

N° Série:/2014

Université Kasdi Merbah Ouargla



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

Département de forage et mécanique chantier pétrolier

MEMOIRE

Pour obtenir le Diplôme de Master

Option: Forage

Présenté Par :

BELGHITAR Elhafed

TAMMA Laiche

TIHAMI Mourad

-THEME-

Analyse des phénomènes de vibration sur la garniture de forage en phase 16"

Soutenue le :28 /05/2014 devant la commission d'examen

Jury

Président:	Hadjeb Riyad	M(A)B	Université Kasdi Merbah Ouargla
Examineurs:	Arbaoui Mohammed Ali	M(A)B	Université Kasdi Merbah Ouargla
Rapporteur:	Dada Saada	M(A)B	Université Kasdi Merbah Ouargla

Remerciement

Au premier temps, je tiens à remercier le bon dieu, qui m'a donné la force et le courage pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier mon promoteur Monsieur : DADA Saada pour ses conseils orientation. Je le remercie vivement pour ses remarques et pour le temps qu'il m'a accordé le long de cette période malgré ses occupation

Mes remerciements vont également à Monsieur : Arbaoui Mohamed Ali d'avoir accepté de présider le jury et au Monsieur : Hadjeb Riyade Avoir accepté d'évaluer ce travail

J'adresse aussi mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants de l'université Kasdi Merbah Ouargla qui ont contribué à ma formation

J'aimerais bien exprimer ma plus profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail leur aide fort appréciable a été enrichissante et déterminante lors de toutes les étapes de travail.

Enfin, tous mes remerciements vont à ma famille et à tous mes amis de l'université Kasdi Merbah –Ouargla qui ont m'aider et qui m'ont porté un soutien moral.

- *Belghitarelhafed*
- *Tamma laiche*
- *Tihami mourad*





Dedicace

Je dédie également ce mémoire :

- *A ma mère*
- *A mon père*
- *A mes frères et mes sœurs*
- *A mes amis*

الملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة ظاهرة الاهتزاز لوسائل نقل الحركة من السطح إلى عمق الآبار البترولية، وذلك أثناء عملية الحفر وهذه الظاهرة تسبب في إتلاف أدوات الحفر، والملحقات التابعة لها، وتعتبر هذه الظاهرة من بين المعوقات التي تؤثر في زيادة تكلفة أشغال عملية الحفر. وعلى سبيل المثال لا الحصر اخترنا البئر OMP80 وخاصة مرحلة الحفر 16" وحتى نحيط بالمشكل ونتعرف عليه وعلى أضراره وعواقبه على أدوات الحفر. قمنا بدراسة لهذه الأدوات والتعرف عليها ثم درسنا هذه الظاهرة (الاهتزاز) ونتائجها وصولاً إلى كيفية التقليل منها لتفادي أضرارها قدر الإمكان.

Résumé

Ce travail a pour but d'étudier le phénomène de vibration de la garniture de forage de la surface jusqu'au fond du puits pendant l'opération de forage. Ce phénomène peut provoquer des endommagements des outils et des tiges de forage et leurs accessoires et constitue l'un des obstacles affectant l'augmentation du cout des travaux du forage. Pour mieux comprendre ce problème et connaître les endommagements résultants, on a choisi le cas du puits OMP80 et précisément la phase de forage 16". Après l'étude et l'identification des outils et les éléments de forage subissant ces vibrations, des solutions ont été proposées pour diminuer l'intensité de ce phénomène et son effet sur le déroulement du forage.

Mots-clés : Forage, Vibrations, puits, Outils de forage.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I.: Caractéristiques des éléments des garnitures de forage

I.1. les tiges de forage.....	02
I.2. Les tiges lourdes.....	04
I.3. Les Masses Tiges.....	05
I.4. Limites d'utilisation des tiges de forage.....	06
I.4.1. Résistance à la traction pure	06
I.4.2. Résistance à la torsion pure.....	07
I.4.3. Résistance à l'éclatement.....	09
I.4.4. Résistance à l'écrasement.....	10
I.5. Choix du diamètre des masses-tiges.....	12
I.6. L'outil de Forage	12
I.6.1. Les différents types des outils de forage.....	13
I.6.2. Le corps de l'outil.....	14
I.6.3. Le profil.....	15
I.6.4. Choix des outils	15
I.7. Les stabilisateurs	15
I.7.1. L'amortisseur de vibrations (Shock Absorber).....	17
I.7.1.1. Principe.....	17
I.7.1.2 . Positionnement.....	17
I.8. Contraintes mécaniques sur les trains de tiges en cours de forage.....	18
I.8.1. Poussée d'Archimède	18
I.8.2. Répartition des efforts dans la garniture	18
I.8.3. Point neutre.....	19
I.8.4. Flambage du train de tige.....	19
I.8.4.1. Cas classique du flambage.....	19
I.8.4.2. Cas de la garniture de forage dans un puits.....	20
I.8.5. Stabilisation des assemblages de fond.....	20

I.8.6-Choix de la BHA.....	21
I.8.6.1 Recommandation sur la pratique des BHA.....	21

II : Vibrations des Garnitures de Forage

II.1. Différents types des vibrations et leurs origines	22
II.1.1. Les vibrations axiales.....	22
II.1.2. Les Vibrations Latérales	24
II.1.3. Les vibrations de torsion.....	25
II.2. Notion des vitesses critiques.....	27
II.2.1. Les vibrations latérales	27
II.2.2. Les vibrations axiales	28
II.3. Calcul des paramètres de vibrations.....	28
II.3.1. Fréquences normales de mode axial.....	28
II.4. Conséquences des vibrations.....	28
II.4.1. Endommagement des outils de forage.....	28
II.4.2. Détérioration des éléments de la garniture de forage.....	28
II.4.3. Dégradation de la qualité du trou.....	29
II.5. Mesure des vibrations en cours de forage	29
II.5.1. Les Dimensions de la sonde.....	30
II.5.2. Sondes utilisées pour mesurer les vibrations	30
II.5.2.1. L'outil 'SVSS'	30
II.5.2.2. Gestion des vibrations	32

III : Etude du phénomène de vibration dans la phase 16"

III.1. Conditions de forage	33
III.2. Analyse des effets des différents paramètres.....	34
III.3. Analyse du phénomène vibratoire observé	38
III.3.1. Situation du point neutre.....	38
III.3.2. Calcul des vitesses critiques de rotation de la garniture.....	38
III.3.2.1. Vitesse critique des vibrations latérales.....	38
III.3.2.2. Vitesse de rotation critique des vibrations axiales.....	39

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Classement de grade.....	03
Tableau I.2: Diminution des résistances mécaniques en fonction de perte d'épaisseur.....	04
Tableau I.3: Caractéristiques des masses - tiges recommandées.....	05
Tableau I.4: Valeurs à utiliser dans la formule 13.....	12
Tableau I.5: Valeurs à utiliser dans la formule 14.....	12

Chapitre III

Tableau III.1: Programme de forage Phase16".....	35
Tableau III.2: Programme de boue phase16".....	35
Tableau III.3: BHA utilisée dans la phase 16".....	36
Tableau III.4 : Types de vibrations observées dans chaque formation en phase 16".....	37
Tableau III.5: Vitesse critique de rotation en fonction de la profondeur.....	41

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Classement de grade.....	03
Tableau I.2: Diminution des résistances mécaniques en fonction de perte d'épaisseur.....	04
Tableau I.3: Caractéristiques des masses - tiges recommandées.....	05
Tableau I.4: Valeurs à utiliser dans la formule 13.....	12
Tableau I.5: Valeurs à utiliser dans la formule 14.....	12

Chapitre III

Tableau III.1: Programme de forage Phase 16".....	35
Tableau III.2: Programme de boue phase 16".....	35
Tableau III.3: BHA utilisée dans la phase 16".....	36
Tableau III.4 : Types de vibrations observées dans chaque formation en phase 16".....	37
Tableau III.5: Vitesse critique de rotation en fonction de la profondeur.....	41

Liste des symboles

T:Traction exercée sur la barre, en N.

S:Section de la barre, en m^2 .

σ :Contrainte exercée sur la barre, en Pa.

E:Module d'élasticité longitudinal ou module de Young.

L:Longueur de la barre, en m.

T_{max} :Tension maximale applicable sur la tige, en N.

$\sigma_{e \text{ min}}$:Limite élastique minimale de l'acier utilisé, en Pa.

S:Section minimale de la tige, en m^2 .

τ :Contrainte de torsion, en Pa.

M:Moment du couple de torsion, en N.m .

R:Rayon de la barre, en m.

J:Moment d'inertie polaire de la barre, en m^4 .

R_e: Rayon extérieur de la barre, en m.

R_i: Rayon intérieur de la barre, en m.

M_{max}: Moment du couple de torsion maximal, en N.m.

$\Delta\theta$:Angle de rotation, en rad.

M:Moment du couple de torsion, en N.m.

L:Longueur de tiges soumise au couple M, en m.

G:Module d'élasticité transversal, en Pa.

N:Nombre de tours.

e:Epaisseur nominale du corps de la tige.

D:Diamètre nominal extérieur du corps de la tige.

h: Hauteur du point neutre définie à partir de l'extrémité inférieure de la garniture .

F : Force appliquée sur le fond exprimée en N.

P_m : Poids moyen au mètre dans l'air du tubulaire sous le point neutre en N / m.

f : Masse volumique du fluide contenu dans le puits, en kg / m^3 .

a : Masse volumique de l'acier, en kg / m^3 .

I : moment d'inertie (m^4) .

OD: diamètre extérieur (m) .

ID : diamètre intérieur (m) .

Fcr : Charge critique en N.

De : Diamètre extérieur en m.

Di : Diamètre intérieur en m.

Ff1sin : Force appliquer pour produire un flambage sinusoïdal en N.

Ff1hel : Force appliquer produire un flambage hélicoïdal en N.

P : Poids linéaire dans l'air de l'élément de garniture en N/m.

WOB : Poids sur l'outil en kdaN.

RPM: vitesse de rotation de l'outil en(tr /min).

ROP: vitesse d'avancement (m/h).

Q : le débit.

V : la vitesse.

Tv: Temps de vibrations.

N: point neutr.

PDC: poids de masse tige.

LDC: longueur de masse tige.

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

Le but des entreprises pétroliers est minimiser le coût de la réalisation d'un puits par le forage avec une bonne qualité et en toute sécurité, elles ont orienté les efforts vers cet objectifs, pour cela il faut remédier aux différents problèmes rencontrés durant l'opération de forage. Donc il faut améliorer les méthodes de forage et introduire des nouvelles technologies.

Parmi les obstacles qui diminuent l'efficacité et la rentabilité c'est phénomène des vibrations des garnitures en cours de forage qui devient l'objectif de plusieurs études et des essais, pour ciblé la minimisation de l'intensité de cet phénomène. Pour cela on va orienter notre étude vers l'observation et conclure de phénomène de vibrations.

Parmi les contraintes qui limitent les performances on peut noter le phénomène de vibrations des garnitures en cours de forage, domaine auquel va s'intéresser cette étude. Ce phénomène est assez fréquent et peut affecter considérablement les coûts de réalisation.

Les vibrations en cours de forage doivent faire l'objet d'un intérêt particulier. Elles sont l'une des principales causes affectant les performances de forage en induisant des endommagements aux équipements, elles peuvent mener parfois à des opérations d'instrumentations coûteuses et occasionner, à la limite, la perte du puits.

Cette étude va s'intéresser au phénomène de vibrations enregistrées lors de la phase 16" à Hassi Messaoud (Puits OMP80), en s'appuyant sur les observations effectuées lors du forage, elle va tenter d'analyser le phénomène vibratoire constaté et ses effets sur la garniture de forage.

CHAPITRE:I

Caractéristiques des éléments de garniture de forage et la limite d'utilisation

I . caractéristiques des éléments des garnitures de forage

La garniture de forage (train de sonde) est un ensemble des organes mécaniques qui joue un rôle de liaison entre l'outil de forage et l'équipement de surface, ses fonctions principales sont :

- Transmettre le mouvement de rotation et l'énergie nécessaire à l'outil de forage pour la destruction de la roche.
- La réalisation, le contrôle et le guidage de la trajectoire de l'outil de forage.
- Fournir du poids sur l'outil
- Elle constituant un moyen de circulation du fluide de forage à partir de la surface jusqu'à l'outil tout en minimisant les pertes de charge. Elle est composée de :
 - * La tige d'entraînement(Kelly)
 - * Des tiges de forage (Drill pipe)
 - * Des tiges lourdes (Heavy weight drill pipe)
 - * Des masses tiges (Drill collar)
 - * Des raccords de filetage (Sub ou Cross Over)
 - * Des stabilisateurs incorporés entre les masses tige.
 - * Des équipements permettent de fermer l'intérieur de la garniture en cas de venue(en cours de manœuvre)

I.1. Les tiges de forage : ont pour fonction la transmission du mouvement de rotation à partir de la table jusqu'à l'outil et permet aussi la canalisation du fluide de forage jusqu'à ce dernier. Les tiges de forage travaillent en tension afin d'éviter les problèmes liés à leur frottement contre les parois

- **Caractéristiques des tiges de forage :**
 - * **Diamètre nominal :** C'est le diamètre extérieur du corps de la tige exprimé en pouces.
 - * **Le grade :** détermine le nuance de l'acier et exprime la résistance de la tige à la traction et la torsion. Les grades normalisées sont : D55- E75 - X95 - G105 - S135

Tableau 01 : Classement de grade

Grade	Limite élastique				Charge de rupture	
	Minimale		Maximale		Minimale	
	Psi	(Mpa)	Psi	(Mpa)	Psi	(Mpa)
E-75	75000	(517)	105000	(724)	100000	(690)
X-95	95000	(655)	125000	(862)	105000	(724)
G-105	105000	(724)	135000	(931)	115000	(793)
S-135	135000	(931)	165000	(1138)	145000	(1000)

* **La gamme** : Exprime la longueur des tiges

Gamme1 :5.50 à 6.70m (18'' à 22'')

Gamme2 :8 .25 à 9.15m (27'' à 30''

Gamme 3 :11.60 à 13.70m (38''à 45'')

* **Le poids nominal** : Exprimé en livres par pied .Il indique le poids du corps de la tige

* **Fabrication** : Elles sont fabriquées à partir des tubes d'acier au carbone étires sans soudure avec des extrémités refoulées.

A l'intérieur (internal upset ou IU)

A l'exterieur (external upset ou Eu)

Des extrémités mixtes (internal – external upset ou IEU)



Figure 01: Caractéristiques des tiges de forage

Des joints sont raccordés à ces extrémités soit par vissage, soit par soudage.

- **La classification d'une tige** : Elle définit son degré d'usure lors de son utilisation qui entraîne la diminution de sa section causant ainsi la dégradation de ses caractéristiques mécaniques. Les classes de tiges sont définies par l'API comme suit :

Classe 1.....Une bande blanche

PremiumDeux bandes blanches

Classe 2.....Une bande jaune

Classe 3.....Une bande orange

RebutUne bande rouge

Les sociétés pétrolières contrôlent ses garnitures après usage et doivent se conformer aux normes API de la classe d'usure de ses tiges.

Tableau 02: Diminution des résistances mécaniques en fonction de perte d'épaisseur

		Classe I	premium	classeII
Resistance en tension (10 ³ dan)	3 1/2 – 13.30 Grade E	120.8	94.4	81.6
	5 – 19.50 Grade E	176	138.6	120.3
Resistance en torsion (dan.M)	3 1/2 – 13.30 Grade E	2 520	1 950	1 680
	5 – 19.50 Grade E	5 580	4 380	3 790
Pression d'éclatement (Mpa)	3 1/2 – 13.30 Grade E	95.1	87	76.1
	5 – 19.50 Grade E	65.5	59.9	52.4

• Les Tools joints

Les Tools joints qui permettent le vissage des tiges l'une à l'autre sont rapportés par soudure aux extrémités du tube. La soudure est réalisée par friction.

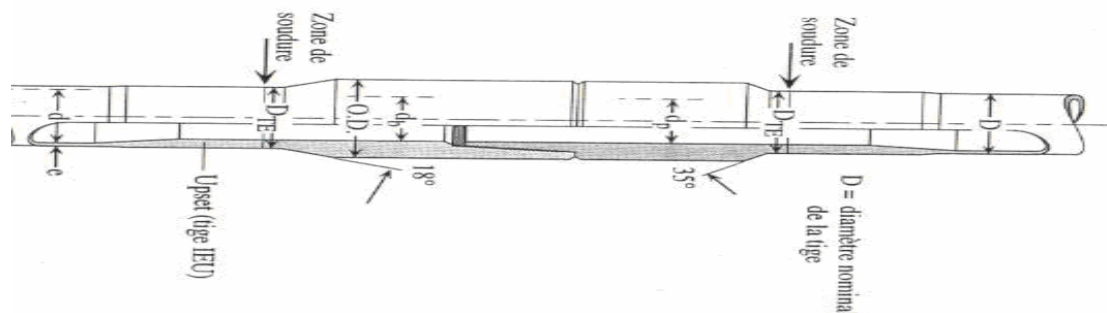


Figure02. Détail d'une tige (corps et tool joints)

Les tool joints actuellement utilisés sont rapportés et soudés par friction sur les renflements (upsets) du corps de la tige. L'API demande, quel que soit le grade du tube utilisé (E, X, G ou S), les propriétés physiques suivantes pour l'acier constituant les tool joints :

- Limite élastique : 120 000 psi (827 MPa),
- Limite minimale de rupture : 140 000 psi (965 MPa).

L'épaulement à 18 degrés du tool joint femelle utilisé pour la manutention de la garniture avec l'élévateur a remplacé l'épaulement à 90 degrés (square shoulder) utilisé autrefois. Ce profil permet en particulier de descendre une garniture en stripping à travers un BOP annulaire sans endommager la garniture en caoutchouc.

I.2. Les tiges lourdes (Heavy weight drill pipe) : sont plus flexibles que les masses tiges moins que les tiges normales. Dans les forages verticaux on utilise les tiges lourdes pour créer un gradient de rigidité intermédiaire entre celle des masses tiges et des tiges. Puisque on a affaire dans ce cas à une variation de section causant l'apparition des contraintes élevées.

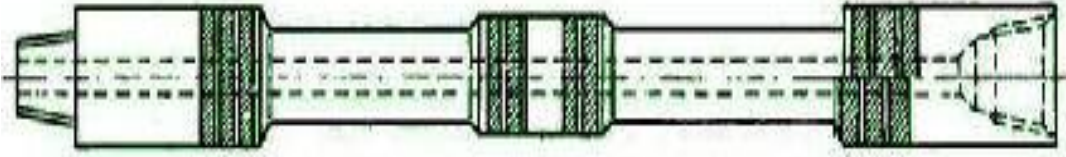


Figure03: Tige lourde

I.3. Masse –tiges : Les masse –tiges fournissent les efforts application de l'outil de forage (poids sur l'outil) et permettent aux tiges de forage de ne pas travailler en compression, le poids utilisé par les masse – tiges ne devra pas dépasser 80% de leur poids propre dans la boue, elles sont plus rigides que les tiges lourdes. Elles sont caractérisées par :

- * Diamètre extérieur et intérieur, ce dernier est normalisé par API en fonction de diamètre extérieur.
- * Pertes de charge les plus réduites possible
- * Facilite de transport
- * Résistance en flambage
- * Rigidité

Tableau 03: Caractéristiques des masses - tiges recommandées

Diamètre extérieur Nominal (Pouce)	Diamètre intérieur (Pouce)	Longueur (pieds)	Diamètre de forage (pouce)
9 ½	3	30	de 24 à 12 ¼
7 ¾ à 8	2 13/16	30	9 7/8
6 ¾	2 13/16 ou éventuellement 2 ¼	30	de 8 ¾ à 8 ½
4 ¾	2 ¼	30	de 6 ¾ à 6

Différents types de masses-tiges:

- **Masses tiges classiques**

- * **Masse tiges lisses** : elles sont lisses sur toute leur longueur. L'utilisation du collier de sécurité pour leur manœuvre dans le puits est obligatoire.
- * **Masse tiges à rétreints** : deux rétreints sont usinés dans la partie supérieure pour permettre l'utilisation de la cale et l'élévateur sans collier de sécurité.

- **Masses tiges à rétreints** Les masse-tiges articulées ne sont utilisées que pour le forage des puits à court rayon. Elles sont composées d'éléments courts reliés par des joints flexibles et incorporent un tube interne en caoutchouc pour permettre le passage du fluide de forage.

- **Masses tiges à extrémités soudées**

- **Masses tiges à partie centrale surdimensionnée**

Utilisées dans les grosses dimensions, elles assurent un meilleur guidage et une meilleure rigidité d'où moins de tendance à dévier. La partie supérieure est réduite pour permettre le repêchage par l'extérieur avec un overshot standard et l'utilisation de filetages courants, donc de couples de serrage acceptables. On peut utiliser trois masse tiges de ce type si la différence entre partie centrale et extrémité réduite est grande et entre six et neuf si la différence est moins importante

- **Masses tiges carrées**

Ayant une rigidité importante et un très bon guidage dans le trou (jeu 1/32" seulement), elles sont utilisées pour supprimer les dog legs et diminuer la déviation. Les angles sont rechargés par un composite carbure-diamant pour éviter leur usure dans les terrains abrasifs. Cette masse-tige doit être placée au-dessus d'un aléreur, placé lui même directement sur l'outil. La présence de cet aléreur est indispensable car, étant donné le faible jeu de la masse-tige carrée dans le trou, il y aurait coincement en cas de perte de diamètre de l'outil. Cet aléreur devra être du type à rouleaux droits (non inclinés), possédant des picots en carbure de tungstène pour obtenir un parfait calibrage du trou.

- **Masses tiges spirales** Elles réduisent le risque de coincement par pression différentielle en diminuant la surface de contact masse-tige/trou. Leur masse est d'environ 4% inférieure à celle des masse-tiges classiques. Elles existent en deux profils :

- * **Profil SHELL (Sine drill collars)** : la section est un triangle curviligne dont les sommets sont tronqués par le cercle du diamètre extérieur.

* **Profil FOX (No Wall Stick drill collars)** : comporte 3 plats pour les diamètres jusqu'à 6" 7/8 et 9 plats groupés 3 par 3 pour les diamètres supérieurs. Ce profil est utilisé dans le monde entier.

- **Masses tiges amagnétiques**

Elles sont utilisées lorsqu'on veut faire des mesures de déviation avec une référence par rapport au nord magnétique.

Ces masse-tiges sont de forme cylindriques. On n'en utilise qu'une seule, placée directement au-dessus de l'outil et centrée par un stabilisateur à sa partie supérieure.

II.4. Limites d'utilisation des tiges de forage. Formules de calcul

II.4.1. Résistance à la traction pure

Lorsque l'on exerce une traction **T** sur une barre de section **S** la contrainte de traction σ produite à l'intérieur de la barre est :

$$\sigma = \frac{T}{S} \quad (01)$$

T : Traction exercée sur la barre, en **N**.

S : Section de la barre, en **m²**.

σ : Contrainte exercée sur la barre, en **Pa**.

L'allongement ΔL produit par cette traction **T** sur la barre de longueur **L** est :

$$\Delta L = L \cdot \frac{\sigma}{E} \quad (02)$$

E : Module d'élasticité longitudinal ou module de **Young**

L : Longueur de la barre, en **m**.

Si l'on ne veut pas déformer une tige de grade donné, la contrainte maximale de traction que l'on peut appliquer sera égale à la limite élastique minimale de l'acier correspondant.

La traction maximale applicable sur une tige est donnée par la formule suivante :

$$\boxed{T_{\max} = \sigma_{e \min} \cdot S} \quad (03)$$

T_{max} : Tension maximale applicable sur la tige, en **N**.

$\sigma_{e \min}$: Limite élastique minimale de l'acier utilisé, en **Pa**.

S : Section minimale de la tige, en **m²**.

Le formulaire du foreur donne les valeurs de T_{\max} en fonction du grade d'acier, des dimensions nominales des tiges, du poids nominal et de l'usure (classe) des tiges.

Puisque la valeur de la limite élastique choisie par l'API produit un allongement permanent de l'ordre de 0.5 %, l'utilisation des tiges à la valeur T_{\max} risque d'entraîner une déformation irréversible. On limitera généralement la traction à 90 % de cette valeur (ce qui revient à travailler avec un coefficient de sécurité de l'ordre de 1.10). On limitera généralement la traction à 80 % de cette valeur dans les puits déviés.

Le corps de la tige limite la traction que l'on peut appliquer sur cette tige.

I.4.2. Résistance à la torsion pure

Lorsque l'on exerce un couple de torsion \mathbf{M} (en fait, \mathbf{M} est le moment du couple de torsion) sur une barre métallique de rayon \mathbf{R} , la contrainte de torsion τ exercée sur cette barre est :

$$\tau = \frac{\mathbf{M}}{\left(\frac{\mathbf{J}}{\mathbf{R}}\right)} \quad (04)$$

τ : Contrainte de torsion, en **Pa**.

\mathbf{M} : Moment du couple de torsion, en **N.m**. (avec $\mathbf{M} = 2 \text{ F.R.}$)

\mathbf{R} : Rayon de la barre, en **m**.

\mathbf{J} : Moment d'inertie polaire de la barre, en **m⁴**.

Pour une barre creuse comme les tiges de forage, le moment d'inertie polaire est :

$$\mathbf{J} = \frac{\pi}{2} (\mathbf{R}_e^4 - \mathbf{R}_i^4) \quad (05)$$

\mathbf{R}_e : Rayon extérieur de la barre, en **m**.

\mathbf{R}_i : Rayon intérieur de la barre, en **m**.

La contrainte de torsion est maximale sur la surface extérieure de la barre. C'est cette valeur que l'on considère dans le cas des tiges de forage, d'où :

$$\tau_{\max} = \frac{\mathbf{M}}{\left(\frac{\mathbf{J}}{\mathbf{R}_e}\right)} \quad (06)$$

$$\frac{J}{R_e} = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{R_e^4 - R_i^4}{R_e} \right) \text{ S'appelle module polaire de section transversale.}$$

La contrainte de torsion maximale est toujours inférieure à la limite élastique. Les différentes théories expliquant le cisaillement conduisent à des valeurs du rapport $\frac{\sigma_{e \min}}{\tau_{\max}}$ comprises entre 1.33 et 2. L'API a choisi $\sqrt{3}$ comme valeur.

Avec cette valeur, le couple de torsion maximum applicable sur une tige est :

$$\boxed{M_{\max} = 0.577 \cdot \sigma_{e \min} \cdot \left(\frac{J}{R_e} \right)} \quad (07)$$

$\sigma_{e \min}$: Limite élastique minimale de l'acier utilisé, en **Pa**.

M_{\max} : Moment du couple de torsion maximal, en **N.m**.

La valeur du couple de torsion maximal que l'on peut appliquer sur le corps d'une tige est donné dans le formulaire du foreur en fonction du grade et de la classe d'usure .

Remarque :

Nous avons mentionné que la valeur de $\sigma_{e \min}$ utilisée par l'API entraîne une déformation permanente de l'ordre de 0.5 %. On peut penser que la valeur du couple de torsion maximal définie par la relation (7) produit une déformation de la tige. Donc, il est préférable de limiter le moment du couple de torsion à 90 % de cette valeur.

Mais nous avons vu que le couple maximum que l'on peut appliquer sur une tige est le couple de serrage de la connexion qui est bien inférieur à la valeur du couple admissible sur le corps de la tige. Donc en général le corps des tiges travaille loin du couple de torsion maximum admissible.

La valeur de la déformation angulaire en fonction du couple **M** appliqué sur une longueur **L** de tiges est donnée par la relation :

$$\Delta\theta = \frac{L \cdot M}{G \cdot J} \quad (08)$$

$\Delta\theta$: Angle de rotation, en **radians**.

M : Moment du couple de torsion, en **N.m**.

L : Longueur de tiges soumise au couple **M** en **m**.

G : Module d'élasticité transversal, en **Pa**.

J : Moment d'inertie polaire de la tige, en **m⁴**.

Si l'on exprime la déformation angulaire en nombre de tours, la relation précédente s'écrit :

$$N = \frac{L \cdot M}{\pi^2 \cdot G \cdot \left(R_e^4 - R_i^4 \right)} \quad (09)$$

N : Nombre de tours.

La résistance du train de tiges à la torsion devient critique en cours de forage de puits profonds, d'alésage du trou et quand la garniture est coincée.

I.4.3. Résistance à l'éclatement

L'API utilise la formule de **Barlow** qui donne la pression intérieure maximale **P_{i max}** pour que la contrainte interne à la paroi du tube ne dépasse pas la limite élastique **$\sigma_{e min}$** . Pour les tiges de classe I la formule est :

$$P_{i \max} = 0.875 \cdot \left(\frac{2 \cdot \sigma_{e \min} \cdot e}{D} \right) \quad (10)$$

e : Épaisseur nominale du corps de la tige (voir Formulaire du foreur - caractéristiques géométriques des tiges de forage). Le facteur 0.875 provient d'une tolérance à la fabrication de 12.5 % sur l'épaisseur des tiges neuves.

D : Diamètre nominal extérieur du corps de la tige.

$\sigma_{e min}$: Limite élastique minimale de l'acier utilisé, en **Pa**.

Pour les autres classes, la formule est :

$$P_{i \max} = 2 \cdot \frac{\sigma_{e \min} \cdot e}{D} \quad (11)$$

e sera diminué de 20 % pour les tiges de classe S, de 30 % pour celles de classe II.

Dans les deux formules précédentes, D et e sont exprimés en m , $P_{i \max}$ et $\sigma_{e \min}$ en Pa .

Il est recommandé de limiter la pression appliquée (ou différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur) à l'extérieur de la tige à 90 % de la pression maximum admissible

$P_{i \max}$.

Le corps de la tige limite la pression d'éclatement que l'on peut appliquer sur cette tige.

Remarque :

Lorsqu'une tige est soumise à des pressions intérieure et extérieure, c'est la différence de pression existant entre l'intérieur et l'extérieur qu'il faut prendre en considération.

I.4.4.Résistance à l'écrasement

Plusieurs formules permettant de déterminer la valeur maximale de la pression extérieure que l'on peut exercer sur le corps d'un tube sont utilisées par l'API. La valeur du rapport D / e (e étant l'épaisseur nominale du corps de la tige et D le diamètre nominal du corps de ce tube) indique quelle formule doit être employée.

- La première formule est :

$$P_{e \max} = 2 \cdot \sigma_{e \min} \cdot \left(\frac{(D / e) - 1}{(D / e)^2} \right) \quad (12)$$

Cette formule s'applique lorsque le rapport D / e est :

- inférieur ou égal à 13.67 pour les tiges de grade E.
- inférieur ou égal à 12.83 pour les tiges de grade X 95.
- inférieur ou égal à 12.56 pour les tiges de grade G 105.
- inférieur ou égal à 11.90 pour les tiges de grade S 135.

- La seconde formule est :

$$P_{e \max} = \sigma_{e \min} \cdot \left(\frac{A'}{(D / e)} - B' \right) - C \quad (13)$$

Les valeurs de A' , B' , C et du rapport D / e sont données dans le tableau suivant.

Tableau 04: valeurs à utiliser dans la formule 13

Grade	A'	B'	C	D / e
E	3.060	0.0642	1 805	de 13.67 à 23.09
X 95	3.125	0.0745	2 405	de 12.83 à 21.21
G 105	3.162	0.0795	2 700	de 12.56 à 20.66
S 135	3.280	0.0945	3 600	de 11.90 à 19.14

- La troisième formule est :

$$P_{e \max} = \sigma_{e \min} \cdot \left(\frac{A}{(D / e)} - B \right) \quad (14)$$

Les valeurs de A, B et D / e sont données dans le tableau suivant.

Tableau 05: Valeurs à utiliser dans la formule 14

Grade	A	B	D / e
E	1.985	0.0417	de 23.09 à 32.05
X 95	2.047	0.490	de 21.21 à 28.25
G 105	2.052	0.0515	de 20.66 à 26.88
S 135	2.129	0.0613	de 19.14 à 23.42

- La dernière formule utilisée est :

$$P_{e \max} = \frac{46.95 \cdot 10^6}{(D / e) \cdot [(D / e) - 1]} \quad (15)$$

Cette formule s'applique lorsque le rapport **D / e** est :

- supérieur ou égal à 32.05 pour les tiges de grade E.
- supérieur ou égal à 28.25 pour les tiges de grade X 95.
- supérieur ou égal à 26.88 pour les tiges de grade G 105.
- supérieur ou égal à 23.42 pour les tiges de grade S 135.

Remarque :

Dans les 4 formules précédentes, $P_e \max$ et $\sigma_e \min$ sont exprimées en **psi**, **D** est en **pouces**. La pression d'écrasement pour les tiges déjà utilisées (diamètre et épaisseur inférieurs aux valeurs nominales) est calculée en ajustant le diamètre extérieur nominal **D** et l'épaisseur nominale **e** comme si l'usure était uniforme sur l'extérieur et nulle sur le diamètre intérieur. Les valeurs pour chaque classe de tige sont données ci-après. Ces valeurs permettront de choisir l'une des 4 formules précédentes et de calculer la valeur de la pression extérieure maximale.

- Pour les tiges de classe Premium (S), sera pris égal à 80 % de l'épaisseur nominale,
- Pour les tiges de classe II, **e** sera pris égal à 70 % de l'épaisseur nominale.

Remarque :

Comme dans le cas de l'éclatement, c'est la différence de pression existant entre l'extérieur et l'intérieur de la tige qu'il faut prendre en considération.

I.5.Choix du diamètre des masses-tiges

Les masses-tiges travaillent en compression. Pour limiter le flambage, la fatigue et les ruptures de la garniture, on est amené à choisir les masses-tiges les plus rigides possibles et en nombre limité pour réduire les problèmes liés aux connexions (les ennuis importants commencent lorsque l'on utilise plus de 12 masses-tiges)(figure 04).

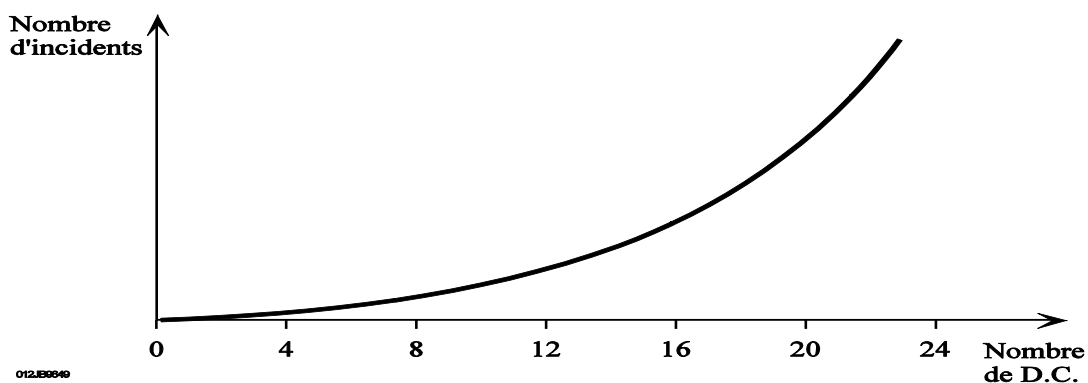


Figure 04 :Nombre d'incidents en fonction du nombre de masses-tiges

- **Diamètre extérieur**

Le principe général est d'utiliser les masses-tiges avec le diamètre extérieur le plus gros possible pour obtenir la rigidité et le poids linéaire maximums. Le diamètre extérieur maximum est choisi en fonction de :

- * diamètre du trou à forer et du diamètre du tubage à descendre,

- * possibilité de repêcher le poisson avec un overshot,
- * possibilité de surforer,
- * vitesse de remontée du fluide de forage dans l'annulaire,
- * risques de coincement par pression différentielle.

- **Diamètre intérieur**

Le plus petit diamètre intérieur sera recherché pour obtenir la masse-tige la plus lourde possible et le maximum de rigidité et de résistance des filetages mâles, mais il faut tenir compte :

- le diamètre des outils à descendre à l'intérieur de la garniture,
- des pertes de charge à l'intérieur de la garniture qui doivent rester le plus faible possible.

I.6.L'outil de Forage :

L'outil de forage est la pièce la moins volumineuse mais la plus importante pour réaliser un puits de forage. C'est le premier élément à s'attaquer aux terrains.

Le choix d'un outil de forage dépend essentiellement de la nature des terrains à traverser.

I.6.1.Les différents types des outils de forage : Les outils se classent en deux catégories :

- * **Les outils à molettes :** Les outils tricônes sont constitués de trois cônes tournant de façon indépendante et montés sur trois bras réunis entre eux par soudure constituant le corps de l'outil. Plusieurs types de roulements sont utilisés (rouleau avec ou sans étanchéité, palier de friction, système de lubrification, etc). Ces outils travaillent principalement en compression.

Les éléments de coupe ce sont :

- Des dents usinées dans le cône,
- Des picots de carbure de tungstène emmanchés en force dans des perçages à la surface du cône.



Figure 05: Les outils à molettes

- * **Les outils à éléments de coupe fixes :** Ils ne possèdent pas de pièces tournantes, ce sont les outils monobloc. Des diamants naturels et de synthèse sont utilisés pour leur fabrication. Les outils à diamants naturels travaillent à la façon d'une lime tandis que les outils à diamants synthétiques travaillent à la façon d'un rabot.
- * **Les outils PDC : (*Polycrystalline Diamond Compact*)** En 1971, General Electric a réussi à faire la synthèse du diamant en laboratoire à partir d'un mélange de graphite, de nickel et de cobalt soumis à des conditions de pression et de température très élevées (100 000 bar et 1 500 °C). La fine couche de diamant, grâce à la présence de cobalt, peut être fixée sur un support en carbure de tungstène. Le produit obtenu est appelé **stratapax** ou compact .

Les diamants obtenus par synthèse sont polycristallins (d'où le nom de **PDC** : Polycristalline Diamond Compact) : la couche de diamant ainsi formée est constituée de petits cristaux qui se sont développés dans des directions aléatoires. Le cobalt, utilisé pour catalyser la synthèse, sert également de liant entre les cristaux.

I.6.2. Le corps de l'outil :

Actuellement, il existe deux types de corps d'outils.

1- Corps en acier (steel body): Les outils utilisent des cutters PDC type périscope qui sont sortis directement dans le corps acier sans aucun brassage.

La protection du diamètre de l'outil se fait en sortant des studs en carbure de tungstène sur toute la hauteur du gage extérieur.

2- Corps en carbure de tungstène (Matrix body): Les outils sont équipés de cutters cylindriques qui sont directement basées dans un évidage qui a été aménagé dans le corps d'outil.

- **Les avantages de steel body :**

- * possibilité de remplacer les cutters périscope après utilisation de l'outil si toute fois il n'y a pas eu érosion du corps.
- * possibilité de pouvoir utiliser toute la surface du cutter étant donnée que ce type de cutter est entièrement exposé.

- **Les inconvénients du steel body :**

Une usure par "Wash out" très rapide du corps acier ce qui limite considérablement sa durée de vie. la durée de vie est directement proportionnelle à la quantité de solides de contenus dans la boue, toutefois cette usure par "Wash out" peut être réduite en apportant une métallisation dure sur la surface d'attaque de l'outil.

- **Les avantages du Matrix body :**

- * La très haute résistance à l'abrasion du corps qui est en carbure de tungstène, ce qui donne une durée de vie toujours supérieure à la durée de vie cutter lui-même.
- * L'évidage aménagé dans le corps de l'outil pour recevoir le cutter donné.

- **Les inconvénients de Matrix body :**

- * son prix qui est sensiblement plus élevé que le steel body.
- * une fois utilisé, cet outil ne peut pas être réparé.
- * toute la surface de cutter ne peut pas être utilisée du fait de sa position dans la matrice.

I.6.3. Le profil :

Il existe principalement trois types de profils :

- * Profil plat ou avec un faible cône intérieur : utiliser en formation tendre (actuellement ces outils sont généralement des outils à lames qui ont un nombre de cutter limités).
- * profil double cône (cône intérieur très prononcé): Ce type de profil étudié généralement pour les formations plus dures, en effet ce a l'avantage d'augmenter le cutter. De plus l'usure des cutters est plus homogène pour les profils en pointe de cône que dans les autres types de profils.
- * Profil parabolique: Ce profil a les mêmes caractéristiques que les profils double cône mais en plus il est plus facile de diriger avec un moteur de fond dans un puits dévié. Ce profil donne une grande surface sur laquelle un nombre important d'éléments peut être fixé.

I.6.4. Choix des outils

Il existe un vaste choix d'outils de forage, Cependant ces outils dans leur grande majorité ont été conçus pour forer des puits verticaux, or il existe des différences majeures entre le travail demandé à un outil dans un puits vertical et celui dans un puits horizontal.

- **Les facteurs de choix des outils :** Ces facteurs sont :

- * La vitesse de rotation de l'outil RPM,
- * Le poids sur l'outil WOB,
- * La tendance de l'outil à s'écarter de l'axe du puits (Walk Tendency),
- * Les charges d'impact sur l'outil,
- * Le nettoyage du front de taille,

- * La pilotabilité de l'outil (steerability),
- * La motorisation.

I.7. Les stabilisateurs :

En forage dirigé, l'utilisation de stabilisateurs est l'un des moyens de contrôler l'inclinaison du puits. Ils sont largement utilisés, particulièrement en forage dirigé conventionnel.

Ces outils sont constitués par des "lames" installées sur des corps tubulaires. Ces lames ont un diamètre égal ou inférieur à celui de l'outil de forage.

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

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

Les stabilisateurs near-bit possèdent des filetages femelle permettant le vissage direct sur l'outil. Un logement permettant d'installer une valve anti-retour est souvent aménagé à leur extrémité inférieure, évitant ainsi l'utilisation d'un raccord.

- **Types de stabilisateurs :**

- * **Stabilisateurs à lames soudées :**

Les lames (en général au nombre de trois) sont soudées sur le corps, obliquement (plus ou moins spiralées) ou parallèlement à l'axe (lames droites). Ces lames sont le plus souvent en acier non revêtu et réalisent un contact limité avec les parois du trou.

De plus ce type de stabilisateur risque d'endommager les formations tendres ou peu consolidées. Ces stabilisateurs ne constituent donc pas de bons outils pour le forage dirigé.

- * **Stabilisateurs à lames intégrales :**

Les stabilisateurs à lames intégrales, soit forgés, soit usinés dans un bloc d'acier. Les lames sont larges et "spiralées" autour du corps. Elles offrent un bon contact avec les parois du trou. La forme des lames et l'espace entre lames conduisent à deux types de stabilisateurs

- de type ouvert (open design)
- de type fermé (tight design)

De manière à prolonger leur durée la surface des lames est couverte de revêtement constitués de matériaux durs tels que:

- grains de carbure de tungstène
- plaques de carbure de tungstène
- boutons de carbure de tungstène

*** Stabilisateurs à chemise :**

Les stabilisateurs à chemises sont constitués d'un mandrin sur lequel vient s'installer une chemise portant des lames. Deux types existent, différants par le mode de montage de leur chemise:

- soit la chemise est directement vissée et bloquée sur le mandrin
- soit le mandrin est divisé en deux parties se vissant l'une sur l'autre, la chemise étant bloquée entre ces deux parties. Ce système présente l'avantage de ne pas avoir à serrer directement sur la chemise En réduisant la quantité de matériel nécessaire, les stabilisateurs à chemises pourraient être une alternative économique aux stabilisateurs intégraux, mais présentent cependant certains inconvénients:
 - Le montage et le démontage des chemises prennent du temps, surtout quand elles remontent sur bloquées.
 - Le dévissage en force conduit alors souvent à une déformation rendant la chemise inutilisable et réduisant l'avantage quantité de matériel.
 - La surface des lames est réduite par rapport aux lames des stabilisateurs intégraux, offrant une moins bonne qualité vis à vis du forage dirigé.

* **Stabilisateurs à chemise non rotative :** Ces stabilisateurs sont constitués d'une chemise, portant des lames le plus souvent droites, installée librement sur un mandrin. Les chemises et leurs lames sont faites, soit intégralement en caoutchouc, soit en acier recouvert de caoutchouc.

* **Stabilisateurs "clamp-on" :** Les stabilisateurs "clamp-on" sont constitués d'une chemise portant des lames, pouvant être glissée à une position quelconque sur un élément tubulaire et être bloquée entre deux couronnes contra-rotatives.

Elles sont nécessaires quand une stabilisation est requise et qu'il n'est pas possible d'installer des stabilisateurs conventionnels.

I.7.1- L'amortisseur de vibrations (Shock Absorber)**I.7.1.1 - Principe :**

Cet outil placé dans le train de tiges pour absorber les vibrations engendrées lors du forage des formations dures ou fracturées.

Il existe deux types différents d'amortisseurs de vibrations :

- L'amortisseur mécanique où l'on applique du poids sur un ressort ou un élément en caoutchouc, qui en se déformant absorbe les vibrations,

- L'amortisseur hydraulique où l'on applique du poids pour comprimer un fluide, du gaz ou même de l'air, afin d'absorber les vibrations.

I.7.1.2 - Positionnement

- La plupart des constructeurs recommandent de positionner l'amortisseur de vibrations directement au dessus de l'outil
- Dans des cas spéciaux il peut être positionné entre l'outil et le stabilisateur suivant, avec une distance maximum de 9 m du tricône

Remarque :

A noter qu'en l'absence d'amortisseur de vibration, il est possible d'atténuer les chocs en:

- * variant la vitesse de rotation
- * augmentant la longueur des masse-tiges
- * rajoutant des tiges lourdes au dessus des masse-tiges.

II.7.1.3- Avantages :

L'utilisation d'un amortisseur de vibrations peut :

- * Augmenter la durée de vie de l'outil à 25 %
- * Améliorer la vitesse de pénétration
- * Diminuer la fatigue du train de tiges
- * Eliminer la rupture des masse-tiges

I.8 - Contraintes mécaniques sur les trains de tiges en cours de forage

I.8. 1-Poussée d'Archimède :

La poussée d'Archimède correspond à la résultante des forces de pression qu'un fluide exerce sur la paroi d'un corps partiellement ou totalement immergé dans celui-ci. C'est une force verticale dirigée dans le sens opposé à celui de la pesanteur et dont l'intensité est égale au poids du fluide déplacé. Elle s'applique au centre de poussée qui correspond au centre de masse du volume qu'occuperait le fluide à la place de la partie immergée du corps.

I.8.2-Répartition des contraintes dans la garniture :

la répartition des contraintes dans une garniture en absence de fluide, il n' est pas de même lorsque cette garniture est plongée dans un fluide.

La répartition généralement admise est reproduite. Quatre situations différentes sont décrites :

1. La garniture est suspendue dans un puits vide. Tous les points de la garniture sont en tension.

2. La garniture est suspendue dans un puits rempli de fluide de masse volumique ρ_f . Une partie est en compression du fait de la poussée d'Archimède qui s'exerce sur la surface inférieure de la garniture. Mais il n'y a pas de risque de flambage dans cette partie car la contrainte axiale est toujours inférieure en valeur absolue à la pression hydrostatique. Lorsque la garniture s'écarte de la verticale, la poussée d'Archimède produit une flexion du tubulaire dirigée vers le haut. Mais le poids du tubulaire, qui est supérieur à cette poussée (car la densité de l'acier est supérieure à la densité du fluide environnant), la ramène en position verticale.
3. Une partie de la garniture appuie sur le fond du puits qui est vide. Il y a risque de flambage dans la partie inférieure qui est en compression.
4. Une partie de la garniture appuie sur le fond du puits qui est rempli de fluide de masse volumique ρ_f . Il y a risque de flambage dans la partie inférieure de la garniture car la pression hydrostatique est inférieure en valeur absolue à la contrainte axiale.

I.8.3. Point neutre

Il existe un point où la contrainte axiale est nulle (pas de traction, ni de compression) est un point au-dessus duquel il n'y a pas de risque de flambage.

Le point neutre (ou section neutre) est défini de façon différente suivant les cas (garniture de forage ou tubing ancré dans un packer, fluides différents entre l'intérieur et l'extérieur du tube, etc.). On a différents définitions telle que :

- C'est le point où la contrainte axiale change de signe (passage d'un état de compression à un état de tension).
- Pour **A. Lubinsky**, c'est le point qui divise la garniture en deux : le poids de la partie supérieure est suspendu à l'élévateur et le poids de la partie inférieure est égal à la force appliquée sur le fond.
- C'est le point où la contrainte axiale est égale à la demi-somme de la contrainte radiale et de la contrainte tangentielle.
- C'est le point où les contraintes axiale, radiale et tangentielle sont égales.
- C'est le point où la contrainte axiale est égale à la pression hydrostatique.

Les 4 dernières définitions sont équivalentes et déterminent en principe le point sous lequel il y a risque de flambage de la tubulaire. Lorsque la garniture est immergée dans la boue, la première définition (contrainte axiale nulle) détermine un point neutre beaucoup plus haut que celui obtenu par les autres définitions.

I.8.4-Flambage du train de tige

I.8.4.1.Cas classique du flambage

Soit une tige verticale sans appuis latéraux sur laquelle on applique une force de compression F dirigée suivant l'axe longitudinal. À partir d'une certaine valeur F_{fl} de la force F , la tige, qui était droite auparavant, fléchit brusquement. Suivant la valeur de F , la tige prend une nouvelle position d'équilibre ou casse. On dit qu'il y a **flambage**. La tige se courbe dans le sens où elle oppose la résistance la plus faible à la flexion (moment d'inertie plus faible).

Le flambage (ou flexion latérale) est une instabilité d'un système en compression. Il est dû au fait que le matériau n'est jamais totalement homogène, que l'axe de la tige n'est pas absolument rectiligne et que la force de compression n'est pas toujours appliquée exactement suivant cet axe.

Lorsque F est inférieur à F_{fl} , aucune déformation appréciable de la tige n'apparaît. Lorsque la valeur de F est comprise entre F_{fl} et F_{cr} , la limite élastique du matériau à la compression n'est pas atteinte, la tige fléchit mais elle reprend sa forme d'origine si l'on supprime la force F .

Lorsque F dépasse la valeur F_{cr} appelée **charge critique**, la limite élastique du matériau est dépassée, avec comme conséquence une déformation permanente de la tige (si l'on supprime F , la tige ne reprend pas sa forme d'origine). Lorsque F atteint la valeur F_{rp} , il y a rupture de la tige. L'expérience montre que les valeurs F_{fl} , F_{cr} et F_{rp} sont proches l'une de l'autre.

Dans un puits vertical, si l'on utilise les tiges pour mettre du poids sur l'outil, elles vont flamber et risquent d'être endommagées. Pour éviter cela, A. Lubinsky a proposé dans les années 1950 d'utiliser des masses-tiges qui ont un moment d'inertie supérieur à celui des tiges de forage et donc une charge critique plus élevée.

I.8.4.2 Cas de la garniture de forage dans un puits

Dans un puits, la situation est différente du cas classique puisque la garniture peut prendre appui sur les parois du trou. La valeur de la force de compression F que l'on peut appliquer sur un élément de la garniture dépend du diamètre du puits et de l'inclinaison.

Il est important de savoir à partir de quelle valeur de F , la garniture va flamber. Le flambage de la garniture sera la cause de changements de l'angle d'attaque de l'outil sur le front de taille entraînant des difficultés pour contrôler la trajectoire. Il sera également

responsable de frottements importants dans le puits diminuant ou même annulant le poids sur l'outil et augmentant l'usure des tubulaires (garniture et tubages). Le flambage va également induire une fatigue supplémentaire de la garniture pouvant entraîner des ruptures. Il faut donc essayer d'éviter autant que possible de faire travailler la garniture en flambage.

Pour une valeur $F_{fl\ sin}$ de la force de compression F , la garniture flambe de façon sinusoïdale. Cette première déformation est instable (le train de tige reprend sa forme initiale dès que la force axiale redevient inférieure à $F_{fl\ sin}$). Les frottements du train de tige contre la paroi du puits augmentent très peu car les forces de contact sont pratiquement inchangées.

Lorsque F atteint la valeur $F_{fl\ hel}$, le train de tige se met en hélice (flambage hélicoïdal). Dans ce cas, les forces de friction sur la paroi du trou augmentent considérablement et très rapidement, le train de tige peut se trouver bloqué et ne plus transmettre le poids sur l'outil (phénomène de lock up).

I.8.5. Stabilisation des assemblages de fond :

Lorsqu'un outil passe d'une formation tendre à une formation dure, le poids sur l'outil n'est pas réparti de façon uniforme sur le fond du trou.

Du fait que le plus de poids est porté par la roche la plus dure, surtout lorsqu'elle est également la plus compressible (cas du sel et de l'anhydrite), il apparaît un moment à l'outil.

En l'absence de stabilisateur sur l'outil, le moment de flexion est transmis aux masse-tiges situées directement au-dessus de l'outil.

L'angle d'attaque à l'outil, (angle que fait l'axe de l'outil avec l'axe du puits), est alors augmenté du fait du jeu entre les masse-tiges et le trou.

I.8.6. Choix de la (BHA)

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

I.8.6.1 Recommandation sur la pratique des BHA

Afin d'éviter une concentration importante des contraintes à la jonction des masses tiges et des tiges de forage, ce qui amplifie le risque de défaillance par fatigue, il est recommandé que le rapport des moments d'inertie relatifs aux sections (**I**) concernées n'excède pas 5.5 lorsque l'on fore dans des formations présentant une forabilité importante, et 3.5 lorsque l'on fore des formations dont la forabilité est faible

$$I = \frac{\pi}{64} (D_e^4 - D_i^4) \quad (16)$$

D_e : Diamètre extérieur de l'élément.

D_i : diamètre intérieur de l'élément.

Dans la plupart des cas, l'application stricte de ce principe nous montre que des masses tiges de petits diamètres et/ou des tiges lourdes (HWDP) doivent être placées dans la zone de transition entre les masses tiges de grand diamètre et les tiges de forage. De plus, ces tiges lourdes (HWDP) peuvent être utilisées là où la force critique de flambage relative aux tiges est dépassée.

CHAPITRE:II

Vibrations des garnitures de forage

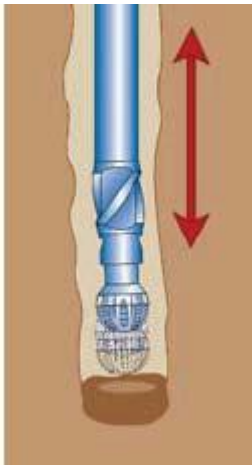
II.Vibrations des Garnitures de Forage

Les foreurs connaissent les vibrations intimement associées au forage par leur effets en surface : mouvement du train de sonde, frottement du câble de forage lorsqu'il entre en résonance avec les vibrations émises par l'outil, répercussions sur l'indicateur de poids.

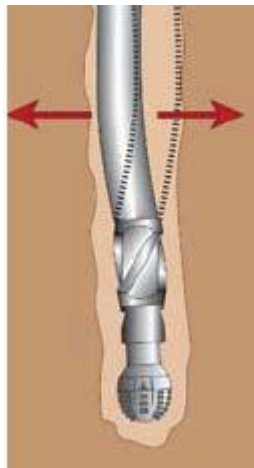
les phénomènes de vibrations liés au forage. Il existe trois types des vibrations à savoir : vibration axiale, vibration de torsion et vibration latérale.

II.1 Différents types des vibrations et leurs origines :

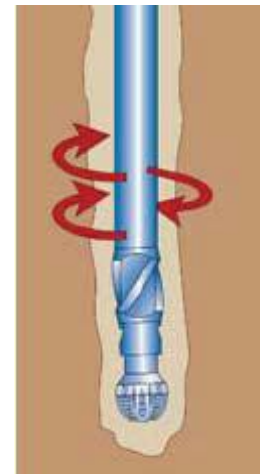
En forage pétrolier, trois types de vibrations ont été identifiés : axiales, radiales et torsionnelles (fig06).



Vibration axiale



Vibration latérale



Vibration de torsion

Figure 06: Types de vibrations

II.1.1 Les vibrations axiales

L'origine des vibrations axiales est due au trépan. Au cours du processus de forage, les dents du trépan détruisent la roche par une succession de percussions.

L'énergie fournie à l'outil de forage par le poids et la rotation ne sert que partiellement à détruire la roche. En effet, une partie de cette énergie est réfléchiée dans la garniture de forage sous forme de vibrations axiales, et une autre se perd en frottement et en chaleur.

Les vibrations axiales les plus éprouvantes pour le matériel sont associées à un rebond important du terrain (**bit-bounce**). Elles se produisent dans les terrains durs qui renvoient une partie importante de l'énergie vers la garniture de forage. Dans ce cas, l'amplitude du rebond peut devenir considérables.

Le "**bit bounce**" ou le "rebond de l'outil" est une situation extrême et très dangereuse des vibrations axiales. Son nom découle du fait que l'outil rebondi périodiquement sur le front de coupe ce qui mène à sa destruction instantanée.

De nombreux facteurs jouent un rôle dans les vibrations axiales :

- **L'effet du terrain :**

On peut distinguer deux types de comportement des roches sous l'effet du poids sur l'outil appliqué et le couple de rotation

- Soit la roche à un comportement ductile, comme dans la plupart des marnes ou argile; le processus de destruction se fait par l'extrusion d'un copeau composé de tranche de terrain empilées et compacté.
- Soit la roche à un comportement friable (calcaire) le processus de destruction se fait par broyage sous le taillant et par fracturation.

Pour les roches friables, le caractère progressif et irrégulier du mode de création des fissures provoque des fluctuations importantes au niveau de la résultante des forces d'un taillant. Pour les roches ductiles les variations de la résultante des forces sont beaucoup plus faibles autour d'une valeur moyenne. Ces observations permettent de comprendre que les oscillations de vibrations existe au niveau du taillant lui même, en particulier dans les changements de terrain, et avec d'autant plus d'amplitude que le terrain devient dur et /ou plus friable.

- **L'effet du trépan :**

Le trépan doit être adapté le mieux possible au terrain à forer. Cela est relativement aisé lorsqu'il y a des références. Des dents cassées peuvent être le signe d'un rebond trop violent en cours de forage.

Les types de trépan le plus utilisés sont le tricône et le PDC. Le tricône est plus sensible aux vibrations axiales que le PDC.

- **L'effet de la boue :**

La pression de la boue à l'intérieur de la garniture de forage atténue la propagation des vibrations provenant du trépan. Il en de même quand la densité et la viscosité sont élevées ou quand le trou est mal nettoyé. Donc la boue joue le rôle d'un amortisseur.

- **L'effet des paramètres de forage :**

Le poids sur l'outil et la vitesse de rotation sont les éléments essentiels sur lesquels le foreur agit durant toute la vie du trépan. Il ajuste pour que le trépan vibre de façon régulière et sans amplitude exagérée. Cela est assez facile dans les terrains homogènes,

mais devient plus compliqué lorsque l'on fore de fréquentes alternances. L'énergie renvoyée dans la garniture de forage alors constamment provoquant des vibrations dommageables pour le trépan et la garniture.

II.1.2 Les Vibrations Latérales :

Elles se concentrent essentiellement au niveau de l'outil et de la garniture de fond (BHA) avec des oscillations perpendiculaires à l'axe de la garniture de forage (fig.7). Elles sont pratiquement indétectables en surface, ce qui empêche d'éviter les dommages qu'elles peuvent causer. Toutefois, elles peuvent être déduites par une augmentation du couple de forage, et apparition des autres types de vibrations.

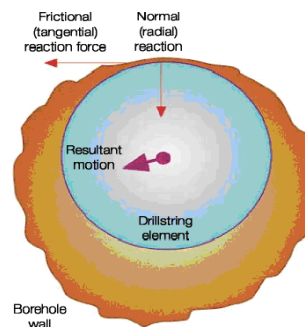


Figure07: Création des vibrations latérales

Le mouvement tourbillonnaire ou "**whirl**" est un cas spécifique de vibrations latérales. Il peut s'initier soit au niveau de l'outil (**bit whirl**), soit au niveau de la BHA (**BHA whirl**). Dans les deux cas, l'outil ou la BHA roulent sur la paroi, ayant ainsi un mouvement de rotation autour d'un axe différent de l'axe géométrique du trou, et générant des chocs latéraux et des frottements avec la paroi du trou. Ceci peut avoir un effet catastrophique sur l'outil (casses et arrachements des picots ou des cutters, endommagement des cônes pour les tricônes et casse des lames pour les PDC) et sur les éléments de la BHA.

Les vibrations latérales sont un phénomène stable dans le temps, c'est à dire qu'une fois initiées, elles ne cessent pas même si on modifie les paramètres de forage.



Figure 08: Le whirling

II.1.3. Les vibrations de torsion :

Les vibrations de torsion de la garniture de forage en cours de forge se sont manifestées depuis que celui-ci existe. Le fait même d'entraîner un outil de forage en rotation crée une accumulation de torsion dans la garniture.

La garniture de forage est soumise à l'entraînement en surface en rotation par la table de rotation ou par le top drive et aux couples résistant du travail de l'outil et à de nombreux facteurs.

A vitesse de rotation en surface à peu près constante, les frottements le long de la garniture et à l'outil provoquent des oscillations de torsion qui se manifestent au travers des ralentissements et des accélérations au niveau de l'outil. Parfois l'outil s'arrête de tourner au fond pour ensuite repartir à grande vitesse et s'arrêter à nouveau lorsque la torsion des tiges est évacuée : c'est le phénomène connu sous le nom de *stick slip*. Dans le cas extrême, assez rares, la détente de la torsion des tiges provoque une accumulation importante de torsion inverse ce qui fait tourner l'outil quelques tours à gauche avant de repartir à droite. On parle alors de « **backward spin** ».

De nombreux paramètres jouent un rôle dans la vibration de torsion :

- **Effet des paramètres de forage :**

Des essais ont montré qu'une vitesse de rotation faible était un facteur favorable à l'apparition d'oscillations de torsion dans la garniture de forage, que l'outil soit au fond ou non. Pour chaque garniture et chaque état de puits donné, il existe une vitesse de rotation critique au-delà de laquelle les oscillations de torsion et en particulier le « **stick slip** » disparaissent.

Une augmentation du poids sur l'outil favorise le « *stick slip* » par augmentation des frottements dus au flambage de l'ensemble de fond. En réduisant le poids, l'entraînement de l'outil redevient plus régulier.

Le poids sur l'outil et la vitesse de rotation critique sont en étroite relation : plus le poids est augmenté, plus il faut augmenter la rotation pour obtenir un régime régulier (avec des limites).

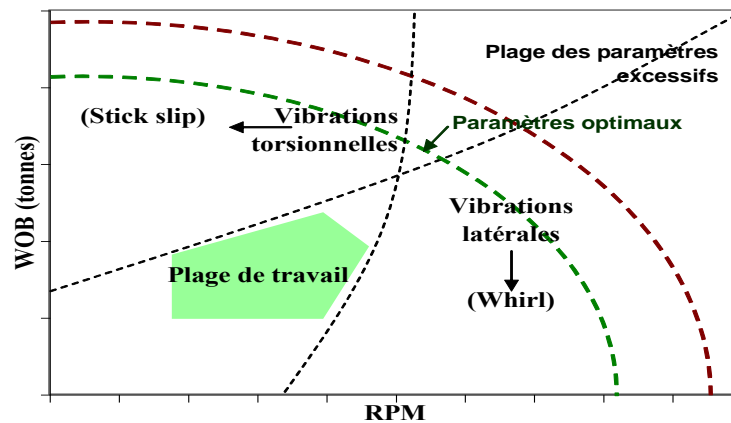


Figure 09: Plages des vibrations en fonction des paramètres de forage

- **Effet du comportement de la boue :**

Plusieurs essais destinés à diminuer les frottements par là même le stick slip ont été tentés ; ils ont permis de sélectionner un lubrifiant efficace mais relativement coûteux.

- **Effet de type de l'outil :**

L'utilisation d'outil à lames : bilames, tri-lames provoquait des ondes de torsion d'une amplitude parfois très sévère. Avec l'abandon des outils à lames, le danger du au phénomène des oscillations de torsion a diminué sans jamais disparaître. Le stick slip était toujours présent surtout en carottage où la vitesse de rotation est relativement lente.

Le stick slip est plus fréquent et plus sévère avec des outils PDC qu'avec des tricônes. Un phénomène rare a été remarqué avec les outils PDC, c'est la rotation à gauche « **backward spin** » due à des oscillations de torsion sévères. L'outil PDC est sensible aux vibrations de torsion, par contre l'outil tricône est peu générateur d'onde de torsion.

- **Effet du puits :**

La lithologie a une influence indéniable sur les vibrations de torsion. Ainsi les formations hétérogènes font augmenter les frottements aux stabilisateurs. Le profil du puits conditionne les frottements mais aussi l'amortissement des vibrations.

L'instabilité d'un grand nombre de paramètre est la raison par laquelle la torsion accumulée dans la garniture varie en permanence.

- **Conversion latérale et axiale de l'énergie :**

On suppose que la garniture de forage est toujours en contact avec les parois du puits de toute sa longueur. Sous cette supposition l'amplitude qui augmente les vibrations latérales peut paraître seulement sous la forme des ondes processionnelles de la garniture de forage quand chaque section de la garniture de forage tourne dans les deux sens. Physiquement un mouvement assimilé à un mouvement du serpent comme la garniture de forage, et avec amplitude croissante peut se produire si le phénomène de la résonance paramétrique a lieu.

En effet, la force axiale appliquée sur l'outil se compose de deux parts : la partie statique, poids sur l'outil, et la partie ou le temps est rentre en dépendance, la fluctuation du poids sur l'outil qui produisent des ondes axiales qui propagent le long de la garniture de forage. Plus ces vibrations axiales il existe toujours des perturbations latérales infinitésimal de la garniture de forage accompagnant le forage. La force axiale de fluctuation au fond contribue à l'énergie des perturbations latérales, donc comme cette force augmente elle apporte une certaine quantité de l'énergie dans le mouvement latéral, et quand elle diminue elle prend une certaine quantité de l'énergie du mouvement latéral. Quand ces deux quantités de bilan énergétique, le mouvement latéral demeurer infinitésimal petit. Une telle situation correspond aux régimes stables. Cependant, la quantité de l'énergie apportée dans le mouvement latéral peut dépasser la quantité de l'énergie prise de lui sous certaines conditions. Alors le résultat correct est que la fluctuation du poids sur l'outil donne simplement l'énergie dans le mouvement latéral ayant pour résultat d'une augmentation des amplitudes des perturbations latérales ; c.-à-d., les régimes instables ont lieu. Ainsi, les ondes axiales peuvent provoquer les ondes latérales, qui alternativement peuvent commencer à se développer aux dépens de l'énergie de la vibration axiale.

Ce scénario est connu dans la physique et la mécanique par la résonance paramétrique. C'est à peu pris semblable à la résonance forcée qui se produite toujours quand la fréquence de la fluctuation du poids sur l'outil coïncide avec l'une des fréquences axiales naturelles. Cependant, IL constitue un phénomène physique différent. Tout d'abord, la résonance paramétrique mène à une augmentation exponentielle d'amplitude de vibrations, pendant que pour la résonance forcée seulement augmentation de l'amplitude linéaire a lieu. En second lieu, pour la résonance forcée la fréquence de la force d'excitation doit coïncider avec les fréquences naturelles

II.2. Notion des vitesses critiques de rotation :

II .2.1.Les vibrations latérales :

Deviennent critiques pour certaines vitesses de rotation du diamètre des tiges de forage. Ces vitesses critiques sont données à + 15% près de la formule suivante.

$$\text{RPM} = \frac{1200}{l^2} (D^2 + d^2)^{1/2} \quad (17)$$

RPM : Vitesse de rotation (Tr/min)

D : diamètre extérieur.

d : diamètre intérieur.

l : longueur d'une tige.

II.2.2.Les vibrations axiales :

Sont fonction de la longueur du train de tiges, les vitesses critiques sont données par la formule suivante :

$$\text{RPM} = \frac{78600}{L} . \quad (18)$$

L : Longueur d train des tiges (mètre)

Il existe donc pour chaque profondeur, une vitesse de rotation critique indépendante du diamètre des tiges ; les harmoniques, ou vibrations secondaires se produisent à 4,9 ,16,25.... etc fois la vitesse donnée par cette équation.

Les vibrations axiales sont moins dangereuses que les vibrations latérales, cependant lorsque les deux types de vibration deviennent critiques en même temps il y a danger de rupture du train de tiges.

II.3.Conséquences des vibrations

II.3.1.Endommagement des outils de forage

L'outil de forage est considéré comme l'élément le plus coûteux et le plus important de la garniture de forage. De plus, il représente par sa structure de coupe diamantée la partie la plus fragile de la garniture de forage, ce qui le rend vulnérable devant les phénomènes vibratoires sévères qu'il subit lors de destruction de la roche. Avec l'introduction des outils PDC, qui sont à la fois plus onéreuse et plus fragile que les outils tricônes surtout en gros diamètres, l'impact des vibrations s'est amplifié davantage.



Figure 10:- Endommagement de l'outil

II.3.2.Détérioration des éléments de la garniture de forage

Les vibrations causent souvent l'usure excessive des stabilisateurs. De plus, les vibrations endommagent les moteurs de fond dans les cas où on a pensé utiliser ces derniers afin d'améliorer les performances de forage. Des outils de mesure de vibrations au fond du trou descendus lors du forage n'ont eux aussi pas résisté à l'ampleur de ces vibrations.



Figure11: - Endommagement des éléments de la garniture de forage

II.3.3. Dégradation de la qualité du trou

L'une des conséquences des vibrations sévères est la génération du cavage dans les formations traversées. En effet, sur les quelques diagraphies réalisées sur les phases forées, le cavage sur certains puits était jugé tolérable. Ceci est souvent combiné avec des faibles vitesses d'avancement. De plus, un excès important de ciment est nécessaire pour la cimentation de l'espace annulaire. Quand à la qualité de cette cimentation, elle est forcément très affectée.

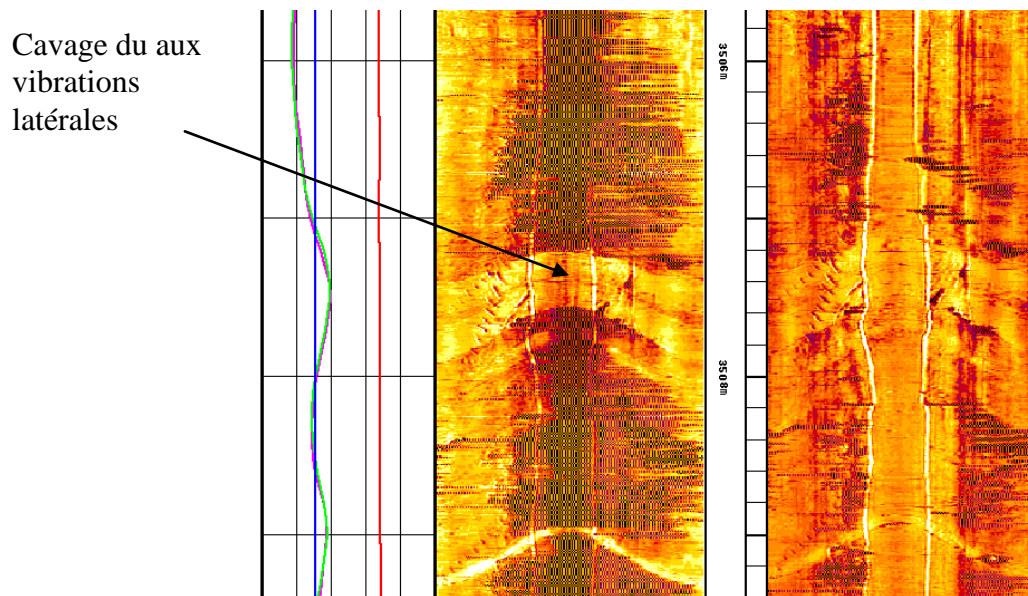


Figure12:- Image de dégradation de la qualité du trou de puits (DSI)

II.4. Mesure des vibrations en cours de forage :

- Les sondes de mesure des vibrations

Les sondes de vibration utilisent trois axes, les accéléromètres sont associés au DC mesurent les changements des accélérations le long de trois axes

- L'axe X mesure l'accélération latérale et radiale de la garniture de forage.
- L'axe Y mesure l'accélération latérale et tangentielle de la garniture de forage.
- L'axe Z mesure l'accélération longitudinale (axiale) de la garniture de forage.

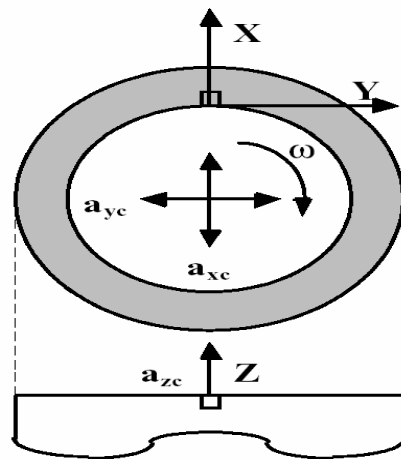


Figure 13: Mesure de vibration

II.4.1 Les Dimensions de la sonde

La moyenne : Représente l'accélération moyenne sur une période du temps spécifiée.

Le sommet : Représente la plus haute accélération qui s'est produite sur une période du temps spécifiée.

Instantané : Les données sont traitées à très haut taux et utilisées pour l'analyse de la fréquence principalement.

II.4.2. Sondes utilisées pour mesurer les vibrations :

II.4.2.1. L'outil 'SVSS' :

Sperry-Sun a développé sous la base d'une sonde un outil de sévérité de vibration (SVSS), afin d'être capable d'assurer une surveillance de vibration au niveau des outils de MWD.

Un outil qui mesure la sévérité des vibrations sous la base d'une sonde. Qui a deux axes de mesure (X et Z) détecte des types de vibration latéraux et axiaux. Choc maximal de 50g.

- La moyenne et le pic de chaque axe sont mesurés.
- SVSS est disponible sur les sondes: PCG-(R) & PCD-(R).

- Le 'SVSS' est disponible pratiquement avec chacune des probes utilisées en Algérie. Des récentes analyses de pannes sur des phases de drain 6" ont renforcés l'utilisation historique de ces données.

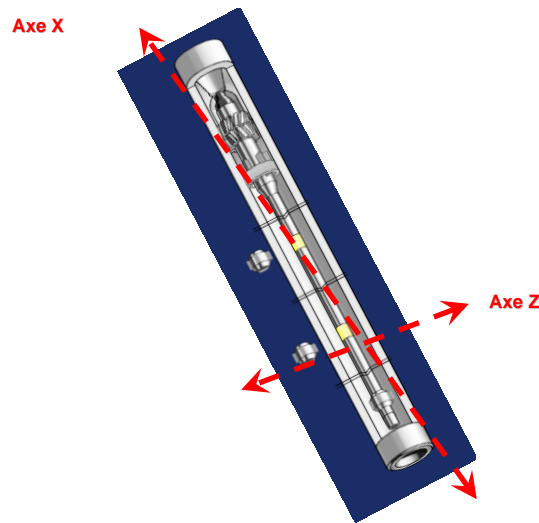


Figure 14: Outil SVSS

Définition de Mesure

- **SVSS PCD-(R) Pic** : Pic est en faite une courte moyenne calculée pendant une période de 10 msec.
- **SVSS PCD-(R) Moyenne** : Le niveau moyen de tous les chocs est enregistré pendant une période de 2.5 secondes.
- **PCD-R** : indique les niveaux de g absolue de vibration.
- **SVSS PCG-(R) Pic**
La valeur enregistrée pour le pic est le plus haut seuil de pic dépassé et NON la valeur actuelle relevée, par exemple 24g sera enregistré comme 20g.
- **SVSS PCG-(R) Moyenne**
La valeur enregistrée pour la moyenne est le plus haut seuil moyen dépassé et NON la valeur actuelle, par exemple une valeur de 5g sera enregistrée comme 4g.

l'outil ('Bit Bounce') :

- **Réaction du SVSS:** Elevé Pic Z.
- **Indication en surface:** Vibration axiale des tiges, fluctuation du poids sur l'outil, variation de pression.
- **Environnement** : Puits verticaux, Outils tricônes dans des roches dures.
- **Décisions à prendre:**

- * Arrêter et reprendre le forage à un RPM plus faible et un poids sur l'outil plus faible.
- * Tout en forant, changer les paramètres de forage de façon à stabiliser la structure de coupe, c'est le même principe que 'bedding in' un nouveau outil (commencer avec un peu de poids sur l'outil et un faible RPM, puis augmenter constamment).

- Chocs latéraux :

- **Réaction du SVSS:** Intermédiaire – élevé Pic X, faible moyenne X.
- **Indication en surface** : Augmentation du couple possible, variation de pression.
- **Environnement** :Puits verticaux, Excentrique garniture de forage, roche dure.
- **Décisions à prendre:**
 - * Arrêter et reprendre le forage à un RPM plus faible.

II.4.2.2- Gestion des vibrations

- * L'utilisation du SVSS permet en temps réel de connaître les vibrations au fond du trou (pour les axes x et z).
- * Les relevés du SVSS indiquent la sévérité et le genre de vibration.
- * L'analyse en temps réel des données du SVSS à l'aide des paramètres de surface est équivalente à une analyse faite avec les données enregistrées.
- * Informer déviateur / plancher de forage / superviseur / chef de chantier.
- * Ajuster les paramètres de forage et surveiller les données du SVSS.

CHAPITRE:III

Etude du phénomène de vibration dans la phase 16''

III : Etude du phénomène de vibration dans la phase 16"

III. 1- Conditions de forage :

La durée de forage de phase 16", d'une longueur moyenne de 2280 m, représente 15% de la durée de réalisation d'un puits. Elle commence dans le **Sénonien Anhydritique** (vers 500 m) et se termine dans le **Dogger Lagunaire**. Cette phase était forée auparavant en diamètres 12 ¼ pour le programme léger et en 17 ½ en programme lourd avec des outils tricônes. Par la suite, cette phase a été optimisée en passant au diamètre 16" et généralisée sur tout le champ avec l'introduction du forage horizontal, au début avec des outils tricônes, puis avec des outils PDC.

- **Paramètres de forage :**

La phase 16'' est réalisée par les paramètres suivantes :

Tableau 06 : Programme de forage Phase 16"

Paramètres	WOB (t)	RPM (tr /min)	Q (l/mn)	ROP moy (m/h)
Valeurs	10-22	90-130	2800-3000	7-8

❖ La garniture de forage utilisée pour la réalisation de cette phase est composée de :

- * Outil PDC de type : **HC609Z IADC S343**
- * BHA (Packed hole) de longueur $L_1 = 259.16\text{m} = 850.26\text{ ft.}$
- * Masses tiges utilisée **9.5 x 3"**.
- * Tiges de forge 5''^{1/2} de longueur $L_2 = 2020.84\text{m} = 6630.05\text{ ft.}$

- **Programme de Boue :**

Les caractéristiques de la boue dans la phase 16'' sont citées dans le tableau suivant :

Tableau 07: Programme de boue phase 16"

Densité (Kg/l)	Vm (sec)	F (cc/30mn)	Vp (cp)	Yv (lb/100 ²)	Gel 0 (lb/100 ²)	Gel 10 (lb/100 ²)	%Sol	%Sab	O/W	Pb
1.02	53	9	16	18	13	17	14.3	3.5	70/30	2.5

- **BHA utilisée dans la phase 16"**

Tableau 08: BHA utilisée dans la phase 16"

Eléments	N°	OD (in)	ID (in)	Longueur (m)
PDC bit	1	16	-	0.45
Near bit stab 15 15/16	1	9,5	3	2.39
Short DC	1	9,5	3	3.04
String stab 15 15/16	1	9,5	3	2.46
DC	1	9,5	3	8.82
String stab 15 15/16	1	9,5	3	2.46
DC	2	9,5	3	17.63
XOS	1	9,5	3	1.01
DC	2	8	2,81	81.5
HYD JAR	1	8	2,81	9.60
DC	9	8	2,81	17.47
XOS	1	8	2,81	1.06
HWDP	12	5,5	3,31	111.27
				Total 259.16m

On voit ici que le Near Bit et le premier stabilisateur sont les deux sous dimensionnés, donc notre BHA repend aux conditions de stabilité, sauf si on cherche une meilleure stabilité et une rigidité contre le flambage on utilise une BHA à quatre stabilisateur cas (à étudier) à HMD et aussi des masses tiges surdimensionnées avec des diamètres intérieurs petits.

III.2. Analyse des effets des différents paramètres :

- **Effet de lithologie** :durant l'utilisation de l'outil PDC(IADC)S434 enregistrant l'influence de lithologie comme dans indique le tableau 16"

Tableau 09 : Types de vibrations observées dans chaque formation en phase 16"

Lithologie	WOB(T)	RPM(tr/mn)	ROP (m/h)	Vibrations observées
Sénonien anhydritique	10 - 15	110-130	13.4	Stick slip, (120tr/mn) est optimale pour prévenir ces vibrations
Sénonien salifère	7 - 15	125 - 140	12.1	Stick slip observé proche du fond de cette formation
Turonien	10 - 15	120 - 140	21.4	Petites vibrations sont observées en général
Cénomaniien	Moins de 15	130	13.3	Stick slip
Albien	10 - 15	125 - 150	24.9	Bas niveaux des vibrations
Aptien	10 - 15	80 - 100	2.4	Bit whirl et chocs latéraux RPM=90 tr/mn soit efficace pour réduire ces vibrations
Barrémien	12 - 15	100 - 125	9.1	Bit whirl et chocs latéraux
Néocomien	12 - 17	Moins de 110	-	Vibrations très fortes sur toutes les axes (bit whirl chocs latéraux et bit bounce)
Malm	10 - 18	100 - 120	3.9	Vibrations de torsion
Dogger argileux	10 - 15	100 - 130	4.8	Petites vibrations transmise dans cette formation avec le BHA whirl
Dogger lagunaire	10 - 20	100 - 130	3.9	Très petites vibrations sont enregistrées.

Ce tableau montre les types de vibrations observées ainsi le poids sur l'outil, la vitesse de rotation et l'avancement dans chaque formation de la phase 16" : les résultats obtenus à partir de l'utilisation de la sonde de mesure des vibration **SVSS** (mesure de la sévérité des vibrations sous la base d'une sonde).

- **Action hydraulique de la boue :**

L'action hydraulique de la boue est une cause complémentaire pour le problème de vibration de la garniture de forage, elle agit comme suit :

La vitesse de la boue dans l'espace annulaire (masses tiges – trou) est très grande et par conséquent elle exerce une action d'érosion sur les parois du trou ; donc le jeu entre les masses tiges et le trou va augmenter et la partie flambée de la garniture se courbe davantage.

Donc on peut conclure que l'action hydraulique de la boue (érosion) aide et participe au flambage de la garniture de forage, provoquant par la suite les vibrations de cette dernière.

Dans notre cas la phase de 16" :

Un débit de 2800 – 3000 l/mn, $D_{DC} = 9^{1/2}$.

$$Q = V_{\min} \cdot S \quad (19)$$

d'où Q : le débit, V : la vitesse et S : la section de l'espace annulaire.

Section $S = \pi/4(D_{csg}^2 - D_p^2)$ donc **S = 0.16m²**;

$$Q = 3000 \text{ l/mn} = 3\text{m}^3/\text{mn}.$$

$$V = Q/S \quad (20)$$

$$V = 3/0.16 = 18.7 \text{ m/min.}$$

Q : le débit

V : la vitesse

S : la section de l'espace annulaire.

Pour obtenir la vitesse minimale (**30m/mn**) il faut que le débit pompé soit de **4800 l/min**.

On voit que la vitesse de remontée est inférieure à la vitesse minimale donnée (**30m/mn**).

Vu la nature des formations en phase **16"** cette vitesse est insuffisante pour un nettoyage du trou. Donc on peut augmenter le débit pour le bon nettoyage du fond du puits en évitant les frottements donc la torsion des tiges.

- **Effet de l'outil :**

L'outil utilisé dans la réalisation de cette phase est de type **PDC (S343)** est d'après les résultats obtenus par l'outil **SVSS**. on voit que dans les terrains (*Turonien, Aptien, Barrémien et le Néocomien*) l'outil conventionnel ne donne pas une meilleure stabilité contre les vibration et un ROP important ; donc il faut utilisé un outil sur lequel on lui apporté les nouvelles techniques contre les vibrations (anti whirl bit, outil hybride, lames asymétriques, technique ARCS).

- **Effet des terrains sur l'outil au cours de vibrations**

Pour essayer de voir l'effet du type de formation sur les vibrations, on a tracé le nombre de cas où le forage a été interrompu en fonction de la dernière formation traversée (fig15) On remarque que les arrêts de forage ont eu lieu essentiellement dans le Barrémien. L'explication de ce résultat reste incertaine vu le nombre important de paramètres intervenants dans le forage (la formation, l'outil et de la garniture de forage, appareils de surface, paramètres de forage,...). Ce point nécessite d'être traité plus profondément.

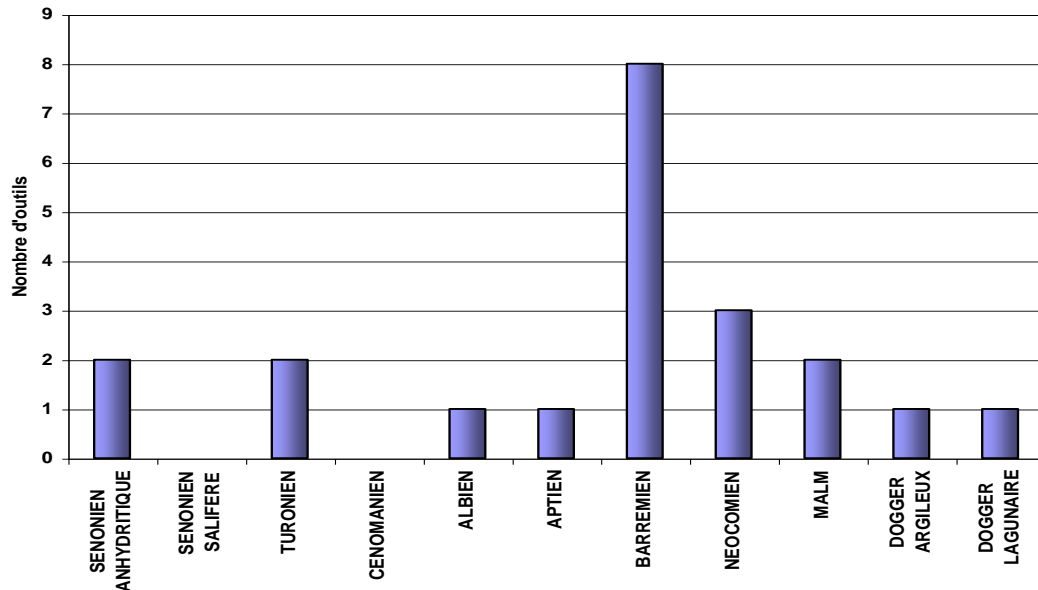


Figure 15 - Nombre d'outils endommagés par formation en phase 16"à HMD

- **Effet des vibrations sur les instrumentations**

Sur le puits de forage, l'amortisseur de vibrations axiales en cours de forage (shock-sub) testé dans l'objectif de remédier à ce problème, a été lui-même endommagé, laissant une partie au fond avec l'outil de forage et le Near bit. Ceci a induit un repêchage qui a duré plus de cinq jours. Notons aussi que chaque fois qu'on a un endommagement de l'outil ou des éléments de la garniture de forage, le risque de laisser une partie de cette garniture dans le trou est élevé, ce qui aura pour conséquence une instrumentation très coûteuse, avec un risque potentiel de perdre le puit.

III.3. Analyse du phénomène vibratoire observé:

III.3.1.Situation du point neutre

Dans le cas général, la relation donnant la position **n** du point neutre (point au-dessus duquel le flambage ne peut pas se produire) peut s'écrire :

$$* \text{ Avec des masses tiges (9.5x3") } \quad N = \frac{10^5 WOB}{P_{DC} L_{DC} K} \quad (21)$$

$$N = \frac{22 \cdot 10^5}{310,72 \cdot 148,0,84} = 57\%$$

P_{DC}: poids de masse tige.

L_{DC}: longueur de masse tige.

K:facteure de flottabilité.

Donc la position du point neutre est de **57%** dans les masses tiges est de **31%** de la longueur total de la BHA utilisée dans la phase 16".

l'utilisation des masses tiges (**9.5 x3"**) donne un point neutre de (**31%**) de la longueur totale de la BHA .

III. 3.2. Calcul des vitesses critiques de rotation de la garniture:

III.3.2.1. Vitesse critique des vibrations latérales :

$$RPM = \frac{1200}{l^2} (D^2 + d^2)^{1/2}$$

Application :

- Tiges **5.5'' G105 21.90lb/ft.**

- L (Dp 5.5'')=9.15m.

$$RPM = \frac{1200}{(9.15)^2} (5.5^2 + 3.5^2)^{1/2} \cdot (0,0254)$$

$$RPM = 15,47 \text{ tr/min}$$

RPM: Vitesse critique des vibrations latérales

Les vibrations latérales ont un effet négligeable sur le long de la garniture de forage mais elles ont un effet important au niveau de l'outil et la BHA car la propagation des vibrations est dans un sens perpendiculaire à l'axe du puits.

III.3.2.2. Vitesse de rotation critique des vibrations axiales :

Sont fonction de la longueur du train de tiges, les vitesses critiques sont données par la formule suivante :

$$\text{RPM} = \frac{78600}{L}$$

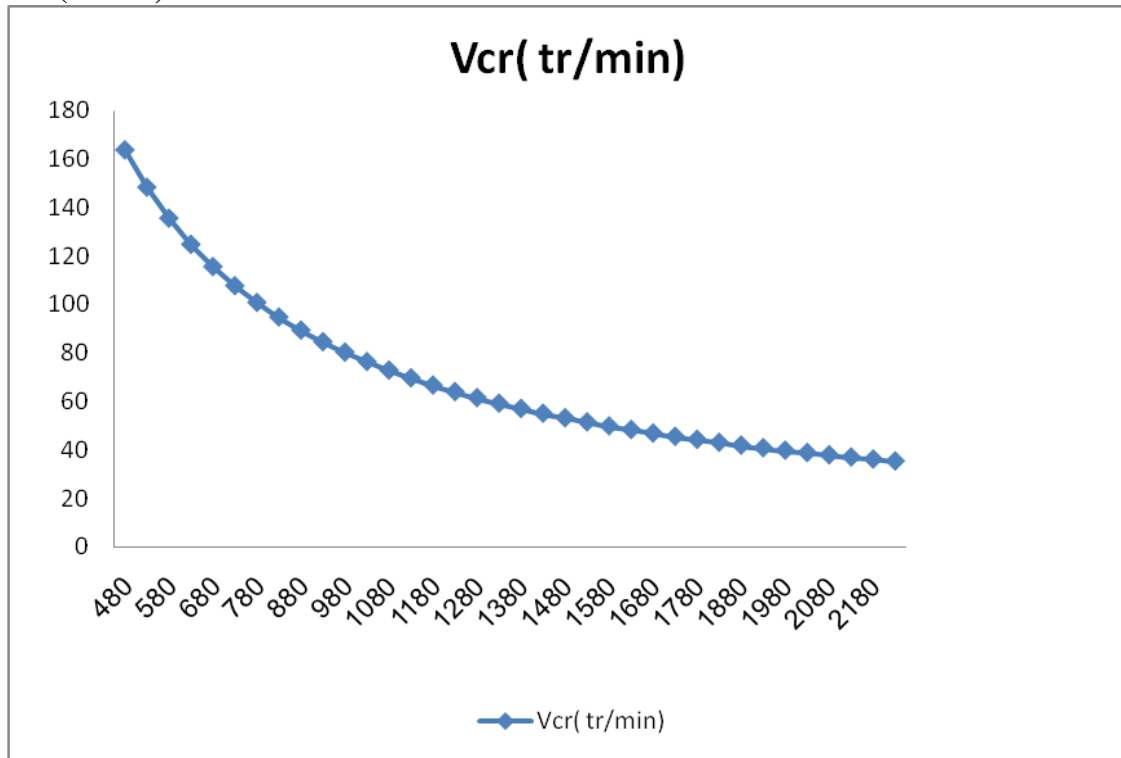
L : en mètre

Influence de la profondeur sur la vitesse critique donnée par le tableau 10.

Tableau 10: Vitesse critique de rotation en fonction de la profondeur

L(m)	V_{cr}(tr/min)	L(m)	V_{cr}(tr/min)	L(m)	V_{cr}(tr/min)	L(m)	V_{cr}(tr/min)
480	163.7	930	84.51	1380	56.95	1830	42.95
530	148.3	980	80.2	1430	54.96	1880	41.8
580	135.5	1030	76.31	1480	53.1	1930	40.72
630	124.7	1080	72.77	1530	51.37	1980	39.69
680	115.5	1130	69.55	1580	49.74	2030	38.71
730	107.6	1180	66.61	1630	48.22	2080	37.78
780	100.7	1230	63.9	1680	46.78	2130	36.9
830	94.69	1280	61.4	1730	45.43	2180	36.05
880	89.31	1330	59.1	1780	44.15	2230	35.24

Vcr(tr/min)



L (m)

Figure 16 - Vitesse critique en fonction de la profondeur

On remarque que la vitesse critique a pour effet de coïncider dans l'intervalle (**580m – 880m**), du **Sénonien anhydratique** jusqu'au **Turonien** avec la vitesse de rotation utilisée. Et par conséquent notre train de tiges va subir des vibrations dangereuses pendant – **42.85h**-, car la vitesse d'avancement moyenne en phase 16" est de 7-8m/h.

$$\text{Temps de vibration} = \text{prof} / \text{ROP}_{\text{MOY}} \quad (22)$$

$$\text{Temps de vibrations :} \quad \mathbf{Tv} = \frac{880 - 580}{7} = \mathbf{43h}$$

Conclusion et perspective

Conclusions et perspectives

Le forage des puits pétroliers est souvent marqué par plusieurs contraintes notamment le phénomène de vibration le long de la garniture de forage durant l'opération, ce qui engendre la détérioration de la garniture, pertes de temps énormes et par conséquent un surcoût de forage.

Dans le souci de minimiser l'intensité des ondes de vibrations, on a employé des appareils d'amortissement placé au dessous de l'outil de forage pour absorber ces ondes.

Notre étude à été orienté vers l'étude de ce phénomène, qui nous a conduis au premier lieu de connaitre les sollicitations influant sur la garniture telles que (traction, compression, torsion, éclatement, écrasement...).

Il faut noter que ce genre de travail nécessite d'être compléter par une base de données plus large afin de minimiser les dégâts causés par ce phénomène.

En fin il faut prendre en considération l'effet de ce phénomène sur la sensibilité de la garniture de forage et le dimensionnement du trou de puits.

Bibliographie

- 1-**Ali Tareb 09/2008 Introduction au forage (INSTITUT ALGERIEN DU PETROLE)
- 2-**EDITION TECHNIP 1972 Paris Forage rotary (garniture de forage).
- 3-**ENSPM formation industrielle3 - Juin 2005 – Forage dirigé Ingénierie et méthodes Edition.
- 4-** ENSPM Formation Industrie — IFP Training FOR00010-2006 garniture de forage.

- 5-**Formation JDF Module M1 .M2. M3 division de forage Département formation SONATRACH.
- 6-***M. BENLOUNES HACENE MESSAOUD. (2006 – 2007),*contrôle et suivi de la trajectoire dense un puits repris en short radius , Etude de cas : MD118.
- 7-** Mémoire fin Etude(Etude du phénomène de vibration.
- 8-**Soussa Abd Elkarim Mémoire de magister2011-2012 (etude des instabilites dans une tige de forage petrolier hnfluence du frottement visqueux) .
- 9-**Tessouh Hamenna et Louchen Hicham 2006Etude et choix des outils de forage dans le drain horizontal de Hassi-Messaoud

ANNEXE

Annexe

INTRODUCTION

Le champ de Hassi Messaoud a été découvert le 16 Janvier 1956 par SN-REPAL qui a amorcé le premier forage (MD1), implanté à la suite d'une campagne sismique réfraction le 15 Juin de la même année. Ce forage de 3338 m de profondeur met en évidence les grès du cambrien comme étant producteurs d'huile.

En Mai 1957, la société CFPA réalise un puits OM1 à environ 7 km au Nord-Ouest du puits MD1, ce forage confirmait l'existence d'un gisement d'huile, son épaisseur peut atteindre 200 m, sa pression initiale est estimée à 482 kgf/cm².

Le champ de Hassi Messaoud fût divisé en deux concessions distinctes :

- CFPA pour le Nord
- SN-REPAL pour le Sud.

La mise en production du champ avait commencé en 1958 avec 20 puits d'exploitation. Le type de drainage durant les premières années fût la déplétion naturelle, néanmoins, l'on a recours, de nos jours au drainage par récupération secondaire, par injection d'eau ou du gaz miscible. Dès lors les forages n'ont cessé de se multiplier et surtout à partir des mesures de nationalisation des hydrocarbures le 24 Février 1971.

2. SITUATION DE CHAMP DE HASSI MESSAOUD

2.1. Situation géologique

Le champ de Hassi-Messaoud occupe la partie centrale de la province triasique. Par sa superficie et ses réserves, il est le plus grand gisement de pétrole d'Algérie. Il est limité au Nord-Ouest par les gisements de Ouargla [Gellala, 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.

Géologiquement, il est limité à l'Ouest par la dépression d'Oued M'ya, au Sud par le môle 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 Ghadamès.

3. INTÉRÊT PÉTROLIER

Le champ de Hassi Messaoud est considéré de part sa superficie et ses réserves, est considéré parmi les plus grands gisements du monde avec une pression de gisement variant de 120 à 400 kgf/cm², une température de l'ordre de 118 à 123°C et une perméabilité très faible de 0 à 1 darcy. Le réservoir est lié aux grès quartzitiques du cambrien, l'horizon le plus productif est lié aux lithozones Ra et Ri dont les qualités pétrophysiques sont assez bonnes. La couverture est assurée

par une épaisse et étanche assise argilo-salifère du Trias. Le champ de Hassi Messaoud est considéré comme une mosaïque de gisement, délimité par les barrières de perméabilité. Après plus de 40 années de production et plus d'une centaine des puits forés, la logique géologique de ce champ demeure énigmatique, c'est ainsi que certaines zones produisent en déplétion et d'autres sont en récupération secondaire, par injection de gaz et d'eau.

4. Prévisions géologiques et de réalisation du puits OMP 80

5. Lithologie du Puits

Plusieurs études sur le champ de Hassi Messaoud ont montré une hétérogénéité qui est particulièrement due des variations des caractéristiques pétro physiques, lithologiques, structurales, ainsi que la variation de la pression de gisement d'un secteur à un autre, ce qui a permis de subdiviser le champ en plusieurs distinctes.

6. Problèmes de Forage

Le terrain qu'on fore n'est pas homogène. Il est formé de plusieurs couches de roches différentes. Chaque roche à ses caractéristiques particulières ce qu'implique la création de plusieurs problèmes qu'on peut le rencontre durant l'opération de forage. Parmi eux on a :

- **Risques de déviation :** Des risques de déviation peuvent exister dans le Mio-Pliocène car cette formation est très friable. Des problèmes de descente du tubage de surface sont souvent rencontrés.
- **Pertes de boue :** Elles peuvent êtres totales ou partielles durant les différentes phases de forage. Elles sont localisées dans les sables du Mio-Pliocène, dans les calcaires du Turonien et au niveau du Trias Argilo-Gréseux (TAG).
- **Eboulements et cavages :** Des risques d'éboulements et de formation de cavités peuvent apparaître dans les formations calcaires et argileuses du Mio-Pliocène et de l'Éocène, dans les sels massifs et solubles dans l'eau du Sénonien Lagunaire.
- **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.
- **Venues d'eaux chlorurées calciques du LD2 :** Au niveau du LD2, il y'a risque de venues des eaux chlorurées calciques enfermées dans les dolomies du LD2, sous une pression de 560 kgf/cm^2 (549 bar). Cette zone doit donc être isolée du réservoir d'eau de l'Albien.
- **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

Annexe

causer des problèmes de coincement et affecter le calibrage du puits. Ces argiles sont forées avec une boue lourde (densité de l'ordre de 2.02). Le Trias Argilo-gréseux, qui se trouve 75 m plus bas, ne résiste pas à cette densité élevée de la boue. Des pertes sont alors observées au niveau du Trias Argilo-gréseux. Afin d'y remédier, il a été décidé de poser le tubage 9"5/8 au niveau du G35 (Trias Argileux).

7- Programmes de Forage et Tubage : Le profil du puits OMP80, de type injecteur de gaz les différentes phases s'établissent comme suit Tableau :

Tableau 01 Programmes de Forage

Phase Paramètres	Valeurs				
	26"	16"	12" ^{1/4}	8" ^{3/8}	6"
WOB (t)	5-25	15-22	5-20	3-12	2-5
RPM (tr /min)	90-130	100-130	50-140	140-190	80-90
Q(l/mn)	2000-4000	2800-3000	2800	1200-1800	700-900
ROP(m/h)	4-5	7-8	0.5-7	4-5	1-2

- **Phase 26" :**
 - Forage vertical jusqu'à la cote 478m.
 - Tubage 18"^{5/8} à cette cote, cimenté jusqu'en surface avec stinger.

Pour les raisons suivantes :

- Maintenir les couches de surfaces non consolidées.
- Isoler les nappes friatiques d'eau douce.
- Supporter tous les éléments de la tête de puits ainsi que tous les autres colonnes de tubage.

Phase 16" :

- Forage de 478m à 2247m.
- Tubage 13"^{3/8} 72# P110 à cette cote, avec accessoires reforable au PDC.
- Cimentation en un seul étage et test casing à 3250 psi (d=1.25).

Pour les raisons suivantes :

- D'éviter de poursuivre un forage dans un découvert présentant un certain nombre de dangers (éboulements) ;

Annexe

- D'isoler les formations contenant les fluides sous fortes ou faibles pressions (zones à pertes) en particulier elle permet le forage des zones de pressions incompatibles ;
- D'éviter la rupture des terrains autour du sabot de la première phase en cas d'éruption d'une formation abordée sans mise en place préalable d'une colonne technique.

Le sabot doit être placé :

Dans les formations dites couvertures que l'on trouve en barrière entre des réservoirs perméables de gradients différents ou non.

Phase 12''^{1/4}

- * Forage vertical de 2247m jusqu'à 3302m.
- * Tubage 9''^{5/8} jusqu'à la cote 3297m
- * Cimentation en un seul étage.
- * Test formation à 400 psi.

La colonne de tubage 9''^{5/8} a pour rôle d'isoler les formations LD2 du Lias ainsi les couches du Trias Salifère et surtout le TS2 (Argile fluentes) le Sabot 9''^{5/8} est posé dans le Trias argileux.

Phase 8''^{3/8}:

- * L'objectif de cette phase est de pénétrer 3 m dans le CAMBRIEN **Ra(ID)**.
- * Descendre de liner 7'' 32# P110 btc, jusqu'au 3411m
- * Cimentation de liner 7''.

Pour les raisons : d'isoler les formations à pression anormale et minimiser le risque de pertes de circulation dans le trias pour poursuivre le forage des objectifs pétroliers du trias, carbonifère et dévonien

- Le sabot de tubage sera posé vers 3411m afin d'éviter des pertes de circulation

Phase 6''

- L'objectif de cette phase est de faire un carottage dans le cambrien d'une longueur de 137m environ.

TUBAGE	OUTILS	dboue
<p>26" 6.6048 m 16 3/8" CSG</p> <p>478 m</p> <p>16" 4.064 m 13 3/8" CSG</p> <p>Albien</p> <p>2247 m</p> <p>12 1/4" 3.151 m LD1</p> <p>Sabot 9 5/8 2.413 m</p> <p>8 3/8 2.134 m LINER 7" 1.778 m</p> <p>Sabot 7" 1.778 m 3411 m</p>	<p>Tricône L115J</p> <p>PDC IADC S434</p> <p>PDC IADC M323</p> <p>PDC MA74PX</p> <p>CORE BIT XR+</p>	<p>Bentonitique d= 1.05</p> <p>Emulsion inverse d= 1.25</p> <p>Invermul d= 2.02</p> <p>Emulsion inverse d= 1.47</p> <p>Versadrill d= 0.88</p>

8 - Programme de Boue :

8.1. Les propriétés physico-chimiques de la Boue :

Les valeurs de différentes propriétés physico-chimique de la boue doit être choisie avec précisions comme indique dans les tableaux suivants pour chaque phase.

Tableau .02:Programme de boue de forage utilisé :

Interval Properties	26"	16"	12 "	8 3/8"	6"
Type du Fluide	Spud / Bentonite Mud	AVOIL-OBM	AVOIL-OBM	AVOIL-OBM	AVOIL-OBM
Densité (Kg/l)	1.05	1.02	2.02	1.47	0.88
Vm (sec)	60/90	53	53	50 /55	53
F(cc/30mn)	115	9	4/5	41	41
VP(cp)	44.5	16	37	15	15
YV(lb/100 ft ²)	73	18	18	10	10
Gels10"(lb/100ft ²)	44	13	8	7	7
Gels10'(lb/100ft ²)	53	17	17	10	10
Sol %	3	39	39	18	18
Sab %	0.5	0.4	0.4	0	-
PH	10-5	-	-	-	-
Oil/Water Ratio	-	70/30	85/15	89/11	89/11
Pb	2.1	2.5	3.5	2	2

Phase 26'' : La présence des sables non consolidés à 120-140m une barrière de calcaire (parfois quelques mètres) à 150m environ, et les calcaires dolomitiques du SENONIEN à 350m qui cause les pertes de circulation.

Cette boue possède les caractéristiques suivantes :

- * Elle permet de consolider les parois de la formation contenant des sables tout en formant un cake à cause de la filtration élevée (naturelle).
- * Exerce une pression hydrostatique à fin de tenir les parois du trou.
- * Une viscosité assez élevée ce qui permet d'avoir un bon nettoyage du trou, ainsi que sa rhéologie qui peut être ajuster d'une manière facile.
- * Eviter les pertes de circulation causées par l'utilisation des densités faibles.
- * Coût de revient assez faible et simplicité de fabrication.

Annexe

Phase 16'' : La boue utilisée à base d'huile à émulsionnée inverse ; elle choisie pour les raison suivantes :

- * Eviter les gonflements des argiles.
- * Résister aux contaminations.
- * Excellent pouvoir lubrifiant.
- * Limiter les coincements par pression différentielle.
- * Eviter le problème de corrosion.

Phase 12'' : La boue utilisée est boue à émulsionnée inverse qu'a des propriétés physico chimiques indiqués.

Phase 8^{3/8} : La boue est de type veradrill OBM relaxed system : c'est une boue à émulsion inverse.

Propriété physico chimique :

Phase 6'' :

La boue utilisée est de type versadrill et à un rapport O/W très élevé pour conserver les caractéristiques de réservoir.