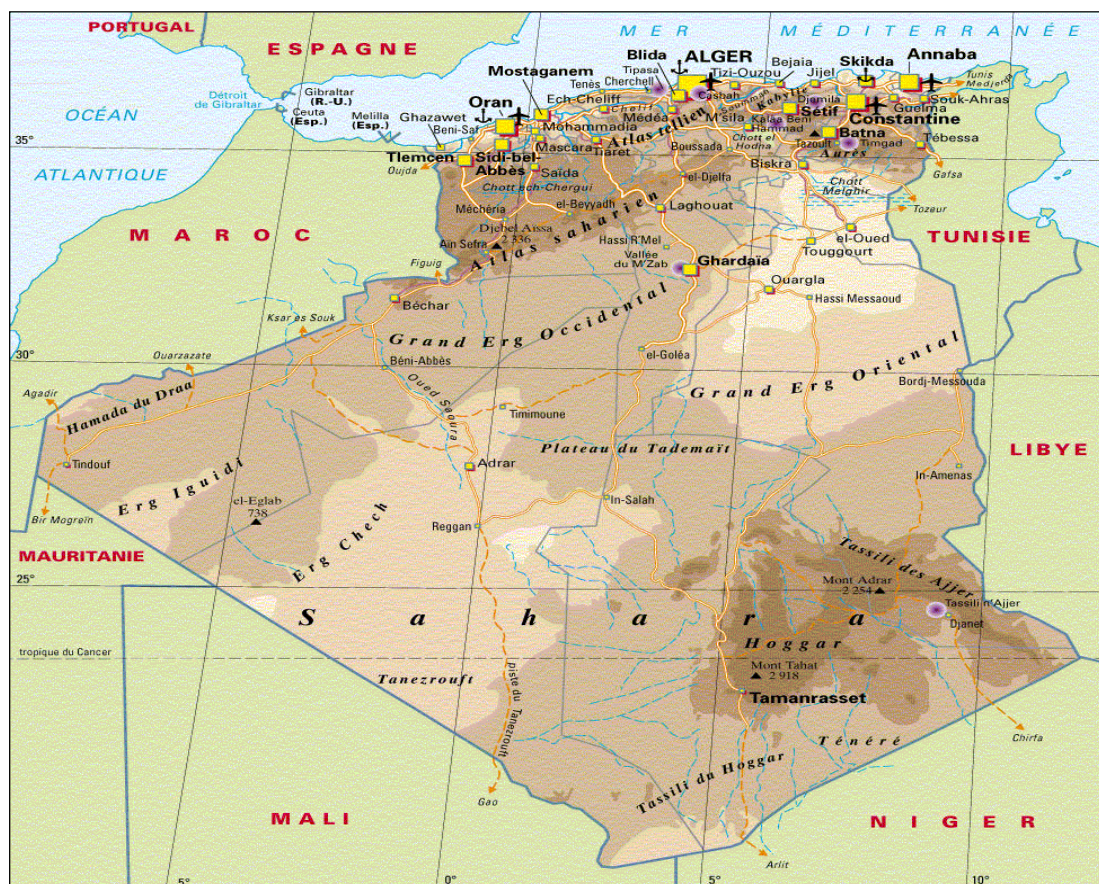


Fig. 43 : Situation géographique du champ de Hassi Messaoud (10)

b) Situation géologique :**Par rapport aux gisements, le champ de Hassi Messaoud est limité:**

- au Nord-Ouest par les gisements d'Ouargla (Guellela, Ben Kahla et Haoud Berkaoui) ;
- au Sud-Ouest par les gisements d'El Gassi, Zotti et El Agreb ;
- au Sud-Est par les gisements Rhourde El Baguel et Mesdar.

Le rôle de Hassi Messaoud est le résultat d'une histoire paléotectonique assez compliquée, c'est le prolongement de la dorsale d'Amguid El Biod de plus de 800km de long. Sa structure fait partie d'un ensemble de structures formant la province triasique Nord orientale.

Géologiquement, il est limité :

- à l'Ouest par la dépression d'Oued Mya ;
- au Sud par le rôle d'Amguid El Biod ;
- au Nord par la structure Djammâa-Touggourt ;
- à l'Est par les hauts-fonds de Dahar, Rhourde El Baguel et la dépression de Ghadames.

III-I-3 : Réservoirs :

Le champ de Hassi Messaoud est composé de quatre réservoirs (R3, R2, Ra, et Ri), dont les dépôts quartzitiques d'âge Cambro-Ordovicien se développent sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur, à une profondeur variant de 3200 à 3500 m.

Le réservoir principal est le Ra, où la formation a été subdivisée verticalement en intervalles avec des propriétés différentes qui sont appelées des drains.

Les drains supérieurs (Ri-D5, D4, D3) sont hautement laminés avec les couches du Limon (épaisseur varie entre 7" et 15 " et l'extension latérale variable de 0 à 1km) lesquels réduisent fortement la perméabilité verticale (l'anisotropie varie de 1 à 100). Ils sont aussi partiellement à totalement érodés dans les parties centrales et nord du champ. Où la porosité est moins de 5%, et la perméabilité horizontale inférieure à 1 mD.

D2, ID, D1 sont les principaux producteurs, la porosité varie de 5% à 12%, et la perméabilité de 0.1 mD à 200 mD.

R2 a des bonnes qualités dans le nord, mais il est près du contact eau-huile dans les autres parties du champ. La porosité est 6%, la perméabilité horizontale 1 mD.

R3 est une nappe aquifère.

Les données pétrophysiques peuvent changer latéralement d'une manière considérable.

Le réservoir est caractérisé par des fissures naturelles qui sont remplies avec des matières différentes telles que les argiles, anhydrite, pyrite, et bitume. Dans quelques cas ils sont ouverts et participent à l'amélioration de taux de récupération.

➤ Caractéristiques du réservoir de Hassi Messaoud :

Le réservoir de HMD se caractérise par son huile légère, sous saturé. Sa composition et ses caractéristiques sont légèrement variables d'une zone à une autre. En général :

- La densité API varie entre 43,7 à 45 °.
- La pression de point de la bulle varie entre 155 kg/cm² (Ouest) à 200 kg/cm² (Est).

- Le GOR: 160 à 230 m³/m³
- Température de réservoir: 240 °F.
- Initial Oil Water Contact: 3380 m.

III-I-4 : Carte des zones et numérotation des puits :

a) Carte des zones de production à HMD :

L'évolution des pressions des puits en fonction de la production a permis de subdiviser le gisement de Hassi Messaoud en 25 zones, dites de production, d'extension variable.

Ces zones sont relativement indépendantes et correspondent à un ensemble de puits communiquant entre eux et non pas avec ceux des zones avoisinantes, et se comportent de la même manière du point de vue pression de gisement. Les puits d'une même zone drainent conjointement une quantité d'huile bien établie. Toutefois, il est important de souligner que le facteur de pression ne peut être le seul critère de caractérisation des zones.

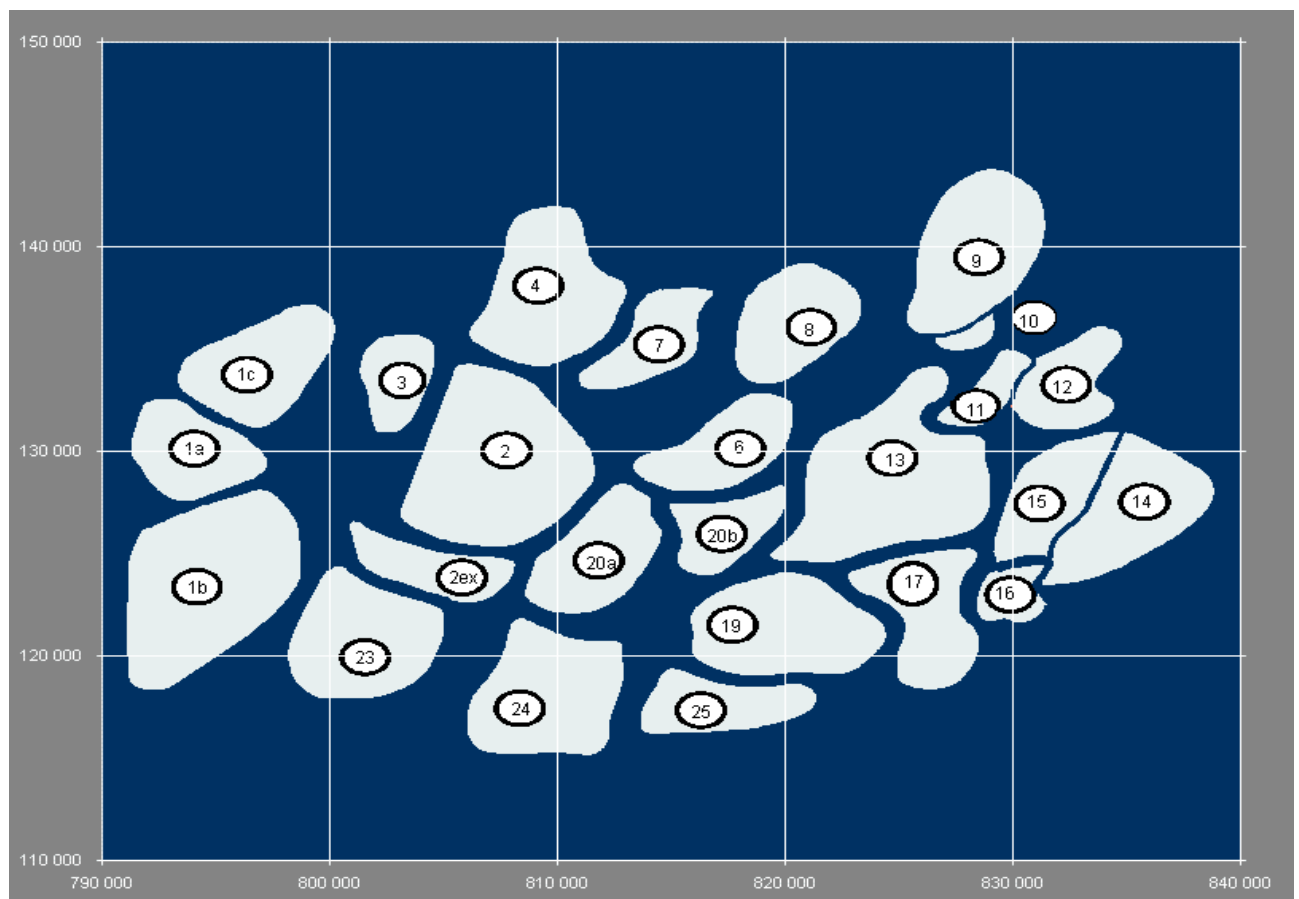


Fig. 44 : Zones de production à Hassi Messaoud.

b) Zones et numérotation des puits :

Il existe deux sortes de numérotation des puits, puisque le champ de Hassi Messaoud reste traditionnellement divisé chronologiquement complétée par une numérotation

géologique basée sur les abscisses et les coordonnées harmonisées avec des coordonnées LAMBERT.

Le champ de Hassi Messaoud est subdivisé en deux secteurs :

- Le secteur Nord : c'est le secteur de OUED MEYA (zone des OM et ON).
- Le secteur Sud : c'est le secteur de MESSAOUD (zone des MD).

Ainsi que le champ de Hassi Messaoud est divisé en zones géologiques comme il est indiqué sur la planche de la figure -3-

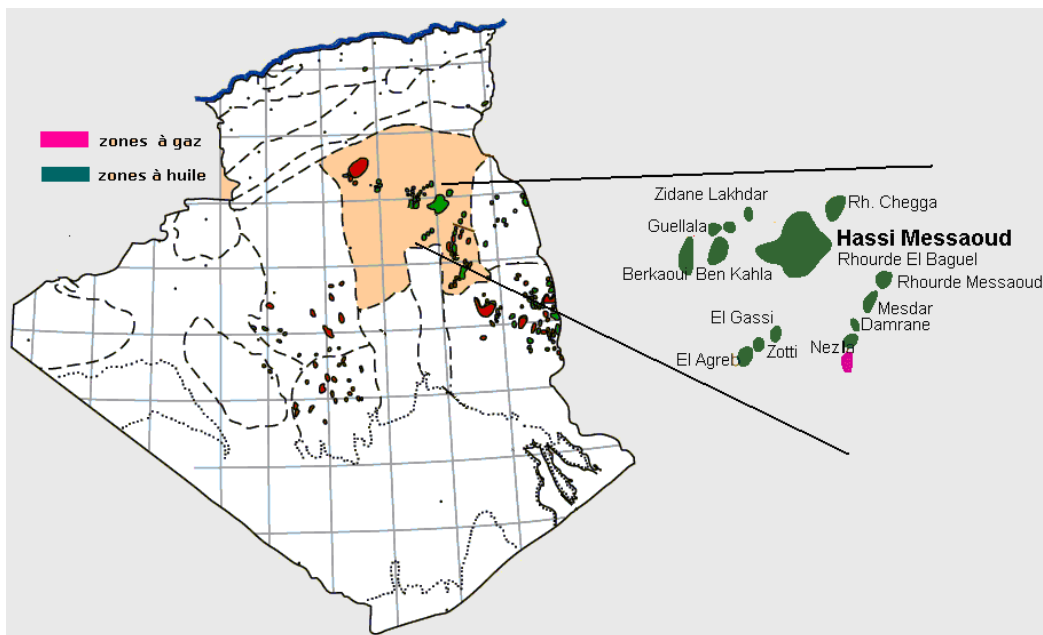


Fig. 45 : Répartition des zones pétrolifères et gazifières. (10)

III-I-5 : Description de la série stratigraphique du champ de Hassi Messaoud

La série stratigraphique du champ de Hassi Messaoud est représentée de haut en bas par les formations suivantes (e = épaisseur moyenne) :

III-I-5 -1 : CÉNOZOÏQUE :

a) MIO-PLIOCÈNE : (e = 240 m)

Présent sur toute la superficie du champ, il est constitué par :

- sable blanc avec fines passées d'argile brune rouge, tendre à pâteuse,
- Calcaire blanc, crayeux, tendre
- passées d'argile versicolore,
- marne gris brun, fortement sableux.

Ces terrains, forment un recouvrement continental essentiellement sableux, se sont mis en place par l'intermédiaire de chenaux (grande disparité de leur granulométrie horizontale

et verticale). Ils sont non consolidés et leur porosité est très importante ce qui entraîne des pertes partielles ou totales et des risques d'éboulement lors du forage. Ils reposent à leur base sur l'Éocène par une surface d'abrasion.

b) ÉOCÈNE (e = 120m)

Constitué de :

- argile brune rouge, fortement sableuse,
- marne et fines passées d'anhydrite blanche,
- calcaire dolomitique crayeux, avec parfois des rognons de silex.

NOTA : Ces deux couches renferment un complexe aquifère à la limite de sa potabilité.

III-I-5 -2 : MÉSOZOÏQUE :

a) CRÉTACÉ :

i- SÉNONIEN : constitué de deux niveaux :

➤ **SENONIEN CARBONATÉ (e = 107m) :**

Il est constitué de calcaires blancs à blanc beige, microcristallins et durs, de dolomies grises à gris clair, parfois cristallines et dures et d'anhydrites blanches, pulvérulentes et parfois massives.

➤ **SENONIEN LAGUNAIRE : niveau représenté par deux unités à faciès lagunaire:**

La première ANHYDRITIQUE, d'une épaisseur moyenne de 219m, est composée d'anhydrite blanche, cristalline, de dolomie moyennement dure, de marne et de calcaire argilo dolomitique.

La deuxième SALIFÈRE, d'une épaisseur moyenne de 140m, est constituée de sel massif blanc transparents à translucides à traces d'anhydrite.

ii- TURONIEN : (e = 90m)

Ce sont des formations carbonatées, constituées de calcaire, craie, dolomie et quelques niveaux argileux.

NOTA : Il contient un aquifère représenté par des eaux à odeur sulfurée, utilisé pour l'injection. Ces eaux sont produites par pompage et utilisées pour le maintien de pression par injection d'eau. Leur salinité est de 210 g/l et leur densité est de 1,13.

iii-CÉNOMANIEN : (e = 145m)

Constitué par des bancs d'anhydrites blanches, transparentes, microcristalline et dures, de marnes argileux gris à gris verdâtre et carbonatées par endroits, de dolomies grises à gris brun, crypto cristallines et dures, puis d'un banc de calcaire blanc, tendre, microcristallin.

iv-ALBIEN : (e = 350m)

Il est représenté par des grés et sables fins avec intercalations d'argile siliceuse.

NOTA : Il renferme un aquifère d'eau douce utilisé pour l'injection et les besoins généraux.

v- APTIEN : (e = 25m)

Représenté par des calcaires blancs à gris blanc, parfois beiges, microcristallins et durs et de dolomies blanches à beiges, cristallines et dures à moyennement dures. Les deux bancs encadrent un niveau argileux.

vi-BARRÉMIEN : (e = 280m)

Représenté par des grès blancs à beiges, parfois gris blanc, fins à moyens, localement grossiers, friables et silico-argileux, de dolomies grises, cristallines et dures et d'argiles versicolores, silteuses, tendres à indurées et légèrement carbonatées.

vii- NÉOCOMIEN : (e = 180m)

Représenté par des argiles grises à grises vertes, localement brunes rouges, silteuses et légèrement dolomitiques et de grès blancs, translucides, friables, très fins à fins, sub-arrondis et silico-argileux.

b) JURASSIQUE :**i- MALM : (e = 225m)**

Constitué d'anhydrites blanches, beiges, pulvérulentes, rarement micro-cristallines et dures, d'argiles rouge-brique à grises, tendres à indurées et silteuses, de calcaires gris-blanc à gris, cristallins et moyennement durs, de dolomies grises à grises blanches, micro-cristallines et dures.

NOTA : Il contient un aquifère d'eau potable de salinité de 30 g/l.

ii- DOGGER

Représenté par deux niveaux :

➤ Argileux: (e = 105m)

Argiles brunes rouges, grises à grises vertes, silteuses et tendres à indurées et de calcaires blancs à gris-blancs, tendres et crayeux.

➤ Lagunaire: (e = 210m)

Anhydrites blanches, pulvérulentes, massives et dures à moyennement dures, de calcaires gris à gris-blanc, argileux et tendres à moyennement durs, d'argiles grises claires à grises foncées, parfois brunes rouges, tendres et indurées, de silts blancs à gris-clair, tendres et de marnes gris-vert à gris, tendres.

iii-LIAS :

D'une épaisseur de 300m, il est représenté par cinq niveaux :

➤ **LD1: (e = 65m)**

argiles grises claires à grises vertes, parfois brunes rouges, tendres, indurées et légèrement carbonatées, de calcaires dolomitiques gris à gris-blanc, argileux, tendres à moyennement durs, de dolomies grises, parfois beiges, tendres à moyennement dures et d'anhydrites blanches, pulvérulentes et cristallines.

➤ **LS1 : (e = 90m)**

sels blancs à rosâtres, transparents à translucides, massifs et durs, d'anhydrites massives, blanches, pulvérulentes, tendres à dures, d'argiles brunes rouges, parfois grises, tendres et légèrement carbonatées et de calcaires dolomitiques gris-beige, microcristallins et tendres.

➤ **LD2 : (e = 55m)**

Argiles brunes rouges, rarement grises, tendres et pâteuses et de dolomies grises, parfois beiges, tendres à moyennement dures.

Nota : ce niveau renferme des eaux chlorurées calciques.

➤ **LS2 : (e = 60m)**

Sels massifs blancs et rosâtres, transparents à translucides et d'argiles brunes rouges, tendres, indurées et légèrement carbonatées.

➤ **LD3 : (e = 30m)**

Argiles grises claires, tendres à indurées et légèrement carbonatées et de calcaires dolomitiques gris à gris-blanc, microcristallins, argileux et durs.

c) **TRIAS :**

Représenté par quatre niveaux :

i- **SALIFÈRE :**

subdivisé en trois horizons

➤ **TS1 : (e = 46m)**

d'une épaisseur de 46m, ce niveau est représenté par des sels massifs, des passées d'anhydrite, et des intercalations d'argile dolomitique.

➤ **TS2 : (e = 189m)**

sels blancs, rosâtres, massifs et transparents, argiles grises à grises foncées ou brunes rouges, silteuses, tendres à indurées et anhydrites blanches à grises beiges, massives et pulvérulentes.

➤ **TS3 : (e = 202m)**

sels blancs à rosâtres, transparents à translucides, massifs et argiles brunes rouges, rarement grises, silteuses, pâteuses et indurées.

Nota : Les horizons TS2 et TS3 sont le siège de manifestations d'argiles fluantes.

ii- ARGILEUX : (e = 113m)

Argiles plus ou moins silteuses, dolomitiques et anhydritiques avec des intercalations de bancs de sel au sommet.

iii-GRÉSEUX : (e = 35m)

grès gris-clair à gris, rarement blancs, très fins à fins, friables et argileux, argiles brunes rouges, rarement grises, silteuses, tendres à indurées et quelques traces de glauconie. Il se subdivise en plusieurs unités qui se différencient par leurs lithologies et leur réponses diagraphiques.

d) ÉRUPTIF : (0 < e < 92m)

andésites blanches, vertes, localement altérées, multicolores et dures, grès gris-blanc, isométriques, siliceux à silico-argileux et parfois quartziques ainsi que des argiles brunes rouges à gris sombre indurées et silteuses.

Nota : Les terrains du Trias argilo-gréseux (TAG) sont le siège de zones à pertes plus ou moins virulentes selon la position où l'on se trouve sur le champ. Le Trias repose en discordance directement sur le Cambrien au centre de la structure et sur l'Ordovicien au niveau des zones périphériques.

III-I-5-3 : PALÉOZOÏQUE :

a) ORDOVICIEN :

Dans sa représentation la plus complète il est constitué de quatre termes :

i- LES QUARTZITES D'HAMRA : (e = 12 à 75m)

quartzites localement grossières, présentant parfois des intercalations argileuses.

ii- LES GRES D'EL ATCHANE : (e = 25m)

grés fin à ciment argileux, bitumineux.

iii-LES ARGILES D'EL GASSI : (e = 50m)

argiles schisteuses, carbonatées, vertes et noires, glauconieuses ou carbonatées présentant une faune (graptolites) indiquant un milieu de dépôts marins. Cette formation est surtout rencontrée sur les zones périphériques du champ.

iv-ZONE DES ALTERNANCES : (e = 20m)

argiles indurées, alternant avec des bancs quartzitiques isométriques et de grés moyens à fins.

Remarques : La série Ordovicienne n'est présente que sur la partie sub-méridionale de la structure, du fait de l'érosion. Au centre de la structure, zone la plus exposée à l'érosion, le Trias repose directement sur le Cambrien.

b) LE CAMBRIEN :

Essentiellement constitué de grés hétérogènes, fins à très grossiers, entrecoupés de passées de siltstones argilo-micacés. On y distingue trois litho-zones R1 (Ri+Ra), R2 et R3.

i- Litho-zone R1 :**➤ Ri : (e = 50m)**

correspond au réservoir isométrique. Il a été recoupé essentiellement à la périphérie du champ, là où la série est complète ; ce sont des grés quartzites isométriques moyens à fins à ciment argileux, avec de nombreuses passées silteuses. Il repose sur le Ra supérieur par une surface d'abrasion.

➤ Ra : (e=100:120m)

Il représente le réservoir principal. Dans sa partie supérieure et moyenne (e= 20 à 60m), il est formé de grés quartzites, anisométriques, moyens à grossiers, à ciment silico-argileux (5 % de kaolinite + illite) localement constitué de quartzites franches. Dans la partie inférieure s'intercalent, de manière irrégulière, des passées centimétriques de siltstones argileux.

ii- Litho-zone R2 : (e = 100m)

Elle est constituée de grés quartzites et quartzites gréseuses, moyens à grossiers, anisométriques, avec parfois des niveaux micro-conglomératiques, à ciment argileux assez abondant (illite). On note des intercalations millimétriques de silt.

iii-Litho-zone R3 :

Il repose sur l' Infracambrien, et parfois directement sur le socle granitique, c'est une série de comblement d'une épaisseur moyenne de 300 m, elle se compose de grés grossiers à micro-conglomérats feldspathique, les grains sont mal classés, le ciment est de nature argileuse avec parfois des zones à grés ferrugineux, et des intercalations d'argiles silteuses. Le "R3" ne présente aucun intérêt pétrolier.

c) L'INFRA-CAMBRIEN : (e = 45m).

Unité lithologique la plus ancienne reconnue au Nord de la structure par le forage OMG 47 à une profondeur de 4092 m. Il est composé de grés argileux de couleur rouge .

III-I-5-4 : LE SOCLE :

Rencontré aux environs de la profondeur de 4000m, il est constitué essentiellement de granite porphyroïde de couleur rose à deux micas . (10)/(11)

ERE	SYST	ETAGES	Ep moy	DESCRIPTION	
CENO-ZOIQUE	NEOGENE	MIO-PLIOCENE <i>discordance alpine</i>	240	Sable, calcaire, marne sableuse	
		EOCENE	120	Sable, calcaire à silex	
MESOZOIQUE	CRETACE	SENONIEN	CARBONATE	107	Calcaire, dolomie, anhydrite
			ANHYDRITIQUE	219	Anhydrite, marne, dolomie
			SALIFERE	140	Sel massif et traces d'anhydrite
		TURONIEN	90	Calcaire crayeux avec quelques niveaux argileux	
		CENOMANIEN	145	Anhydrite, marne, dolomie	
		ALBIEN	350	Grés, sable avec intercalations d'argile silteuse	
		APTIEN	25	Dolomie cristalline avec niveau argileux, calcaire	
		BARREMIEN	280	Argile, grés, dolomie	
		NEOCOMIEN	180	Argile, marne, dolomie, grés	
	JURASSIQUE	MALM		225	Argile, marne, calcaire, grés et traces d'anhydrite
		DOGGER	ARGILEUX	105	Argile silteuse, marne dolomitique avec fines passées de grés
			LAGUNAIRE	210	Anhydrite, marne dolomitique, marne grise
		LIAS	L.D 1	65	Dolomie, anhydrite, argile
			L.S 1	90	Alternances sel, anhydrite et argile
			L.D 2	55	Anhydrite et dolomie cristalline
			L.S 2	60	Alternances sel et argile
			L.D 3	30	Alternances de dolomie et de marne
		TRIAS	SALIFERE	TS 1	46
	TS 2			189	Sel massif à intercalations d'anhydrite et argile gypsifère
	TS 3			202	Sel massif et traces d'argile
	ARGILEUX		113	Argile rouge dolomitique ou silteuse injectée de sel et d'anhydrite	
	GRESEUX		35	Grés, argile	
ERUPTIF <i>discordance hercynienne</i>	0-92		Andésites altérées		
PALEOZOIQUE	ORDOVICIEN		QUARTZITES D'EL HAMRA	75	Quartzites fines avec traces de tigillites
		GRES D'EL ATCHANE	25	Grés fins à ciment argileux, bitumineux	
		ARGILES D'EL GASSI	50	Argiles schisteuses, vertes ou noires, glauconieuses à graptolithes	
		ZONE DES ALTERNANCES	20	Alternance de grés et argile. Présence de tigillites	
	CAMBRIEN	Ri	50	Grés isométriques, fins, silteux	
		Ra	120	Grés à grés quartzitiques anisométriques à niveaux de silts	
		R2	100	Grés moyens à grossiers à ciment argileux illitique	
		R3	300	Grés grossier à ciment argileux, argile silteuse	
	INFRA-CAMBRIEN	45	Grés argileux rouges		
	S O C L E				Granite porphyroïde rose

Fig. 46 : Coupe stratigraphique type de Hassi Messaoud.

III-I-6 : Analyse des problèmes géologiques attendus au champ de HMD:

Plusieurs problèmes rencontrés lors du forage à Hassi Messaoud sont généralement liés à :

- la nature des terrains traversés ;
- le régime de pression ;
- les caractéristiques et types de boues utilisées.

On peut résumer les problèmes en six types courants :

III-I-6-1 : Risques de déviation :

Des risques de déviation peuvent exister dans le Moi Pliocène car cette formation est très friable. Des problèmes de descente du tubage de surface sont souvent rencontrés.

III-I-6-2 : Pertes de boue :

Elles peuvent être totales ou partielles durant les différentes phases de forage. Elles sont localisées dans les sables du Moi Pliocène car se sont terrains non consolidés, perméables et très poreux, dans les calcaires du Turonien et au niveau du Trias Argilo Gréseux (TAG).

III-I-6-3 : Éboulements et cavages :

Des risques d'éboulements et de formation de cavités peuvent apparaître dans les formations calcaires et argileuses du Moi Pliocène et de l'Éocène, dans les sels massifs et solubles dans l'eau du Sénonien Lagunaire.

III-I-6-4 : Sels fluents :

Des coincements de la garniture de forage sont observés dans le Sénonien Lagunaire Salifère (672 – 815 m). Des sels fluents resserrent les parois du trou. Ce type de coincement est rencontré à chaque fin de la phase 16" et ce lors de la remontée de la garniture.

III-I-6-5 : Venues d'eaux chlorurées calciques du LD2 :

Au niveau du LD2, il y'a risque de venue des eaux chlorurées calciques enfermées dans les dolomies du LD2, sous une pression de 560 kgf/cm² (549 bar). Cette zone doit donc être isolée du réservoir d'eau de l'Albien. Les venues d'eau sont fréquentes, ce problème ne peut être résolu qu'avec l'utilisation d'une boue lourde, mais cette boue lourde favorise le craquage de TAG.

III-I-6-6 : Argiles fluentes :

Des argiles fluentes sont rencontrées au niveau du Trias Salifère TS2 (sels massifs avec intercalations d'anhydrites et d'argiles). Le fluage de ces argiles peut causer des problèmes de coincement et affecter le calibrage du puits. Ces argiles sont forées avec une

IV : Comparaisons PDM / turbine :

IV-1 : Caractéristiques de fonctionnement :

<u>PDM</u>	<u>Turbine de déviation</u>
<p>◇ Le couple T est directement proportionnel à la perte de charge ΔP à travers la section motrice. Ceci rend le moteur très simple à opérer.</p> <p>◇ RPM est directement proportionnel au débit Q, encore que le couple de sortie T ait également une influence.</p> <p>◇ La perte de charge ΔP à travers la section motrice est directement proportionnelle au couple T. \nearrow Si $\nearrow T$, ΔP</p>	<p>◇ HPn, Tn, RPMn, et ΔPn sont les caractéristiques nominales de puissance, couple, vitesse, et perte de charge de la turbine pour un débit Q et une densité $d = 1$.</p> <p>◇ Si la densité varie de $d1$ à $d2$: RPM reste constant T, ΔP, Th et HP sont multipliés par $d2/d1$.</p> <p>◇ Le couple T est fonction (débit Q, densité de la boue, angle des aubes, nombre d'étages) et aussi affecté par le poids sur l'outil WOB. T est directement proportionnel au carré du débit Q. $T_2 = T_1 \cdot (Q_2/Q_1)^2$</p> <p>◇ RPM est directement proportionnel au débit Q (à couple T constant). $RPM_2 = RPM_1 \cdot (Q_2/Q_1)$</p> <p>◇ La perte de charge ΔP à travers la section motrice varie comme RPM et inversement avec le couple T. \nearrow Si $\nearrow RPM$, ΔP \nearrow Si $\nearrow T$, ΔP ΔP est directement proportionnel au carré du débit Q. $\Delta P_2 = \Delta P_1 \cdot (Q_2/Q_1)^2$</p> <p>◇ Couple T et RPM sont inversement proportionnels. \nearrow Si $\nearrow RPM$, T La relation entre T et RPM est linéaire.</p>

<p>◇ Puissance hydraulique consommée (hp) $HHP \text{ consommée} = \Delta P \cdot Q / 1714$ $\Delta P \text{ psi, } Q \text{ gpm}$ $HHP \text{ consommée} = \Delta P \cdot Q / 450$ $\Delta P \text{ kg/cm}^2, Q \text{ l/min}$</p> <p>◇ Puissance mécanique créée (hp) $HP \text{ créée} = T \cdot RPM / 5252$ $T \text{ ft.lbs}$</p> <p>◇ Efficacité</p> <p>Efficacité = $\frac{HP \text{ créée}}{HHP \text{ consommée}}$</p>	<p>$T = T_n \cdot (2 - RPM / RPM_n)$</p> <p>◇ La poussée axiale T_h vers le bas est directement proportionnelle au carré du débit Q. $T_h2 = T_h1 \cdot (Q2/Q1)^2$</p> <p>◇ Puissance hydraulique consommée (hp) $HHP \text{ consommée} = \Delta P \cdot Q / 1714$ $\Delta P \text{ psi, } Q \text{ gpm}$ $HHP \text{ consommée} = \Delta P \cdot Q / 450$ $\Delta P \text{ kg/cm}^2, Q \text{ l/min}$</p> <p>◇ Puissance mécanique créée (hp) Directement proportionnelle au cube du débit Q. $HP2 = HP1 \cdot (Q2/Q1)^3$ La relation entre HP et RPM est parabolique. $HP = HP_n \cdot (2 - RPM / RPM_n)^{RPM_n}$</p> <p>◇ Efficacité Fonction des efficacités hydraulique, volumétrique, et mécanique. Efficacité = $\pm 65 \%$</p>
--	---

IV-2 : Pratiques opérationnelles et limitations :

<u>PDM</u>	<u>Turbine de déviation</u>
<p>◇ Faible puissance hydraulique exigée. Perte de charge ΔP à travers la section motrice en forage de l'ordre de 50 à 800 psi.</p> <p>◇ Puissance HP de sortie Si le rotor est muni d'une duse de by-pass, son \varnothing doit être déterminé de façon à permettre à la section motrice de développer la puissance nécessaire, et toute variation du</p>	<p>◇ Forte puissance hydraulique exigée. Perte de charge ΔP à travers la section motrice en forage de l'ordre de 500 à 3000 psi.</p> <p>◇ Puissance HP de sortie élevée 2-3 fois > PDM La puissance optimale correspond \pm moitié du couple de calage et moitié de RPM</p>

<p>débit compromettra la performance du PDM.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◇ RPM modéré (50-400) ◇ Outils de forage Tous les types d'outil utilisables. Accepte des pertes de charge à l'outil élevées (2000 psi). Vie de l'outil prolongée. ◇ Longévité faible à moyenne (80-150 hrs) ◇ Température limitée à 125°C pour un PDM standard, 160°C pour un PDM HT. ◇ Boue à l'huile : point d'aniline > 60°C. ◇ Pression de surface = indicateur de poids WOB et de couple T. Si P constant, ΔP est constant \Rightarrow T et WOB constants. Très pratique pour l'opérateur. ◇ Pression on bottom = P off bottom + 300 à 400 psi WOB est directement proportionnel à la variation de P. ◇ Indication du calage = la pression de surface aussitôt de façon importante. ◇ Charge de poussée vers le bas faible. ◇ L'usure acceptable sur la bearing section est de 1-8 mm selon la taille \varnothing du PDM. 	<p>d'emballement.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◇ RPM très élevé (300-1000) ◇ Outils de forage Tricônes compatibles dans la limite de 450 rpm. Ne peut pas accepter des pertes de charge à l'outil élevées (200 à 450 psi selon \varnothing). ◇ Grande longévité (250-300 hrs) Pas d'élastomère, pas de rotule (joint universel), pas de dump valve. ◇ Pas de limitation de température. ◇ Boue à l'huile : pas de restriction. ◇ Pression de surface = indicateur RPM ◇ Pression on bottom = P off bottom / 1.1 à 1.3 ◇ Indication du calage = la pression de surface aussitôt de quelques 102 psi. Pression en calage = pression en forage x 0.7 à 0.8 Puissance de résistance au calage = 3 fois > PDM. ◇ Charge de poussée vers le bas équilibrée grâce à la balance drum.
--	--

<ul style="list-style-type: none">◇ Pompage LCM possible avec précaution.◇ Teneur en solides la plus faible possible : sable < 2 %. LGS < 4 %◇ Modification des paramètres de sortie du PDM facile en changeant rotor/stator multilobe.◇ Longueur hors tout : 6 à 9 m.◇ Bent housing : angle de 1° à 2.75°. DLS important.◇ Coût de remplacement 'lost in hole' moins cher.	<ul style="list-style-type: none">◇ L'usure acceptable sur la bearing section est de 4 mm.◇ Pompage LCM pas possible.◇ Teneur en solides la plus faible possible : sable < 2 %. LGS < 4 %◇ Modification des paramètres de sortie difficile.◇ Longueur hors tout : ± 12 m.◇ Bent housing : angle de 0.5° à 1.5°. DLS moins grand.◇ Coût de remplacement 'lost in hole' plus cher.
---	---

Conclusion général

A partir des différentes études que l'on a menées, plusieurs réalités ont été mises en évidence. A la fois en ce qui concerne les performances des différents types de moteur de fond, la configuration dans laquelle ils sont utilisés, les défaillances qu'ils peuvent rencontrer, et leurs rentabilités. Ces faits nous ont conduits aux conclusions suivantes :

Pour les turbines le problème le plus significatif est l'usure excessive des outils.

Par contre les PDM sont le plus souvent mis en défaut par leur section motrice ou leur section d'appui. Ici il serait bon de mettre en évidence les bonnes performances des moteur PDM

A partir des différentes études , plusieurs réalités ont été mises en évidence et ont conduits aux conclusions suivantes :

- ❖ Les moteurs PDM ont une durée de vie très faible*
- ❖ La longueur moyenne des run de tous les types de moteur est nettement en dessous de la longueur maximale qu'ils ont pu atteindre.*
- ❖ Pour les turbines les problèmes les plus significatifs sont le faible BUR et l'usure excessive des outils. Par contre les PDM sont le plus souvent mis en défaut par leur section motrice ou leur section d'appui.*

L'analyse économique donne un avantage à la turbine dans le réservoir du Ra.

Résumé

Introduction :

Actuellement les hydrocarbures tiennent une place prépondérante dans la consommation énergétique mondiale. Cependant ; les ressources en énergies fossiles ne sont pas inépuisables. C'est pourquoi les progrès technologiques essayent de repousser les limites des réserves et les taux de récupération.

L'une des technologies au quelles ont aboutis ses progrès est le forage horizontal. Cette technologie a été introduite en Algérie en 1992, et comme partout ailleurs dans le monde elle a connue un très grand succès. Le champ de Hassi Messaoud compte aujourd'hui plus de 470 puits horizontaux dont plus 270 nouveaux puits forés en medim radius. Pour le forage de ces puits on doit utiliser des moteurs de fond.

Ce travail consiste a comparer entre les performances des turbines et des PDM lors du forage de la phase 6" dans le champ de Hassi Messaoud. Et ce pour pouvoir déterminer le type de moteur le plus approprié pour le forage de cette phase.

Définition de forage dirigé :

Le forage dirigé consiste a dévier un puits de la verticale le long d'une trajectoire pré déterminé et ce pour atteindre un point qui peut ce trouvé a des centaines de mètres de la verticale du point de départ en surface.

Applications du forage dirigé :

- Puits d'interception
- Puits latéral (Side-track)
- Emplacements des surfaces impraticables
- Forages dirigés pour raisons géologiques
- Puits d'exploration multiples
- Plates-formes de production à puits multiples
- Forage horizontal

Les moteurs de fond :

Les turbines :

Composition:

- Section motrice : stator Rotor Étage de turbine
- la section d'appui
- Transmission : Coude ajustable et l'arbre de transmission flexible en Titane

summary

Introduction:

Currently hydrocarbons are predominant in the global energy consumption. However; the fossil energy resources are not inexhaustible. That is why technological progress trying to push the boundaries of reserves and recovery rates.

One of the technologies which have Successful progress is horizontal drilling. This technology was introduced in Algeria in 1992, and like everywhere else in the world has known a great success. The field of Hassi Messaoud now has over 470 horizontal wells including over 270 new wells drilled in medium radius. For the drilling of these wells are to be used down hole motors.

This work is to compare the performance between turbines and PDM during the drilling phase 6 "in the Hassi Messaoud field. And in order to determine the most appropriate type of engine for drilling in this phase.

Definition of directional drilling:

Directional drilling is to deflect a vertical wells along a pre- determined path and to reach a point that it can found hundreds of meters vertically above the base surface.

Applications directional drilling:

- Interception Wells
- Lateral wells (Side-track)
- Locations impassable surfaces
- Forages headed for geological reasons
- Multiple exploration wells
- Multi-well production platforms
- Horizontal drilling

Bottom hole motors:

Turbines:

Composition:

- Driving Section: Stator Rotor turbine floor
- The support section
- Transmission: Adjustable elbow and flexible shaft Titanium

Notation et symboles

Chapitre I : Généralité sur le forage dirigé :

La profondeur (MD) : la longueur réellement forée par l'outil.

Le déport du puits ou le déplacement horizontal (HD): c'est la distance horizontale entre la verticale passant par la tête du puits et la verticale passant par la cible.

La cote ou la profondeur verticale (VD) : c'est la distance verticale entre l'horizontale passant par la tête du puits et l'horizontale passant par la cible.

Kick Off Point (KOP) : Le point où commence la déviation

Inclinaison(α) (drift angle): L'angle de déviation par rapport à la verticale

Build Up ou la montée en inclinaison : La montée régulière en inclinaison, la section déviée, où on augmente l'inclinaison

Gradient de Déviation (build up rate) : Croissance de l'inclinaison par unité de longueur, exprimé positivement en [$^{\circ}/10\text{m}$], [$^{\circ}/30\text{m}$] ou [$^{\circ}/100\text{ft}$]

Rayon de courbure (R) : Généralement le gradient de déviation est maintenu constant, la trajectoire décrit un arc de cercle dont le rayon

Avec :

L : la profondeur

α : l'inclinaison

g : le gradient de déviation [$^{\circ}/10\text{ m}$]

R : le rayon de courbure de trajectoire [m]

End Of Build up (EOB) : Le point final de build up, dont la trajectoire reprend la forme d'une droite rectiligne

Start Of Drop : Le point où commence la dégradation d'inclinaison ou le drop off

Drop Off ou la descente : Amorce de décroissance, une décroissance de l'inclinaison jusqu'à une valeur nettement inférieure de l'inclinaison d'entrée

Gradient de chute : Décroissance de l'inclinaison par unité de longueur, exprimé négativement en [$^{\circ}/10\text{m}$], [$^{\circ}/30\text{m}$] ou [$^{\circ}/100\text{ft}$]

End Of Drop : Le point final de Drop off, dont la trajectoire reprend la forme d'une droite rectiligne (hold), ou elle atteint la verticale.

Azimut (A) (azimuth) : La direction du puits par rapport au nord

WOB : Poids sur l'outil

Bibliographie :

- (1): Working guide to DRILLING EQUIPMENT AND OPERATIONS (William Ryons) ;
- (2): PRICISION DRILLING DIRECTIONAL SERVICES, DD module (Sonatrach training course);
- (3): PETROLEUM ENGINEERING AND DEVLOPMENT STUDIES, directional drilling volume 2 (T.A.Inglis);
- (4) : ENMPSP, forage dirigé ingénierie et methode. Edition 3.3_Juin 2005 (Jean_Paul SZEZUKA) ;
- (5): INTRODUCTION TO DIRECTIONAL AND HORIZONTAL DRILLING J.A"Jim" Short;
- (6) : LE FORAGE Jean paul NGUYEN ;
- (7) : Drilling motors DRILEX (Backer) ;
- (8): STANDARD HAND BOOK OF PETRLEUM AND NATURAL GAZ ENGINEERING (William C.Lyons);
- (9) : Court de forage dirigé. Niveau master 02 (Mdz : Hadjadj Souad) ;
- (10) : Mémoire de fin d'étude : Comparaison des performances des turbines et PDM sur la phase 6" À Hassi Messaoud (Cherif Billal – Cherif Souheyla) 2009/2010 ;
- (11) :Mémoire de fin d'étude : Forage de la phase 12^{1/4} en un seul *Run* avec le moteur de fond Geoforce dans la région de Hassi Messaoud (Mahtout Habib – Chelghoum Abdelghani) ;

Chapitre III :

- (12) : Document « SONATRACH», Géologie de Hassi Messaoud HMD ;
- (13) : Document « SONATRACH» Procédures de forage horizontal- SH/DF Janvier 2003 ;
- (14) : Programme de forage « OMJz46 », SONATRACH & HALLIBURTON ;
- (15) : Rapports journaliers de forage du puits « OMJz46 » ;