REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

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

Département de forage et mécanique des chantiers pétroliers

MEMOIRE

MASTER PROFESSIONNEL

Spécialité : Hydrocarbures

Option : forage pétrolier

Présenté par : BENNADA Abderrahmane

KORTI Amara

BELGASMI Abderrahim

Thème

Calculs et évaluation de qualité de cimentation : comparaison entre les puits Ghardaïa nord-1 (GHAN-1) et TOUMIET-1 (TOUT-1)

Soutenu publiquement

Le : 15/ 06 /2019

Devant le jury :

Dr. MAMANOU Abdellatif	MC B	Président	UKM Ouargla
Dr. ABBAS Hadj abbas	MCB	Encadreur	UKM Ouargla
Mr. KHALIL Moulai Brahim	MC B	Examinateur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2018/ 2019

Remerciement

Tout d'abord, je remercie le de m'avoir

Donné la Puissance pour achever mes études supérieures.

Je remercie Mon promoteur Mr ***hadj abbas Abbas***

M'avoir encadré, aidé et orienté par ses conseils fructueux.

Je remercie tous les professeurs qui ont contribué À ma

Formation à L'université.

Sans oublier les personnels de chantier ***ENTP 161***

Qui me donne beaucoup des informations Ainsi qu'à Tous

Ceux qui ont contribué de près ou de loin à la Réalisation de

Ce modeste travail.

BENNADA ABDERRAHMANE

BELGASMI ABDERRAHIM

KORTI AMARA

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- *La cause de mon existance :*

  Ma très chère mère

  Mon très chèr père

- *A cher encadreur Mr Abbas Hadj Abbas*
- *Mes frères*
- *Mes soeurs.*
- *Mes deux grandes mère.*
- *Toute les famille bennada et les gents de Commune touggourt*
- *A toute personne connue bennada Abderrahmane*

Merci pour vous tous

Dédicace

Je dédie ce fruit de tant d'années d'études :

A ceux qui ont Consacré toute leurs vies pour la

réussite de leurs enfants, mes chers parents.

A Mes chers frères ABDEL HADI .HAMZA

A mes très chères sœurs.

A ma chère fiançais

A toute ma famille.

A cher encadreur Mr Abbas Hadj Abbas

A tous mes chers amis : Rahim, Ali, Mohammed, Ramzi,

Taher, Khaled, Nizar, Rami, Abadelwahab ,Moussa,Boubakar..

A mes collègues qui ont été très coopératifs et compréhensifs

Tout le long de la réalisation de ce travail.

Et A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Merci pour vous tous

Dédicace

Je dédie ce fruit de tant d'années d'études :

A ceux qui ont Consacré toute leurs vies pour la réussite de leurs enfants, mes chers parents.

A MON cher frère Amara.

A mes très chères sœurs.

A ma chère fiançais

A toute ma famille.

A cher encadreur Mr Abbas Hadj Abbas

A tous mes chers amis :Ali, Mohammed, Badrou, Aziz, Khaled, Nizar, Rami, Abadelwahab , lamin , Ramzi...

s collègues qui ont été très coopératifs et compréhensifs tout le long de la réalisation de ce travail.

Et A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Merci pour vous tous

Résumé : Cette étude représente la manière de réaliser une cimentation primaire de tubage 9 $^{5/8}$"du puits GHAN-1 et une cimentation étagée du puits TOUT-1, et celle de faire les calculs nécessaires (le volume de laitier, la masse de ciment, le volume d'eau de gâchage, le volume de chasse, la masse des additifs, le temps d'injection et la pression de refoulement), et on fait une corrélation entre les résultats. Après la réalisation et la prise de ciment, on essaie de reconnaître la façon de contrôler la qualité de la couche formée et son adhérence par le train de CBL (Ciment Bound Log) et VDL (Variable Density Log).

Mots clés : cimentation primaire, cimentation étagée, laitier, ciment, l'eau de gâchage, boue de chasse, additifs, temps d'injection, pression de refoulement, CBL, VDL.

ملخص :هذه الدراسة تتمثل في كيفية انجاز عمليه حقن سائل ذو خصائص فيزيائية في الفراغ الحلقي من اجل عزل الطبقات الأرضية من انهيار داخل البئرين TOUT-1و GHAN-1 وبعدها كيفية انجاز كل الحسابات اللازمة (حجم السائل، كتلة الاسمنت ,حجم ماء المزج ,حكم طين الدفع ,كتلة المواد الكيميائية المضافة ,مدة الحقن , ضغط دفع السائل) ثم اجراء مقارنة حول النتائج .وبعد الانتهاء من عملية الحقن وجفاف السائل نتعرف الى كيفية مراقبة جودة الطبقة المشكلة من طرف السائل بواسطة جهاز CBLو VDLالذي يعتمد على موجات الصوتية في العمل التي تعطينا معلومات حول نوعية وصلابة هذا السائل ذو الخصائص الفيزيائية.

كلمات مفتاحية: سائل ذو خصائص فزيائية، الفراغ الحلقي، ماء المزج، طين الدفع، مدة الحقن، ضغط دفع السائل، موجات صوتية، جفاف السائل.

Abstract : This study represents the way of the construction of a primary cementing of casing 9 $^{5/8}$ well GHAN-1 and staged cementing of well TOUT-1, and how to make calculations necessary (the volume of slag, mass, cement, the volume of mixing water, the volume of hunting, the mass of the additives, time of injection and discharge pressure) , then we do a correlation between these results. After realization and catch of cement, this last which will check by the train of CBL (Cement Bound Log) and VDL(Variable Density Log) which make known to us on the quality and the adherence of cement with the formation .

Key words: primary cementing, staged cementing, slag, mixing water, hunting additives time of injection, discharge pressure.

SOMMAIRE

Titres	Pages
Remerciements	
Dédicace	
Résume	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des sigles	
Résumé	
Introduction générale	1

Chapitre I : présentation des puits GHAN-1 et TOUT-1

I.1 présentation de puits GHAN-1 :	2
I.1.1 Situation géographique d'Oued Mya	2
I.1.2 Sommaire du puits	3
I.1.3 Récapitulation du temps	4
I.1.4. Programme de forage	6
I.2 présentation de puits TOUT-1	11
I.2.1 Situation géographique	11
I.2.2 Situation géologique	11
I.2.3 Développement de la région	12
I.2.4 Caractéristiques du réservoir	13
I.2.5 Sommaire du puits TOUT-1	13

Chapitre II : Généralité sur le forage rotary

II.1 Principe du forage rotary	17
II.2 Description d'un appareil de forage	18
II.2.1Les équipements de fond	18
II.2.2 Les équipements de surface	21
II.3 Les systèmes dans l'appareil de forage	22
II.3.1 Systèmes Levage	22
II.3.2 Systèmes de Rotation	25
II.3.3 Système circulation et pompage	26
II.3.4 Les systèmes de transmissions de puissance	27
II.3.5 Systèmes de sécurité	27
II.3.6 Paramètres de forage rotary	28

Chapitre III : Généralité sur le tubage et la cimentation

III.1 Tubage	29
III.1.1 Rôle du tubage :	29
III.1.2. Les différentes colonnes de tubage	30
III.1.3. Caractéristiques des tubages	30
III.1.4. Les contraintes sur les tubages	34
III.1.5.Centralisation de la colonne de tubage	35
III 1.6. Préparation de la colonne de tubage	35
III.2 La cimentation	36
III.2.1 Définition	36
III.2.2 But de la cimentation	36
III.2.3 Différent types de cimentation	36
III.2.4. Ciments et laitiers	41
III.2.5. Les caractéristiques du laitier de ciment	46
III.2.6. Classes de ciments API	48
III.2.7. Critères de choix du laitier	49
III.2.8. L'eau de gâchage (fabrication)	49
III.2.9. Additifs pour ciments	50
III.2.10. Fluides intermédiaire (Preflush et spacer)	52
III.2.11. Paramètres affectant la cimentation	53
III.2.12. Choix des fluides et des écoulements	55
III .2.13. Les équipements des préparations et pompage de ciment	55
III.3. Evaluation de la qualité de cimentation	59
III.3.1 Contrôle d'une cimentation	59
III.3.2 Vérification de la qualité de ciment	62

Chapitre IV : Etude de cas

IV.1 Détail de la phase 12 ¼ "	63
IV.1.1 Etudes de puits GHN-1	63
IV.1.2 Etudes de puits TOUT-1	72
IV.2 Corrélation et discutions des données et résultats	77
IV.2.1 Aspects compatibles	77
IV.2.2 Aspects différents	78
IV.2.3 Discutions	78
Conclusion générale	79

Liste des figures

Figure	Page
Fig. I.1. situations géographiques du bassin d'Oued Mya	2
Fig. I.2. schéma synoptique du forage GHAN-1	3
Fig. I.3. courbe explicative de processus de forage	4
Fig. I.4. Coupe lithologique du puits GHAN-1	5
Fig. I.5. Situation géographique de la région de haoud berkaoui.	11
Fig. I.6. Situation géologique de haoud berkaoui.	12
Fig. I.7. Localisation du puits TOUT-1	13
Fig. I.8. Courbe du temps de forage au puits TOUT-1	14
Fig. I.9. Coupe lithologique du puits TOUT-1	15
Fig. II.1. Outil tri-cones	20
Fig. II.2. Outil monobloc	20
Fig. II.3. Raccords (tool-joint)	20
Fig. II.4. Assemblage de fond	21
Fig. II.5. Description simplifiée d'un appareil de forge	21
Fig. II.6. Treuil de forage	23
Fig. II.7. Câble de forage	24
Fig. II.8. Système de mouflage	24
Fig. II.9. Matériels annexe de levage	24
Fig. II.10. La table de rotation.	25
Fig. II.11. Nomenclature de la table de rotation	25
Fig. II.12. Tige d’entraînement (Kelly)	26
Fig. II.13. Circulation de la boue	26
Fig. II.14. L’obturateur de sécurité B.O.P	27
Fig. II.15. Schéma représente poids sur l’outil	28
Fig. III.1. Différentes colonnes de tubage	30
Fig. III.2. Différents types de filetage API.	33
Fig. III.3. l’élongation en fonction d’élasticité	34
Fig. III.4. les types Centralisation de la colonne de tubage	35
Fig. III.5. Cimentation au Stinger	37

Fig. III.6. Déroulement d'une cimentation primaire	38
Fig. III.7. Déroulement de la cimentation étagé	39
Fig. III.8. Variation du rapport de débit en fonction de l'excentricité du casing	53
Fig. III.9. Effet de stand-off sur le déplacement de la boue	53
Fig. III.10. Effet de la rotation sur la cimentation.	54
Fig. III.11. Effet de canneling causé par la boue	54
Fig. III.12. Tète de cimentation.	56
Fig. III.13. Variation de la profondeur en fonction de la température pour un Test de thermométrie.	59
Fig. III.14. Tète de cimentation.	61
Fig. III.15. Principe du VDL	62
Fig. III.16. Exemple d'un bon CBL et d'un mauvais CBL	62
Fig. IV.1 : Schéma du puits GHAN-1	64
Fig.IV.2. Diagraphie de CBL-VDL montre une très bonne cimentation GHAN- 1	71
Fig.IV.3.Schéma du puits TOUT-1	73
Fig.IV.4Diagraphie de CBL-VDL montre une très bonne cimentation TOUT-1	77

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tab. I.1. Données du puits GHAN-1	3
Tab. I.2. Plan de GHAN-1	4
Tab. I.3. paramètres de la phase 26"	6
Tab. I.4. Paramètres du trépan dans la phase 26	6
Tab. I.5. conception de tubage de la phase 26"	6
Tab. I.6. programme du ciment	7
Tab. I.7. paramètres de la phase 16"	7
Tab. I.8. paramètres du trépan dans la phase 16"	7
Tab. I.9. conception du tubage de la phase 16"	8
Tab. I.10. programme du ciment	8
Tab. I.11. Paramètres de la phase 12"1/4	8
Tab. I.12. Paramètres du trépan dans la phase 12"1/4	9
Tab. I.13. Conception de tubage de la phase 12"1/4	9
Tab. I.14. Programme de ciment	9
Tab. I.15. Paramètres de forage de la phase 81/2"	10
Tab. I.16. Paramètres du trépan dans la phase 81/2"	10
Tab. I.17. Conception de tubage de la phase 81/2"	10
Tab. I.18. paramètre de ciment	10
Tab. I.19. développement de la région	12
Tab. III.1. Grades des tubages.	31
Tab. III.2. Longueurs des casings	31
Tab. III.3. Conditions de bonne qualité de ciment par diagraphie sonique CBL et VDL.	62
Tab. IV.1. longueur des casings	67
Tab. IV.2. Capacité les tubages	67
Tab. IV.3. Volume de laitiers	67
Tab. IV.4. Volume de boue de chasse	67
Tab. IV.5. Calcul de la quantité des additifs de la phase 9 $^{5/8"}$	68
Tab. IV.6. longueur des casings	74
Tab. IV.7. Capacité les tubages	75

Tab. IV.8. Volume de laitiers	75
Tab. IV.9. Volume de boue de chasse	75
Tab. IV.10. types et quantités des additifs du laitier de tête	76
Tab. IV.11. types et quantité des additifs du laitier de queue	76
Tab. IV.12. Les indices de similitudes	78
Tab. IV.13. Les aspects différents	78

NOMENCLATURE

API	American Petroleum Institut
bar	unité de préssion
MD	Measured Depth
BHA	BottomHoleAssembly
TVD	Trou Vertical Depth
Cm	centimètre
CBL	Cement Bond Log
d	densité
Dc	drill collar
Dp	drill pipe (tiges)
ft	feet
H	profondeur
HP	haute préssion
HT	haute temperature
Hw	heavyweight
TD	Trou Depth
in	inch
IF	internal flush
VDL	Variable Density Log
RC	Rayon Casing
RH	Rayon Hole
Kg	kilogramme
Kecr	coefficient d'écrasement
Kecl	coefficient d'éclatement
Ktra	coefficient de traction
L	longueur
MD	mudweight
Poise	unité de la viscosité
Psi	unité de préssion
Pieds	unité de longueur
Pt	poids de tiges

PV	Plastic viscosité
P110	grade 110
RPM	Rotate per minute
Sg	specific gravity
SPM	strokes par minute
Stb	stabilisateur
WOB	weight on bit
YP	Yield Point
GHAN-1	Ghardaïa nord
TOUT-1	Toumiet-1

Introduction générale :

Dans le monde actuel, le pétrole et le gaz naturel occupent une place essentielle parmi les sources d'énergie exploitées, et pour satisfaire les besoins de tout le monde en énergie, on prospecte, exploite actuellement des gisements situés à des profondeurs de plus en plus grandes où les caractéristiques posent des problèmes techniques difficiles.

Pour pouvoir arriver à ces grandes profondeurs, le puits est réalisé en étages, forme une structure télescopique renversée, lie le réservoir à la surface à l'aide des conduites bien cimentées.

Dans ce document qui constitue la mémoire de fin d'études, on met en étude l'opération du tubage et cimentation de la phase 12" ¼ et contrôle de leur qualité. Cette opération est réalisée dans le puits, GHAN-1 réalisé par l'appareil ENTP «TP 161 » et TOUT-1 réalisé par ENTP «TP 223» puis,on fait une corrélation entre les résultats et les types de ces deux opérations.

Pour cela on suggère le plan de travail suivant :

Chapitre I : présentation des puits GHAN-1 et TOUT-1

Chapitre II : généralités sur le forage rotary

Chapitre III : généralités sur le tubage et cimentation.

Chapitre IV : étude de cas des puits GHAN-1 et TOUT-1

Introduction :

Le bassin d'OUED-MYA représente l'un des basins les plus complexes du monde. Durant l'histoire géologique, ce basin a subi une évolution tectonique intense caractérisée par des phases compressives et distinctives.

Après plusieurs années de la mise en production du gisement, on a constaté que des ensembles de puits se comportent d'une manière indépendante les uns par rapport aux autres. D'où, la définition des zones dont les pressions moyennes évoluent d'une manière différente.

I.1 présentation du puits GHAN-1 :

I.1.1 Situation géographique d'Oued Mya:

Oued Mya est un bassin de la plate-forme saharienne, correspondant à la partie occidentale de la province triasique, elle est limitée au nord par les permis Talémazéne et Touggourt, à l'est par le champ de Hassi Messaoud, au nord-ouest par le champ de Hassi R'mel, et au sud elle est ouverte sur la dépression de Mouydir. Les limites géographiques se présentent comme les meilleurs repères : Les parallèles 31°15' et 33°00' limitent respectivement ensembles au sud et au nord, et les méridiens 6°15' et 3°30' limitent à l'est et à l'ouest, elle englobe les bloc :438-425-422-437-436- 3178-420-419-418-417 et 416, appartenant au Sonatrach. [1]

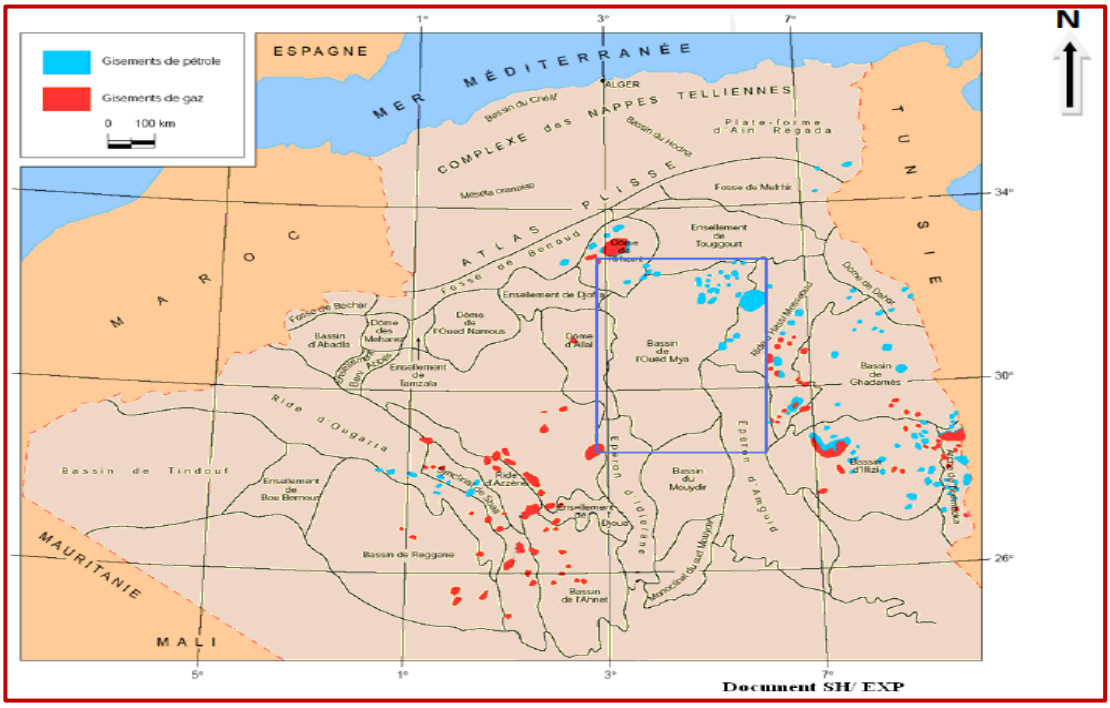

Figure I.1 : Situation géographiques du bassin d'Oued Mya [2]

I.1.2 Sommaire du puits :

I.1.2.1 Données du puits :

Tableau I.1 : Données du puits GHAN-1 [2]

Nom du puits	GHARDAIA NORD-1 (GHAN-1)
Champ	Ghardaïa II
Bloc	420a
Bassin	Oued Mya
Coordonnées UTM (F31)	X= 554 737,73m Y = 3 627 089,86m
Coordonnées de grille	Zs= 656,66m Zt= 664,28m
Profil	Vertical
Type de puits	Exploration
Profondeur totale	+/-2600m
But du reservoir	Trias T2A à 2270m, Trias T1B à 2294m
Durée	48.79days
Appareille de forage	TP161

Le tableau ci-dessus montre les données du puits GHAN-1. Il est dans le bassin (Oued Mya) champ (Ghardaïa II), type de puits (exploration) et la profondeur totale (+/- 2600 m).

I.1.2.2 Emplacement et location du puits GHAN-1 :

Depuis HASSI MESSAOUD, prenez la route qui mène à GHARDAIA sur une distance de 260 km et BERRIANE sur une distance de 22 km, la station de traitement SH distante de 38 km et la route balisée sur une distance de 17 km.

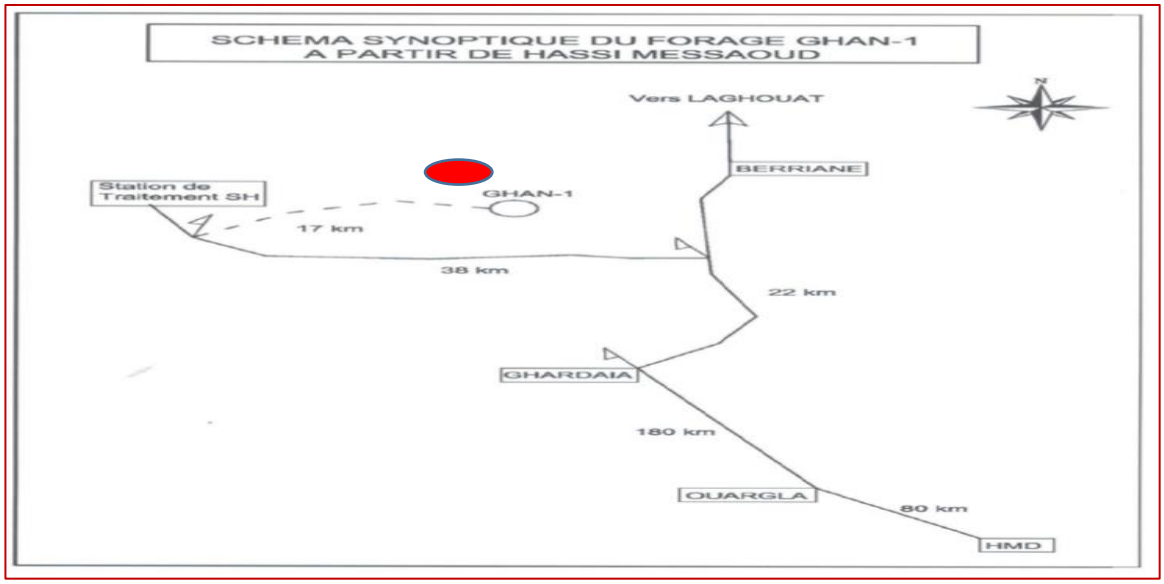

Figure I.2 : schéma synoptique du forage GHAN-1 [2]

I.1.3 Récapitulation du temps :

I.1.3.1 Courbe de forage :

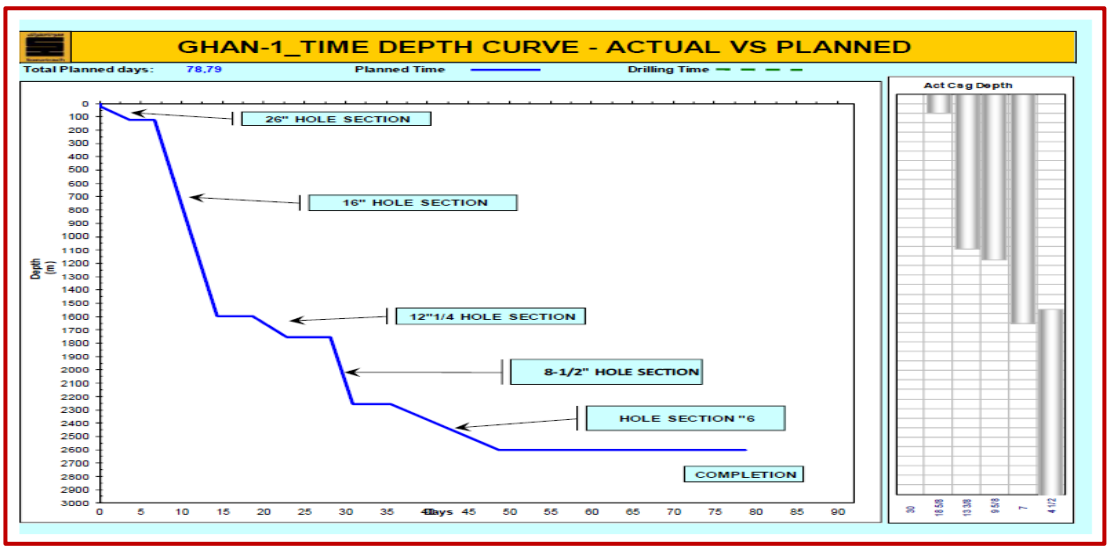

Figure I.3 : courbe explicative de processus de forage [2]

Le diagramme montre l'évolution de la profondeur du puits en +/-2600 avec le changement de jours jusqu'à atteindre environ 78,79 jours.

Tableau I.2 : Plan de GHAN-1 [2]

GHAN-1 PLAN			
ACTIVITY	DEPTH (m)	TIME (Days)	CUM Days
SPUD	0,00 m	0,00 days	0,00 days
DRILL 26in HOLE SECTION	126,00 m	3,65 days	3,65 days
FLAT TIME	126,00 m	3,02 days	6,66 days
DRILL 16iN HOLE SECTION	1597,00 m	7,66 days	14,32 days
FLAT TIME	1597,00 m	4,29 days	18,62 days
DRILL 12 1/4in HOLE SECTION	1756,00 m	4,14 days	22,76 days
FLAT TIME	1756,00 m	5,43 days	28,19 days
DRILL 8 1/2in HOLE SECTION	2256,00 m	2,74 days	30,93 days
FLAT TIME	2256,00 m	4,60 days	35,53 days
DRILL 6in HOLE SECTION	2600,00 m	13,26 days	48,79 days
COMPLETION	2600,00 m	30,00 days	78,79 days

Le tableau montre la durée de chaque phase du forage que vous utilisez depuis la surface jusqu'à la dernière profondeur.

I.1.3.2 Objectifs du puits GHAN-1 :

Les primaires objectifs du puits GHAN-1sont les suivants :

- Forer le puits sans accidents, incidents ou dommages causés à l'environnement.
- Terminer toutes les opérations conformément aux lignes directrices de la Sonatrach HSE standard.

- Forer (+ /-2600m) avec 48.79jours.
- Évaluer le Trias T2A, Trias T1B.
- Atteindre les objectifs d'acquisition de l'exploitation forestière.

I.1.3.3 Coupe lithologique :

Les couches du puits de chaque phase sont illustrées par coupe lithologique ci-dessous :

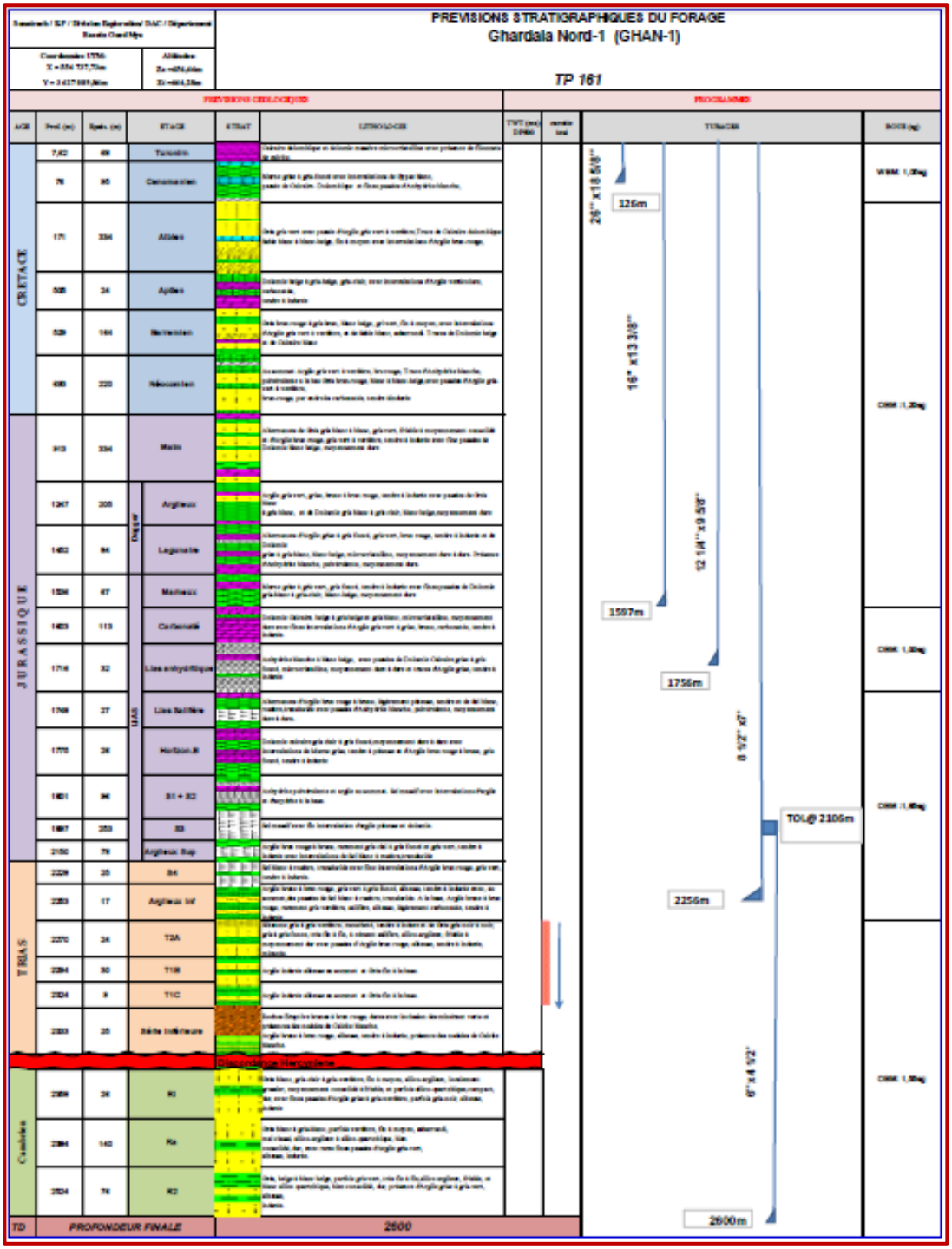

Figure I.4 : Coupe lithologique du puits GHAN-1 [2]

I.1.4.Programme de forage

Le programme de forage du champ d'Oued Mya comprend 5 phases :

I.1.4.1.PHASE 26":

But :

- forer verticalement la section depuis la surface jusqu'à ± 126 m et poser le tubage 18 $^{5/8''}$
- forer la section avec un seul trépan.
- cimenter le tubage 18 5/8" +/- 50 dans le cénomanien.

Paramètres du forage :

Les changements dans les paramètres du forage (WOB, RPM, Début) de la phase 26" sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.3 : paramètres de la phase 26"

Paramètres de forage	WOB(T)	RPM (tr/min)	Début (Lpm)
FORAGE	1-25	80-120	3000

Trépan :

Les paramètres d'outil utilisés dans la phase 26" sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.4 Paramètres du trépan dans la phase 26".

Type du trépan	Manufacture	Modèle	Etat	IADC	Buses (/32)
SB535C	**SMITH**	**TCI**	**NEW**	**535**	**1 X16+3X18**

Tubage :

Les caractéristiques du tubage utilisé dans la phase 26" sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.5 : conception de tubage de la phase 26"

Setting Depth	Top	Size	Wt	Grade	Conn	ID	Drift	Capacity	Safety Factors			
									Burst	Collapse	Tension	Triaxial
(m)	(m)	(in)	(lb/ft)			(in)	(in)	(ltr/m)				
126	0	18 5/8	87,8	J55/K55	BTC	17,755	17,567	159,74	2,35	4.99	5.42	3.12

Programme de cimentation :

Le type de ciment, le volume et la profondeur du tubage de la phase 26"sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.6 : programme du ciment [2]

tubage	Profondeur de sabot	Type ciment	volume
$18^{5/8}$ "	126	Lead-1.58 light to surface Tail-1.9 to 100m above shoe	Lead -35% oh excess Tail-35%oh excess

I.1.4.2 PHASE 16":

But :

- Forer la section de ± 126 m jusqu'à +/- 1597 m (top Lias carbonate).
- Obtenir un bon profil de trou et maintenir la verticalité.
- Exécuter et cimenter le tubage 13''3/8.

Paramètres du forage :

Les changements dans les paramètres du forage (WOB, RPM, Début) de la phase 16" sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.7 : paramètres de la phase 16"

Paramètre de forage	WOB	RPM	Début
Les équipements	2-4	50-60	2800
20 m de formation	14-16	100	2800
Le forage	15-20	130-140	2800

Trépan :

Les paramètres d'outil utilisés dans la phase 16" sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.8 : paramètres du trépan dans la phase 16"

Type du trépan	Manufacture	Modèle	Etat	IADC	Buses (/32)
TFF913S	**NOV**	**PDC**	**NEW**	**S432**	**9X12**

Tubage :

Les caractéristiques du tubage utilisé dans la phase 16" sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.9 : conception du tubage de la phase 16"

Setting Depth	Top	Size	Wt	Grade	Conn	ID	Drift	Capacity	Safety Factors			
									Burst	Collapse	Tension	Triaxial
(m)	(m)	(in)	(lb/ft)			(in)	(in)	(ltr/m)				
1597	0	$13^{3/8}$	68.0	N80	BTC	12.415	12,259	78.10	1.48	1.55	2.13	1.53

Programme de cimentation :

Le type de ciment, le volume et la profondeur du tubage de la phase 16"sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.10 : programme du ciment [2]

tubage	Profondeur de sabot	Type ciment	volume
$13^{3/8}$ "	1597	Lead-1.30 light F/top baremian to surface Tail-1.9 F/shoe to top baremian	Caliper +10%

I.1.4.3.PHASE 12"$^{1/4}$:

But :

- Forer la section de /- 1597m à /- 1756 (± 40m en lias anhydritique)
- Excuter et cimenter le 9 5/8”, de réaliser une meilleure zone isolée.

Paramètres de forage :

Les changements dans les paramètres du forage (WOB, RPM, Début) de la phase 12"$^{1/4}$ sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.11 : Paramètres de la phase 12"1/4

Paramètre de forage	WOB	RPM	Début
Les équipements	2-4	50-60	2600
20 m de formation	14-16	100	2600
Le forage	15-20	130-140	2600

Trépan :

Les paramètres d'outil utilisés dans la phase $12^{1/4}$ "sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.12 : Paramètres du trépan dans la phase $12"^{1/4}$

Type du trépan	Manufacture	Modèle	Etat	IADC	Buses (/32)
DSF813M	**NOV**	**PDC**	**RR**	**M423**	**8*12**

Tubage :

Les caractéristiques du tubage utilisé dans la phase $12"^{1/4}$ sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.13 : Conception de tubage de la phase $12"^{1/4}$

Setting Depth (m)	Top (m)	Size (in)	Wt (lb/ft)	Grade	Conn	ID (in)	Drift (in)	Capacity (ltr/m)	Safety Factors			
									Burst	Collapse	Tension	Triaxial
1756	0	9⅝	47,0	P110	BTC	8,681	8,625	38,19	2,05	1,42	2,93	2,98

Programme de cimentation :

Le type de ciment, le volume et la profondeur du tubage de la phase $12^{1/4}$"sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.14 : Programme de ciment [2]

tubage	Profondeur de sabot	Type ciment	volume
$9^{5/8"}$	1756	Tail-1.9 F/Botton to 200m Inside previous casing	C.+10%

II.1.4.4.PHASE 8 ½":

But :

- Forer la section de +/- 1756m jusqu'à +/- 2256m
- Exécuter et cimenter le casing 7".
- Couvrir les zones réservoirs.

Paramètres de forage :

Les changements dans les paramètres du forage (WOB, RPM, Début) de la phase 8 $"^{1/2}$ sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.15 : Paramètres de forage de la phase $8^{1/2"}$

Paramètre de forage	WOB	RPM	Début
Les équipements	2-4	40-50	1600
20 m de formation	04-06	70-90	1600
Le forage	10-17	120-140	1600

Trépan :

Les paramètres d'outil utilisés dans la phase $8^{1/2}$ "sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.16 : Paramètres du trépan dans la phase $8^{1/2"}$

Type du trépan	Manufacture	Modèle	Etat	IADC	Buses (/32)
MM66	**HDBS**	PDC	**NEW**	**S224**	**6X20**

Tubage :

Caractéristiques du tubage utilisé dans la phase $8^{"1/2}$sont montrès dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.17 : Conception de tubage de la phase $8^{1/2"}$

Setting Depth	Top	Size	Wt	Grade	Conn	ID	Drift	Capacity	Safety Factors			
									Burst	Collapse	Tension	Triaxial
(m)	(m)	(in)	(lb/ft)			(in)	(in)	(ltr/m)				
0	2056	7	29	P110	NVAM	6.184	6.059	19.38	2.25	1.18	6.53	1.63
2056	2256	7	32	P110	NVAM	6.094	6	18.22	2.33	1.21	6.71	1.69

Programme de cimentation :

Le type de ciment, le volume et la profondeur du tubage de la phase $8^{1/2}$"sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.18 : paramètre de ciment [2]

tubage	Profondeur de sabot	Type ciment	volume
7"	2256	Single stage-1.9 to 200m above $9^{5/8"}$ shoe	Caliper +15%

I.2 présentation du puits TOUT-1 :

I.2.1 Situation géographique :

La région de Haoud Berkaoui représente une des 10 (dix) principales zones productrices d'hydrocarbures du Sahara algérien.

Elle se situe à environ 800 Km au sud-est de la capitale Alger, à 100 km au nord-ouest de Hassi Massaoud et à 30 km d'Ouargla. Elle s'étend du sud-est de Ghardaïa jusqu'au champ extrême Boukhzana près de la route de Touggourt.

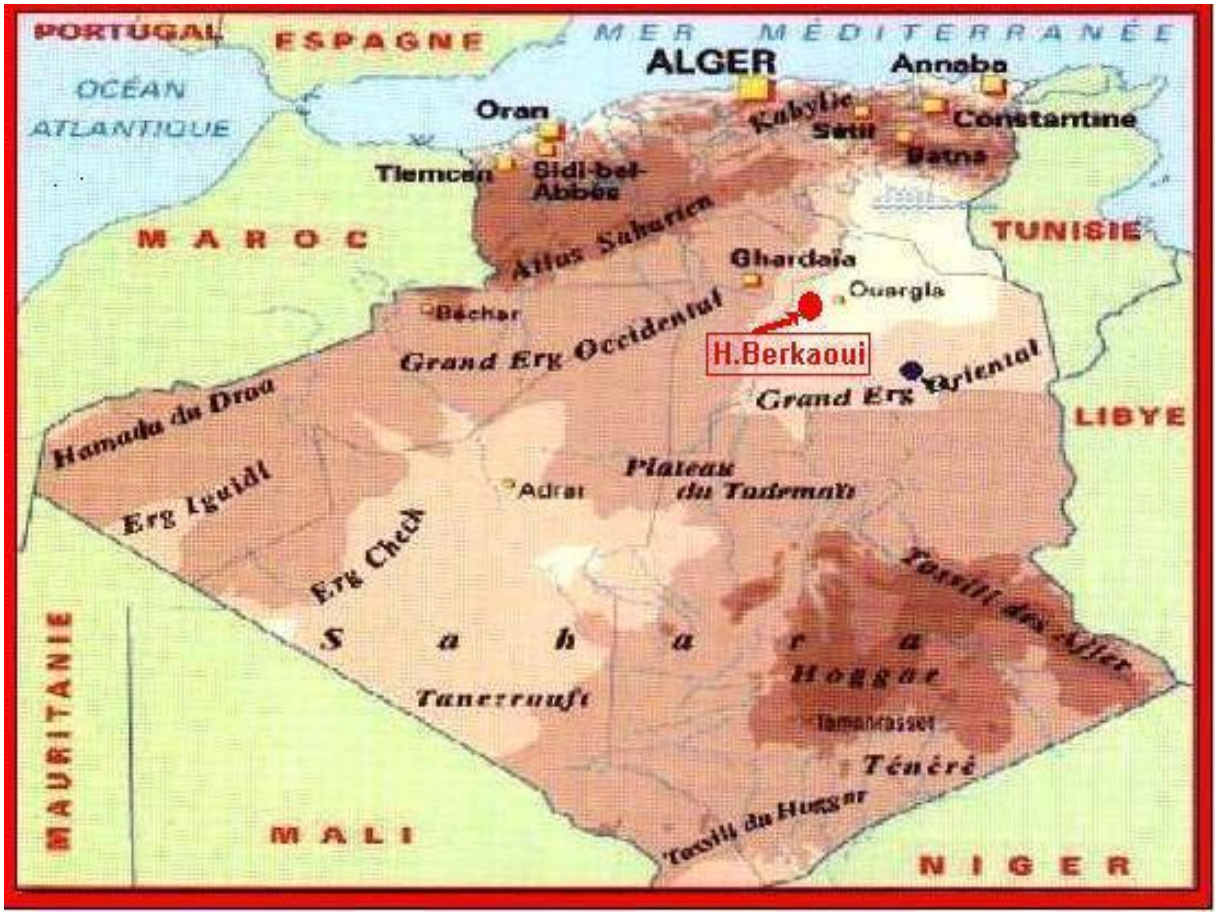

Figure I.5. Situation géographique de la région de haoud berkaoui. [3]

I.2.2 Situation géologique :

La région de Haoud Berkaoui fait partie du bassin de Oued-Mya, ce dernier se situe dans la partie nord du Sahara Algérien.

Ce bassin a la configuration d'une dépression allongée d'orientation nord-est/sud-ouest acquise au cours du paléozoïque. Il est limitée, au nord par la zone haute de Djamâa –Touggourt, constituée de terrains d'âge cambrien ; Au nord-ouest le môle de Talemzane (Hassi R'mel) ; À l'est, par la dorsale d'El-Agreb El-Gassi qui se prolonge jusqu'à Massaoud au nord et au sud

Par la dépression de Mouydir.

La région de Haoud- Berkaoui se situe au nord de la dépression d'Oued-Mya (Bloc 438). Cette structure se trouve dans la partie la plus subsidence orientée nord-est/sud-ouest.

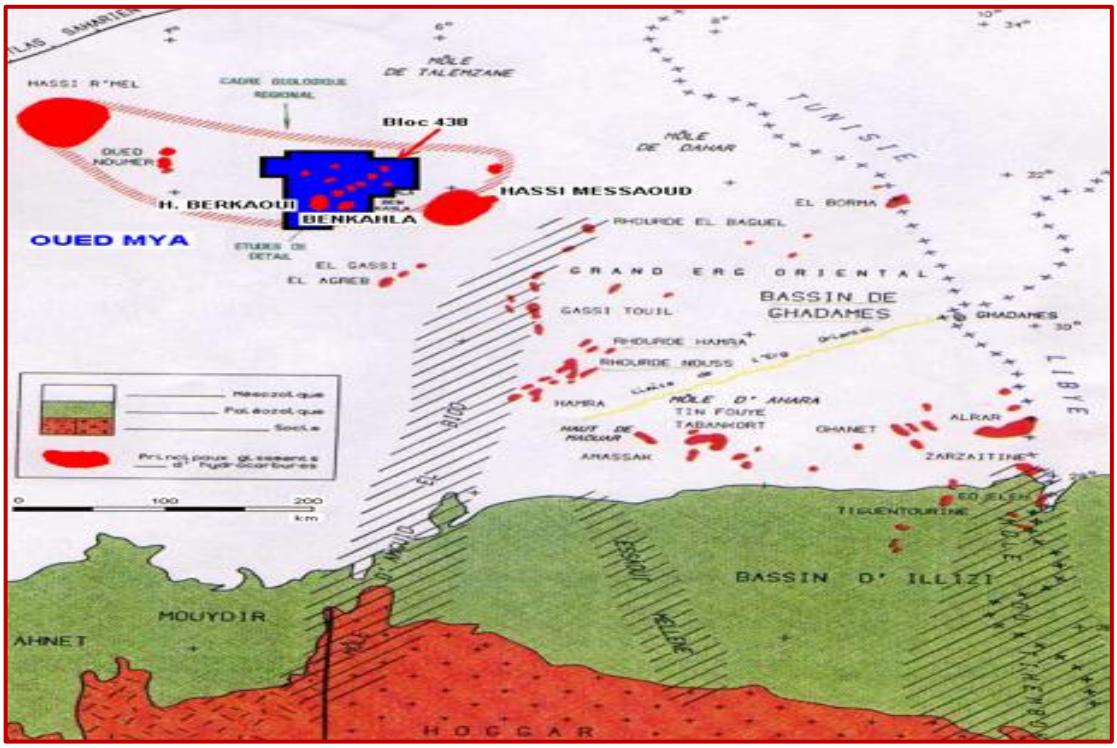

Figure I.6 : Situation géologique de haoud berkaoui.

I.2.3 Développement de la région :

Ce tableau représente l'histoire du développement de la région :

Tableau.I.19 : développement de la région

Champ	découvert	Date de mise en service	Le sondage	Nbre actuel des puits producteurs	Nbre actuel des puits injecteurs
Oulouga	1963	1966	OA#01	27	13
HBK	1965	1967	OK#101	8	8
BKH	1966	1971	OKP#24	4	3
Guellala	1969	1976	GLA#01.	9	6
GLA-NE	1972	1978	GLA-NE#01	4	0
BKHE	1999	2001	BKHE#01.	3	0

I.2.4 Caractéristiques du réservoir :

On distingue deux blocs au niveau du gisement de Haoud- Berkaoui, divisés par deux failles majeures d'orientation sud- ouest /nord- est (bloc des OKN a l'Est et bloc des OKJ à l'Ouest).

Le trias argilo-gréseux a présenté des indices importants d'hydrocarbures. Il est composé de T2, T1 et la série inférieure (SI) dont deux (02) sont productifs (T1 et SI), le troisième niveau (T2) est généralement compact.

I.2.5 Sommaire du puits TOUT-1

I.2.5.1 Localisation du puits TOUT-1 :

Le puits vertical TOUT-1 (TOUMIET-1) s'inscrit dans le cadre de développement de gisement de champ de HAOUD BERKAOUI, il se situe dans la périphérie nord du gisement de HAOUD BERKAOUI.

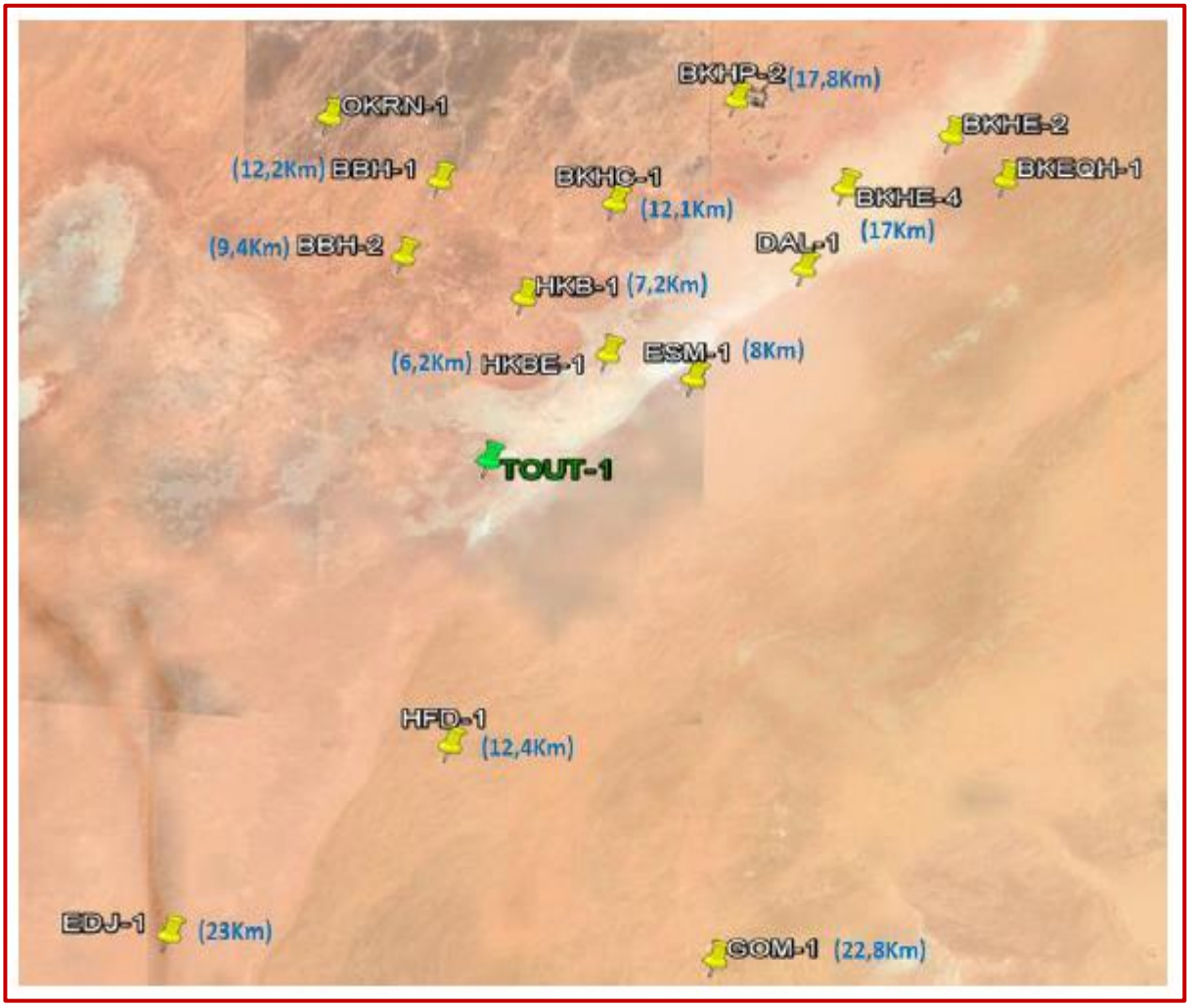

Figure I.7 : Localisation du puits TOUT-1[3]

I.2.5.2 Coordonnées d'implantation (UTM) :

X=702233,006 m Z_s= 165.42m

Y= 3495596,029m Z_t=176.12m

I.2.5.3 Coordonnées géographiques :

M=05°07' 51",20062" E

L= 31°34' 15",87533" N

I.2.5.4 Estimation du temps de forage au puits TOUT-1 :

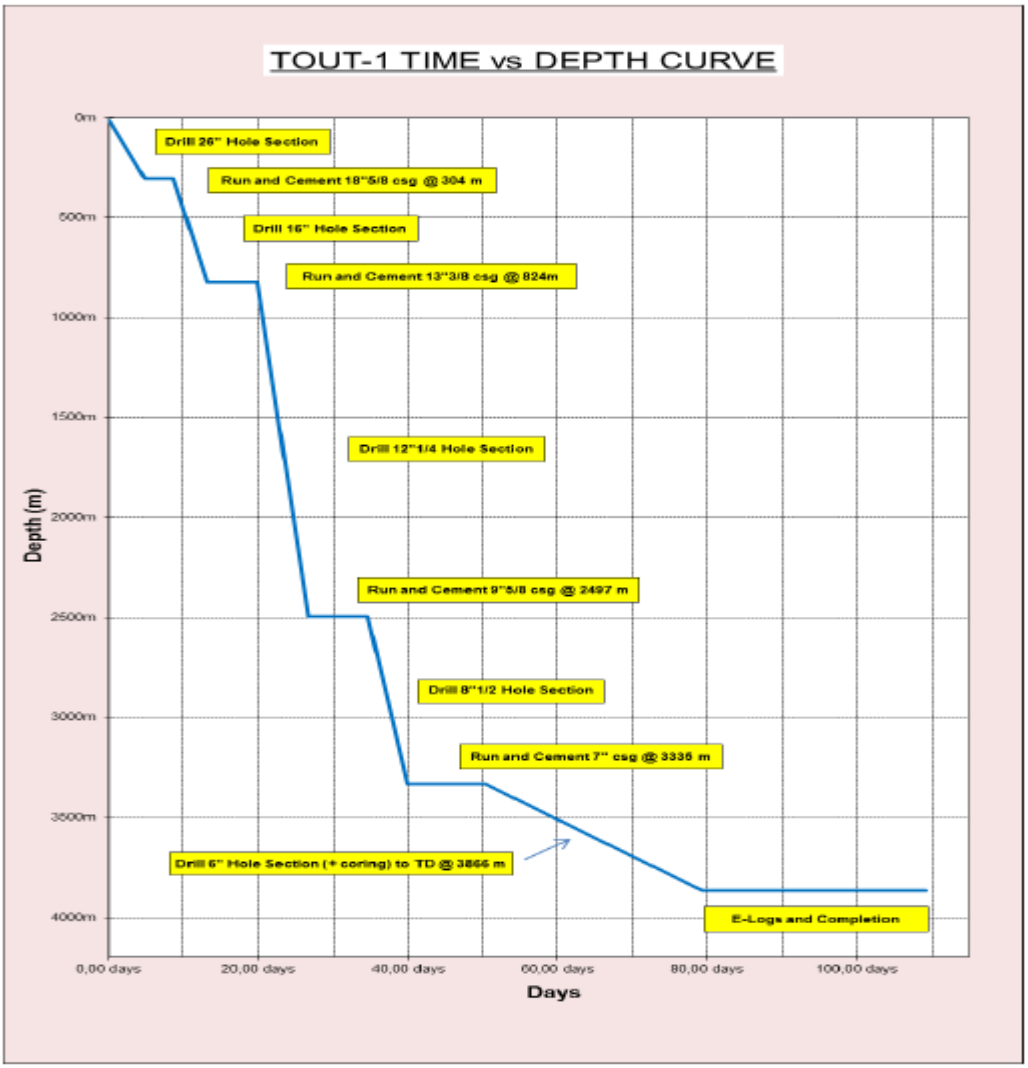

Figure.I.8 : Courbe du temps de forage au puits TOUT-1

Le diagramme montre l'évolution de la profondeur du puits en +/-3866m avec le changement de jours jusqu'à atteindre environ 79,30 jours.

I.2.5.5 Stratigraphie du champ de puits TOUT-1 :

La figure suivante représente la coupe lithologique du puits TOUT-1 :

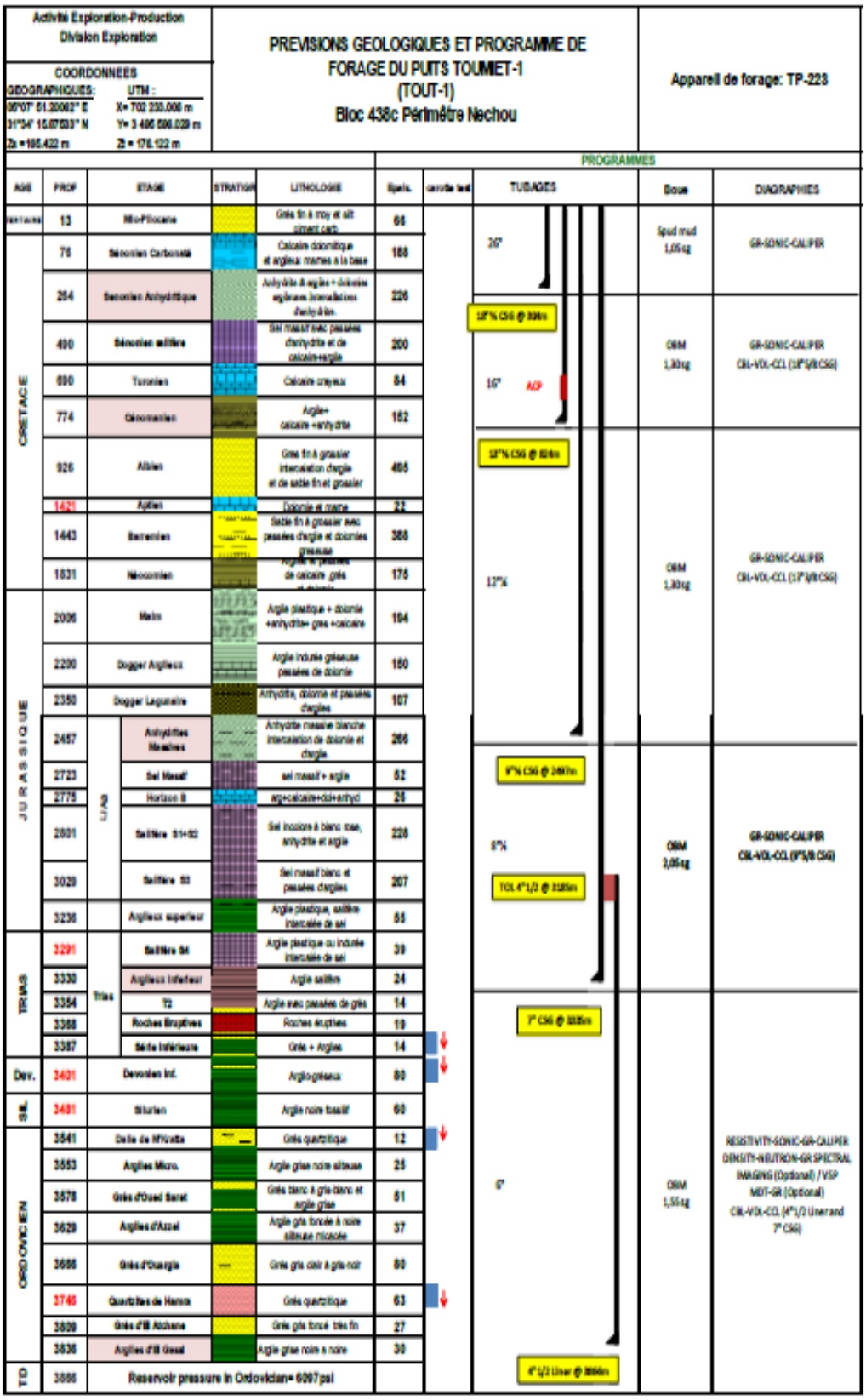

Figure.I.9 : Coupe lithologique du puits TOUT-1 [3]

I.2.5.6 Aperçu sur le forage :

Tous les puits à HBK sont fores verticalement, sauf quelques puits qui ont subit des faibles déviations. Le puits TOUT-1 c'est un puits exploration de bassin oued mya , Le programme de forage est comme la suite :

- **Phase de démarrage (26'')** : à environ ± 304 m
- **Phase de forage 17''$^{1/2}$ ou 16 ''** : à environ ± 813 m
- **Phase de forage 12''1/4** : à environ ± 2513 m
- **Phase de forage 8''1/2** : fond à ± 3866 m
- **Phase 6''** : c'est la phase la plus intéressante qui traverse le réservoir.

L'objectif principal de la phase 6'' est la Série Inférieure du Trias. Les Grès du réservoir T1 constituent un objectif secondaire dans le cas où le tubage 7'' est posé dans le T2.

La boue de cette phase est alourdie avec du Carbonate de Calcium (CaCo3), produit Acidifiable qui n'endommage pas le réservoir. [3]

Introduction

Le forage est l'opération de désagrégation mécanique des roches en vue de pénétrer progressivement dans le sous-sol et d'atteindre l'aquifère situé à une certaine profondeur. Le forage est une activité importante dans la recherche et l'exploitation des hydrocarbures. Il complète la prospection géologique et géophysique, Il précède la mise en production des hydrocarbures.

Un processus de forage est un dispositif qui assure l'extraction de la matiere pour realiser un puits .Un grand nombre de puits modernes sont des puits fores, par percussion d'un outil dans le sol ex : le Battage-Havage, ou par l'action rotative d'un outil coupant tournant autour d'un axe vertical ex : Tariere, Rotary, ou bien une combinaison des deux actions ex : Marteau fond trou. Dans l'industrie petroliere le systeme de forage le plus repondu se nomme : systeme de forage rotary [4].

II.1 Principe du forage rotary

La méthode rotary consiste à utiliser des trépans à dents tricône ou des trépans monoblocs comme les outils à diamant, sur lesquels on applique une force procurée par un poids tout en les entraînant en rotation. L'avantage de cette technique est de pouvoir injecter en continu un fluide au niveau de l'outil destructif de la formation pour emporter les débris hors du trou grâce au courant ascensionnel de ce fluide vers la surface.

La sonde de forage rotary est l'appareillage nécessaire à la réalisation des trois fonctions suivantes : Poids sur l'outil ; vitesse de rotation de l'outil ; Injection d'un fluide. Ce sont les masses tiges qui vissées au-dessus de l'outil, appuient sur celui-ci ; ces masse tiges prolongées jusqu'en surface par des tiges, constituent la garniture de forage. Elle est mise en rotation dans son ensemble grâce à la table de rotation et par l'intermédiaire de la tige d'entraînement.

La totalité de la garniture de forage est percée en son centre afin de canaliser le fluide de forage vers l'outil, un joint rotatif étanche "tète d'injection" doit couronner la tige d'entraînement et permettre la liaison entre la conduite de refoulement des pompes de forage et l'intérieure de la garniture.

Un appareil de forage est nécessaire pour soutenir le poids de la garniture et manœuvrer celle-ci :c'est le rôle du derrick, du crochet de forage et du treuil.

L'appareil de forage est complété d'une installation nécessaire aux traitements du fluide de retour en surface, d'un stockage de tubulaires et des abris de chantier [5].

II.2 Description d'un appareil de forage

L'appareil de forage, ou plus globalement le chantier de forage est constitué d'un ensemble d'équipements, des techniques opératoires et un personnel très qualifié.

On classe généralement les appareils de forage rotary on quatre catégories qui sont définies par les profondeurs limites qu'ils peuvent atteindre avec des tiges 4 1/2". On distingue :

- Les appareils légers : pour les profondeurs inférieures à 1200 m. ces appareils sont le plus souvent portables ou semi-portables.
- Les appareils moyens : pour les profondeurs comprises entre 1200 et 2500 m.
- Les appareils lourds : pour les profondeurs comprises entre 2500 et 4000 m.
- Les appareils ultras- lourd : pour les profondeurs supérieures à 4000 m.

Ces performances de profondeur se traduisent par un poids et une puissance qui caractérise le critère de choix d'un appareil de forage [6].

L'installation de l'appareil de forage est formée par un ensemble des équipements complexes comprenant des mécanismes liés entre eux pour accomplir une fonction bien déterminée dite forage d'un puits.

Les principaux éléments d'un appareil de forage sont :

II.2.1 Les équipements de fond

Le forage rotary exige l'utilisation d'un arbre de forage creux appelé garniture, qui a pour principales fonctions :

- entraîner l'outil en rotation.
- appliquer un certain effort sur l'outil.
- apporter l'énergie hydraulique nécessaire à l'évacuation des déblais (canaliser la boue de forage) [7].

Une garniture de forage est constituée des éléments suivants :

II.2.1.1 Tiges de forage (Drill Pipe)

C'est la partie la plus longue de la garniture, elle est constituée d'une série Importante de tubes minces d'acier qui s'étendent jusqu'à la surface et dont le rôle est de transmettre le couple vers l'outil et de soutenir plus ou moins le train de masses tiges. Chaque tige est munie à ses extrémités de renflements appelés tool-joint (TJ) servant pour le vissage des tiges entre elles et comme points d'appui du train de tiges sur la paroi de puits [8].

II.2.1.2 Masse tiges (Drill collars)

Les masse-tiges permettent de :

- mettre du poids sur l'outil pour éviter de faire travailler les tiges de forage en compression. Le poids utilisable des masse-tiges ne devra pas excéder 80% de leur poids total dans la boue ;
- jouer le rôle du plomb du fil à plomb pour forer un trou aussi droit et vertical que possible [7].

II.2.1.3 Outil de forage (rock bit)

Choisir l'outil de forage fait partie intégrante de l'optimisation des opérations de Forage car il est impératif de trouver l'outil qui accomplit au mieux sa tâche tout en forant le plus rapidement et le plus longtemps possible. Il existe une variété d'outils de forage, mais on distingue généralement deux classes principales : [9]

- **Outil tri-cônes (à molette)**

  Un outil à molettes est constitué de trois parties principales : les molettes, les roulements et le corps de l'outil. Les molettes présentent des rangées circonférentielles de dents s'intercalant entre les rangées de dents des cônes adjacents. Les dents sont soit en acier usinées dans le cône, soit des picots de carbure de tungstène sertis dans des perçages à la surface des cônes [5].

  Le principal mode de destruction de la roche, par les taillants fixés sur les molettes, est le poinçonnement. Il se déroule par la pénétration verticale du taillant dans la roche sous l'effet d'un effort normal créant un champ de contraintes au voisinage du taillant. Lorsque les limites à la rupture sont atteintes un déblai se produit. Ce type de trépan est particulièrement adapté lorsque les roches à forer présentent une forte dureté [10].

- **Outil monobloc (à diamant)**

  Les outils diamantés sont de deux types, à diamant naturel ou synthétique (PDC: Polycrystalline Diamond Compact, ou TSP :Thermally Stable Polycrystalline). Ces types sont spécifiques par la nature des éléments de coupe qui détruise la roche de manière mécaniquement différente : le diamant naturel abrase la roche et traille comme une macro meule, les diamants polycristallins (PDC, TSP) cisaillent la roche en découpant des copeaux comme un outil de tournage des métaux [5].

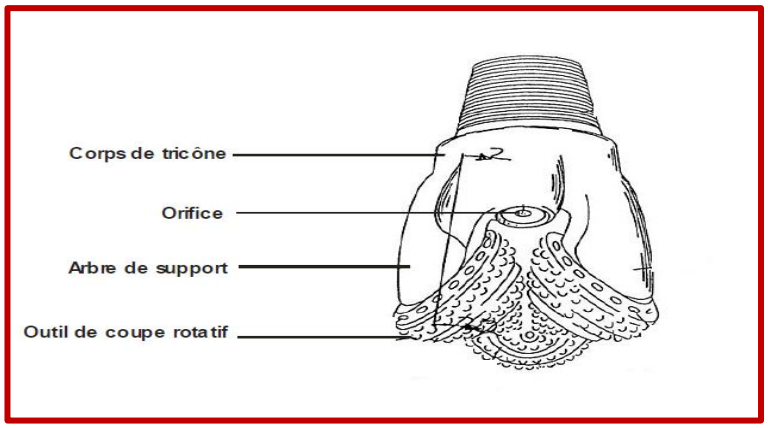

Figure. II.1 : Outil tri-cones [5].

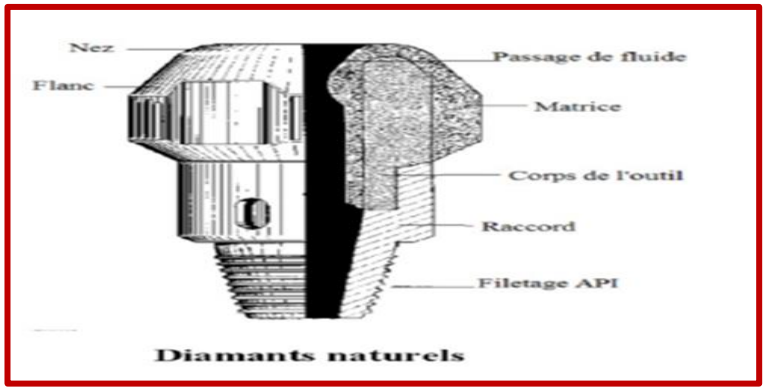

Figure. II.2 : Outil monobloc [4].

II.2.1.4 Les équipements auxiliaires

Composés des stabilisateurs (incorporés à la garniture de forage au niveau des masses tiges afin de garder le contrôle sur la trajectoire de l'outil), des amortisseurs de choc, et des raccords divers [4].

Figure. II.3 : Raccords (tool-joint)

II.2.1.5 BHA (Bottom Hole Assembly)

L'assemblage de fond ou BHA (Bottom Hole Assembly) est la partie inférieure de la garniture de forage, elle est principalement constituée de l'outil de forage, des masses tiges et des stabilisateurs. La BHA a un effet prépondérant sur le comportement directionnel du système de forage [11].

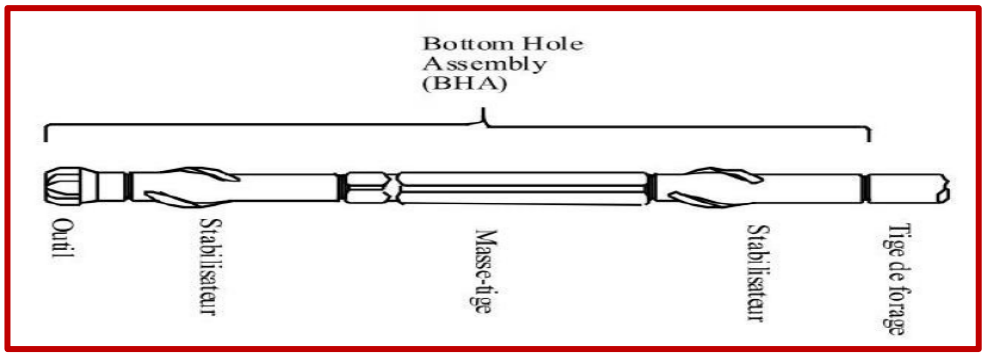

Figure. II.4 : Assemblage de fond [11].

II.2.2 Les équipements de surface

Cette catégorie est repartie en plusieurs groupes mettant en oeuvre l'outil de forage et assurent la sécurité du puits.

- Moteurs (groupe de force)
- Transmission de force (sortie des moteurs)
- Transmission des pompes de forage
- Pompes de forage
- Cache des du groupe de force
- Constructions d'habitation
- Bacs à boue de forage
- Plancher du groupe de force et de la table de rotation
- Bloc de décantation de la boue
- Tréteaux pour tiges de forage
- Pont
- pied du mat Train de sonde.
- Élévateur
- Moufle mobile
- Passerelle d'accrochage,
- Câble de forage
- Plate-forme
- Moufle fixe
- Plancher de gerbage
- Table de rotation
- Treuil auxiliaire (cabestan)
- Treuil principal
- Boite de vitesse

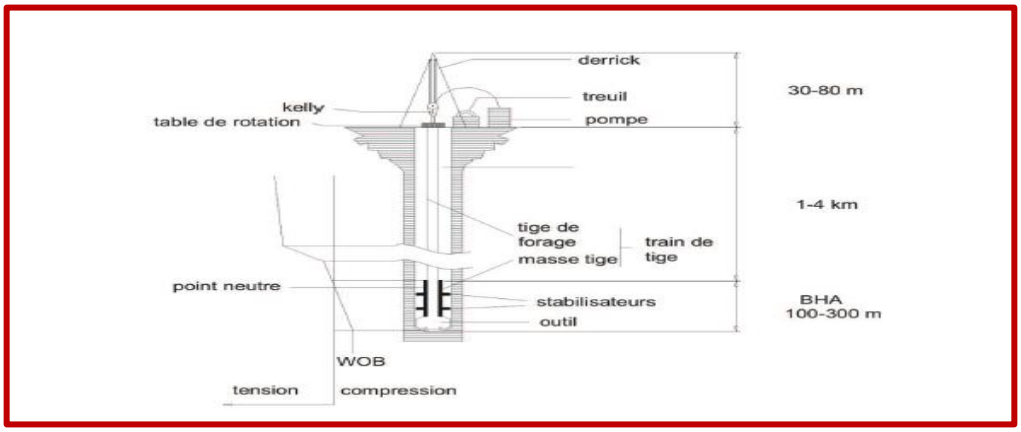

Figure. II.5 : Description simplifiée d'un appareil de forge [5].

II.3 Les systèmes dans l'appareil de forage

II.3.1 systèmes Levage

Cette fonction sert à assurer les manoeuvres de descente et de remontée. Elle est principalement composée de :

II.3.1.1 Structure de la tour de forage

Il existe trois grandes catégories de structures : la tour, le mât et le mât haubané monté sur une remorque, ces structures ont des caractéristiques techniques spécifiques qui ont un rôle commun pendant le forage.

- **La tour**

  C'est la plus ancienne forme qui dérive de la tour construite en bois. Elle est en forme de pyramide très pointue, dont les quatre pieds s'appuient sur les sommets d'un carré, cette surface sera le plancher de travail.

- **Le mât**

  Le mât est une structure en forme de A très pointu. Il a la particularité d'être articulé à sa base ce qui lui permet d'être assemblé ou démonté horizontalement puis relevé en position verticale en utilisant le treuil de forage et un câble de relevage spécial.

- **Le mât haubané monté sur remorque**

  C'est le domaine des appareils légers et des appareils spécialisés dans le work-over.

- **Les substructures**

  Ces constructions répondant du besoin de surélévation du planché de forage pour laisser la place aux empilages de tête de puits ainsi que le BOP. Elles pouvant être indépendantes du mât de levage. La substructure comprend 4 supports métalliques principaux destinés à recevoir les 4 fers d'angle du derrick et qui reposent sur le sol par des plaques métalliques. Ces 4 supports sont reliés entre eux par des fers horizontaux et des cornières entrecroisées.

II.3.1.2 La mécanique de levage

II.3.1.2.1 Le treuil de forage (draw work)

Le treuil de forage est destiné à assurer les manoeuvres de remontée et de descente des tiges. Il est considéré comme le coeur d'un appareil de forage, puisque c'est la capacité du treuil qui caractérise la classe de profondeur des forages que l'on pourra effectuer [5].

Le treuil de forage comprend de façon générale :

- L'arbre-tambour portant le tambour d'enroulement du câble avec de part et d'autre les tambours de freins.
- L'arbre des cabestans qui porte d'un coté une poupée de cabestan, de l'autre d'un cabestan automatique, et au milieu le tambour de curage .
- Les arbres de la boite de vitesses (arbre intermédiaire et arbre d'attaque) [6].

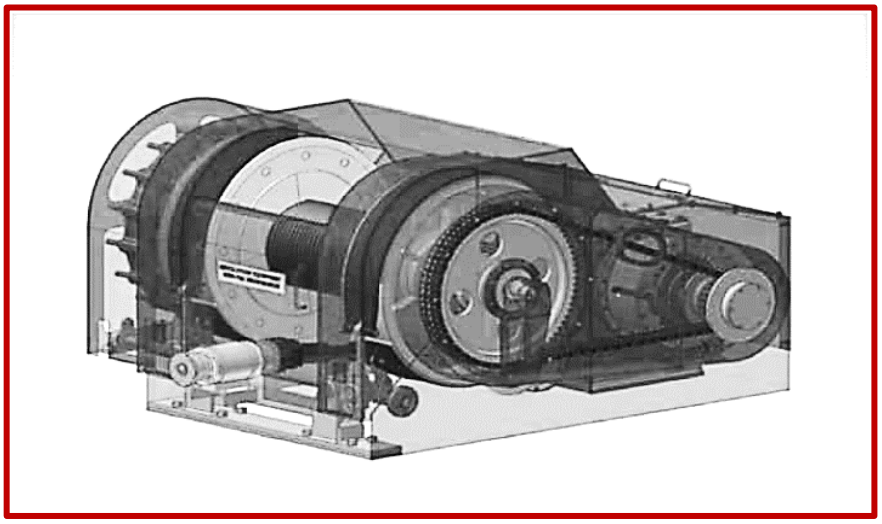

Figure. II.6 : Treuil de forage

II.3.1.2.2 Le mouflage

C'est un mécanisme de transmission du mouvement constitué de deux moufles, l'un fixe, l'autre mobile, contenant chacun un nombre arbitraire de poulies, et d'une corde qui les relie. Il sert à réduire l'effort nécessaire (ou démultiplier la force utilisée) pour rapprocher les deux groupes de poulies [4], il comprend :

- **Le moufle fixe (crown block)** : formé d'un certain nombre de poulies et placé au sommet du mât, il possède une poulie de plus que le moufle mobile,
- **Le moufle mobile (travelling block)** : formé également d'un certain nombre de poulies par lesquelles passe le câble de forage, il se déplace sur une certaine hauteur entre le plancher de travail et le moufle fixe. Il comporte à sa partie inférieure un crochet (hook) qui sert à la suspension de la garniture
  Pendant le forage.
- **Le câble (DRILING LINE)** : il est constitué de plusieurs torons disposés en spirale autour d'une âme, chaque toron est lui-même constitué de plusieurs fils calibrés, également disposés en hélice sur plusieurs couches [12].

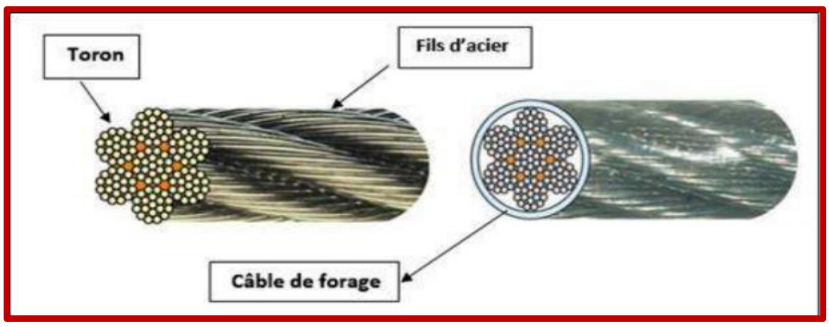

Figure II.7 : Câble de forage.

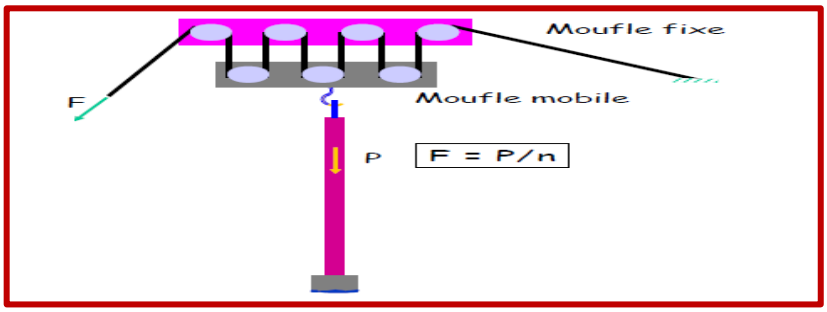

Figure II.8 : Système de mouflage

II.3.1.2.3 Le crochet de levage

Se trouve suspendu directement au moufle mobile. Un système de roulement à billes permet la rotation du crochet autour de son axe sans entrainer celle du moufle mobile. Cette rotation est néanmoins limitée en partie par un système de verrouillage. Un ressort puissant permet à chaque opération de dévissage des éléments de train de sonde un dégagement vers le haut de la partie supérieure, ce qui évite la détérioration de filetage [6].

II.3.1.2.4 Les outils de plancher

Pour les manoeuvres de changement d'outils, de descente de tubage, ainsi que pour les ajouts de tiges en cours de forage, on utilise du matériel de plancher que l'appelle matériel de manoeuvre, ce sont :

- les clés,
- les cales ou coins de retenue,
- les élévateurs,
- les clés pneumatiques [13].

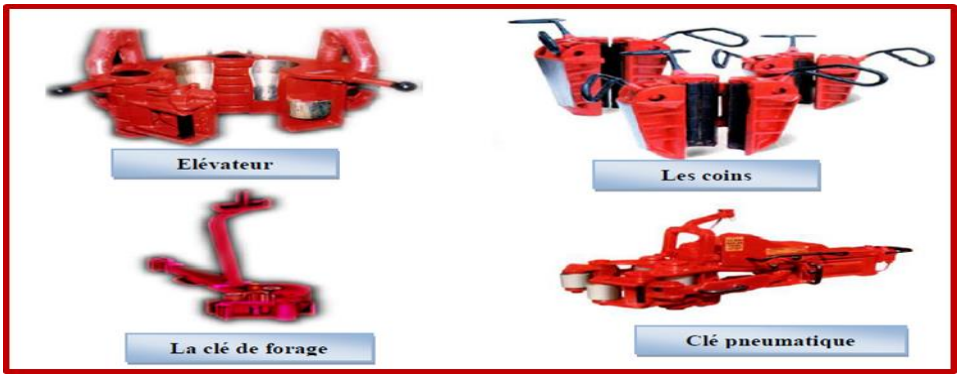

Figure II.9 : Matériels annexe de levage [13].

II.3.2 Systèmes de Rotation

II.3.2.1 Table de rotation (Rotary table)

Il est constitué d'une table de rotation, d'une tige d'entraînement à section carré (kelly) ainsi que d'une tête d'injection qui peut être motorisée (TopDrive).

Pour faire tourner l'outil, on visse au sommet des tiges, de forme cylindrique, une autre tige de section carrée ou hexagonale, appelée tige d'entraînement (kelly), et on l'introduit dans un moyeu appelé table de rotation, elle tourne à des vitesses 40 à 500 tr/min [12].

Une table de rotation se compose d'un bâti fixe supportant une partie mobile intérieur reposant sur la partie fixe par l'intermédiaire d'un roulement à billes principale.

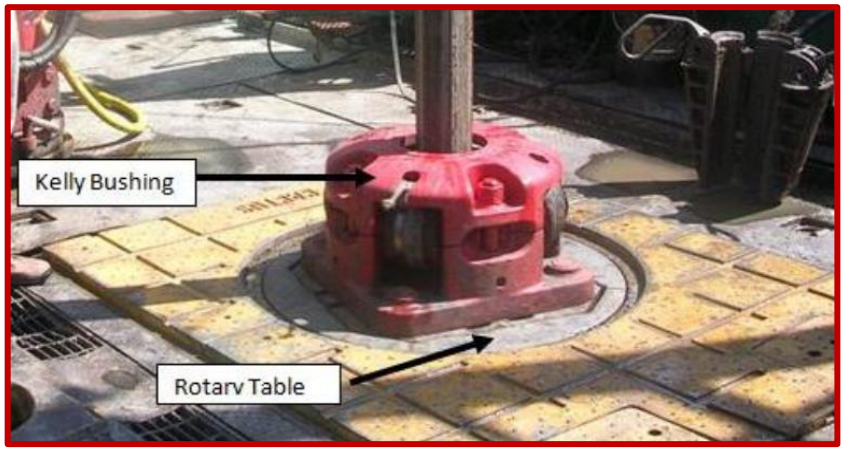

Fig. II.10 : La table de rotation.

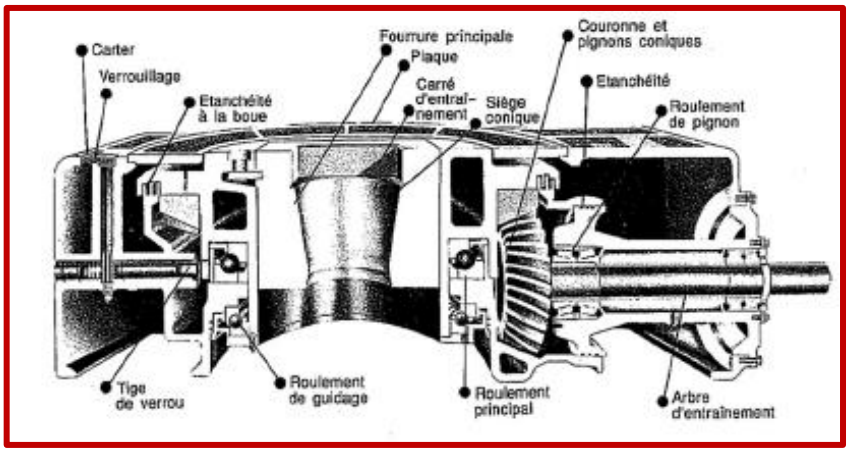

Fig. II.11 : Nomenclature de la table de rotation

II.3.2.2 La tête d'injection :

La tête d'injection représente un mécanisme qui relie le mouflage non tournant à la partie qui tourne au cours de forage ; donc elle appartient autant à l'outillage de circulation de boue qu'à l'outillage de rotation, en effet la tête d'injection joue un double rôle :

- Permet la circulation de la boue jusqu'au trépan, animé d'un mouvement de rotation.
- Supporte le poids de la garniture pendant le forage [6].

II.3.2.3 Tige d'entraînement (Kelly)

De section carrée, hexagonale ou triangulaire, elle est entrainée en rotation par la table

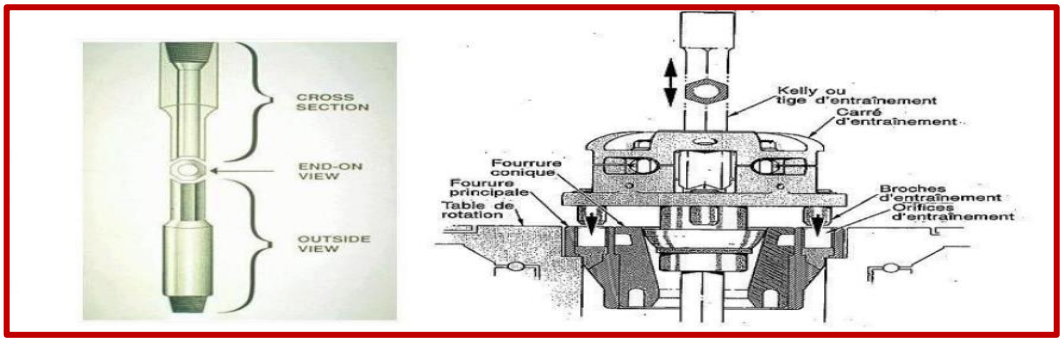

Figure. II.12 : Tige d'entraînement (Kelly) [4].

II.3.3 Système circulation et pompage

II.3.3.1 Les pompe de forage

Ces sont des pompes alternatives à pistons, le mouvement alternatif des pistons étant produit par le système classique de la bielle et d'un vilebrequin. Ces pompes de principe volumétriques fournissent un debit qui directement fonction de la ctlindree de la pompe et du regime de rotation du vilebrequin.pour regler le debit les foreurs comptent les cycles par minute ce qu'ils definissent par coups de pompes a la minute.

II.3.3.2 Équipement de pompage et de circulation

Les équipements de pompage et de circulation assure l'acheminement du fluide de forage (la boue) depuis l'aspiration de la pompe jusqu'au retour aux bassins. La boue est fabriquée dans des bassins de grande capacité, elle est ensuite aspirée par des pompes (pompes à boue) et refoulée dans les tiges creuses (au niveau de la tête d'injection), elle descend le long de la garniture de forage, sort par les orifices de l'outil, remonte dans l'espace annulaire entre la garniture de forage et le puits jusqu'en surface. Là, elle est recueillie dans un tube vertical (tube fontaine), puis acheminée par un autre horizontal (goulotte) vers des tamis vibrants, pour être débarrassée des déblais, avant d'être réinjectée dans le puits.

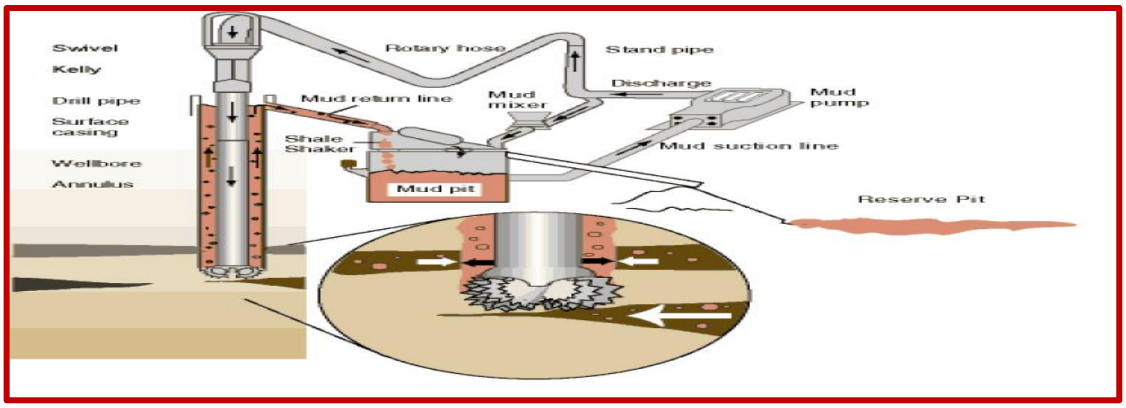

Figure. II.13 : Circulation de la boue [5].

II.3.4 Les systèmes de transmissions de puissance

Le moteurs diesel est la source initiale d'énergie, mais on peut rencontrer également sur des plates-formes de production l'utilisation de puissance fournie par des turbines à gaz et même parfois le raccordement du chantier de forage au réseau de distribution électrique ; mais même si ce système présente des avantages majeurs tels qu'une énergie peu coûteuse et silencieuse, il modifie le caractère autonome du chantier de forage. D'autant plus que le mode de fonctionnement procure des appels de puissance dont la répercussion sur le réseau de distribution n'est pas acceptable.

L'énergie produite par des moteurs diesels, est acheminée sous forme électrique ou mécanique vers les différents systèmes de l'installation : pompe à boue, treuil et table de rotation. L'énergie électrique est produite par un ensemble de génératrices à courant continu et/ou des alternateurs, entraîné par les moteurs diesels, cette énergie électrique est ensuite utilisé pour alimenter les moteurs électriques alternatifs ou à courant continue, les accessoires et l'éclairage via des convertisseurs électriques [5].

II.3.5 Systèmes de sécurité

Au forage des puits aux gisements où l'on suppose la présence d'une pression élevée des couches, afin d'éviter une éruption de gaz et d'huile, la tête de puits est munie de dispositifs d'étanchéité de sécurité appelés obturateurs de sécurité (B.O.P).

II.3.5.1 L'obturateur de sécurité

Est monté sur la bride d'une colonne intermédiaire descendue avant le début du forage. L'éruption de gaz et d'huile peut commencer très vite et se dérouler d'une manière bien intense, ce qui peut finir par la perte du puits et de l'équipement. A l'aide des obturateurs de sécurité on peut prévenir rapidement Le début de l'éruption et réaliser des opérations nécessaires dans le puits.

II.3.5.2 Le Système De Commande

L'ensemble de commande des obturateurs est équipé d'une pompe, d'un dispositif hydraulique d'entrainement qui maintient une pression constante, et d'un groupe hydraulique d'accumulation à diaphragme de haute pression [6].

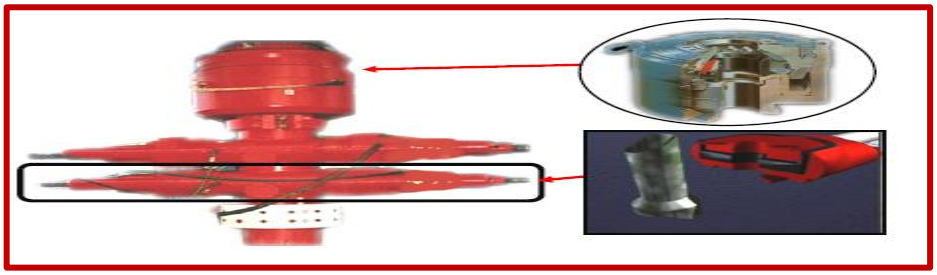

Figure. II.14 : L'obturateur de sécurité B.O.P [6].

II.3.6 Paramètres de forage rotary

Pour avoir le meilleur rendement d'un atelier de forage rotary, il convient d'être très vigilant sur les trois paramètres suivants :

- **le poids sur l'outil**

  L'avancement s'accroîtra en fonction du poids sur l'outil (qui s'augmente en s'avançant par le montage au fur et à mesure de tiges), mais on est limité dans cette voie par l'usure rapide des lames et des dents et surtout par détériorations rapide des roulements des outils à molettes. Le contrôle du poids sur l'outil s'opère par le dynamomètre qui mesure la tension du brin (file) mort du câble, il donne le poids de tout ce qui est suspendu au crochet.

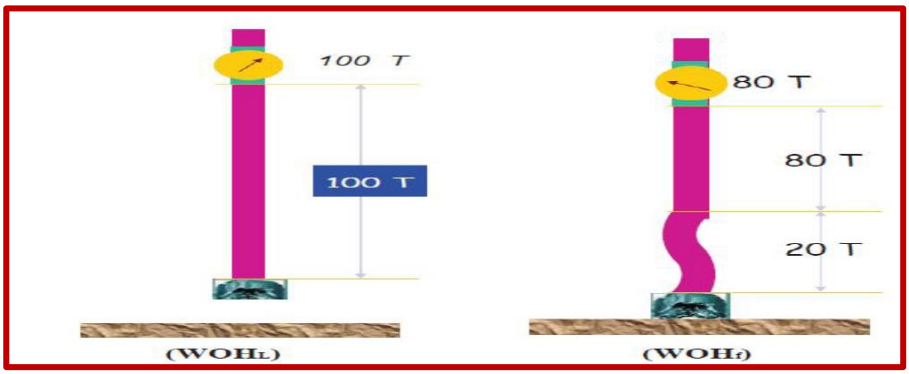

Figure. II.15 : Schéma représente poids sur l'outil [14].

- **la vitesse de rotation**

  La plus part des appareils rotary sont munis d'un indicateur donnant la vitesse de rotation de la table (table de rotation). Dans les terrains durs, la vitesse de rotation sera faible ; elle sera plus élevée lorsque les terrains seront tendres. Cette vitesse qui se calcule en fonction de la vitesse des moteurs et le rapport des transmissions, devra être vérifiée par un appareil de contrôle.

- **le débit des pompes (à boue, à air)**

  La vitesse de remontée des cuttings doit se situer autour de 60 m/min. au minimum. Le choix de la puissance de la pompe et de son moteur sera conditionné par le volume total de boue à mettre en œuvre pour la plus grande profondeur du forage, en tenant compte des pertes de charge, de la viscosité de la boue et de dimensions des tiges [14].

Introduction

L'opération de tubage suivi par la cimentation est une opération très coûteuse représente l'environ d'un quart du coût total du forage, cela peut s'expliqué par l'importance primordiale de cette opération qui consiste à descendre dans le trou déjà foré à un côte bien déterminer une colonne des tubes ayant un diamètre extérieur légèrement inférieur de ce dernier, et de la fixer à l'aide d'un bouchon de laitier du ciment entre les parois de trou et l'extérieur des tubes.

Le programme de tubage d'un puits est l'ensemble des prévisions concernant les diamètres et la résistance de tubages, ainsi que les côtes auxquelles interviennent des changements dans ces diamètres. Dans le but est d'assuré la sécurité du puits avec le minimum des colonnes d'où un coût minimal en tenant compte pour la réalisation de ce programme le facteur suivant :

- Destination du puits.
- Profondeur du puits.
- Particularités géologiques du gisement.
- Méthode de complétion ;
- Facteur économique.
- Composition chimique du fluide de couche (eau chlorurée calcique, eau salée, hydrocarbure gazeux ou liquide).
- Profil du puits.
- les risques de corrosion.

.

III.1 Tubage :

III.1.1 Rôle du tubage :

- Le tubage sert à empêcher les parois du puits de l'effondrement dans le but de continuer le forage sans problèmes.
- La fondation d'un canal isolé pour la remontée du pétrole ou du gaz du fond du puits à la surface ;
- Le maintien en place des parois du puits pour éviter les éboulements ;
- La séparation de toutes les couches traversées (aquifères, gazifières et pétrolières) les unes des autres ;
- L'isolement des couches à problème (perte de boue, des argiles gonflantes, etc). [15]

III.1.2 Les différentes colonnes de tubage :

Les colonnes de tubage sont :

- tube guide,
- colonne de surface,
- colonne technique,
- colonne de production.
- colonne perdue (Liner).

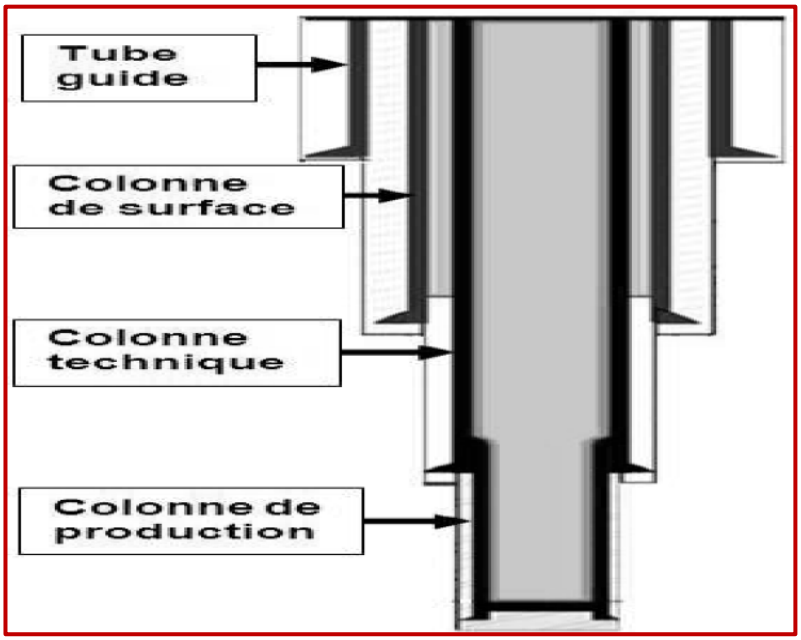

Figure. III.1 : Différentes colonnes de tubage

III.1.3 Caractéristiques des tubages :

III.1.3.1 Fabrication :

Les tubes sont fabriqués dans différents grades d'acier, d'épaisseurs différentes selon les contraintes auxquelles ils seront soumis, lors de leur descente et durant la vie du puits. Les grades d'acier utilisés sont les suivants : H40 - J55 - K55 - C75 - N80 - C95 P110 - Q125 - V150. La lettre représente la composition chimique de l'acier, et les chiffres la limite élastique minimale, en milliers de psi.

Certains grades ne sont pas normalisés par l'API dans certaines dimensions.

Les tubes peuvent être fabriqués :

- par étirage sans soudure,
- par soudure électrique longitudinale sans apport de métal,
- par soudure par recouvrement.

III.1.3.1.1 Description des grades des tubages les plus utilisés :

Tableau III.1 : Grades des tubages

grade	description
H40	Grade inférieur, limite d'élasticité max 80 000 psi, convenable pour les puits à H_2S
J55	bon pour les puits à H_2S,
K55	Résistance à l'écrasement et l'éclatement même que le J55 mais une plus grande résistance à la traction. Résistant à l'H_2S à toute température,
L80	Généralement c'est le plus utilisé dans l'industrie. convenable pour les puits à H_2S,
N80	D'acier allié, il n'est pas convenable à l'H_2S à toute température,
C90	Utilisé dans les puits à haute température contenant l'H_2S,
T95	D'acier allié, conçu pour améliorer le C95 qui ne résiste pas à l'H_2S à basse températures
P110	conçu pour résoudre les problèmes rencontrés dans les puits profonds
Q125	Utilisé souvent pour les puits profonds à haute pression, spécialement pour les fortes pressions d'écrasement, peut utiliser dans des environnements à H_2S à des températures avoisinant 107 °C ou plus

III.1.3.1.2 Longueurs des casings (rangées) :

L'API a spécifié trois rangées de casing qui sont :

Tableau III.2 : Longueurs des casings

Rangée	Longueur (ft)	Longueur (m)
1	16-25	4,8 - 7,5
2	25-34	7,5 – 10,2
3	Plus de 34	Plus de 10,2

III.1.3.2 Diamètre :

Le diamètre nominal d'un tube correspond à son diamètre extérieur exprimé en pouces. La tolérance admise est de ±0,75 %.

Le jeu entre corps de tube et trou varie généralement de 1"1/2 pour les petites dimensions à 4"1/2 pour les plus grandes.

III.1.3.3 Epaisseur :

Pour un même grade d'acier, l'épaisseur peut être différente en fonction des efforts à subir. La tolérance maximale admise par l'API sur l'épaisseur des tubes est de 12,5 %.

La plus grande dimension d'outil pouvant être descendue dans un tube est égale au diamètre du mandrin, qui est inférieure au diamètre intérieur du tube.

III.1.3.4 Poids :

Le poids nominal exprimé en lb/ft, il est donné pour l'identification.

A chaque épaisseur dans une dimension de tube donnée correspond un poids nominal qui ne peut pas servir pour le calcul car il ne prend pas en charge le poids des manchons.

III.1.3.5 Types de filetages :

En général, le casing et les manchons sont caractérisés par leur type de filetage, l'API a spécifiée quatre propriétés d'un filetage, qui sont :

Hauteur de filetage (thread height) : qui est la distance verticale par rapport à l'axe du filetage entre la base et la crête du filetage.

- Le pas définit comme étant la distance entre deux crêtes successives d'un filetage.
- La conicité : c'est le changement du diamètre du filetage exprimé en in/ft.
- La forme : les filetages sont ronds ou carrés.

On distingue deux types de filetage : API et non API

III.1.3.5.1 Filetages API :

L'API a normalisé trois types de filetages :

- **Filetage rond :** Caractérisé par 8 filets par pouce, ayant une rainure en V, sa conicité est de ¾ in/ft pour tous diamètre du casing.
- **Filetage buttress :** C'est un filetage carré avec 5 filets par pouce ayant une conicité de ¾ in/ft pour les casings de diamètre supérieur à 75/8, et 1 in/ft pour les casings de diamètre supérieur à 16 pouces.
- **Extrême – line :** C'est un filetage à profile trapézoïde qui assure une bonne étanchéité métal-métal, c'est le plus adapté pour les hautes pressions et températures. Il est caractérisé par :
    - 6 filets par pouce et une conicité de 11/2 in/ft pour les diamètres de 5 à $7^{5/8}$ pouce.
    - 5 filets par pouce et une conicité de 11/4 in/ft pour les diamètres de $8^{5/8}$ à $10^{3/4}$ pouce.

Les deux premiers sont utilisés pour le raccordement par manchon ; le troisième pour raccordement par joint intégral. Le filetage rond peut être court ou long (résiste à la traction ne se fait que dans les grades d'acier supérieurs à H40 et pour des dimensions de tubes égales ou inférieures à $9''^{5/8}$).

Le filetage rond assure généralement une résistance à la traction plus faible que la limite élastique minimale du corps du tube (sauf quelques exceptions : tubes les plus minces en grade inférieur dans les petites dimensions).

Les filetages buttress et extrême – line permettent une résistance des joints supérieure ou au moins égale à la limite élastique minimale du tube.

Les avantages des joints intégraux par rapport aux joints à manchons sont :

- meilleure étanchéité.
- encombrement extérieur plus faible (meilleure introduction dans le puits).
- meilleure résistance à la traction que les joints à filetage rond.

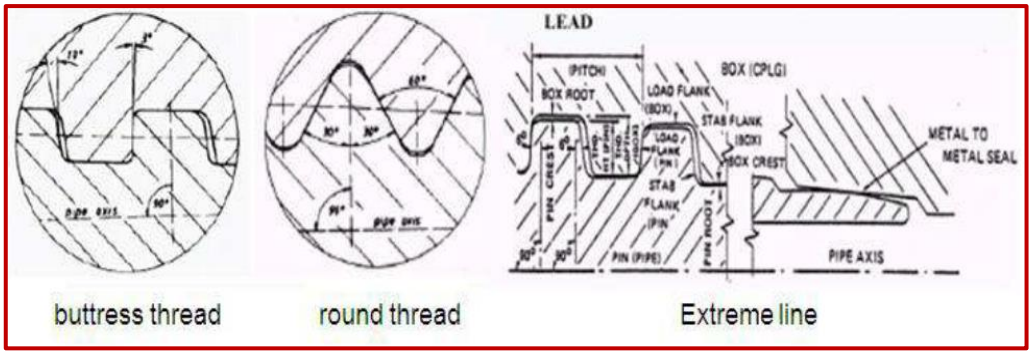

Figure.III.2 : Différents types de filetage API [15] .

III.1.3.5.2 Filetages non API :

Ces filetages peuvent être réalisés sur des tubes normalisés par l'API.

Les plus importants sont :

- Les joints Hydril équipés de filetages constitués de deux étages de filets décalés l'un par rapport à l'autre (vissage plus rapide) :
  - triple seal (joint intégral).
  - EU (joint intégral dont les filetages sont usinés sur les extrémités refoulées des tubes).
  - Coupled Triple Seal (joint à manchon particulièrement prévu en grade V150).
- Les joints VAM de Vallourec :

L'étanchéité est obtenue par un contact métal sur métal (chaque extrémité de tube s'appliquant sur un épaulement conique usiné à l'intérieur du manchon) et le raccordement se fait par un filetage de type buttress (6 filets par pouce pour les tubes 4''1/2 a u lieu de 5 habituellement).

Ce joint peut être à :

- manchon normal.
- manchon à encombrement spécial de diamètre extérieur plus faible.

Le joint VAM a une résistance à la traction comparable à celle du joint API à filetage buttress, mais il a l'avantage d'avoir une meilleure étanchéité, même sous fortes pressions.

III.1.4 Les contraintes sur les tubages :

III.1.4.1 Contraintes à l'écrasement :

L'écrasement du tube est provoqué par la pression différentielle entre l'intérieur et l'extérieur. Si la pression extérieure est plus forte, la pression différentielle a tendance à écraser le tube. Le cas le plus défavorable survient lorsque la colonne est descendue vide dans la boue, ou est amenée à être vidée.

Les efforts d'écrasement sont plus grands sur les tubes se trouvant vers le bas de la colonne, puisque la pression hydrostatique est plus importante. Le coefficient de sécurité est de 1,125 par rapport à la valeur de la résistance à l'écrasement du tube, compte tenu de la traction (la colonne étant supposée vide pour les puits d'exploration).

III.1.4.2 Contraintes à l'éclatement :

Ils interviennent plus particulièrement dans le cas des colonnes de production, pour l'exploitation de gisement de gaz. L'éclatement survient lorsque la pression à l'intérieur de la colonne est supérieure à celle à l'extérieur. Le coefficient de sécurité est de 1,10 par rapport à la valeur de la pression d'éclatement du tube ou du joint (l'annulaire étant supposé rempli d'eau).

III.1.4.3 Contraintes à la traction :

Ils sont plus importants pour les tubes situés dans la partie supérieure de la colonne, puisqu'ils supportent le poids des tubes se trouvant au-dessous.

Généralement, lors de la descente de la colonne, on prend un coefficient de sécurité d'au moins 1,60 par rapport à la limite élastique du corps du tube, et on s'assure que ce coefficient ne descendra par au-dessous de 1,30 lors de la vie du puits, la colonne étant supposée dans la boue.

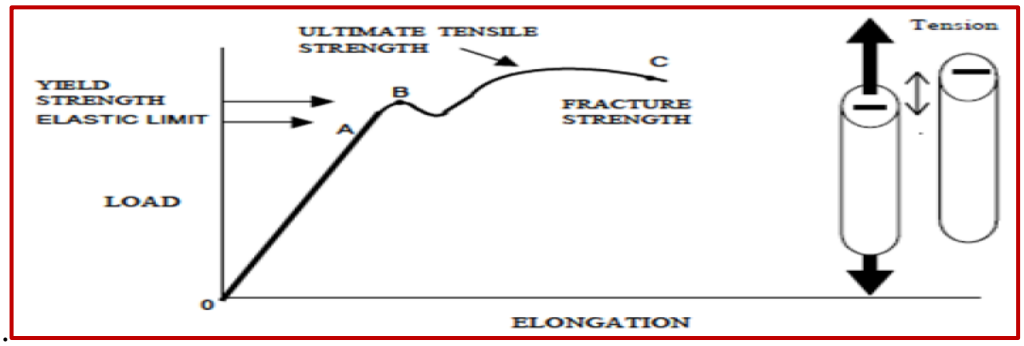

Figure.III.3 l'élongation en fonction d'élasticité

III.1.5 Centralisation de la colonne de tubage :

Le centrage d'une colonne est un élément déterminant pour l'obtention d'une bonne cimentation, pour cela on utilise des centreurs placés :

- au droit des zones à cimenter,
- au droit des dog-legs,
- de part et d'autre des caves
- dans les zones à risques de blocage ou pertes.

On distingue trois types de centreurs flexibles utilisés dans les puits verticaux et Moyennement déviés, rigides utilisés dans les puits horizontaux et les centreurs rotatifs Utilisés dans le cas d'une cimentation en rotation comme une colonne de liner.

Il est préférable d'utiliser des centreurs de forme spiralée qui favorise la turbulence lors de l'injection du laitier.

Ils sont placés le long de la colonne et permettent de la centrer dans le puits.

Centreur avec déflecteur

Centreur souple

Centreur rigide

Figure III. 4 : les types Centralisation de la colonne de tubage

III 1.6. Préparation de la colonne de tubage

- Contrôle du grade et de l'épaisseur
- Marquage
  - Marques au poinçon
  - Marques peintes au pochoir
  - Identification par couleurs
- Contrôle des filetages
- Calibrage
- Mesure et numérotage des tubes
- Rangement des tubes sur le rack [16]

III.2 La cimentation :

III.2.1 Définition :

Cimenter une colonne de tubage consiste à mettre en place un laitier de ciment dans tout ou partie de l'espace annulaire entre le tubage et le trou foré. Le ciment, en faisant prise, assurera la liaison entre la colonne de tubage et le terrain.

III.2.2 But de la cimentation :

- ancrer la colonne au sol.
- réaliser la séparation entre les différentes couches productrices pouvant contenir des fluides différents à des pressions différentes.
- prévenir le dévissage des tubes pendant le forage
- canaliser en surface les fluides exploités
- éviter la pollution des nappes phréatiques
- fermer les couches à haute pression pour éliminer les risques d'éruption
- protéger les colonnes contre les agents chimiques et la corrosion électrochimique [17].

III.2.3 Différent types de cimentation :

III.2.3.1 Cimentation au Stinger :

La cimentation au Stinger est utilisée dans les colonnes de surface de grands diamètres. Exemple : Colonne 185/8dans un trou 24" ou 26", dans le but de :

- réduire l'excès de ciment
- éviter la contamination
- réduire la durée de cimentation

Pour réaliser la cimentation au Stinger, on utilise un outil appelé Stinger vissé au bout d'une garniture de tiges. La profondeur du puits dépasse rarement 500 m. La colonne de tubage est munie d'un sabot spécial pour recevoir le Stinger. La garniture de tiges est descendue à l'intérieur du tubage jusqu'au sabot. Le Stinger est ancré dans le sabot spécial.

On effectue ensuite les opérations suivantes :

- Circulation à l'intérieur des tiges. Le retour de boue se fait normalement par l'espace annulaire Trou-Casing.
- Injection d'un bouchon laveur à l'intérieur des tiges.

- Pomper le volume de laitier à l'intérieur des tiges.
- Lancer le bouchon de chasse à l'intérieur des tiges.
- Chasser avec de la boue.
- Lorsque le bouchon arrive au niveau du sabot, on note un à-coup de pression.
- Désancrer le stinger.
- Circulation à l'intérieur des tiges. Le retour de boue doit se faire par le tubage.
- On fait cette circulation pour vérifier l'étanchéité du sabot.
- Remonter la garniture et attendre la prise de ciment.

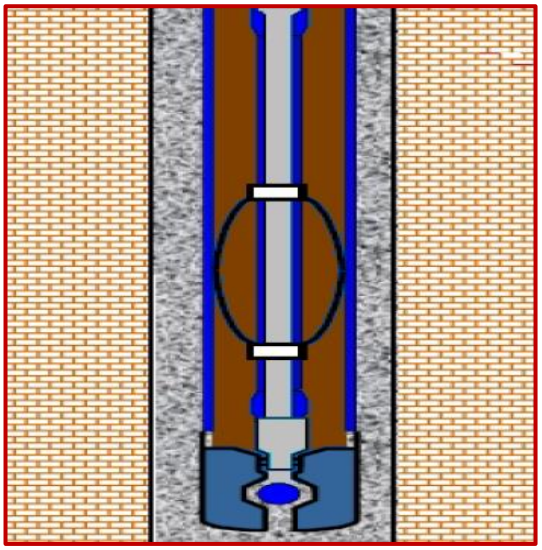

Figure III. 5 : Cimentation au Stinger

III.2.3.2 Cimentation primaire :

Les laitiers de ciment ainsi injectés s'écoulent à travers le sabot pour remonter ensuite dans l'annulaire. L'anneau de retenue, comme son nom l'indique sert d'épaulement aux bouchons racleurs inferieur et supérieur qui encadre le volume de laitier dans le casing. Un à-coup de pression crève le bouchon inferieur pour laisser circuler le laitier dans l'annulaire. C'est le laitier qui pousse directement la boue en place et lave à la fois les parois du trou et l'extérieur du casing au cours de son écoulement. Lorsque tout le laitier est injecté.

On libère le bouchon supérieur qui est déplacé par circulation de la boue de forage. Cette opération est appelée chasse. Le volume de chasse est le volume de boue entre l'anneau et la tête de cimentation. En fin de chasse on doit remarquer une montée en pression qui signifie l'arrêt du bouchon supérieur. Le maintien d'une surpression pendant quelques minutes permet de faire en même temps un test d'étanchéité de la colonne.

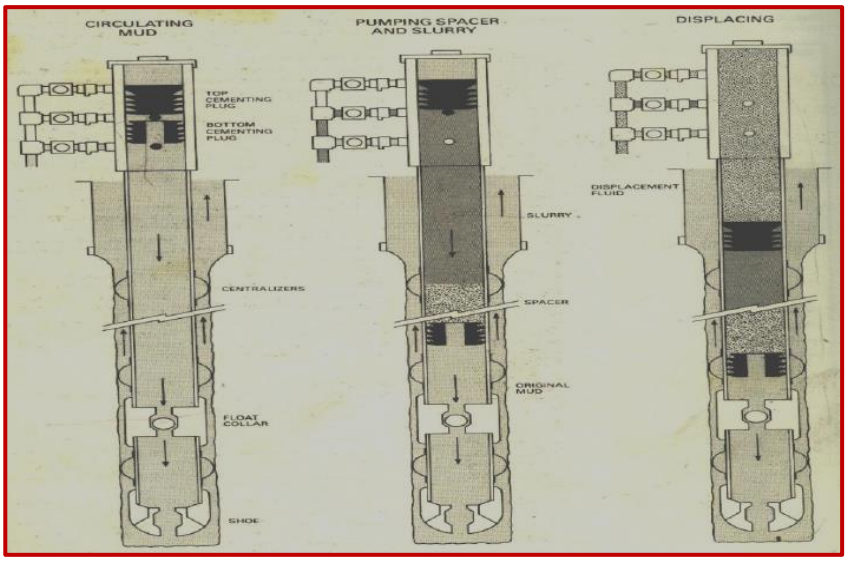

Figure III.6 : Déroulement d'une cimentation primaire

III.2.3.3 Cimentation étagé :

La cimentation à double étage est utilisée :

- si les formations sont fragiles (risques de pertes de circulation ou zones à faibles pressions).
- si les hauteurs d'annulaires à cimenter sont importantes (contamination du laitier).
- si deux types différents de laitiers doivent être mis en place.
- de volume ou hauteur de laitier trop important.

La colonne est équipée d'une différentielle valve ou diverter valve (DV) à la cote désirée, la cimentation primaire est effectuée d'une manière classique avec toutefois l'utilisation de bouchon devant passé à travers le rétrécissement procuré par la DV. Après l'à-coup de pression on laisse tomber la bombe (50-60 m/min). La pression d'ouverture cisaille des goupilles et déplace la chemise. On peut alors injecter le laitier, mais on n'utilise pas de bouchons de tête. En fin d'injection, on libère le bouchon de queue que l'on chasse jusqu'à la DV. Celui-ci refermera la DV par le déplacement d'une seconde chemise.

On ne placera pas de gratteurs au-dessus de la DV et l'on positionnera un packer de terrain ou des ombrelles en dessous. La DV sera située dans une zone rectiligne et les quatre tubes de part et d'autres de la DV, porteront deux centreurs chacun. Au-delà de 40° d'inclinaison, les DV mécaniques ne sont généralement plus opérationnelles (le bouchon d'ouverture ne peut plus descendre seul).

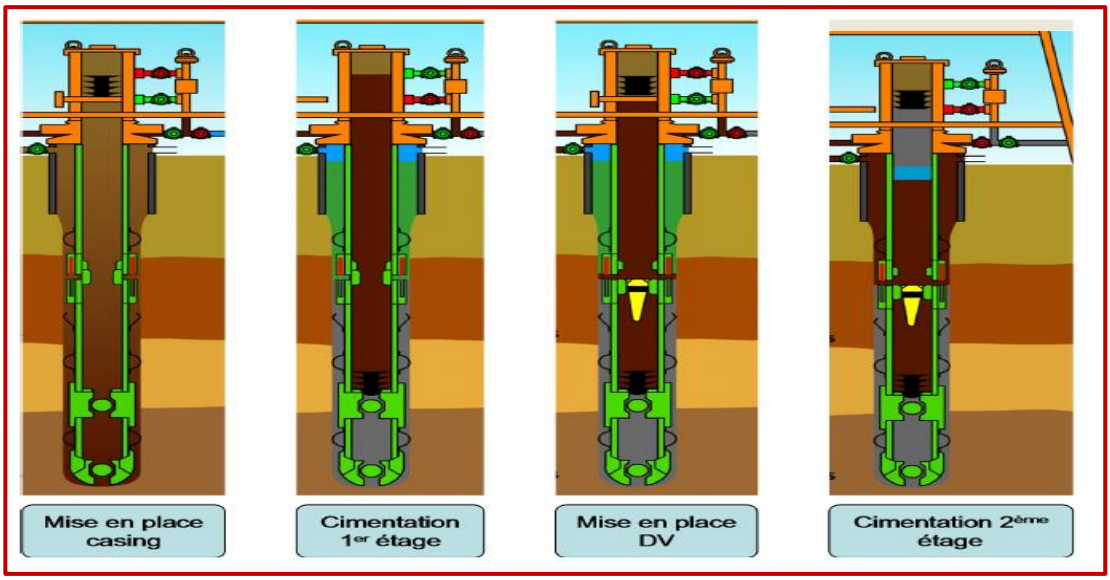

Figure III.7 : Déroulement de la cimentation étagé

III.2.3.4 Cimentation sous pression (squeeze ou ésquichage) :

C'est la mise en place d'un laitier de ciment sous pression à un point donné du puits, Le but de l'opération est de remédier à un défaut d'étanchéité ou de créer une nouvelle étanchéité (perforation d'une couche déplétées). Cette opération consiste à appliquer de la pression sur une formation perméable pour que le laitier se déshydrate progressivement et forme un cake de ciment faisant prise et colmatant les défauts d'étanchéité ou les zones à pertes.

L'injection du laitier s'effectue généralement suivant la méthode « hésitation squeeze », qui consiste à injecter par volumes de quelque centaines de litres entrecoupés d'arrêts de pompage de quelque minutes, en augmentant graduellement la pression jusqu'à atteindre la pression de squeeze [5].

III.2.3.5 Bouchons de ciment :

Les bouchons de ciment trouvent de nombreuses applications, soit en cours de forage, soit après la production d'un puits.

Parmi ces applications nous pouvons citer :

- colmatage de pertes,
- isolation de zone,
- abandon,
- déviation,
- ancrage d'un packer en trou ouvert.

Ces applications sont très variées et les propriétés recherchées dans ces applications sont, elles aussi, très diverses. La composition, la mise en place et les propriétés finales du ciment devront donc être adaptées au problème à résoudre.

III.2.3.5.1 Colmatage de pertes en forage :

Pendant le forage, il n'y a plus de retour de boue, et les colmatant ne restaurent pas la circulation. Une seule solution : le bouchon de ciment. Le laitier pourra lui aussi être perdu, mais prendra dans la formation et la consolidera. A la même côte, plusieurs bouchons de ciment peuvent être nécessaires avant que la circulation ne soit rétablie. Quand c'est le cas, le bouchon peut être reforé et le forage repris.

III.2.3.5.2 Isolation de zone :

En travaux de reconditionnement si on désire obturer une formation qui ne produit plus, ou qui s'est transformée en zone à eau ou à gaz, un bouchon de ciment peut être posé pour isoler cette zone. Une autre solution peut être envisagée : le squeeze de ciment ou un obturateur mécanique tel que le bridge plug.

III.2.3.5.3. Abandon :

Tout puits doit être bouché et abandonné un jour ou l'autre. On doit toujours effectuer un ou plusieurs bouchons de ciment. Les puits secs sont bouchés après le forage et les tests. Les zones déplétées peuvent être bouchées après 15 ans environ de production. Des puits sont abandonnés temporairement après forage et tests en attendant la complétion et l'installation de l'équipement de production. Les bouchons d'abandon sont les bouchons de ciment les plus fréquemment effectués.

III.2.3.5.4 Déviation :

Si, pendant le forage, des outils ou des tiges sont perdus dans le puits, et si les opérations de repêchage ne réussissent pas, la seule solution est de poser un bouchon de ciment audessus du poisson pour partir en déviation et continuer le forage.

III.2.3.5.5 Ancrage d'un packer en trou ouvert :

Dans la plupart des puits verticaux forés à terre, un train de test est descendu pour savoir si la zone est productive avant de descendre et de cimenter une colonne de production. Les outils sont normalement au fond du trou afin de pouvoir appliquer du poids pour gonfler le packer qui

isolera la zone d'intérêt du reste du puits. Cependant, si la zone à tester est trop loin du fond ou si la formation est fragile et ne peut supporter le poids des outils, il peut être nécessaire de poser un bouchon de ciment sous cette zone afin de créer un point d'appui.

Notez qu'il existe des outils pour faire des tests sélectifs en trou ouvert et que généralement la zone est près du fond. Aussi c'est une des applications les moins fréquentes des bouchons de ciment [18].

III.2.4 Ciments et laitiers :

III.2.4.1 Définition de ciment :

Les ciments sont des liants hydrauliques, c'est à dire qu'au contact de l'eau, leurs constituants minéralogiques s'hydratent en formant une pâte ou laitier qui durcit et devient un matériau doué de propriétés mécaniques capables de lier d'autres matériaux.

Les propriétés du laitier et du matériau dur dépendent de la nature des hydrates formés. Elles sont également fortement influencées par la pression et température, ce qui est le cas dans les puits de forage. Il est donc indispensable de tenir compte de ce phénomène.

III.2.4.2 Les différents types de laitiers de ciments :

III.2.4.2.1 Laitiers allégés :

Les ciments de base utilisés pour la cimentation possèdent des caractéristiques telles (composition chimique, granulométrie) qu'une fois mélangés à l'eau de gâchage, on obtient des laitiers de densité normalement comprise entre 1.78 et 1.98.

Ces densités peuvent parfois présenter des inconvénients. En effet, certaines formations ne tolèrent pas de colonnes de ciment d'un tel poids. Il est donc parfois nécessaire d'alléger les laitiers de ciment pour diminuer les pressions hydrostatiques au droit des couches fragiles et éviter ainsi les fracturations. Il est utile, également, pour colmater les zones à pertes en cours de forage, de confectionner des bouchons de ciment de faible densité.

Les laitiers de ciment ayant une densité voisine de 2.00 requièrent des pressions de pompage élevées pour la mise en place. De plus, ces laitiers imposent des pressions statiques et dynamiques importantes, non seulement sur la formation traitée, mais également sur les autres formations avoisinantes. Au droit des formations perméables, ces pressions peuvent entraîner une déshydratation du laitier.

Dans l'utilisation des ciments allégés on distingue généralement :

- les bouchons de ciment destinés à colmater les pertes.
- les cimentations des cuvelages couvrant ces zones.
- Le colmatage par la boue n'ayant pas réussi, on procède généralement par mise en place de plusieurs bouchons de petit volume.
- Le temps de pompabilité est réglé le plus court possible et, au besoin, accéléré.

Nous pouvons classer les ciments allégés en 4 grandes catégories :

- les gels ciments (ou à la bentonite), de densités minimales de 1.4.
- les laitiers ultrafins, de densités minimales de 1.3.
- les laitiers à la mousse, une densité minimum de 1 à 1.1 en surface, mais qui varie en fonction de la profondeur.
- les laitiers allégés aux billes de verre, de densités minimales de 1.2.

III.2.4.2.2 Laitiers denses ou alourdis :

Un laitier de ciment présente une densité comprise entre 1.78 et 1.98. Cette limite peut être repoussée jusqu'à 2.15 par l'emploi de dispersants, mais pour obtenir des densités de laitier supérieures, il faut leur incorporer des produits alourdissant.

Les densités élevées sont utilisées lorsqu'une pression hydrostatique importante est nécessaire au contrôle du puits. Dans ce cas, la densité de la boue peut être supérieure à 2.00. Celle du laitier devra être légèrement supérieure pour avoir un bon déplacement de la boue.

III.2.4.2.3 Laitiers pour températures élevées :

Les ciments Portland peuvent être utilisés jusqu'aux environs de 80°C ; au-delà de cette température, on utilise des ciments dits retardés, afin d'avoir un temps de pompabilité suffisant pour mettre en place les laitiers dans les puits. Les ciments haute température normalisés par l'API sont :

- Classe D : température de 77 à 100°C (température statique)
- Classe E : température de 110 à 143°C
- Classe F : température de 110 à 160°C

III.2.4.2.4 Laitiers basse température :

Lorsque la température des forages à cimenter s'abaisse au-dessous de + 10°C, les ciments classiques ne donnent pas de résultats satisfaisants. Toutefois si la température reste supérieure au point de congélation de la phase aqueuse, on constate un retard dans la prise de plus en plus prononcé avec une résistance à la compression très lente à se développer. Pour les températures plus basses, la phase aqueuse gèle, le ciment ne s'hydrate plus et la prise n'intervient pas. Deux remèdes peuvent être appliqués : soit élever la température pour accélérer la prise, soit utilisé des systèmes de ciment pouvant faire prise à basse température.

On distingue les ciments fondus et les ciments au gypse :

- **Les ciments fondus :** Les ciments fondus ou ciments alumineux sont obtenus par fusion à 1600°C d'un mélange de bauxite et de calcaire ou de chaux.
- **Ciment au gypse :** L'ingrédient de base est un ciment pétrolier non retardé, le classe G est souvent utilisé, mélangé avec une forte proportion de plâtre spécialement étudié pour cet usage.

III.2.4.2.5 Les laitiers thixotropes :

Les ciments thixotropes sont des laitiers de ciment qui possèdent des propriétés rhéologiques particulières et auxquelles sont associées des propriétés mécaniques intéressantes.

- formation rapide de gel en l'absence d'agitation ou d'écoulement,
- Ces ciments sont expansifs, ce qui assure une meilleure liaison entre casing et formations consolidées.
- La résistance mécanique de ces ciments est convenable bien qu'elle se développe plus lentement que pour un laitier classique.
- la thixotropie réduit les pertes car le laitier se gèle dans les fissures et empêche le cheminement du gaz,
- densités légèrement plus basses que celles des laitiers classiques,
- Quelques minutes après sa mise en place, il n'exerce pas de pression hydrostatique, du fait de son gel élevé,
- Malgré une viscosité supérieure à celle des ciments classiques, les pertes de charge restent faibles du fait de sa mise en place à débit réduit.

III.2.4.2.6 Les laitiers expansifs :

L'étanchéité des cimentations est un problème qui n'a pas encore été résolu dans tous les cas. En supposant respectées toutes les règles connues et devant assurer une bonne cimentation, on pense qu'il peut y avoir manqué d'étanchéité, soit par retrait du ciment au cours de la prise, soit par création d'un micro-annulaire par contraction du tubage. Les ciments purs conservés sous eau s'allongent d'environ 2 mm/m alors que les ciments conservés à l'air libre diminuent d'une quantité du même ordre.

La contraction du tubage conduisant à la formation d'un micro-annulaire, peut être due à plusieurs causes :

- changement d'une boue lourde utilisée pour la chasse du laitier par une boue légère nécessaire à la reprise du forage,
- fermeture du puits sous pression pendant la cimentation et ensuite ouverture du puits,
- chaleur d'hydratation du ciment : lorsque le ciment fait prise, la chaleur dégagée par le laitier fait dilater le tubage ; ce dernier se contracte par la suite, il se crée alors un micro-annulaire non étanche.
- L'utilisation d'un ciment expansif permettrait d'éviter le retrait du ciment et la formation d'un micro-annulaire.

III.2.4.2.7 Laitiers pour zones à gaz :

Dans les puits à gaz, le laitier est appelé à couvrir les réservoirs, il a été souvent observé des venues de gaz dans l'annulaire quelques heures ou quelques jours après une telle cimentation ; venues dont l'importance peut être telle qu'il faut entreprendre des cimentations complémentaires, difficiles, coûteuses et parfois dangereuses.

Si la mauvaise adhérence du ciment à la formation et au casing peut parfois être mise en cause, particulièrement lorsqu'on a employé une boue à base d'huile, les diverses études consultées et les travaux ont montré qu'il s'agit le plus souvent d'un problème directement lié au phénomène de prise de ciment.

Pour résoudre ce problème, dans l'état actuel des connaissances sur ce sujet, plusieurs solutions sont possibles et complémentaires :

- Contrôler la perte en eau du laitier de ciment en réduisant la vitesse de filtration par l’ajout d’un réducteur de filtrat

- On limite ainsi la perte de volume, donc la perte de pression ainsi que le risque de déshydratation, tout en réduisant la mobilité de l'eau inter-granulaire et rendant ainsi difficile le déplacement de celle-ci par le gaz.
- Opposer une barrière au gaz soit en le confinant dans la formation, soit en le piégeant dans le ciment (tensio-actifs piégeant le gaz sous forme de bulles), soit encore en rendant impossible le déplacement de l'eau du ciment par le gaz (résine, latex,...).
- Avoir un très bon déplacement de la boue, surtout à la paroi (régime turbulent conseillé).
- Réduire le gel à une valeur très faible (maintien de la pression) ou à une valeur très élevée supérieure à 300 lb/100 ft2 (blocage du gaz).
- Avoir une prise franche : bonne connaissance de la température BHCT ou BHST, utilisation de la micro-silice et des ciments "fins".
- Ajuster le temps de pompabilité en ne prenant pas de sécurité trop forte pour que le ciment débute sa prise juste après la fin de la mise en place.

III.2.4.2.8 Laitiers pour massifs salifères :

Il est bon de rappeler brièvement l'influence du NaC1 sur le ciment. Le NaC1 accélère le ciment aux faibles concentrations (180 g/l) et le retarde aux fortes.

La résistance à la compression des ciments gâchés à la saumure saturée est plus faible que celle des ciments gâchés à l'eau douce (environ 20 % à 60 %). Le contrôle du filtrat est pratiquement impossible sur les laitiers gâchés à la saumure saturée, et difficile sur ceux gâchés à la saumure demi-salée (180 g/l). Le contrôle du temps de pompabilité est plus délicat sur les ciments salés, mais non impossible. Le choix de l’eau de gâchage se fait en fonction des caractéristiques de la formation (bancs de sel, sel massif...), des impératifs du laitier (filtrat, temps de prise) et des conditions de fond (température). Pour pallier aux divers problèmes rencontrés, on opte pour un laitier gâché à la saumure demi-salée, qui développe ces caractéristiques :

- Assez bonnes caractéristiques mécaniques
- Compatibilité avec les additifs, mais leur action est généralement réduite
- Pas de risque d'accélération par le sel
- Filtrat contrôlable, mais jamais très bon [18].

III.2.5 Les caractéristiques du laitier de ciment :

III.2.5.1 La densité :

La densité du laitier peut être calculée très simplement à partir de la densité de poudre de ciment, de celle de l'eau de gâchage, et de celles des différents additifs entrant dans la composition du laitier.

III.2.5.2 Rendement :

C'est le volume de laitier obtenu par tonne de ciment. On ne le mesure pas, il se calcule simplement par la formule :

$$R=1000 * \frac{\frac{Mc}{dc}+Ve+\Sigma Vad}{Mc} \qquad \textbf{(III.1)}$$

Avec :

Mc : la masse de laitier de ciment

d_c : densité de laitier de ciment

V_{ad} : volume des aditifs

Ve : volume d'eau

III.2.5.3 La rhéologie :

Lorsqu'on parle de rhéologie d'un laitier de ciment, il faut toujours se rappeler que l'on a affaire à un ciment fortement chargé en solides. Par exemple, si on considère le cas classique d'un classé G, mixé à une densité de 1,90, on a en volume 42 % de solides. Le comportement rhéologique du laitier de ciment est celui d'une suspension aqueuse fortement chargée.

III.2.5.4 Le filtrat :

Le laitier de ciment est une suspension de solides dans l'eau. De ce fait, placé devant une formation perméable, et soumis à une pression, il va perdre une quantité plus ou moins grande d'eau. Le phénomène de filtration va entraîner une déshydratation prématurée du laitier qui pourra devenir impompable et fera prise dans de mauvaises conditions.

La filtration du laitier de ciment est mesurée comme celle de la boue avec un filtrepresse API à température ambiante et sous 7 bars ou d'un filtre-presse HP-HT, lorsqu'on veut simuler les conditions de fond.

III.2.5.5 L'eau libre :

C'est le volume d'eau surnageant audessus du laitier après un certain temps de repos. La mesure se fait dans une éprouvette de 250 ml de laitier, après 2 heures de repos. Le résultat est exprimé soit en cc, soit en pourcentage (1 cc correspondant à 0,4 %). Cette mesure va caractériser le phénomène de sédimentation de la suspension de particules de ciment dans l'eau. Nous l'avons volontairement associée à la mesure de filtrat pour pouvoir préciser clairement que, contrairement à ce que l'on pourrait penser, ces deux mesures sont totalement indépendantes.

III.2.5.6 Le temps de pompabilité :

C'est le temps mis par le laitier, maintenu en agitation sous conditions de pression et de température, pour atteindre une consistance de 100 Poises. Pratiquement, il correspond à la durée pendant laquelle le laitier reste pompable.

Le temps de pompabilité d'un laitier est estimé à l'aide d'un consistomètre tout en tenant compte des paramètres influençant sur la prise (l'agitation, la pression et la température qu'il subira lors de son refoulement dans le puits).

III.2.5.7 La résistance à la compression :

On mesure la résistance mécanique à l'écrasement du ciment conservé en température sous une pression maximale de 207 bar, pendant une durée variable (8 heures, 24 heures...7 jours..., 6 mois...).

La mesure se fait à l'aide d'une presse, sur des cubes de 5 cm de côté. Le résultat, exprimé en bar, correspond à la contrainte maximum supportée par le cube avant destruction. Le ciment est conservé le temps voulu en pression et température mais la mesure, elle, se fait à pression atmosphérique et à température ambiante.

III.2.5.8 La perméabilité :

La mesure de la perméabilité se fait exactement de la même manière que pour les roches, à l'air ou à l'eau. Les plugs de 23 mm de diamètre servant à la mesure sont prélevés par carottage sur les mêmes cubes, de 5 cm de côté, servant aux mesures de résistance. La perméabilité du ciment sera très variable suivant les formulations et les conditions de conservation, pouvant aller de quelques centièmes de millidarcy à quelques millidarcy. On observe souvent une évolution similaire de la résistance à la compression et de la perméabilité du ciment.

III.2.5.9 La finesse du ciment :

La finesse du ciment peut être repérée soit par une analyse granulaire soit par des mesures de surface spécifique. La surface spécifique s'exprime en g/cm2 et correspond à la surface externe des grains de ciments compris dans 1 g de matière. Il faut également retenir que les résultats obtenus dépendent de la méthode de mesure. Quoiqu'il existe des relations empiriques entre les différents résultats, il est préférable de toujours utiliser la même méthode de mesure pour effectuer des comparaisons entre ciments.

III.2.6 Classes de ciments API :

L'American Petroleum Institute (API) a établi un classement de ciments pour sondages basé principalement sur la profondeur d'utilisation.

Le classement API est le suivant :

- **Classe A** : utilisé de la surface à 6 000 ft (1 829 m) lorsqu'aucune caractéristique particulière n'est demandée.
- **Classe B** : utilisé de la surface à 6 000 ft (1 829 m) lorsque les conditions nécessitent une résistance modérée ou élevée aux sulfates.
- **Classe C** : utilisé de la surface à 6 000 ft (1 829 m) lorsque les conditions nécessitent une haute résistance initiale. (disponible en type ordinaire ou en type moyenne ou forte résistance aux sulfates).
- **Classe D** : utilisé de 6 000 à 10 000 ft (1 829 à 3 048 m) en conditions de température et pression modérément élevées (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates).
- **Classe E** : utilisé de 10 000 à 14 000 ft (3 048 à 4 268 m) dans des conditions de température et pression élevées (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates).
- **Classe F** : utilisé de 10 000 à 16 000 ft (3 048 à 4 877 m) dans des conditions de température et pression très élevées (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates).
- **Classe G** : étudié pour être utilisé de la surface à 8 000 ft (2 438 m), son domaine d'utilisation peut être étendu des plus basses aux plus hautes températures grâce à sa compatibilité avec tous les additifs (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates).

- **Classe H** : identique à la classe G mais prévu pour des densités de laitier supérieures (1,98 au lieu de 1,90).

Remarque : les ciments classe E et F possèdent dans leur formulation un retardateur. Il y a donc un risque d'incompatibilité avec d'autres additifs. Notamment, si leur temps de pompabilité est trop court ou trop long il est, pratiquement, très difficile, sinon impossible, de les retarder ou de les accélérer. Il faut donc les considérer comme des ciments spécifiques, ne possédant pas le caractère d'universalité des classes G et H [19].

III.2.7 Critères de choix du laitier :

Il est imposé par les paramètres suivants :

- La température statique de fond de trou qui conditionne le temps de prise et donc le temps de pompabilité.
- La température de fond de trou sous circulation, lors de la mise en place du laitier, qui modifie le temps de prise et donc le temps de pompabilité.
- La densité du laitier imposée par les limitations de pression hydrostatique de certaines formations rencontrées.
- La viscosité plastique du laitier et ses caractéristiques de filtrations.
- Les paramètres rhéologiques du laitier.
- Le temps de prise et de développement d'une résistance à la compression [5].

III.2.8 L'eau de gâchage (fabrication) :

L'eau est un diluant principale lors de la préparation du laitier, elle peut être de l'eau douce, saumure saturée ou semi-saturée. L'eau douce est compatible avec tous les additifs et présente de bonnes caractéristiques mécaniques mais ne donne pas une bonne adhérence du laitier aux formations salifères pour lesquelles on fait appel à une saumure saturée mais l'incompatibilité du laitier avec un grand nombre d'additifs, filtrat pratiquement incontrôlable, chute des caractéristiques mécaniques et l'effet retardateur important à basse température demeurent ses inconvénients.

Pour cela on opte pour une eau de gâchage semi-saturée qui sert de compromis. Généralement, l'eau de gâchage utilisé est celle du chantier. Le prestataire service cimentation doit prélever un échantillon pour l'analyser au laboratoire [19] .

III.2.9 Additifs pour ciments :

On est couramment amené à utiliser un certain nombre d'additifs, pour adapter les caractéristiques du ciment aux différentes conditions d'utilisation. Ces additifs peuvent être classés comme suit :

III.2.9.1 Accélérateurs :

Ces produits accélère la prise de ciment à basse température ou compensent l'effet retardateur d'autre additifs, ils permettent de réduire le temps d'attente avant la reprise des opérations de forage.

On les utilise dans les cas suivants :

- Cimentation de casing de surface et bouchons à faible profondeur
- Bouchons de ciments pour colmatage de zone à pertes.
- Cimentation avec additifs à effet retardateur tel que les réducteurs de filtrat On cite : chlorure de calcium (CaCl2), silicate de sodium, chlorure de sodium (NaCl).

III.2.9.2 Retardateurs :

Ils retardent la prise d'un ciment et accroissent par la même temps de pompabilité dont l'on pourra disposer pour sa mise en place, ou cas où, soit une haute température de fond de puits soit un effet accélérateur dû à un autre additif risquerait de réduire dangereusement le temps disponible à la mise en place.

III.2.9.3 Les dispersants :

Ce sont utilisés pour résoudre le problème d'eau libre qui est dû à la précipitation des particules solides dans le laitier de ciment, ces produits dispersants vont maintenir en suspension toutes les particules pendant la prise du laitier. On distingue : les polymères et les lignosulphanates de calcium.

III.2.9.4 Agent de contrôle de filtration :

Les cas les plus classiques d'emploi de réducteurs de filtrat sont :

- Squeeze
- Cimentation de colonnes de production
- Cimentation de zones à gaz

Ils évitent la perte d'eau de laitier par filtration dans les formations perméables, ce qui risque de déclencher, soit une prise intempestive, soit un absence de prise dus à l'absence d'eau nécessaire à l'hydrolyse et à la cristallisation des composants de ciment.

III.2.9.5 Allégeant :

Ce sont des matières inertes légères mélangées au ciment dont l'effet est d'une part de réduire la densité du laitier, d'autre part d'en réduire les couts. Par contre, la plupart des allègent ont un effet sur le temps de prise et sur la résistance à la compression du ciment il sera souvent nécessaire de compenser par des additifs appropries.

Les principaux allègent utilisés sont :

- L'eau qui est le principal produit utilisé
- Les produits solides à faible densité à titre d'exemple les billes de verre creuses de densité de 0,3 et 0,7, la chaux.
- l'inclusion d'agents moussants au laitier comme de l'azote ou de l'air par
- l'intermédiaire d'un compresseur ou d'une unité d'azote.

III.2.9.6 Alourdissant :

Ils servent à augmenter la densité du laitier. Ils sont inertes et mélangés au ciment sec. Les principaux Alourdissant utilisés sont : la Baryte ou sulfate de baryum $BaSO4$ (d=4,2), L'Hématite ou minerai de fer (d=4,9 à 5,3), L'Ilménite ou l'oxyde de fer (d=4,7), La Galène et l'arséniure de fer (d > 7) Tout produit alourdissant doit, être pour incorporer au ciment, posséder les caractéristiques suivantes :

- exiger le moins d'eau de mouillage possible,
- ne pas réduire la résistance du ciment,
- ne pas influer sur le temps de pompabilité,
- avoir une granulométrie uniforme et comparable à celle du ciment,
- provoquer un accroissement minimum du volume du laitier,
- être chimiquement inerte.

Il doit donc n'agir que par sa densité propre.

III.2.9.7 Additifs spéciaux et spécifiques :

III.2.9.7.1 Fluidifiants : qui compense une très grande viscosité ou une tendance à gélifier de certains laitiers, facilitent l'établissement de régimes d'écoulement tourbillon lorsqu'ils sont exigés.

III.2.9.7.2 Les anti-moussants : qui évitent l'excès de mousse produite au mixage de certains ciments, laquelle risque d'interférer avec le bon fonctionnement des pompes.

III.2.9.7.3 Les gélifiants : qui modifient les caractéristiques thixotropiques de certains laitiers. Utilisés pour la cimentation des zones à pertes pour que le ciment se durcie dès l'arrêt du pompage pour qu'il ne puisse pas s'infiltrer dans les drains de la formation [5].

III.2.9.7.4 La silice : qui est utilisée pour protéger le ciment contre les fortes températures (plus de 110°C statique). On l'utilise à un pourcentage fixé de 30 à 40 %.Elle est impérativement mélangée à sec au ciment [19].

III.2.9.7.5 Additifs pour cimentation des zones à gaz : qui sont des additifs destinés à bloquer le cheminement du gaz dans le ciment au moment de la prise. Ce sont, par exemple, le gas-check d'Haliburton ou le gas-block de Dowell.

III.2.10 Fluides intermédiaire (Preflush et spacer) :

Pour avoir une bonne cimentation, il faut que le ciment chasse tout le volume de la boue au tour du casing, mais la boue et le ciment sont généralement incompatibles et leur contact génère des sévère channeling ou la formation des fluides impompable de grande viscosité, pour éviter ces problèmes, l'utilisation des fluides intermédiaires est très importante. Le fluide intermédiaire déplacé en tête du laitier a pour but de :

- Faciliter le déplacement de la boue dans l'annulaire
- Isoler le laitier de ciment du contact avec la boue pour éviter tout gèle de boue
- Faciliter l'élimination de la boue gelée sur les parois du tubage en assurant un régime turbulent,

En effet, le calcium présent dans le ciment flocule les particules argileuses des boues, causant la formation de bouchon de boue très visqueux. Ces bouchons risquent d'être transpercés par le ciment d'où il peut résulter une mauvaise cimentation.

Les fluides intermédiaires agissent principalement comme tampon pour éviter la contamination de la boue en contact avec le ciment. Son volume est calculé de telle sorte qu'il assure un contact avec la formation pour une durée bien déterminée (7 à 15 mn).

- **Le preflush** : est généralement de l'eau, mélangée avec des surfactants.
- **Le spacer :** est un fluide complexe du fait qu'il soit à la fois compatible au laitier et à La boue et il doit avoir de bonnes propriétés rhéologiques pour minimiser La contamination du laitier qui cause de mauvaise cimentation [5].

III.2.11 Paramètres affectant la cimentation :

III.2.11.1 Le stand-off :

La centralisation de la colonne de tubage doit procurer une distance de séparation entre le tubage et la paroi du trou. Cette distance de séparation est appelée Stand off.

L'API recommande un stand-off de 67%, sachant que 100% désigne un centrage parfait, et 0% un centrage où le tubage touche la paroi du trou. Pour les puits verticaux ou déviés ne dépassant pas 60°, des centreurs flexibles seront utilisés dans tout le découvert. Au-delà de cette inclinaison, n'utiliser que des centreurs rigides.

FigureIII. 8 : Variation du rapport de débit en fonction de l'excentricité du casing

- **Effet du stand-off sur le déplacement de la boue :**

Le stand-off a un effet néfaste sur la cimentation en favorisant l'effet channeling.

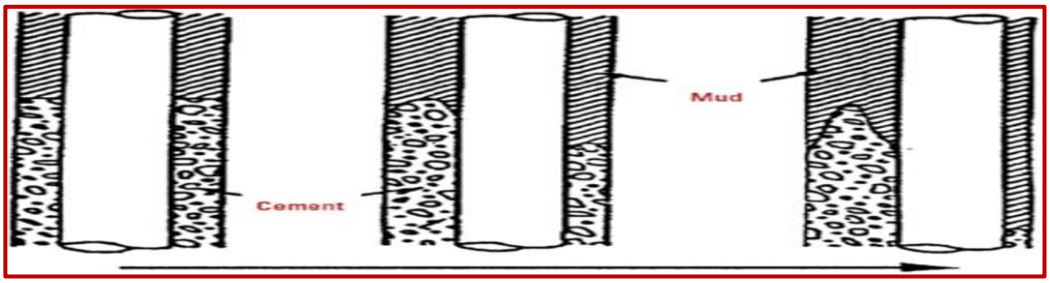

Figure III.9 : Effet de stand-off sur le déplacement de la boue

III.2.11.2 Effet de la rotation de la colonne de tubage sur la cimentation :

La rotation de la colonne de tubage favorise la turbulence même dans le cas où le stand-Off est faible.

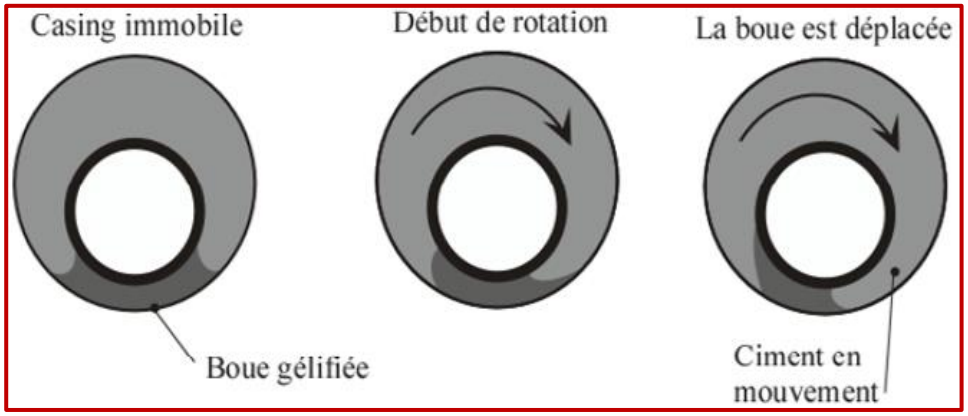

Figure III.10 : Effet de la rotation sur la cimentation.

III.2.11.3 L'effet de channe Ling :

Il est définit comme étant l'emprisonnement de la boue ou du gaz au milieu de la gaine de ciment, ce phénomène est influe sur la qualité de la cimentation.

Pour éviter ce phénomène, il faut :

- Assurer une bonne centralisation de la garniture.
- Choix un débit de chasse adéquat (régime turbulent).
- Utiliser des preflush et spacers.
- Procéder à la rotation de la colonne de tubage pendant la cimentation si possible.

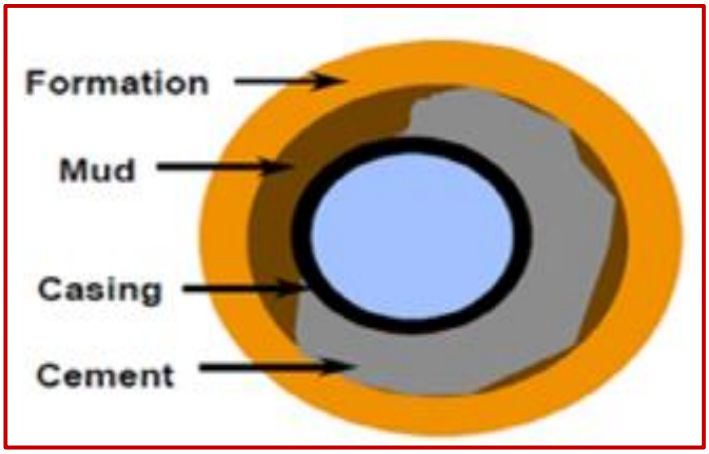

Figure.III.11 : Effet de canneling causé par la boue

III.2.12 Choix des fluides et des écoulements :

La cimentation d'une colonne perdue impose, en plus des différents choix et déterminations faits pour la cimentation d'une colonne, des précautions spécifiques.

La boue sera traitée, colonne perdue au fond, pour obtenir la fluidité optimale. Le fluide intermédiaire de tête obéit aux règles déjà énoncées pour les cimentations à simple étage. Le fluide intermédiaire de queue doit se trouver, en fin de chasse de part et d'autre de la connexion entre le train de pose et la tête de colonne perdue. Ses caractéristiques chimiques doivent être adaptées au laitier. Le volume doit être tel que la circulation inverse puisse se faire après déconnexion sans que le laitier soit en contact avec la boue.

Pour le laitier, les quantités étant faibles, la totalité du volume pourra être fabriquée et homogénéisée en surface. L'eau libre du laitier doit être faible (< 1 %). La détermination du débit de remontée du laitier dans le découvert doit être très soigneusement établie [5].

III.2.13 Les équipements des préparations et pompage de ciment

III.2.13.1 Equipements de la colonne cimentation simple étage

Outre les tubes, une colonne de tubage est munie de certains accessoires destinés soit à faciliter sa descente, soit à augmenter les chances de réussite de la cimentation. Ce sont :

- les sabots :
  - Sabots de tubage
  - Sabot ordinaire à biseau
  - Sabot à soupape
  - Sabot à soupape et jets tourbillonnaires
  - Sabot ordinaire à biseau
  - Sabot à remplissage différentiel
  - Sabot à bille à remplissage permanent
  - Sabot à soupape duplex
- les anneaux de retenue pour les bouchons :
  - Anneau à soupape
  - Anneau à balle à remplissage permanent
  - Anneau à remplissage différentiel
- les bouchons :
  - Bouchon inférieur
  - Bouchon supérieur
- les centreurs de tubage :
  - Centreurs flexibles
  - Centreurs rigides

❖ les racleurs de parois :

- Racleurs rectilignes
- Racleurs Rotatifs [17]

III.2.13.2 Le matériel de cimentation et les stocks :

III.2.13.2.1 L'unité de cimentation :

Les unités de cimentation permettent d'effectuer simultanément :

❖ le mixage du ciment et des additifs afin d'obtenir un laitier correspondant aux caractéristiques désirées pour chaque type particulier d'opération ;

❖ le pompage du laitier obtenu avec une grande flexibilité de vitesse et pression de pompage.

Ces unités de pompage sont composées de deux pompes Triplex à grand débit et hautes pressions montées soit sur camion soit sur skid. La source d'énergie actionnant ces pompes et l'équipement auxiliaire de ces unités est assurée par deux moteurs diesel.

III.2.13.2.2 La tête de cimentation :

Elles sont généralement conçues pour contenir deux bouchons, plusieurs capacités de pression sont disponibles en accord avec les capacités du casing. Les systèmes de retenue des bouchons sont constitués soit par une tirette de retenue qui est tirée vers l'extérieur pour libérer le bouchon, soit par une demi-bague qui est manoeuvrée depuis l'extérieur.

Normalement, il existe sur ces têtes un témoin qui permet de voir le départ du bouchon. La mise en place et le verrouillage de bouchons dans la tête doit être fait sérieusement, plusieurs cimentations ont été ratées parce que les bouchons sont partis intempestivement ou qu'ils ne sont pas partis du tout [17].

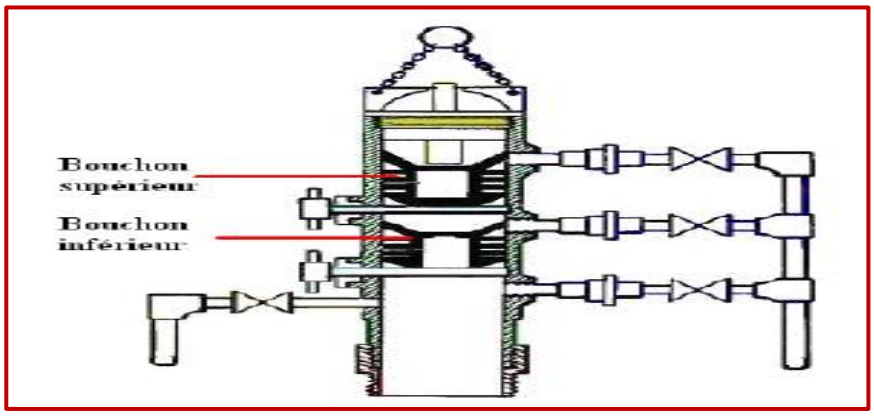

Figure III. 12 : Tète de cimentation [17].

III.2.13.2.3 Bouchons de cimentation :

Le rôle essentiel des bouchons est de séparer positivement les différents fluides pendant leur déplacement à l'intérieur du tubage afin de retarder leur mélange et les risques de contamination. Ils sont de deux types :

- **Bouchon inférieur :** muni d'un diaphragme destructible sous l'effet d'une légère surpression. Outre qu'il sépare les fluides, il racle les parois du tubage lors de son déplacement, évitant la contamination du laitier qui le pousse.
- **Bouchon supérieur :** étanche et résiste aux hautes pressions, il est situé en queue de laitier. En fin de chasse, il se mettre sur le bouchon inférieur permettant de réaliser un test en pression de la colonne.

III.2.13.2.4 Bacs de recirculation et système d'ajout d'additifs liquides :

On effectuera les tests de fonctionnement à l'eau, La préférence est actuellement redonnée aux additifs solides, moins coûteux et de durée de conservation plus longue. Le système d'ajout d'additifs liquides évite toutefois d'avoir à libérer un, voire deux bacs de leur fluide de forage pour y préparer l'eau de gâchage.

Les bacs de recirculation, d'aussi faible capacité soient-ils, assurent une meilleure homogénéité du laitier.

III.2.13.2.5 Entonnoir et duses de gâchage :

Le test de fonctionnement est effectué à haute et à basse pression. On s'assurera que des duses de différents diamètres sont disponibles. Si nécessaire, on préparera quelques mètres cubes de laitier pour faire le choix des duses.

III.2.13.2.6 Compresseurs, silos et silo intermédiaire :

On vérifiera que le silo intermédiaire n'est pas bouché par du ciment ; les lignes seront soufflées pour évacuer d'anciens dépôts éventuels de ciment, de baryte ou de bentonite. L'ensemble sera mis en pression jusqu'à atteindre la pression de service afin de détecter des fuites éventuelles et l'efficacité du compresseur ; le test terminé, on purgera la pression. L'air toujours plus ou moins humide provoquant le mottage et le vieillissement du ciment, on se limitera aux transferts indispensables.

III.2.13.2.7 Matériel de descente de tubage :

Elévateurs, cales et élingues doivent être adaptés au tubage ; ils ont à supporter la colonne et les forces de frottement.

Le personnel doit être sur le site quelques jours avant la descente du tubage afin de vérifier et de préparer les équipements. Des pièces de rechange doivent être disponibles pour l'ensemble du matériel (en particulier des peignes de clés et un indicateur de couple).

Si possible, une clé hydraulique complète sera tenue en réserve. Le vissage des tubes à la corde doit être prévu en cas de panne de la clé hydraulique.

Il conviendra de disposer d'un système facile à manipuler qui permette le remplissage rapide du tubage et qui puisse être connecté au bac de manœuvre.

III.2.13.2.8 Stock de ciment :

On ajoutera par précaution à la quantité théoriquement nécessaire, un supplément tenant compte du cavage, du volume de ciment mort dans les silos (aussi bien ceux du chantier que ceux du transporteur) et des problèmes toujours possibles en cours de cimentation.

Bien évidemment, il est toujours préférable que la quantité de ciment en stock soit trop élevée.

III.2.13.2.9 Stock d’additifs :

Par sécurité, on approvisionnera des quantités d'additifs suffisantes pour préparer deux fois le volume de laitier prévu.

III.2.13.2.10 Stock d'eau de gâchage :

Il sera ajusté selon la quantité pratique de laitier prévue pour la cimentation (incluant le cavage, les volumes impompables (etc.).

III.2.13.2.11 Volume de boue en surface :

La règle est d'avoir en surface 1.5 fois le volume de chasse de façon à pouvoir cimenter en pertes totales (c'est-à-dire sans récupérer, en retour, aucun volume de boue utilisable pour le déplacement et pour le remplissage de l'annulaire) [5].

III.3. Evaluation de la qualité de cimentation :

Après avoir cimenté, il est nécessaire de vérifier :

- La hauteur de ciment dans l'espace annulaire.
- La qualité de la cimentation.
- L'étanchéité du tubage et parfois de la cimentation du sabot.

III.3.1 Contrôle d'une cimentation :

Le dégagement de chaleur et l'augmentation de la contrainte d'adhérence du ciment lors de sa prise permettent d'étudier la cimentation d'un tubage et sa qualité grâce aux diagraphies suivantes :

- Thermométrie.
- Sonic (CBL-VDL) [Cement Bond Log-Variable Density Log].

III.3.1.1. Thermométrie :

La méthode la plus courante consiste à effectuer une thermométrie du trou, 6 à 12 heures après la cimentation.

La réaction exothermique de prise du ciment élève la température de la boue au voisinage du ciment. La lecture du diagramme doit permettre de :

- déterminer la hauteur de ciment dans l'espace annulaire
- préciser les zones de mauvaise cimentation.

Pour faire cette lecture, il est bon de caler le diagramme de thermomètre sur la courbe du caliper effectué avant de descendre le tubage.

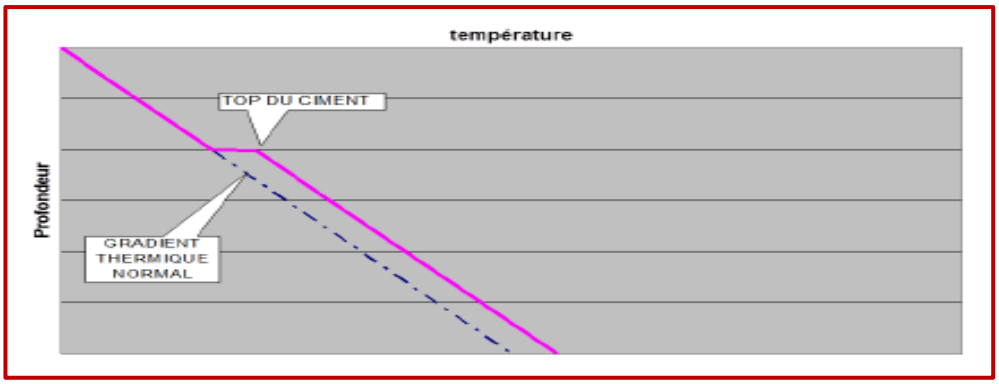

Figure. III.13 : Variation de la profondeur en fonction de la température pour un Test de thermométrie.

- **Interprétation** :La figure III.13 présente la hauteur de ciment en fonction de l'augmentation de la température qui est due a l'effet de réaction exothermique de prise de ciment qui augmente la température de la boue au voisinage de ciment.

Si la thermométrie donne quelques renseignements sur la présence ou non des zones polluées dans la cimentation, elle ne précise pas si le ciment adhère correctement aux parois du tubage. Pour cela on utilise les diagraphies soniques CBL – VDL (Cement Bond Log – Variable Density Log).

Ce sont des outils sonique qui enregistrant l'amplitude d'une onde sonore dans le tubage dont le taux d'atténuation est fonction de la compression du ciment et du pourcentage de circonférence cimentée.

III.3.1.2 Les Sonics : CBL – VDL (Cément Bond Log – Variable Density Log) :

III.3.1.2.1 Principe du CBL (Cément Bond Log) :

Elle permet d'étudier et de quantifier la qualité de la cimentation par la mesure d'adhérence entre tubage et ciment, Un train d'onde de fréquence variant entre 15 et 30 KHz selon les appareillages, est périodiquement généré par un émetteur.

Cette onde traverse la boue, passe dans le tubage, le ciment et la formation si ces divers milieux sont couplés acoustiquement, puis est détectée par un récepteur qui se trouve sur le corps de l'outil (généralement à 3 pieds de l'émetteur).

L'énergie acoustique voyageant le long d'un tube se propage plus rapidement que les ondes de formation elles-mêmes plus rapides que les ondes de boue.

- **Interprétation de CBL :**

Dans le cas d'un tubage non cimenté toute l'énergie acoustique circule le longde l'acier : il y a très peu d'atténuation de l'onde et de l'amplitude de la première arche du signal est importante, Dans le cas d'un tubage parfaitement cimenté, cette énergie se propagera à travers le ciment jusque dans la formation.

Dans le cas d'un tubage mal cimenté, l'énergie se répartit entre le tubage et la formation.

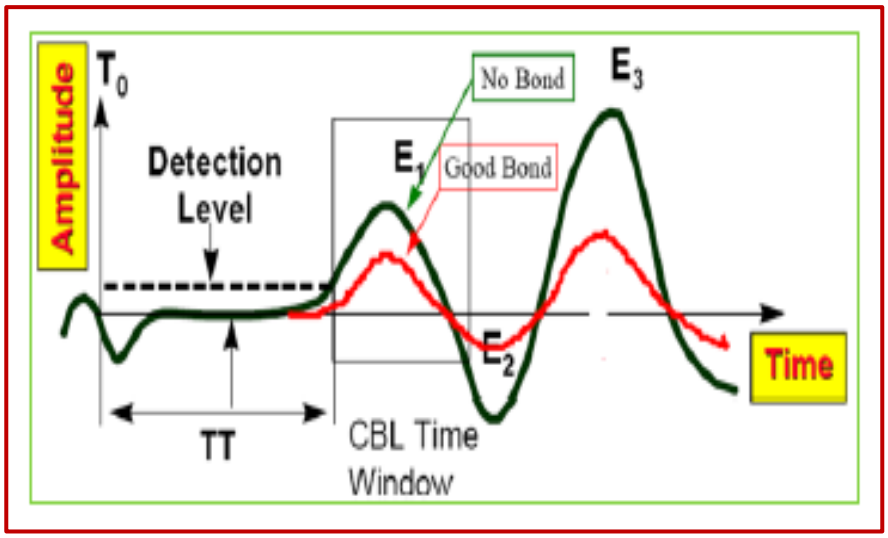

Figure.III.14 : Principe du CBL [20]

III.3.1.2.2 Principe de VDL :

L'étude de la qualité de la cimentation peut être faussée par un certain nombre de phénomènes. Il s'est avéré utile d'enregistrer l'ensemble du train d'ondes sonores reçues par un récepteur situé généralement à 5 pieds de l'émetteur. Enregistré en complément du CBL, le VDL permet de définir l'adhérence Ciment Formation.

La présentation de cet enregistrement est :

- Sous forme du train d'onde complet ou de sa partie positive uniquement ("Wave Forme", "Signature Curve") : la lecture est difficile.
- En densité variable (VDL), seules les arches positives étant reproduites en une échelle de gris d'autant plus foncés que l'amplitude est plus grande.

Cette présentation permet de contrôler la présence des ondes de formation et leurs variations en fonction de la profondeur, ainsi que l'amplitude des ondes de tubage.

- **Interprétation de VDL :**
  - Dans le tubage libre, les ondes de tubage apparaissent très nettement, parallèles et rectilignes sur toute la partie libre. On ne voit pas les ondes de formation.
  - Dans le tubage bien cimenté, elles sont très affaiblies et peuvent même pratiquement disparaître. Les ondes de formation apparaissent très nettement.
  - Dans une partie moyennement cimentée, les ondes de tubage sont visibles, plus ou moins sombres, ainsi que les ondes de formation [20].

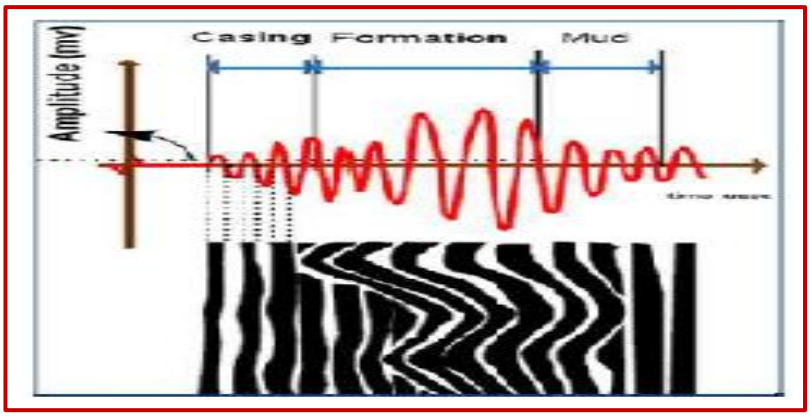

Figure.III.15 : Principe du VDL [20]

III.3.2 Vérification de la qualité de ciment :

Tableau III.3 : Conditions de bonne qualité de ciment par diagraphie sonique CBL et VDL.

Diagraphie utilisé	Bonne cimentation
CBL	• L'amplitude du CBL est faible. • Le Travel time. est peu différent de celui mesuré dans le tubage libre.
VDL	• ondes de tubage très faibles • des ondes de formation très nettes dont les variations correspondent à celles vues sur le sonique enregistré en trou ouvert. • le signal de formation vient en haut et claire.

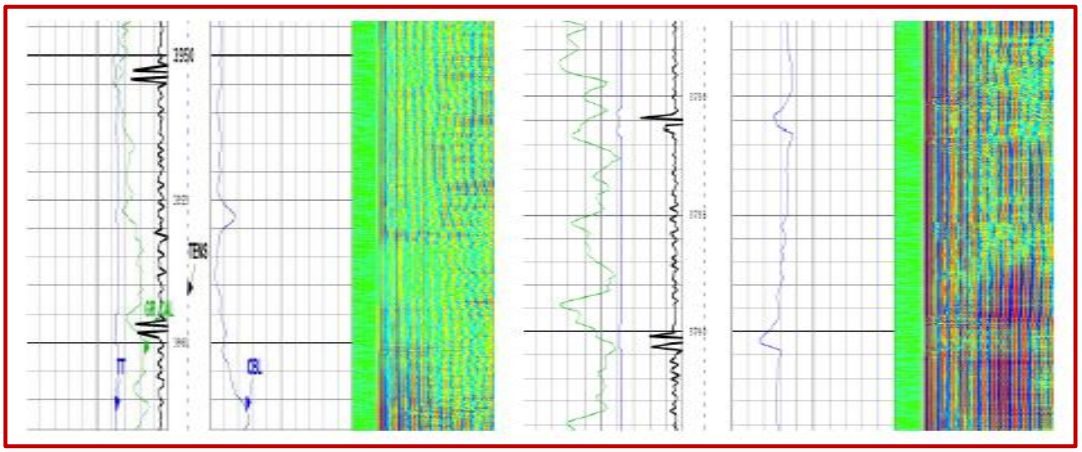

Figure. III.16 : Exemple d'un bon CBL et d'un mauvais CBL [20].

Introduction :

Ce chapitre représente les calculs nécessaires de la phase 12 ¼" des puits (GHAN-1 et TOUT-1), pour cimenter le tubage 9 $^{5/8}$" et passer à la prochaine phase 8 ½ avec la garantie de la sécurité du puits.

Notre travail est basé sur les calculs (le volume, le temps d'injection, la quantité des additifs, le laitier de ciment et la pression refoulement).

À la fin du chapitre, on compare les deux puits avec les résultats obtenus à partir de leurs données.

IV.1 Détail de la phase 12 ¼ ":

IV.1.1 Etudes de puits GHN-1 :

IV.1.1.1 programme de cimentation de la phase 12"$^{1/4}$ de puits GHAN-1 :

IV.1.1.1.1 Conception de l'opération :

- Le travail principal consiste à sceller le tubage de 9 $^{5/8}$"dans le 12,$^{25'}$ OH jusqu'à 1730m de diamètre en pompant 13,44 m^3. 1,90 SG UNIFLAC Boue afin d'isoler le LIAS Anhydritique.
- Le TOC sera à 1389 m (200 m à l'intérieur du boîtier précédent). 7 m^3 de MUDPUSH II seront pompés à l'avance pour faciliter l'élimination de la boue et atténuer le risque de contamination du lisier dans la annulus.
- 1 m^3 de MUDPUSH II seront pompés afin d'atténuer le risque de contamination du lisier à l'intérieur du cuvelage si le sommet l'isolation de la fiche a échoué.

IV.1.1.1.2 Objectif de l'opération :

- Cimenter le boîtier de 9 $^{5/8}$ avec une suspension simple de 1,90 sg.
- Soulever le haut du ciment à 200 m à l'intérieur du tubage précédent.
- renforcer le boîtier pour pouvoir supporter la balance des paiements et équipement de surface.
- Une piste de chaussure dure pour pouvoir percer la section suivante.
- Isolez correctement le OH. [21]

IV.1.1.1.3 formulation et calcul :

IV.1.1.1.3.1 Calcul des volumes :

- **Volume total de laitier :**

Après avoir déterminé la hauteur du ciment dans l'annulaire, et connaissant le profil du puits (diamètre intérieur et extérieur du tubage et le diamètre du trou), on peut calculer le volume de laitier à pomper qui (pour une cimentation primaire) égale à :

$$V_T=V_1+V_2+V_3+V_4 \qquad \textbf{(IV.1)}$$

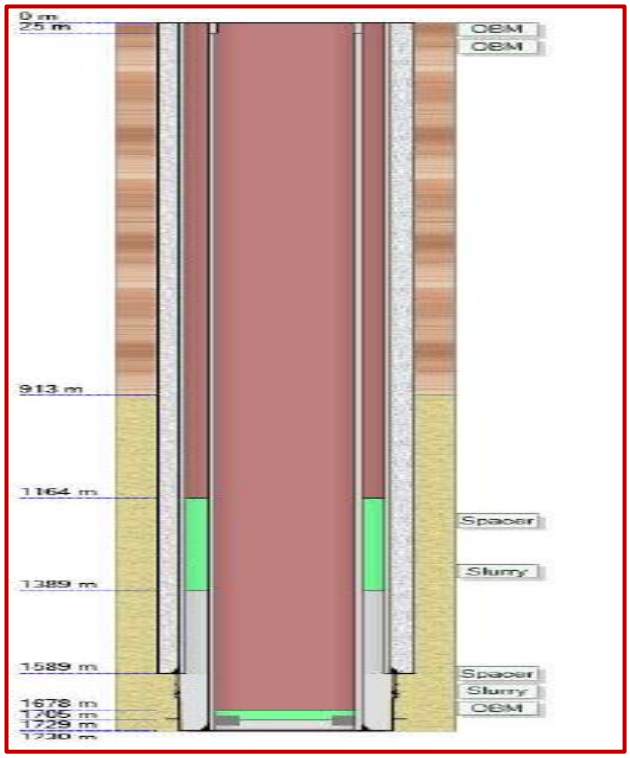

Figure .IV.1 : Schéma du puits GHAN-1. [21]

Telle que :

$\mathbf{V_T}$: volume total de laitier de ciment (m^3).

$\mathbf{V_1}$: volume entre l'anneau-sabot (m^3).

$\mathbf{V_2}$: volume de trou au-dessous de sabot (m3)(1 à 2m).

$\mathbf{V_3}$: volume de l'espace annulaire trou-tubage $9^{5/8}$ (m^3).

$\mathbf{V_4}$: volume de l'espace annulaire tubage $13^{3/8}$ –tubage $9^{5/8}$ (m3).

N.B : le volume du trou est généralement supérieur à celui du trépan d'où les volumes V_2 et V_3 doivent être majorés par un coefficient de majoration qui dépend de la formation.

- Calcul de V_1 :

$$V_1 = C_{\text{TUBAGE } 9^{5/8}} * H_1 \qquad \textbf{(IV.2)}$$

Tell que :

$C_{tubage\ 9\ 5/8}$: Volume unitaire à l'intérieur de tubage (l/m).

H_1 : Hauteur entre l'anneau de retenu et le sabot (m).

($H_1 = H_{sabot\ 9\ 5/8} - H_{anneau\ de\ retenu}$).

A.N V_1= 38.19 * (1729-1704.6) = **0.9 m³**

- Calcul de V_2 :

$$V_2 = \frac{\pi D^2 trou}{4} * H2 * k \qquad \textbf{(IV.3)}$$

Tell que :

V_2: Volume de trou au-dessous de sabot (m^3).

D_{trou} : Diamètre de trou $12^{1/4}$ (m).

H_2 : la hauteur entre le sabot de tubage $9^{5/8}$ et le fond de puits (m).

($H_2 = H_{fond\ puits} - H_{sabot\ 9\ 5/8}$).

K : coefficient de majoration (dans notre puits K=50%).

A.N V_2=(3.14*(0.0254*12.312)2)/(4)*0.9*1.5 = **0.103 m³**

- Calcul de V_3 :

$$V_3 = (S_{\text{TROU}} - S_{\text{TUBAGE } 9^{5/8}}) * H_3 * K \qquad \textbf{(IV.4)}$$

Ou

$$V_3 = \left(\frac{\pi D^2 trou}{4} - \frac{\pi OD^2 tubage}{4}\right) * H3 * k \qquad \textbf{(IV.5)}$$

Tell que :

S_{trou} : section de trou $12^{1/4}$ (m^2).

$S_{tubage\ 9\ 5/8}$: section de tubage $9^{5/8}$ (m^2)

H_3 : Hauteur entre le sabot $9^{5/8}$ et le sabot $13^{3/8}$ (m). ($H_3 = H_{sabot\ 9\ 5/8} - H_{sabot\ 13\ 3/8}$).

D_{trou} : diametre de trou $12^{1/4}$ (m).

OD_{tubage} : Diametre exterieur de tubage (m).

A.N V_3= (0.0767-0.0469)*140*1.5 = **6.258 m³**

❖ Calcul V_4 :

$$V_4 = C_{TUBAGE133/8-TUBAGE\ 95/8} * H_4 \qquad (IV.6)$$

Ou

$$V_4 = (S_{inter\ 13\ 3/8} - S_{ext\ 95/8}) * H_4$$

Tell que :

$C_{tubage13\ 3/8-tubage\ 9\ 5/8}$: Volume unitaire entre le tubage $13^{3/8}$ et le tubage $9^{5/8}$ (l/m).

H_4 : Hauteur entre le sabot $13^{3/8}$ et le top Ciment (m) /($H_4 = H_{sabot}\ 13^{3/8} - H_{top\ ciment}$).

$S_{13\ 3/8}$: section intérieure de tubage13 $^{3/8}$(m²).

$S_{9\ 5/8}$: section extérieure de tubage $9_{5/8}$ (m²)

A.N $V_4 = (0.078-0.0469)*200 =$ **6.22 m³**

Donc on aura le volume total :

A.N de la formule (IV.1) : $V_T = 0.9 + 0.103 + 6.258 + 6.22 =$ **13.44 m³**

➢ **volume de boue de chasse :**

Le volume de boue de chasse c'est le volume de boue qui pousse le ciment à l'intérieur de tubage.

$$V_{CHASSE} = C_{INT-TUBAGE} * H_{ANNUE-SURFACE} \qquad (IV.7)$$

Tell que :

V_{chasse} : volume de boue de chasse (m3).

$C_{int.tubage}$: volume unitaire à l'interieur de tubage (l/m).

$H_{annue-surface}$ **:** Hauteur entre l'anneau de retenu et la surface (m).

$$V_{CHASSE} = (C_{INT-TUBAGE} * H_{TUBAGE}) + (C_{INT-TUBAGE} * H_{TUBAGE})$$

A.N $V_{CHASSE} = 38.19 * (1705-25)+(36.91*25) =$ **65.08 m³**

- **les informations sur le puits :**

Le tableau ci-dessous montre les longueurs (tubage $9^{5/8"}$et $13^{3/8"}$) par a pour poids nominal 53.5lb /ft et 47 lb/ft de tubage $9^{5/8"}$et 68 lb/ft de $13^{3/8"}$ avec la longueur de la anneau de retenue et top ciment nécessaires au calcul :

Tableau IV.1 : Longueur des casings

Type	**Longueur (m)**
Tubage $9^{5/8}$ inch 53.5 lb/ft (TD).	**25**
Tubage $9^{5/8}$ inch 47 lb/ft (TD).	**1729**
Tubage $13^{3/8}$ inch 68 lb/ft (TD).	**1589**
Anneau de retenue	**1704.6**
Top ciment	**1389**

Le tableau ci-dessous montre les capacités (tubages $9^{5/8"}$et $13^{3/8"}$)nécessaires au calcul :

Tableau IV.2 : Capacité les tubages

Type	Capacité (l/m)
Tubage $9^{5/8}$ inch 53.5 lb/ft	36.91
Tubage $9^{5/8}$ inch 47 lb/ft	38.19
Tubage $13^{3/8}$ inch	78.1

Le tableau ci-dessous montre les résultats des volumes pour les longueurs de $9^{5/8"}$:

Tableau IV.3 : Volume de laitiers

Zone	**Longueur (m)**	**Volume (m^3)**
Anneau-sabot	**24.4**	**0.9**
Ciment entre tubage $13^{3/8}$ et $9^{5/8}$	**200**	**6.22**
Ciment entre tubage $9^{5/8}$ et trou $12^{1/4}$	**140**	**6.258**
Ciment entre le fond et le sabot $9^{5/8}$	**0.9**	**0.103**
Volume total de ciment =		**13.44**

Le tableau ci-dessous montre les résultats des volumes du calcul et du volume de la boue de chasse :

Tableau IV.4 : Volume de boue de chasse

Zone	**Longueur (m)**	**Volume (m3)**
Tubage 95/8 inch 53.5 lb/ft	**25**	**0.92**
Tubage 95/8 inch 47 lb/ft	**1679.6**	**64.14**
V_T de la boue de chasse =		**65.06**

IV.1.1.1.3.2 Calcul de la quantité de ciment :

La densité du laitier utilisée est d_l= 1.9, d'un rendement R= 0.758 $^{m3/}{}_{T}$.

$$Qc = \frac{VL}{R} \qquad \textbf{(IV.8)}$$

A.N $\quad Q_c = \frac{13.44}{0.758} =$ **17.73 tonnes**

IV.1.1.1.3.3 Calcul de la quantité des additifs :

Laitier de ciment est composé de types d'additifs et varie en fonction de la quantité en cours de l'opération de la cimentation .Le tableau ci-dessous montre comment calculer la quantité d'additifs :

Tableau IV.5 : Calcul de la quantité des additifs de la phase 9 $^{5/8"}$

Les Type des additifs	Calcul la quantité des additifs
Anti foam (defoamer)	1 $_{(l/tonne)*}$ 17.73 = **17.73 l**
Fluid loss (perte)	(0.20% * 17.73 *1000)/100 = **35.46 kg**
Dispersant	(0.25% * 17.73 * 1000)/100 = **44.32 kg**
Retarder	(0.09%* 17.73 * 1000) / 100= **15.95 kg**
Mix fluid	441.38$_{(l/tonne)*}$ * 17.73 = **7.82 m^3**
Mix water	436.726 * 17.73 $_{(l/tonne)*}$ = **7743.15 m^3**

- **Le temps de mixage est de : 60 min**

IV.1.1.1.3.4 Calcul du temps d'injection du laitier t_I :

$$\mathbf{ti.t} = \frac{\mathbf{Vi}}{\mathbf{Qi}} \qquad \textbf{(IV.9)}$$

Tell que :

V_i : Volume injecté (L)

Q_i : débit d'injection (L/min)

$t_{i.t}$: temps d'injection total (min).

Les fluides injectés respectivement sont :

- 7000 l de spacer avec un debit 800 l/min

A.N $\quad t_{is} = \frac{700}{800} =$ **9min**

- 13440 l de laiter de iment avec un debit de 800 l/min

A.N $t_{il} = \frac{13440}{800} = \mathbf{17min}$

- 1000 l de spacer avec un debit 800 l/min

A.N $t_{is} = \frac{1000}{800} = \mathbf{1min}$

- 48000 L de boue de chasse avec un débit de 1000 L/min

A.N $t_{ch} = \frac{4800}{1000} = \mathbf{48min}$

- 3000 L de boue de chasse avec un débit réduit jusqu'à la tombe de bouchon supérieur sur le bouchon inferieur avec un débit de 400 L/min.

A.N $t_{ch} = \frac{3000}{400} = \mathbf{8min}$

- 11360 L de boue de chasse avec augmentation de débit jusqu'à 1000 L/min

A.N $t_{ch} = \frac{11360}{1000} = \mathbf{11min}$

- 1700 L de boue de chasse avec réduction de débit jusqu'à 400 L/min

A.N $t_{ch} = \frac{1700}{400} = \mathbf{4min}$

Donc :

Le temps total d'injection : $t_{i.t}$ = 9+17+1+48+8+11+4 = 98 min= **1h : 38min**

IV.1.1.1.3.5 Calcul de la pression de refoulement (P_{ref}) :

La pression maximale prévisible en fin de refoulement est égale à la différence de la pression entre espace annulaire et l'intérieure du tubage.

$$P_{ref} = \left[\frac{d_L \cdot h_{L.e.ann}}{10.2} + \frac{d_{sp} \cdot h_{sp.e.ann}}{10.2} + \frac{d_b \cdot h_{b.e.ann}}{10.2}\right] - \left[\frac{d_L \cdot h_{L.int.tub}}{10.2} + \frac{d_{sp} \cdot h_{sp.int.tub}}{10.2} + \frac{d_b \cdot h_{b.int.tub}}{10.2}\right] \quad \textbf{(IV.10)}$$

Tell que :

P_{ref} : Pression de refoulement (bar).

d_l : densité de laitier de ciment.

$h_{L.e.annu}$: hauteur de laitier dans l'espace annulair

d_{sp} : densité de spacer

$h_{sp.e.annu}$: hauteur de spacer dans l'espace annulaire (m).

d_b : densité de la boue de forage.

$h_{b.e.annu}$: hauteur de boue de forage dans l'espace annulaire (m).

$h_{L.int.tuba}$: hauteur de laitier à l'intérieur de tubage (m).

$h_{sp.int.tub}$: hauteur de spacer intérieur de tubage (m).

$h_{b.int.tub}$: hauteur de boue à l'intérieur de tubage (m).

- calcul la hauteur de laitier dans l'espace annulaire :

$$h_{l.e.annu} : \text{fond de puits} - \text{top ciment} \qquad \textbf{(IV.11)}$$

A.N $h_{l.e.annu}$ = 1729.9-1389 = **340.9 m**

❖ hauteur de spacer dans l'espace annulaire :

$$h_{sp.e.annu} = V_{sp} / C_{\text{tubage 13 3/8 ,95/8}} \qquad \textbf{(IV.12)}$$

A.N $h_{sp.e.annu}$ = 7000 / 39.9 = **175.39 m**

❖ hauteur de boue de forage dans l'espace annulaire :

$$h_{b.e.annu} = \text{fond de puits} - h_{l.e.annu} - h_{sp.e.annu} \qquad \textbf{(IV.13)}$$

A.N $h_{b.e.annu}$ = 1729.9-340.9-175.39= **1213.61 m**

❖ hauteur de laitier à l'intérieur de tubage :

$$h_{L.int.tuba} = \text{fond de puits} - h_{\text{annue de retenu}} \qquad \textbf{(IV.14)}$$

A.N $h_{L.int.tuba}$ = 1729.9 – 1704.6 = **25.3 m**

❖ hauteur de spacer intérieur de tubage :

$$h_{sp.int.tub} = V_{sp} / C_{\text{tubage 95/8}} \qquad \textbf{(IV.15)}$$

A.N $h_{sp.int.tub}$ = 1000/ 38.19 = **26.18 m**

❖ hauteur de boue à l'intérieur de tubage :

$$h_{b.int.tub} = \text{fond de puits} - h_{l.int.tub} - h_{sp.int.tub} \qquad \textbf{(IV.16)}$$

A.N $h_{b.int.tub}$ = 1729.9-25.3-26.18= **1678.42 m**

Donc : après applique la formule **(IV.10)** :

On a : $d_l = 1.9$ $d_{sp} = 1.3$ $d_b = 1$

$$P_{ref} = 32.23 \text{ bar}$$

IV.1.1.1.4.Interprétation de des logs CBL-VDL de phase 12$^{1/4}$ puitsGHAN-1:

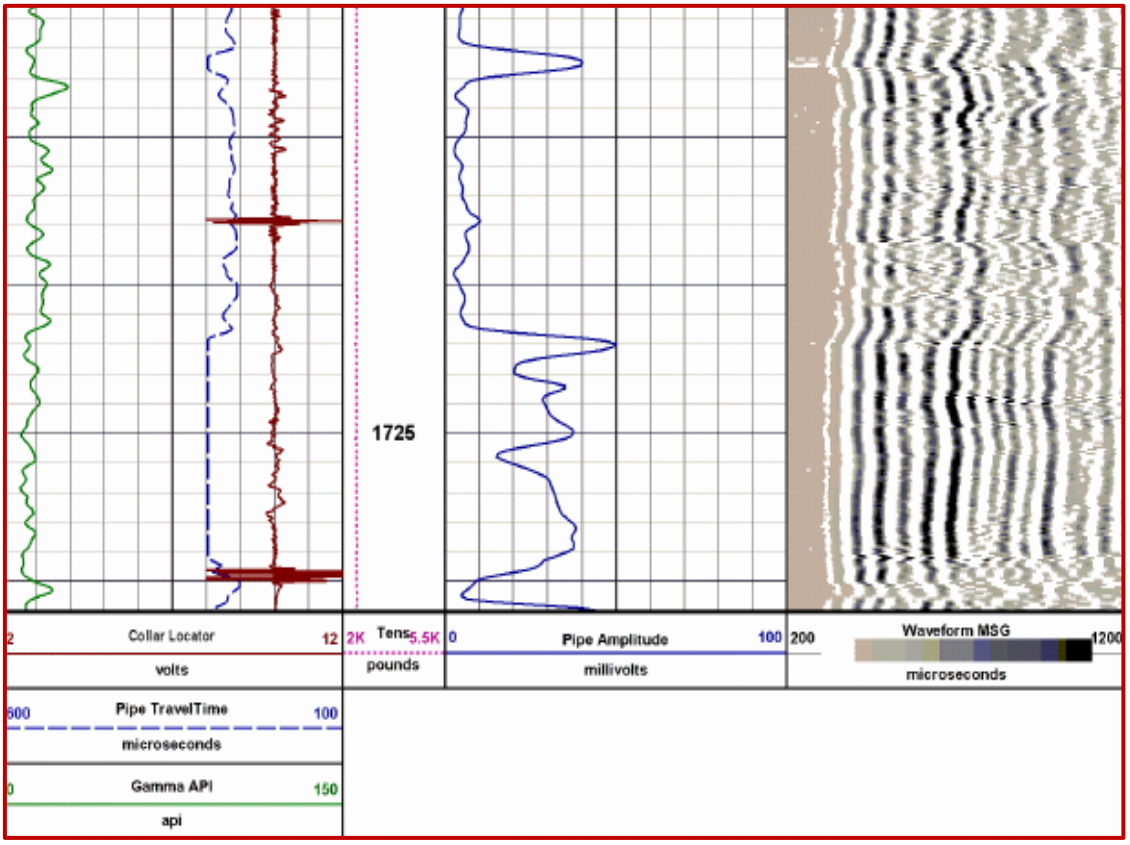

Figure.IV.2 : Diagraphie de CBL-VDL montre une très bonne cimentation GHAN- 1 [22]

Interprétation :

Le log montre une très bonne cimentation de 1725 à 1700 m, bonne de 1700 à 1675m, moyenne de 1675 à 1650 m, bonne à très bonne de 1650 à 1625 m, faible à moyenne de 1625 à 1600 m, moyenne de 1600 à 1595 m, faible de 1590à 1500 m, bonne à moyenne de 1500 à 1475m, faible de 1475 à 1450 m, bonne à moyenne de 1450 à 1425 m, faible de 1425 à 1400 m, bonne à moyenne de 1400 à jusqu'au top ciment (dessus tubage par 200 m).

IV.1.2 Etudes de puits TOUT-1 :

IV.1.2.1 programme de cimentation de la phase 12"1/4 de puits TOUT-1 :

IV.1.2.1.1 : Opération de cimentation :

Une fois le tubage au fond :

- Monter la tête de cimentation et tester les lignes à 4000 psi pendant 10 minutes. Purger la pression et isoler les lignes de cimentation.
- Ouvrir les lignes des pompes de forage sur le manifold et circuler suivant les débits, pressions et durée prévus par le programme de cimentation.
- Faire le pre-job meeting (Technique & Safety) avec toutes les parties prenantes pendant la circulation.
- Sur le Manifold, fermer la ligne des pompes à boue, ouvrir la ligne de cimentation et pomper le Spacer suivi du Preflush.
- Larguer le bouchon inférieur, pomper le laitier de queue 1.9 SG, et le lancement du bouchon supérieur attendre le deplacement du fluide
- Larger le bouchon de fermeture de DV, pomper le spacer suivi par le pompage de laitier de tete et le lancement du bouchon de fermeture de DV.
- Chasse : pomper 1 m3 d'eau par l'Unité de cimentation, continuer la chasse avec les pompes de forage. Ne pas dépasser un volume de chasse égal au volume théorique + moitié de la section anneau–sabot, même sans à-coup de pression.
- A l'à-coup de pression, tester le tubage pendant 15 min à 3000 psi.
- Faire un bilan des volumes de boue après la cimentation, afin d'évaluer s'il y a eu des pertes pendant l'opération. Ne pas confondre les effets d'U-tube avec des pertes. Les bacs de stockage d'eau de mixage doivent être contrôlés en fin d'opération suivant la Procédure Générale de Cimentation

IV. 1.2.1.2 : Conception de l'opération (cimentation étagée):

- Le travail principal consiste à sceller le tubage de 9 5/8 "dans le 12 1/4' OH jusqu'à 2512m de diamètre en pompant 26.90 m^3. 1,35 SG de laitier de tête, puis pomper 35.54 m^3 de laitier de queue .1.9 SG pour couvrir la phase.
- Le TOC sera à 613 m (200 m à l'intérieur du boîtier précédent).10 m3 de MUDPUSH II seront pompés à l'avance pour faciliter l'élimination de la boue et atténuer le risque de contamination du lisier dans la annulus.

- Afin de pomper le volume estimé de deux laitier du ciment (cimentation étagée) en doit pomper la boue de chasse 94.96 m3 jusqu'à l'anneau de retenu. [23]

IV.1.2.1.3 formulation et calcul :

IV.1.2.1.3.1 Calcul des volumes :

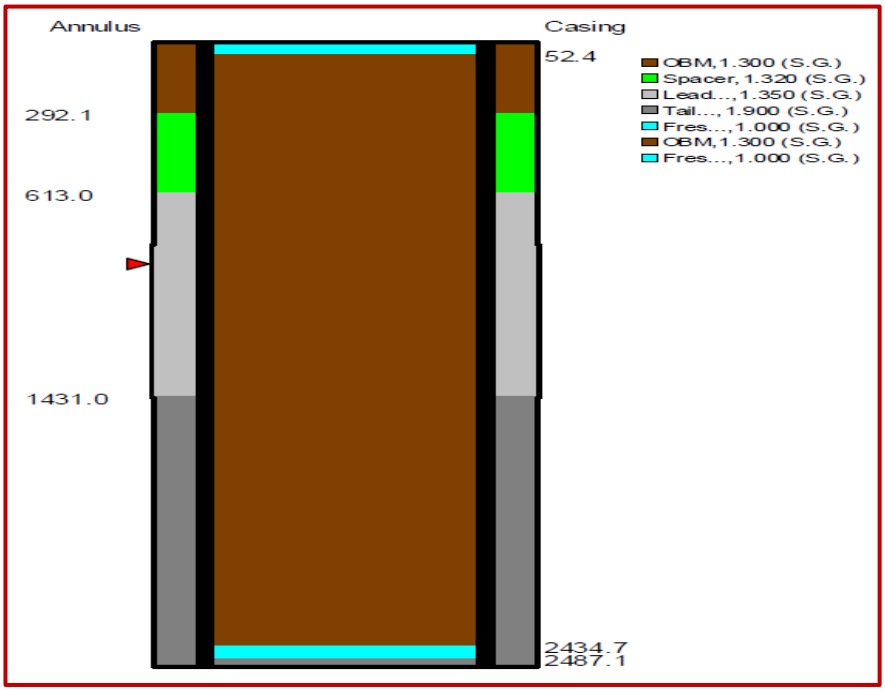

Figure .IV.3 : Schéma du puits TOUT-1 [23]

- **Volume total de laitier :**

$$V_T = V_{t1} + V_{t2} \qquad \textbf{(IV.17)}$$

Tell que :

V_T : volume de lead slurry ou laitier de tête 1.35 SG (m^3)

V_{t1} : volume de laitier entre les deux tubages

V_{t2} : volume de laitier entre le trou et le tubage 9 $^{5/8}$

- Calcul de V_{t1}

$$V_{t1} = (C_{TUBAGE\ 13} - C_{TUBAGE\ 95/8}) * H_1 \qquad \textbf{(IV.18)}$$

$$V_{t1} = 31.18 * 200 = \mathbf{6.23\ m^3}$$

- Calcul de V_{t2}

$$V_{t2} = C_{tr-\ 95/8} * H * K \qquad \textbf{(IV.19)}$$

$$V_{t2} = 29.09 * 613 * 1.1 = \mathbf{20.5\ m^3}$$

Donc : A.N du formule **(IV.17)** $V_T = \mathbf{26.8\ m^3}$

$$V_Q = V_{q1} + V_{q2} + V_{q3} \qquad \textbf{(IV.20)}$$

Tell que :

V Q : volume de tail slurry ou laitier de queue 1.9 $_{SG}$ (m3)

V $_{q1}$: volume de laitier entre le sabot et l'anneau de retenu

V $_{q2}$: volume du laitier entre le sabot et le fond du puits

V $_{q3}$: volume du laitier entre le trou et le tubage 9 $^{5/8}$

- Calcul de **V_{q1}**

$$V_{q1} = C_{95/8} * H \qquad \textbf{(IV.21)}$$

$$V_{q1} = 38.18 * 25$$

$$V_{q1} = 0.95 \text{ m3}$$

- Calcul de **V_{q2}**

$$V_{q2} = 0.785 * D^2 * H * K \qquad \textbf{(IV.22)}$$

$$V_{q2} = 0.09 \text{ m}^3$$

- Calcul de **V_{q3}**

$$V_{q3} = C\ tr_9^{5/8} * H * K \qquad \textbf{(IV.23)}$$

$$V_{q3} = 29.09 * 1081 * 1.1$$

$$V_{q3} = 34.6 \text{ m3}$$

Donc : A.N du formule **(IV.20)** **V_Q = 35.5 m3**

- **volume de boue de chasse :**

A.N du formule **(IV.7)** **V_{CHASSE}** = 38.18 * 2487 = **94.95 m^3**

- **les informations sur le puits :**

Le tableau ci-dessous montre les longueurs (tubage 9$^{5/8"}$et 13$^{3/8"}$) par a pour poids nominal :

Tableau IV.6 : Longueur des casings

Type	**Longueur (m)**
Tubage 95/8 inch 47 lb/ft (TD).	**2512**
Tubage 133/8 inch 68 lb/ft (TD).	**813**
Anneau de retenue	**2487.08**
Top ciment de tète	**613**

Le tableau ci-dessous montre les capacités (tubages 9$^{5/8"}$et 13$^{3/8"}$) nécessaires au calcul :

Tableau IV.7 : Capacité les tubages

Type	Capacité (l/m)
Tubage 95/8 inch 47 lb/ft	**38.18**
Tubage 95/8 inch X Tubage 133/8 inch	**31.15**
Tubage 95/8 inch X le trou + 10%	**29.09**

Le tableau ci-dessous montre les résultats des volumes pour les longueurs de $9^{5/8"}$:

Tableau IV.8 : Volume de laitiers

Zone	**Longueur (m)**	**Volume (m3)**
Anneau-sabot	**25**	**0.95**
Ciment lead entre tubage 133/8 et 95/8	**200**	**6.23**
Ciment lead entre tubage 95/8 et trou 12 1/4	**613**	**20.5**
Ciment tail entre tubage 95/8 et le trou	**1081**	**34.6**
Volume total de ciment (lead)		**26.8**
Volume total de ciment (taill)		**35.5**

Le tableau ci-dessous montre les résultats des volumes du calcul du volume la boue de chasse :

Tableau IV.9 : Volume de boue de chasse

Zone	**Longueur (m)**	**Volume (m3)**
Tubage 95/8 inch 47 lb/ft	**2487**	**94.95**
Volume total de boue de chasse		**94.95**

IV.2.1.3.2 Calcul de la quantité de ciment et l'eau de gâchage :

- **calcul de la quantité de ciment :**

D'après le formulaire du foreur : **V_{lait} = 121.8 L / 100 Kg** **(IV.24)**

Tell que :

Q_T : quantité de laitier de tête

Q_Q : quantité de laitier de queue

A.N 121.8 L ⟶ 100 Kg

26900 ⟶ **Q_T = 22 tonnes**

35500 ⟶ **Q_Q = 35.48 tonnes**

❖ **Calcul l'eau de gâchage :**

D'après le formulaire du foreur : **$V_{eau/laitier}$ =90.1 L/100 Kg (IV.25)**

Tell que :

V_{eT} : volume d'eau de gâchage du laitier de tête

V_{eQ} : volume d'eau de gâchage du laitier de queue

A.N 90.1 L ⟶ 100 Kg

22000 ⟶ **V_{eT} =19.82 tonnes**

35480 ⟶ **V_{eQ} =26.5 tonnes**

IV.2.1.3.3 Calcul de la quantité des additifs :

Laitier de ciment est composé de types d'additifs et varie en fonction de la quantité en cours de l'opération de la cimentation .Le tableau ci-dessous montre comment calculer la quantité d'additifs :

Tableau.IV.10 : types et quantités des additifs du laitier de tête

Les Type des additifs	la quantité des additifs
Anti foam (defoamer)	2 (l/tonne)* 22 = **44 l**
Fluide loss (perte)	(0.50% * 22 *1000)/100 = **110 kg**
Retarder	(0.65%* 22 * 1000) / 100= **143 kg**
Mix fluid	441.38 (l/tonne)* 22 = **9.71 m^3**

Tableau.IV.11 : types et quantité des additifs du laitier de queue

Les Type des additifs	la quantité des additifs
Anti foam (defoamer)	2 (l/tonne)* 35.48 = **70.96 l**
Fluid loss (perte)	(0.30% * 35.48 *1000)/100 = **106.44 kg**
Dispersant	(0.20% * 35.48 * 1000)/100 = **70.96 kg**

Retarder	(0.25%* 35.48 * 1000) / 100= **88.7 kg**
Mix fluid	$443.005_{(l/tonne)*}$ * 35.48 = **7.82 m^3**

IV.2.1.3.3 Calcul du temps d'injection :

A.N du formule **(IV.9)** : **T_{ch} =** 12.5+33.62+44.37+2.5+25+76.2+5

= **3h : 22min**

IV.2.1.3.4 Calcul de la pression de refoulement (P_{ref}) :

A.N du formule **(IV.10)** : **P_{ref} =** 387 – 321= **66 bar**

IV.1.2.1.4 Interprétation de des logs CBL-VDL de phase 12$^{1/4"}$ puits TOUT-1 :

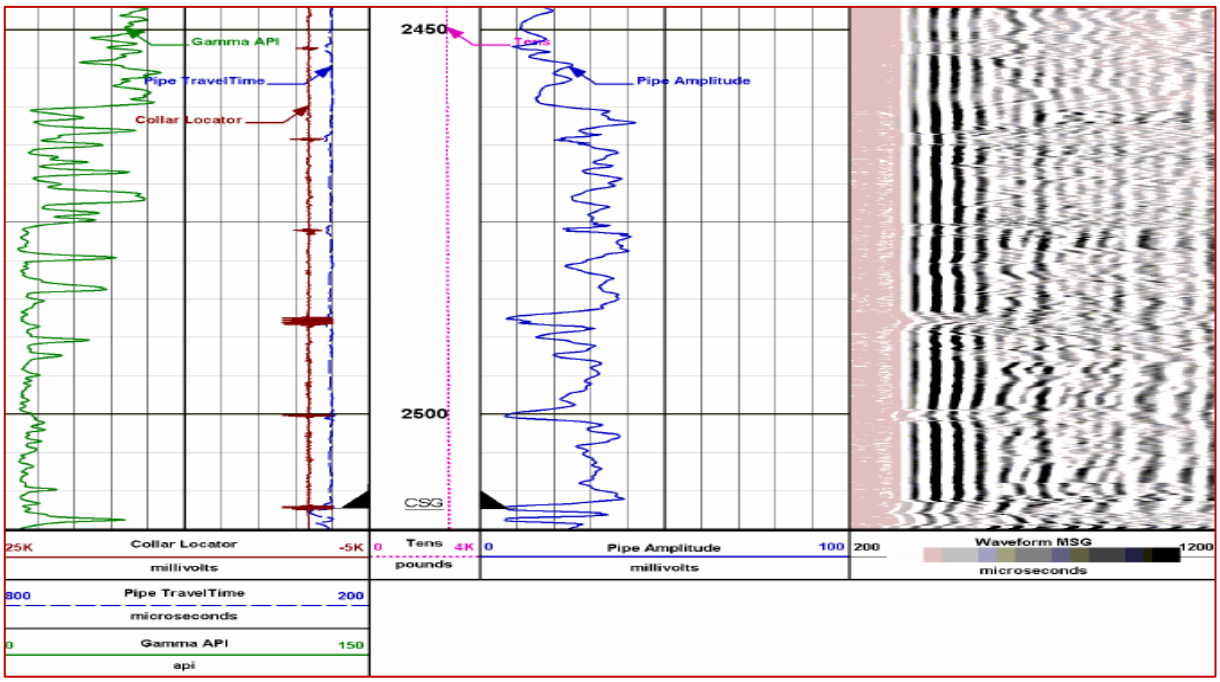

Figure.IV.4 : Diagraphie de CBL-VDL montre une très bonne cimentation TOUT- 1 [21]

Interprétation :

Le log montre une très bonne cimentation de 2500 à 2450m, bonne de 2450 à 2400m, moyenne de 2400 à 2350 m, bonne à très bonne de 2350 à 2300 m, faible à moyenne de 2300 à 2250 m, moyenne de 2250 à 2200 m, faible de 2200à 2150 m, bonne à moyenne de 2150 à 2100m, faible de 2100 à 2000 m, bonne à moyenne de 2000 à 1950 m, faible de 1950 à 1900m, bonne à moyenne de 1900 à jusqu'au top ciment (dessus tubage par 200 m).

IV.2 Corrélation et discutions des données et résultats

IV.2.1 Aspects compatibles

Ce tableau représente les similitudes des puits GHAN-1 et TOUT-1 :

Tableau.IV.12 : Les indices de similitudes

Puits	GHAN_1	TOUT_1
Types de puits	Exploration	Exploration
Année de début de forage	2019	2019
Compagne de contrat	ENTP	ENTP
Schéma du puits	Vertical	Vertical
Basin	Oued_Mya	Oued_Mya

IV.2.2 Aspects différents

Le tableau suivant représente les différences signes entre les deux puits étudié :

Tableau.IV.13 : Les aspects différents

Puits	GHAN -1	TOUT-1
Type de cimentation	Classique	Etagé
Longueur du casing 13 $^{3/8}$	1589 m	813 m
Longueur du casing 9 $^{5/8}$	1729 m	2513 m
Volume de laitier	13.44 m^3	57.54 m^3
Temps d'injection	01 :38 min	03 : 22 min
La pression de refoulement	32.23 bar	66 bars
Compagne de service	Schlumberger	Oil serv
Le cout d'opération	**$16,000.00**	**$40,200.00**

IV.2.3 Discutions :

D'après les calculs et résultats précédentes on a constats que la profondeur du découvert est le variable clé pour la détermination du programme, du types ainsi du cout de cimentation.

La profondeur du puits a une relation directe avec la pression de refoulement finale de cimentation, donc les puits non profond comme Ghan-1 ayant des pressions de refoulement inférieur à la pression de fracturation des formations et ne génère pas des problèmes comme l'éboulement ou l'endommagement des formations cimentée.

Mais pour les puits profond comme Tout-1 provoque des conséquences très dangereuses Et non désirables dans le cas d'utilise un celle type de laitier, qu'implique plutôt L'endommagement et l'abandonnement de puits, donc perte économique grave, c'est pour cela L'équipe de cimentation ou l'association de service applique la cimentation étagé c'est ta dire Injecté dans le puits deux laitiers différentes soit dans la densité ou dans les additifs pour éviter Ce problématique et réduisez la valeur du pression de refoulement.

Conclusion générale :

Notre travail consiste à effectuer un suivi détaillé de la phase $12^{1/4}$"aux deux puits GHAN-1 et TOUT-1. On a mis en évidence l'opération de cimentation d'une manière générale puis on a fait tous les calculs nécessaires pour une bonne cimentation.

On a calculé le volume de l'espace annulaire en tenant compte de l'irrégularité des parois et par la suite, on a fait le calcul du volume du laitier nécessaire sur le plan de la qualité et de la quantité et puis effectué une comparaison entre les deux puits. L'opération de cimentation du puits GHAN-1 est primaire (classique) et l'opération de cimentation du puits TOUT-1 est étagée.

La pompabilité du laitier nécessite une technicité spéciale afin de ne pas avoir de gel ou prise de laitier au cours du pompage, raison pour laquelle, on doit bien veillez sur le temps de pompage pour :

- Le laitier et le volume de chasse sans oublier le spacer avant et après le laitier. Une fois ce dernier mis en place, on laisse le temps nécessaire pour la prise de ciment, puis on procède à l'opération de diagraphie.
- CBL : Cement Bound Log
- VDL : Variable Density Log

Celle-ci nous donne une idée sur la qualité du ciment qui devrait avoir des propriétés mécaniques (résistance) et hydrauliques (perméabilité, porosité) voisines ou meilleures (inférieures) que celles de la formation.

Bibliographiques

[1] Évaluation des réserves- région d'Oued Mya BEICIP (1992).

[2] Sonatrach exploration production division forage direction des opérations 2019 opérations Ghardaïa nord-1 (GHAN-1) TP 161.

[3] Sonatrach exploration production division forage direction des opérations 2019 opérations Toumiet -1 (TOUT-1) TP 223.

[4] M. Riane Rami « Contribution à la Synthèse d'Observateur Adaptatif à Entrées Inconnues d'un Système de Forage Rotary » Magister université M'hamed Bougara-Boumerdes 2010.

[5] Jean Paul Nguyen le forage technique d'exploitation pétrolière 1993.

[6] A. BERROUSSI « ETUDE D'UN POMPE A BOUE OIL-WELL» université Kasdi Merbah Ouargla 2017.

[7] **A**. Salimani, « Forage pour non foreurs » département formation Sonatrach, Septembre 2003.

[8] A. BELAID « Modelisation tridimensionnelle du comportement mecanique de la garniture de forage.., » École nationale supérieure des mines de Paris, 2005.

[9] G. PELFRENE « Rôle du processus de forabilité des rochesdans les vibrations de torsiondes systèmes de forage pétrolier » Thèse de doctorat École nationale Supérieure des mines de Paris 2005.

[10] A. ABDOULAYE « Contribution à la surveillance d'un processus de forage Pétrolier» Thèse de doctorat, ParisTech-Institut des Sciences et Technologies 2010.

[11] J. KAPLAN « Modélisation tridimentionnelle du comportement directionnel du système de forage Rotary » Thèse de doctorat École nationale supérieure des mines de Paris, 2003.

[12] M.CHERIFI «Etude et maintenance de treuil de forage OIL WELL 840E» Université Hassiba Benboualide, chlef, 2012.

[13] A. Slimani FORMATION JDF Module M1 Mars 2004.

[14] Forage Rotary «La boue de forage», Edition Technip 1972.

[15] BENASKEUR Khaled « descente et cimentation du liner 7 » université M'hamed Bougara- Boumerdes 2010.

[16] A. Slimani ; C. SOUSSI « FORMATION JDF Module M2 », Tome 1.

[17] A. Slimani ; C. SOUSSI « FORMATION JDF Module M1 » mars 2004.

[18] IFP Training, LES BOUCHONS DE CIMENT, ENSPM Formation Industrie 05.

[19] Ciments et laitiers (Copyright 2006 ENSPM Formation Industrie – IFP Training).

[20] IFP Training, LES DIAGRAPHIES DE CIMENTATION, ENSPM Formation Industrie, 2005.

[21] Schlumberger (casing cementing program) puits GHAN- 1 2019.

[22] HESP cementbond log casing collar locator gamma ray puits GHAN- 1.

[23] Oïl serv (casing cementing program) puits TOUT-1 , 2019.