

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

Département de : Génie Civil et Hydraulique

C:.....
R:.....

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de

Master2, Filière: Hydraulique

Spécialité : Forage d'eau

Thème

Pose, cimentation d'une colonne de tubage et calcul de cimentation. Cas du forage Debidibi – El Hadjira.

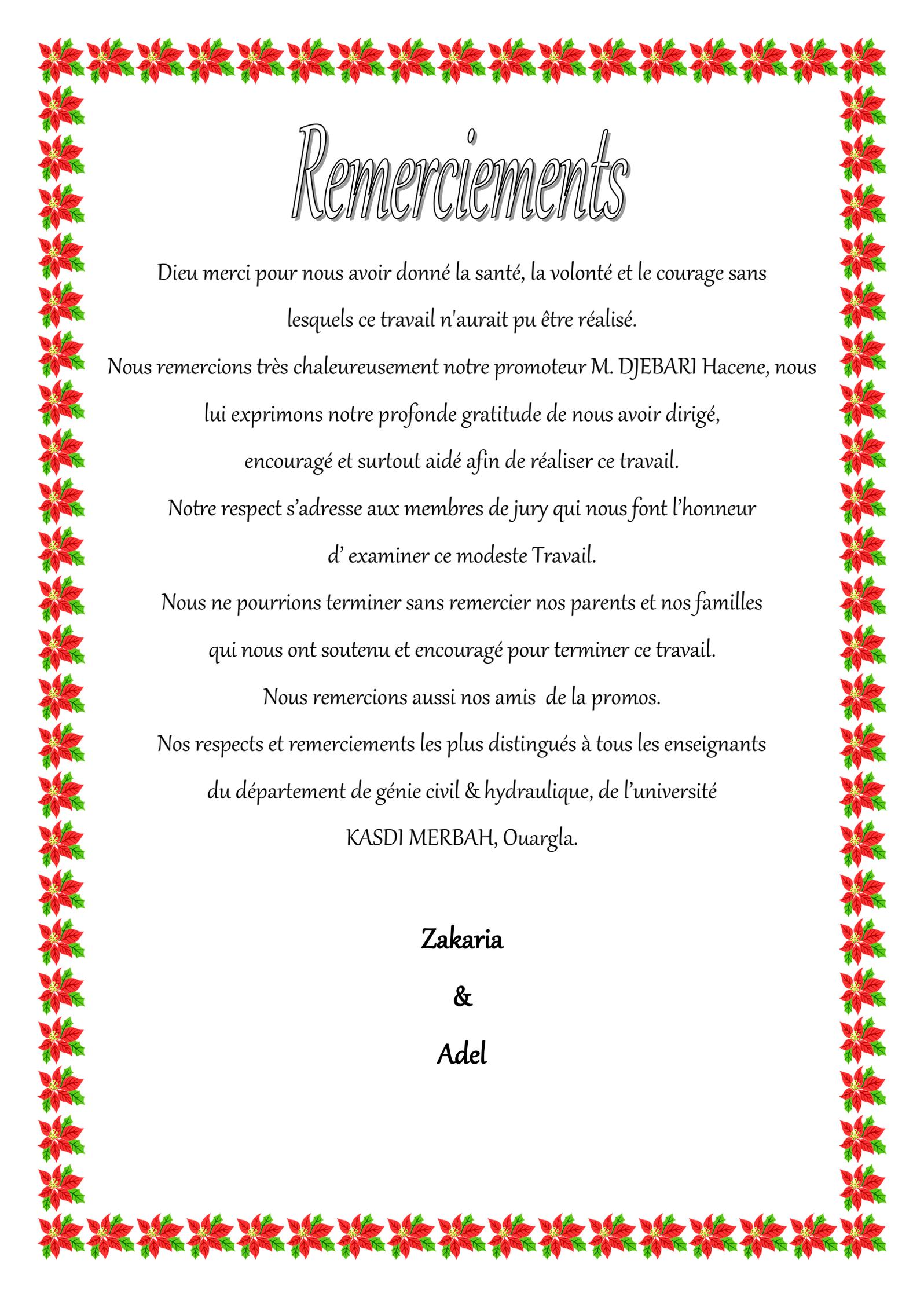
Présenté par :

- ❖ **DJEGHBALA Zakaria**
- ❖ **NAAM Adel**

Soumis au jury composé de :

DJEBARI Hacene	M. A. A Univ. Ouargla	Encadreur
MANSOURI Zina	M. A. A Univ. Ouargla	Présidente
NETTARI Kamel	M. A. A Univ. Ouargla	Examineur

Année Universitaire: 2020 / 2021



Remerciements

Dieu merci pour nous avoir donné la santé, la volonté et le courage sans lesquels ce travail n'aurait pu être réalisé.

Nous remercions très chaleureusement notre promoteur M. DJEBARI Hacene, nous lui exprimons notre profonde gratitude de nous avoir dirigé, encouragé et surtout aidé afin de réaliser ce travail.

Notre respect s'adresse aux membres de jury qui nous font l'honneur d'examiner ce modeste Travail.

Nous ne pourrions terminer sans remercier nos parents et nos familles qui nous ont soutenu et encouragé pour terminer ce travail.

Nous remercions aussi nos amis de la promos.

Nos respects et remerciements les plus distingués à tous les enseignants du département de génie civil & hydraulique, de l'université

KASDI MERBAH, Ouargla.

Zakaria

&

Adel



Dédicace

Celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas Allah.

Quoi de plus que de pouvoir partager les meilleurs moments de
sa vie avec les êtres qu'on aime.

Arrivé au terme de nos études, nous avons le grand plaisir de dédier ce
modeste travail à :

nos chères mères et nos pères,

À nos frères

À La famille Djeghbala et koll

À La famille Naam et Chaib

À tous nos amis de la promotion Master Forage

À notre encadreur : DJEBARI hacene

À tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin pour la
réalisation de ce modeste travail

DJEGHBALA Zakaria

&

NAAM Adel

SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I – Généralités sur la cimentation

1-Historique	03
2- Définition	03
3 – Buts de l'opération de cimentation (Objectifs de la cimentation)	04
4 – Classification des ciments (classification API : formulaire du foreur I3)	04
5 – Différents types de cimentation	05
5 – A- Cimentation des cuvelages et des tubages (casing).....	05
5 – A - 1 – La Cimentation conventionnelle	05
5 – A- 2 – Cimentation primaire	07
5 – A - 3 – La Cimentation double étage	08
5 – A- 4 – Les cimentations étagées	09
5 – B – La cimentation sous pression (squeeze).....	10
5 – C – Mise en place d'un bouchon de ciment	10
6– Matériel de cimentation & habillage (ou Équipements) de la colonne.....	12
6 – 1 – Le matériel de cimentation.....	13
6 – 2 – Les équipements pour la colonne de casing (Habillage de la colonne).....	18
7 – Déroulement de l'opération d'une cimentation	23
8 – Programme de cimentation	24
9 – Les différentes méthodes de cimentation	25
9 – 1- La cimentation par les tiges	25
9 – 2- La cimentation par le tube ancré	26
9 – 3 – La cimentation par le tube suspendu	27
9 – 4– La cimentation par canne dans l'annulaire	27
9 – 5 – La cimentation au Stinger	29
Conclusion	31

Chapitre II – Description du puits

1 – Situation géographique de la région d'étude (et du puits)	32
A-Introduction	32
B-Situation géographique de la commune d'El Hedjira.....	32
2 – Aperçu géologique (Lithologie du champ).....	34
3 – Données du puits	35
4 – La fiche technique du puits	35
5 – Objectif du puits	36
6– Le programme de forage	37
7– Le programme de tubage	37
8 – Durée des travaux de forage	38
Conclusion.....	39

Chapitre III – Les laitiers de ciment

1 – Laitiers de ciment.....	41
2 – Définition.....	41
3 – Choix du laitier de ciment	41
4 – Préparation d'un laitier de ciment	42
4-1 – Caractéristiques et propriétés d'un laitier de ciment	42
4-2 – Hydratation et prise de ciment	45
Conclusion	47

Chapitre IV – Calcul de cimentation et étude de cas (forage Debidibi : El Hedjira)

Introduction	48
1 – Volume nécessaire du laitier de ciment	48
2 – Quantité de ciment sec pour préparer 1 m ³ de laitier	49
3 – volume d'eau de gâchage (mixage)	50
4 – Volume de fluide de chasse	51
5 – Pression de refoulement à la fin de la chasse	51
6 – Calcul du débit	52
7 – Le temps de cimentation	53
7 – 1 – Temps d'injection.....	53
7 – 2 – Temps de chasse.....	53
7 – 3 – Temps de prise.....	53
7 – 4 – Durée de cimentation.....	53
8- Contrôle de la cimentation.....	53
8-1-Contrôle de la hauteur de ciment dans l'espace annulaire	53
8-2-Contrôle de la qualité de la cimentation	54
8-3-Contrôle de l'étanchéité du tubage et de la cimentation du sabot	54
Conclusion.....	56

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

N°		Page
01	Cimentation étagée.....	08
02	La DV et jeu de bouchons	10
03	Mise en place d'un bouchon de ciment.....	11
04	L'unité de cimentation.....	13
05	L'unité de cimentation Tassili.....	14
06	Schéma de fonctionnement d'une unité de cimentation.....	14
07	La tête de cimentation.....	15
08	Photographie d'une tête de cimentation (cementing head).....	15
09	Coupe d'une tête de cimentation (cementing head).....	16
10	Les bouchons de cimentation ; supérieur et inférieur.....	17
11	Superposition des bouchons supérieur et inférieur ; fin de cimentation.....	17
12	Serrage et collage d'un sabot à la base du premier tube.....	18
14	Différents types d'anneaux de retenue.....	19
15	Opération de serrage et collage d'un anneau de retenue.....	20
16	Les centreurs souples ou flexibles (bow – type).....	21
17	Les centreurs rigides (rigid – type).....	22

18	Différents types des gratteurs.....	23
19	Déroulement de l'opération de cimentation	24
20	Dispositif de cimentation par les tiges.....	26
21	Dispositif de cimentation par le tube ancré.....	26
22	Dispositif de cimentation par le tube suspendu.....	27
23	Dispositif de cimentation par canne dans l'annulaire.....	28
24	Dispositif de cimentation par canne dans l'annulaire, après mise en place du MGA.....	28
25	Procédés de cimentation au Stinger.....	30

Chapitre II

01	Situation géographique de la commune d'El Hedjira.....	32
02	Situation géographique du forage Debidibi.....	33
03	La Lithologie du champ.....	34
04	Diverses colonnes de tubage.....	38
05	Programme de forage et tubage type, lors du forage dans la région de Dibdibi.....	40

Chapitre III

01	Situation géographique de la commune d'El Hedjira.....	32
----	--	----

Chapitre IV

01	Schéma du CBL.....	54
----	--------------------	----

LISTE DES TABLEAUX

N°		Page
01	Résumé de données relatives à El Hedjira.....	33
02	Paramètres envisagés relatifs au puits Debidibi.....	35
03	Données de la fiche technique du puits Debidibi.....	36
04	Paramètres de forage. Ouvrage Debidibi.....	37
05	Programme de tubage. Ouvrage Debidibi.....	37

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La rareté de la ressource en eau, notamment celle de surface a contraint l'homme de chercher d'autres sources d'approvisionnement en cet élément vital. C'est pour cette raison qu'on eu recours aux eaux souterraines dont l'exploitation passe inévitablement par la construction d'ouvrages de captage.

La réalisation de ces derniers, une fois leur implantation indiquée, est conditionnée par l'établissement d'un programme bien étudié de forage et de complétion, lors duquel le choix des phases et la mise en place de colonnes de tubages est considéré comme une opération capitale dont la réussite de tout ouvrage en dépend et s'y articule et découle.

L'ancrage des diverses colonnes de casing est, elle aussi, une étape cruciale surtout pour obtenir une rectilignité, tant souhaitée, et assurer une bonne assise pour la ou les phases suivantes. Obtenir un enracinement et une consolidation des tubages revient à dire passer par une opération de cimentation.

La cimentation des colonnes de tubage s'avère alors une opération importante pour maintes raisons et surtout pour la préservation de la qualité de la ressource en eaux souterraines et plus particulièrement garantir la longévité de l'ouvrage.

C'est pourquoi personne ne peut nier son importance lors de la réalisation d'ouvrages de captage, qu'ils soient pétroliers, hydrauliques ou autres.

Qu'il s'agisse donc d'isoler les diverses formations géologiques traversées ou tout simplement de protéger la tête de forage contre les pollutions possibles, spécialement celles provenant de la surface, il est conseillé de mener une opération de cimentation (de l'espace annulaire) sur une profondeur de l'ordre de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres voire plus et ce, selon les exigences de la phase.

Une opération de cimentation consiste à injecter un laitier de ciment (mélange eau + ciment) dans le trou (espace annulaire), soit pour cimenter une colonne de tubage, soit pour mettre en place un bouchon de ciment dans le but de colmater une perte, créer une déviation ou isoler des couches entre elles ou celles épuisées.

D'entre les objectifs d'une cimentation, on cite entre autres :

- ✓ La fermeture des couches à haute pression pour éliminer les risques d'éruption ;
- ✓ La réaliser de séparation entre les différentes couches productrices pouvant contenir des fluides différents à diverses pressions ;
- ✓ Assurer de bons supports aux colonnes de casing ;

Introduction Générale

- ✓ Garantir une protection des colonnes contre les divers agents chimiques et la corrosion électrochimique ;
- ✓ La prévention des affaissements des parois des puits ;
- ✓ Contourner les éventuelles pollutions des eaux souterraines (nappes captives) ;
- ✓ Se servir d'appuis pour la tête du puits et les équipements de contrôle ;
- ✓ Prévenir le dévissage du casing pendant le forage, ni de se défaire ;
- ✓ Pourvoir une étanchéité derrière les diverses colonnes de tubage.

Nous savons pertinemment que, dans la majorité des cas, les foreurs sont contraints d'aller chercher les ressources (eau, pétrole ou gaz ...), à des profondeurs très importantes.

Pour pouvoir les atteindre, l'ouvrage peut être réalisé en étages, autrement dit, une forme d'une structure télescopique renversée et ce, pour réussir à lier le système aquifère (ou le réservoir) au jour (à la surface), à l'aide, bien sûr, de colonnes de casing bien cimentées.

Dans notre projet, nous nous sommes intéressés à la pose d'une colonne de tubage, sa cimentation avec la vérification des différentes opérations de calcul. Notre choix s'est porté sur la troisième phase, lors de la réalisation du forage hydraulique Debidibi, réalisé dans la région d'El Hedjira – W. Ouargla, réalisé par l'entreprise TASSILI.

Pour ce faire, notre travail comprend quatre chapitres différents :

Au premier, on a essayé de donner des généralités sur la cimentation ;

Au second, une description du site et du puits a été nécessaire ;

Le troisième chapitre s'intéresse aux laitiers de ciment et leur emploi ;

Au dernier chapitre, nous présentons l'étude de cas et le calcul de cimentation avec vérification.

Et comme à l'accoutumée, on a commencé par une introduction générale et on a terminé par une conclusion générale et quelques recommandations.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉS SUR
LA CIMENTATION

1 – Historique:

L'Argile, qui est très utilisée dans la construction de maisons et de bâtiments, a également été utilisée pour consolider les premiers puits.

Cependant, les ciments de pouzzolane étaient déjà connus à l'époque romaine antique. En effet, certains matériaux d'origine volcanique, mélangés à de la chaux qui avait une bonne résistance à la compression, étaient déjà utilisés par les Romain.

Joseph Aspdin était celui qui avait développé les ciments Portland pour la première fois en 1824.

L'obtention de ce matériau a été possible par la cuisson d'un mélange d'argile et de calcaire ensemble qu'Aspdin l'appelait Portland simplement parce que son extraction s'était faite sur l'île de Portland, au large des côtes anglaises. Portland est un mélange de ciment de base.

Le ciment utilisé pour les applications pétrolières a beaucoup évolué au fil des années, et peut désormais être utilisé même dans les conditions les plus sévères.

Dans l'industrie pétrolière, les ciments sont classés à l'échelle API (American Petroleum Institute) et peuvent être adaptés aux diverses conditions et selon les besoins aussi, avec l'ajout d'additifs, d'adjuvants et de matériaux inertes.

La première opération de cimentation connue de puits remonte à l'année 1903, en Californie, lorsque les services d'une compagnie (l'Union Oil Co.) ont mélangé une cinquantaine de sacs de ciment et l'ont pompé dans un puits pour isoler un horizon aquifère. Le durcissement de cette suspension n'a été remarqué qu'après vingt huit (28) jours, ensuite on a repris les activités de forage.

2 – Définition :

Une cimentation consiste à remplir l'espace annulaire (découvert – tubage) avec un mélange eau et ciment, communément appelé laitier de ciment, dans le jargon du forage. Le remplissage s'effectue au-dessus du massif filtrant jusqu'à la surface du sol.

Il faut signaler qu'il existe différents types de cimentation répondant chacun à un problème particulier et par conséquent, la cimentation se voit une opération fondamentale permettant la protection des ouvrages contre les effondrements, les pollutions extérieures et seule une cimentation correcte permet de prévenir les écoulements préférentiels des eaux d'infiltration pouvant se développer tout au long du tubage.

3 – Buts de l'opération de cimentation (Objectifs de la cimentation) :

Une opération de cimentation ne conditionne pas non seulement la longévité de l'ouvrage, mais elle destinée à accomplir tant de rôles, dont nous citons les principaux :

- Isoler les couches à haute pression pour anéantir tout risque d'éruption ;
- Permettre de séparer les diverses couches productrices ayant l'aptitude de renfermer d'éventuels fluides sous différentes pressions ;
- Jouer le rôle de support pour les différentes colonnes de tubage ;
- Se comporter comme film protecteur du casing contre les agents chimiques ainsi que la corrosion électrochimique ;
- Prévenir l'affaissement du découvert (parois du puits) ;
- Préserver la ressource en eau souterraine de toute forme de pollution ;
- Servir comme appuis pour la tête du puits et les divers équipements de contrôle ;
- Éviter le dévissage du casing lors des manœuvres, du forage ou en cas de coincement.

Il faudra alors chercher la meilleure étanchéité possible derrière la colonne de tubage.

4 – Classification des ciments selon l'American Petroleum Institute (API) :

Les foreurs disposent de plusieurs classes de ciment, mises à sa disposition et définies par certaines normes arrêtées par l'API et ce, pour mener à bien toute opération de cimentation. Opter à une telle ou telle classe tiendra compte essentiellement de certains facteurs, tels que :

- La profondeur atteinte et surtout la pression du fond ;
- La température du fond (gradient géothermique) ;
- L'éventualité contact laitier – eau de formation, en particulier celle corrosive ou chargées (eaux sulfatées).

Pour permettre un usage aisé de ce produit, l'American petroleum Institute (API) a établi une classification de ciments, pour sondages. Cette dernière est basée principalement sur les exigences du site et celles du marché. Les diverses classes API du ciment sont :

- ✓ **Classe A** : Utilisée du jour jusqu'à 6000 ft (1829 m) de profondeur, lorsqu'une caractéristique particulière n'est pas demandée ;
- ✓ **Classe B** : Utilisée de la surface jusqu'à 6000 ft (1829 m), lorsque les conditions nécessitent une résistance modérée ou élevée aux sulfates ;

- ✓ **Classe C** : Utilisée de la surface à 6000 ft (1829 m), lorsque les conditions nécessitent une haute résistance initiale. (Disponible en type ordinaire ou en type moyenne ou forte résistance aux sulfates). Les ciments classe (C) se caractérisent par une grande finesse, ce qui leur confère une vitesse d'hydratation élevée et donc une forte résistance initiale ;
- ✓ **Classe D** : Utilisée entre 6000 et 10000 ft (1829 à 3048m) en condition de température et de pression modérément élevées. (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates) ;
- ✓ **Classe E** : Utilisée de 10000 à 14 000 ft (3048 à 4268 m) dans des conditions de température et de pression élevées (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates). Son temps de pompabilité est réglé par l'ajout d'un retardateur en usine, par le cimentier ;
- ✓ **Classe F** : Utilisée de 10 000 à 16 000 ft (3048 à 4877 m) dans des conditions de température et de pression élevées (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates). Son temps de pompabilité est réglé par un retardateur que le cimentier ajoute en usine ;
- ✓ **Classe G** : Étudiée pour être utilisée du jour à une profondeur de 8000 ft (2438 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 prévue pour des densités de laitier supérieurs (1,98 au lieu de 1,90).

Nota bene : Les ciments classe E et F possèdent, dans leur formulation, un retardateur. Il y a donc la probabilité du risque d'incompatibilité avec d'autres additifs, notamment si leur temps de pompabilité est trop court ou trop long. Il est pratiquement très difficile, voire 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 classe G et H.

5 – Les différents types de cimentation :

5 – A– La cimentation des cuvelages et des tubages (casing) :

5 – A- 1 – La cimentation conventionnelle :

Avant de procéder à l'opération de cimentation proprement dite, il faut au préalable suivre les étapes suivantes :

- 1 – Inspecter le casing (filetage de connexion) ;
- 2 – Effectuer les diverses mesures sur casing ;

- 3 – Nettoyer le tubage ;
- 4 – Calibrer le tubage (diamètre interne) ;
- 5 – Numéroté le tubage ;
- 6 – Placer le sabot au premier joint de tubage ;
- 7 – Mettre la valve de sécurité supplémentaire (Flute Collar) au deuxième joint ;
- 8 – Concentrer les centreurs aux joints de fond ;
- 9 – Placer quelques centreurs (dits positifs qui permettent un centrage plus efficace) dans le tubage de surface.

Dans l'ensemble, les instructions et consignes générales de la cimentation sont :

- 1 – Changer les bras, l'élévateur et les cales par ceux qui sont spécifiques au tubage en question ;
- 2 – Changer la fourrure de la table de rotation ;
- 3 – Mettre en place les joints selon l'ordre en remplissant le tubage ;
- 4 – S'assurer du fonctionnement des valves anti – retour (Flute Collar et Sabot) par une circulation en surface ;
- 5 – Une fois au fond, on doit mettre en place une tête de cimentation et commencer à faire une circulation avec de la boue (au moins un cycle) pour le nettoyage du trou.

Après avoir calculé au préalable les volumes de la cimentation, on commence l'opération comme suit :

- 1 – Faire un test d'efficacité des pompes de forage si on prévoit de les utiliser ;
- 2 – Aligner les lignes de cimentation avec la tête de cimentation et les tester sous pression ;
- 3 – Pomper (injecter) un séparateur de fond ou spacer (Généralement) de l'eau pour la boue à l'eau, environ 2 m^3 ;
- 4 – Larguer (introduire) le bouchon de fond (doit être à membrane ouvrable avec la pression) ;
- 5 – Mélanger le volume voulu du gel de ciment (faible densité 1,7) et du laitier de ciment (densité élevée 1,9) et le pomper, ensuite, à l'intérieur du tubage.

Le volume total de ciment doit comprendre toujours un excès de 10 % (prévoir un volume de sécurité de 10 à 20m) qui est supposé pouvoir combler le cavage ;

- 6 – Larguer le bouchon de surface (supérieur) qui doit être étanche même sous pression ;
- 7 – Pomper le séparateur de surface (spacer) ;
- 8 – Commencer la chasse pour déplacer le contenu de l'intérieur du tubage jusqu'à la Flute Collar. Quand le bouchon de fond (inférieur) atteint la flute Collar (anneau de retenu) la pression montre un pic nécessaire à la destruction de la membrane du

bouchon de fond et par la suite le ciment commence à envahir le dernier joint de tubage et puis l'espace annulaire ;

9 – Continuer la chasse avec un débit maximum possible pour provoquer le maximum de turbulences qui sont nécessaires pour faire remplacer complètement la boue par le ciment au niveau de l'espace annulaire ;

10 – Lorsque le volume de chasse est presque fini, diminuer le débit et observer attentivement la pression (lorsque le bouchon supérieur arrive au niveau du bouchon inférieur, la pression augmente considérablement et il sera impossible de circuler). Arrêter la circulation et essayer de maintenir la pression si possible, sinon dépressuriser la colonne et s'assurer qu'aucun fluide ne retourne de l'intérieur par tubage ;

11 – Attendre la prise (le durcissement) du ciment jusqu'à (24 heures).

5 – A- 2 – La cimentation primaire :

Une fois injectés, les laitiers de ciment s'écoulent à travers le sabot pour remonter ensuite dans l'espace annulaire. Comme son nom l'indique, l'anneau de retenue sert d'épaulement aux bouchons racleurs (inférieur et supérieur) qui encadrent le volume de laitier dans la colonne de tubage.

La membrane du bouchon inférieur sera crevée suite à un à-coup de pression et laisse donc passer et circuler le laitier dans l'annulaire. C'est le laitier de ciment qui fait pousser 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 la totalité du laitier est injectée, on argue le bouchon supérieur. Ce dernier est déplacé, à son tour, par circulation du fluide de forage. Cette opération est appelée chasse.

Le volume de chasse équivaut celui 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 (par son prédécesseur inférieur avec l'anneau de retenu).

Il faut maintenir une surpression pendant quelques minutes pour permettre de faire en même temps un test d'étanchéité de la colonne.

5 – A- 3 – La cimentation double étage :

Lorsque le programme prévoit une cimentation étagée, il est indispensable d'incorporer une DV (Différentiel Valve) dans la colonne de tubage.

Une cimentation étagée est programmée pour les raisons suivantes :

- Pour avoir deux (2) étages distincts :

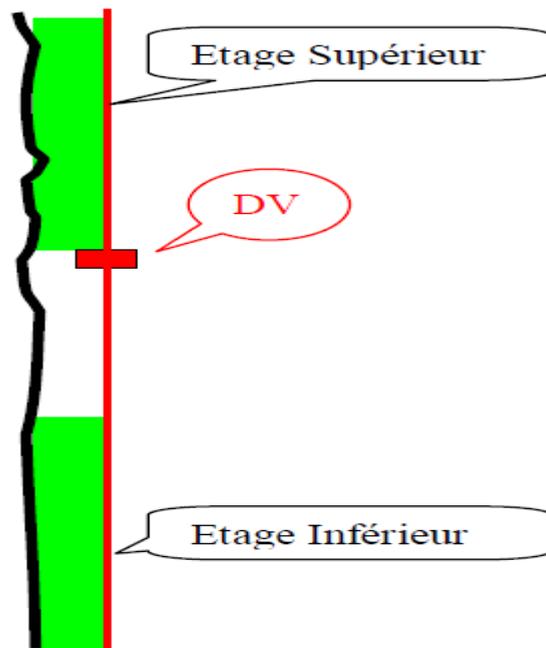


Fig. (1) : Cimentation étagée.

- Pour des besoins en pression : La colonne de tubage doit être cimentée sur tout l'intervalle découvert, mais la pression de refoulement est très élevée pour remonter le laitier à la hauteur voulue, il y'a risque de fracturer les terrains. Il est judicieux d'utiliser une Deverter Valve (DV), et de cimenter la colonne en deux étapes.

➤ **Déroulement d'une cimentation étagée :**

a) Cimentation de l'étage inférieur :

Dès que la colonne de tubage sera descendue à 1 m du fond du puits, les opérations suivantes seront effectuées dans une suite chronologique :

- ✓ Faire circuler pendant un ou deux cycles ;
- ✓ Injecter un bouchon laveur ;
- ✓ Pomper le volume de laitier ;
- ✓ Larguer le 1^{er} bouchon de cimentation pour chasser le laitier ;
- ✓ Chasser avec de la boue jusqu'à l'arrivée du bouchon sur l'anneau.

À ce moment, on doit enregistrer le 1^{er} à-coup de pression. C'est l'indice de la fin de cimentation de l'étage inférieur.

b) Cimentation de l'étage supérieur :

Une fois la cimentation de l'étage inférieur achevée et vérification du refluer, on procède à la cimentation de l'étage supérieur.

- ✓ Ouvrir le couvercle de la tête de cimentation ;
- ✓ Lancer le bouchon d'ouverture ou bombe de la DV ;
- ✓ Rétablir la circulation ;

Lorsque la bombe arrive sur la DV, elle repose sur la chemise inférieure. On note une légère augmentation puis une chute de pression qui indique l'ouverture des orifices de la DV.

- ✓ Faire circuler pendant un ou deux cycles, à travers les orifices de la DV ;
- ✓ Injecter le bouchon laveur ;
- ✓ Pomper le volume de laitier ;
- ✓ Larguer le second bouchon de cimentation pour chasser le laitier ;
- ✓ Chasser avec de la boue jusqu'à l'arrivée du bouchon sur la chemise supérieure de la DV. Sous une légère pression, les goupilles se cisailent, la chemise coulisse vers le bas et ferme les orifices.

c) Contrôle de la cimentation :

Après cimentation, il est indispensable de procéder à la vérification de :

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

5 – A – 4 – Les cimentations étagées :

Les cimentations étagées consistent à effectuer les opérations de cimentation en plusieurs étapes successives (généralement 2 ou 3). Chaque étape permettant de cimenter une partie de la colonne. Cette procédure permet de diminuer les risques de fracturation hydraulique en réduisant la pression induite par la colonne de laitier dans les annulaires.

Pour ce faire, un équipement spécifique est intégré dans la colonne. Il s'agit d'un raccord spécial comportant des ouvertures que l'on peut ouvrir à la demande pour permettre au laitier injecté dans la colonne de passer dans l'annulaire.

L'ouverture et la fermeture de cet équipement, appelé (Diverting Valve ou DV), est contrôlée au moyen de bouchons (ou bombes) lancés dans le tubage et agissant mécaniquement ou hydrauliquement sur des volets (chemises). Des bouchons spécifiques en tête et en queue de laitier permettent le contrôle de l'injection. Ils servent également de séparateur entre le laitier et les fluides présents dans le forage.



Fig (2) : La DV et jeu de bouchons

5 – B – La cimentation sous pression (squeeze) :

Cette opération, communément appelée squeeze dans le jargon du forage, consiste à injecter du laitier de ciment, sous pression, dans une formation perméable ou à travers les perforations d'une colonne.

On procède à une squeeze pour remédier aux problèmes suivants :

- ✓ L'obstruction d'un niveau producteur de gaz ;
- ✓ L'obturation d'un niveau aquifère ;
- ✓ Obstruer des perforations mal situées ;
- ✓ Complément de cimentation primaire, insuffisante par suite de canalisation ou de remontée de ciment incomplète ;
- ✓ Le colmatage des pertes de circulation.

Une telle opération se déroule habituellement selon un processus de montée en pression jusqu'à ce que le puits commence à absorber (pression d'absorption), puis chute rapide de la pression suivie d'une remontée graduelle. On arrête le pompage lorsque la pression atteint une valeur qu'on s'est fixée à l'avance.

5 – C – Mise en place d'un bouchon de ciment :

1 – But :

La mise en place d'un bouchon de ciment est conseillée pour les cas de figures suivants :

- 1 – Lorsqu'on veut abandonner un trou ;
- 2 – Déviation d'un trou pour la pose d'un sifflet déviateur ;
- 3 – Suppression (colmatage) d'une perte.

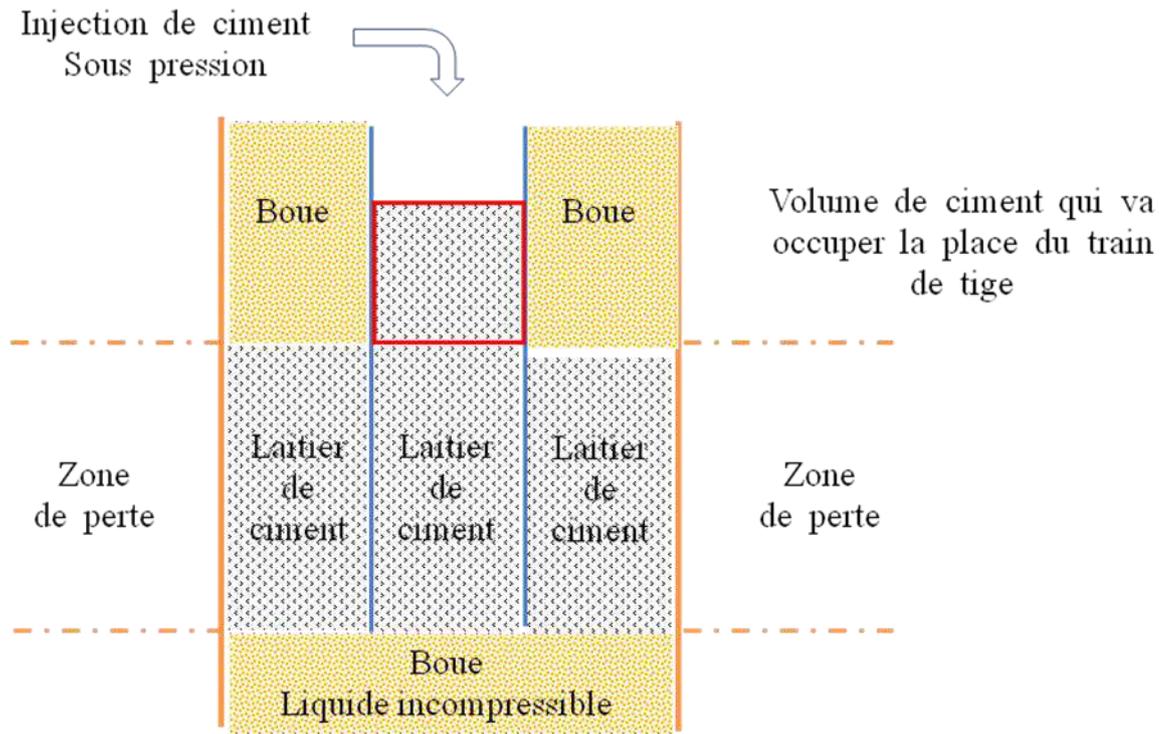


Fig (3) : Mise en place d'un bouchon de ciment

2 – Déroulement de l'opération :

1 – Il faut calculer le volume de laitier le volume de chasse, ce dernier doit être calculer avec précision ;

2 – Il faut la descente du train de tige ;

3 – Injection du volume de laitier et de chasse.

NB : quelque soit le but du bouchon, la densité doit être de 1,9.

Parfois on doit ajouter du sable au ciment afin d'augmenter la résistance de la prise.

4 – Dégagement du train de tige, ce ci se fait lentement (la vitesse de remontée du train de tige ne doit pas dépasser les 20cm/s, jusqu'à ce que l'extrémité inférieure du train de tige atteigne la hauteur théorique de ciment) ;

NB : Ne jamais laisser l'extrémité inférieure du train de tige atteindre la surface pour assurer un bon nettoyage.

5 – Évacuation de l'excès de ciment (soit une circulation directe ou inverse.

NB : Pour éviter la contamination de la boue par le laitier de ciment, on injecte avant et après la cimentation un tampon d'eau ou un bouchon laveur ou spacer.

Remarque : Dans le cas où la mise en place de un, de deux, de trois bouchons de ciment ne règle pas le problème de la perte de circulation de boue, on sera obligé d'élargir le trou, juste dans la zone de perte, à l'aide d'un outil spécial (élargisseur locomotique). Après re-forage, nous aurons un anneau de pierre de ciment dans la couche considérée (zone à perte). Quand on fait descendre l'élargisseur locomotique jusqu'en face de la zone à perte, on doit assurer un excès de pression, il commence alors à s'ouvrir et doit commencer à ce moment le re-forage, dès qu'on termine, il se referme.

6 – Matériel de cimentation & habillage (ou Équipements) de la colonne :

Une colonne de tubage (de casing), avant sa descente et sa mise en place pour être cimenter, doit être munie d'équipements et accessoires et ce, pour :

- 1 – Assurer une descente facile de la colonne ;
- 2 – Garantir un bon ancrage du casing ;
- 3 – Pouvoir supporter les divers efforts lors des diverses opérations (forage, tubage ...) ;
- 4 – Poursuivre les opérations ultérieures en toute sécurité.

Pour réussir une cimentation on doit avoir besoin d'un certain matériel et d'accessoires :

- 1 – Des équipements pour la colonne de casing (sabots, anneaux de retenu, centreurs, gratteurs ...etc. Ils seront introduits avec le casing au fond du trou.
- 2 – Des équipements de la colonne, utilisés en surface :
 - ✓ La tête de cimentation ;
 - ✓ Les bouchons de cimentations (supérieur et inférieur) ;
 - ✓ Les élévateurs et les colliers de tubage ;
 - ✓ Les protecteurs de filetages ;
 - ✓ Accessoires annexes etc.
- 3 – Les équipements pour la fabrication et le pompage du laitier de ciment, en surface :
 - ✓ Le mixeur (mixer) ;
 - ✓ Les silos de stockage ;
 - ✓ L'unité de pompage ...etc.

6 – 1 – Le matériel de cimentation :

a) L'unité de cimentation :

Les unités de cimentation offrent la possibilité d'effectuer certaines opérations simultanément, telles que :

- ✓ 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.

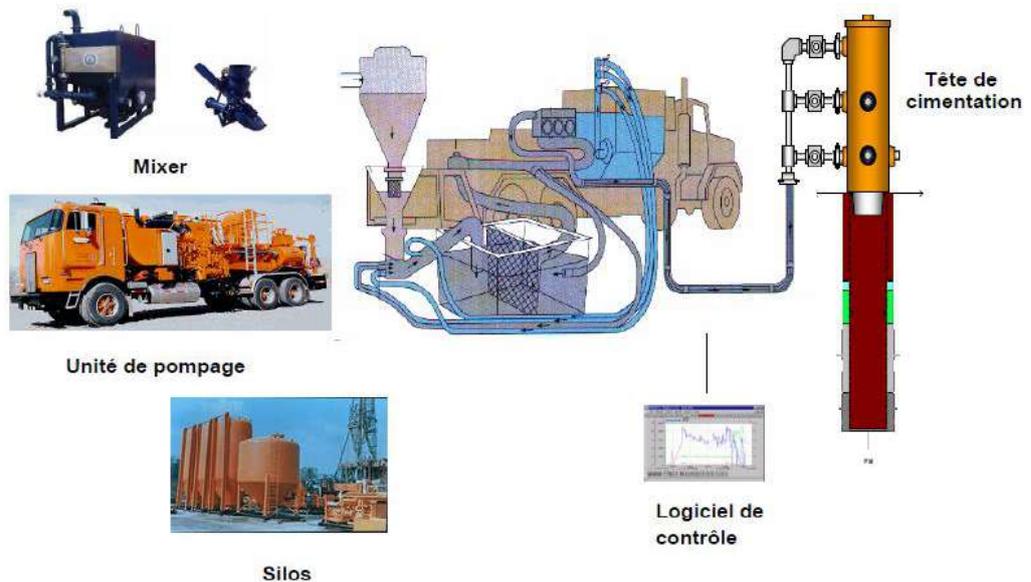


Fig (4) : L'unité de cimentation.

Ces unités de pompage sont composées de deux pompes Triplex, à grand débit et hautes pressions, montées soit sur camion soit sur skid.

Le test en pression des pompes, vannes et lignes de cimentation jusqu'au plancher, sera enregistré sur un graphe. L'équipement sera en parfait état (pièces de rechange) et adapté à l'opération envisagée.



Fig (5) : L'unité de cimentation Tassili.

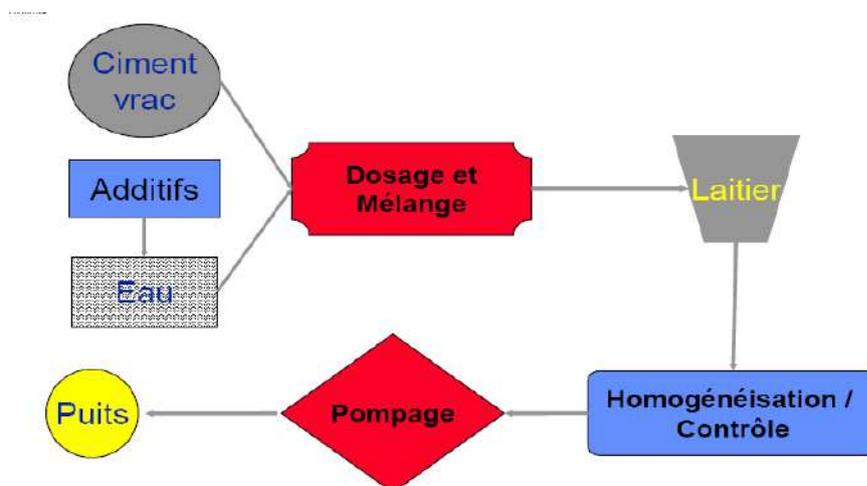


Fig (6) : Schéma de fonctionnement d'une unité de cimentation.

b) La tête de cimentation :

Ces têtes 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 manœuvrée depuis l'extérieur.

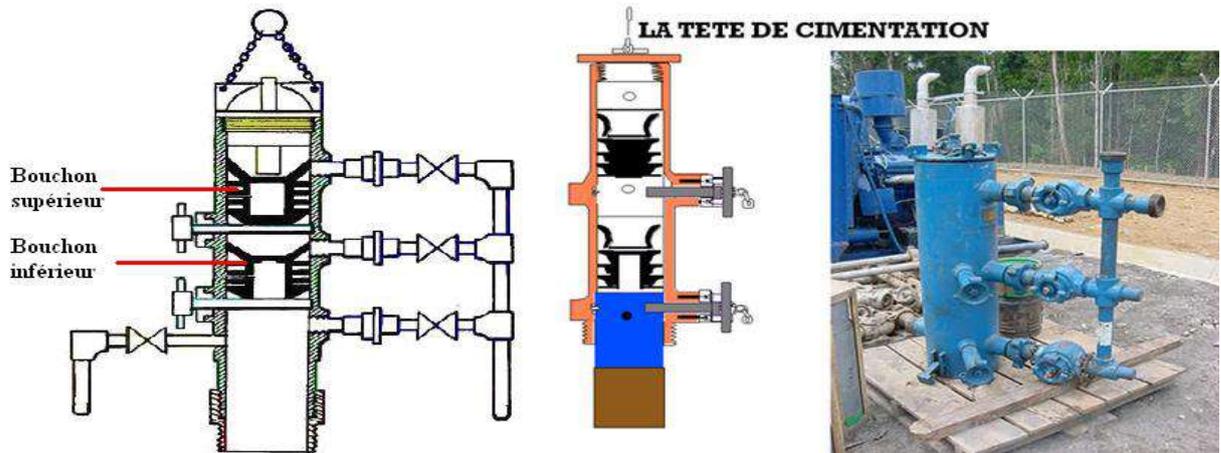


Fig (7) : La tête de cimentation.

À l'ordinaire, il existe sur ces têtes un témoin qui permet de voir le départ du bouchon. La mise en place et le verrouillage des 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.

Elles sont vissées sur le dernier tube de la colonne (*1^{er}* tube au niveau du plancher) et permettent de loger les bouchons de cimentation (inférieur et supérieur). Elles doivent aussi permettre la circulation du fluide de forage, l'injection du laitier de ciment après le largage du bouchon inférieur, la chasse du bouchon supérieur avec la boue initiale.



Fig (8) : Photographie d'une tête de cimentation (cementing head).

La tête de cimentation et la rotule seront, si possible, testées en pression (adaptateur pour fermeture de la tête), soigneusement vérifiées, nettoyées et rengraissées pour éviter tout ennui en cours de cimentation. Les joints du raccord rapide doivent être en parfait état. Le système de largage des bouchons ainsi que les vannes du manifold doivent être faciles à manœuvrer. La longueur des flexibles devra être telle qu'on puisse facilement lever au moins un tube au-dessus de la table de rotation.

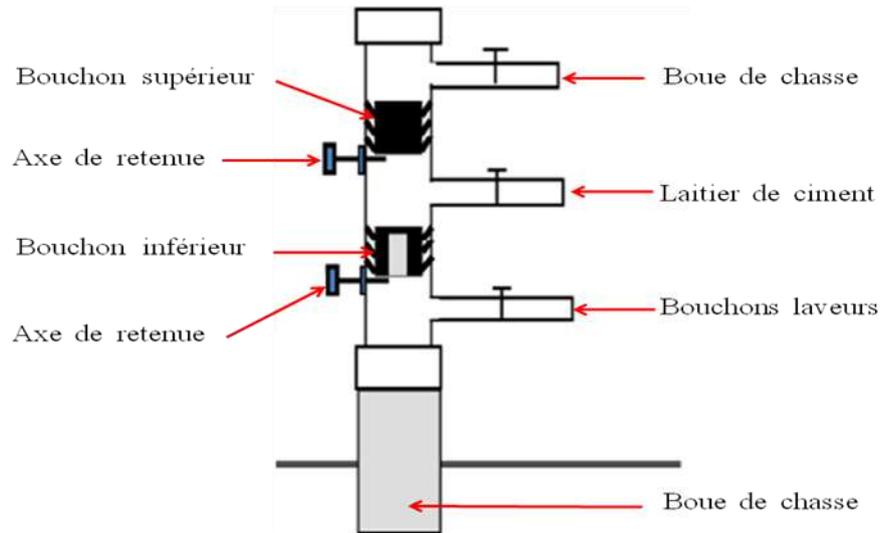


Fig (9) : Coupe d'une tête de cimentation (cementing head).

c) Les bouchons de cimentation :

Faisant partie des équipements de la colonne qu'on utilise depuis la surface, ces bouchons, sont introduits à l'intérieur de la colonne de tubage, au cours de l'opération de cimentation. Ils ont pour rôle essentiel de séparer positivement les différents fluides (boue, fluide intermédiaire, laitier) au cours de leur déplacement à l'intérieur du tubage pour :

- 1 – Retarder le plus possible leur mélange ;
- 2 – Freiner/éviter les risques de contamination de ces fluides.

Ces bouchons sont de deux types, on distingue :

- Le bouchon inférieur (bouchon de tête) ou bottom cementing plug ;
- Le bouchon supérieur (bouchon de queue) ou top cementing plug.

1 – Le bouchon inférieur (bottom plug)

Il doit assurer une séparation entre le laitier de ciment et le fluide de forage (ou le tampon d'eau), retardant au maximum voire empêchant le contact boue – laitier, pour éviter la pollution du laitier par la boue pendant son passage à l'intérieur de la colonne (du casing).

Ce bouchon est muni de lèvres en caoutchouc, sur son extérieur (extérieurement), qui sont destinées au raclage et au nettoyage de la paroi intérieure du tubage, au cours de sa descente. Il est muni d'une ouverture centrale cylindrique fermée par une mince membrane

La membrane, dont on parle, est au fait un diaphragme destructible sous l'effet d'une légère pression. Bien que qu'il est d'un emploi facultatif, il est vivement recommandé de l'utiliser et ce, pour plusieurs raisons.

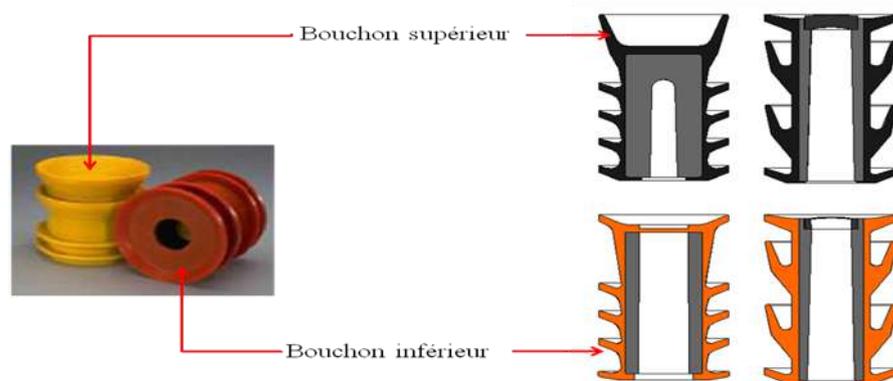


Fig (10) : Les bouchons de cimentation ; supérieur et inférieur.

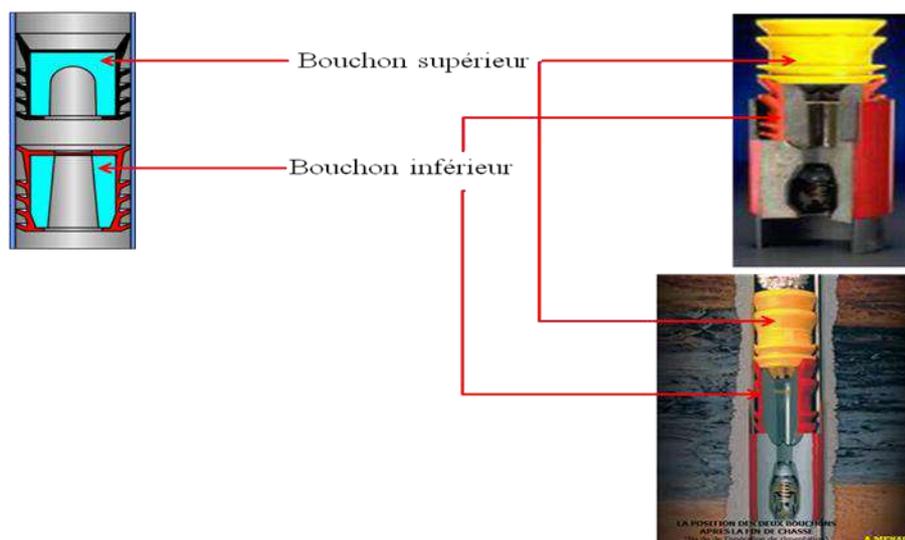


Fig (11) : Superposition des bouchons supérieur et inférieur ; fin de cimentation.

Outre qu'il sépare les fluides, le bouchon inférieur essuie les parois du tubage et empêche la contamination du fluide qui le pousse.

2 – Le bouchon supérieur (top cementing plug) :

Contrairement au précédent (inférieur), ce bouchon est plein et peut résister à des pressions importantes. Il est libéré après l'injection du laitier de ciment et permet à l'opérateur de savoir que la cimentation est terminée, quand il arrive sur le bouchon inférieur, au niveau de l'anneau de retenue (à – coups de pression..).

Comme il est étudié pour être étanche et résistant aux hautes pressions, il doit être injecté en queue du laitier. En fin de chasse, il vient se mettre en place normalement sur le bouchon inférieur (ou sur le dispositif d'arrêt) permettant ainsi de réaliser un test en pression de la colonne.

6 – 2 – Les équipements pour la colonne de casing (Habillage de la colonne) :

a) Les sabots (the shoes) :

Le premier équipement qu'on aura à installer sur le tubage est le sabot. C'est un élément qui doit être vissé à l'extrémité inférieure d'une colonne de casing. Il est spécialement aménagé (arrondi ou biseauté) de façon à faciliter la descente du casing dans le trou.

Ce sont des organes qui facilitent le guidage de la colonne de tubage. Ils ont aussi pour but d'éviter tout type de circulations inverses.



Fig (12) : Serrage et collage d'un sabot à la base du premier tube.

On utilise des anneaux et des sabots munis de systèmes anti – retour. Ces derniers doivent être :

- ✓ À bille : si le trou est faiblement dévié $< 30^\circ$;
- ✓ À clapets activés : si la déviation est importante ou lors de forage horizontal.

Ils sont de trois types, on distingue entre autre :

- ✓ Les sabots à canal avec ou sans événements ;
- ✓ Les sabots avec dispositif anti-retour permanent ;
- ✓ Les sabots avec dispositif anti-retour transformable.

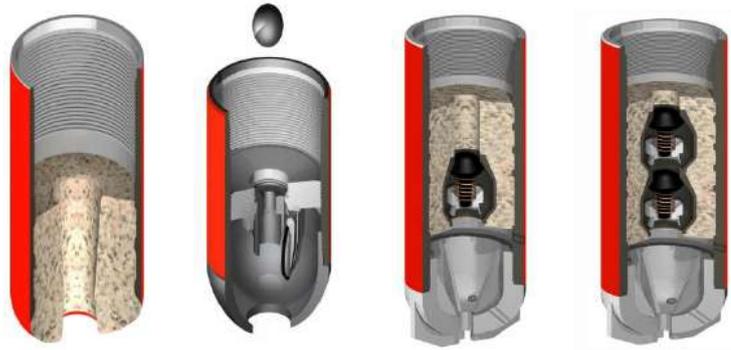


Fig (13) : Différents types de Sabot.

b) Les anneaux de retenue :

Comme leur nom l'indique, ces anneaux de retenue servent d'épaulement aux bouchons racleurs (inferieur et supérieur) qui encadrent le volume de laitier de ciment dans le casing.

La fonction de l'anneau de retenue est donc de servir de siège au(x) bouchon(s) de cimentation, selon les cas ou selon les techniques des compagnies.

L'anneau de retenu est placé de 10 à 20m au-dessus de sabot de guidage et constitue donc une base pour les bouchons de cimentation.

On distingue :

- ✓ Les anneaux conventionnels (utilisés pour les cimentations à un seul étage) ;
- ✓ Les anneaux différentiels (utilisés pour la cimentation à deux étages ou étagées).

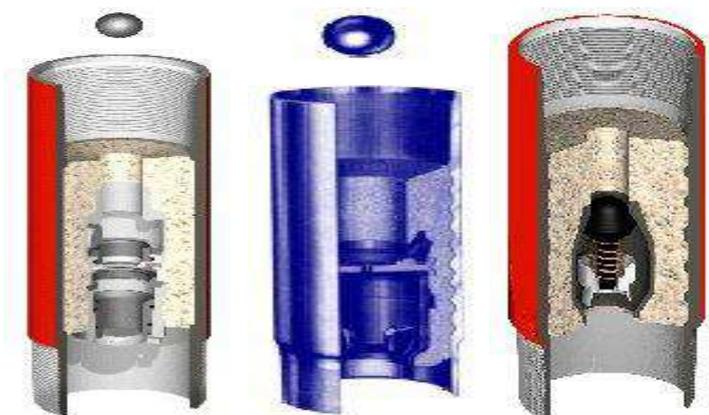


Fig (14) : Différents types d'anneaux de retenue.

On peut dire que, presque toutes les colonnes de tubage (à l'exception de certaines colonnes de surface) sont équipées d'un anneau de retenue, placé généralement entre le deuxième et le troisième tube, à partir du sabot (parfois entre le 3^{ème} et le 4^{ème} tube).

Le rôle de cet anneau est de retenir les bouchons de cimentation et permet donc d'indiquer la fin de l'opération de cimentation et ce, lorsque le bouchon supérieur arrive à son niveau (à – coup de pression).



Fig (15) : Opération de serrage et collage d'un anneau de retenue.

c) Les centreurs de tubage (casing centralizer) :

La réussite d'une opération de cimentation est basé sur le bon centrage du casing, afin de pouvoir assurer :

- 1 – Une garniture de ciment régulière autour du tubage ;
- 2 – Le nettoyage du trou.

Le centrage d'une colonne est donc un élément déterminant pour l'obtention d'une bonne cimentation. Ils ont pour rôle d'empêcher le contact du casing contre les parois du trou, de manière à permettre une meilleure répartition possible du ciment autour de la colonne. On les place tout le long de la colonne, pour pouvoir la centrer dans le puits et ce, en fonction des renseignements fournis par les mesures ou diagrammes de calibrage et de déviation, aux endroits où l'on désire que la cimentation soit la meilleure possible.

Pour l'obtention d'une bonne cimentation, on doit habiller la colonne de tubage de centreurs ; tel que :

- ✓ Au droit des zones à cimenter ;
- ✓ En face des dog-legs ;
- ✓ De part et d'autres des caves ;
- ✓ Dans les zones à risques de collage ou à pertes.

Un exemple de centrage minimal pour un puits subvertical peut être défini de la manière suivante :

- ✓ Deux centreurs par tube entre l'anneau et le sabot ;
- ✓ Deux centreurs par tube au droit du réservoir ;
- ✓ Un centreur par tube de part et d'autre du réservoir ;
- ✓ Deux centreurs sur l'avant dernier tube dans l'entrefer ;
- ✓ Un centreur par tube sur toute la partie à cimenter avec un laitier de remplissage ;
- ✓ Un centreur rigide sous le casing head housing pour faciliter la pose sur slip (des calles) ;
- ✓ Un centreur souple spiralé placé sur chaque tube ;
- ✓ Deux stops collars, fixés aux extrémités de chaque centreur.

Il existe deux types de centreurs :

➤ **Les centreurs souples ou flexibles (bow – type) :**

Ils sont les plus utilisés et les plus employés, notamment aux espaces annulaires (tubage – trou), car ils sont adaptés aux trous irréguliers, surtout s'ils ont des running forces plus importantes que les centreurs rigides, ils donnent un meilleur centrage (verticalité) dans les découverts irréguliers.



Fig (16) : Les centreurs souples ou flexibles (bow – type).

➤ **Les centreurs rigides (rigid – type) :**

Ces centreurs sont munis de lames en forme de (U), et sont pratiquement utilisés aux divers cas suivants :

- 1 – Les espaces annulaires (tubage – tubage) ;
- 2 – Les trous bien calibrés et aux diamètres nominaux ;
- 3 – Dans des puits très déviés ;
- 4 – En cas d'espaces annulaires très minces (vissés entre chaque joint).

Ils ont l'avantage de limiter et de réduire les forces de frottements.



Fig (17) : Les centreurs rigides (rigid – type).

d) Les gratteurs (the scratchers) :

Ce sont des dispositifs qu'on fixe à l'extérieur de la colonne de tubage, pour gratter le film de cake déposé par la boue, sur les parois du trou, pendant le forage. Il suffit juste d'appliquer des manœuvres (de haut en bas) mais de faibles amplitude, à la colonne de tubage durant sa descente.

Au fur et à mesure, de ce mouvement, les gratteurs, qui sont constitués de fil métallique rigide, éliminent le cake (destruction mécanique du cake suite au mouvement de rotation et/ou de translation).

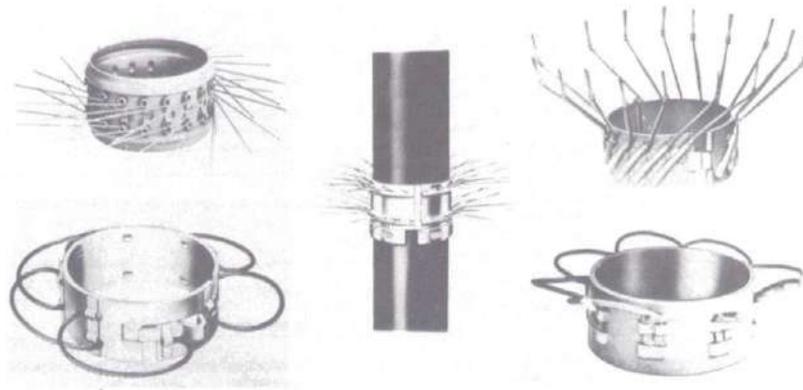
Leur emploi est particulièrement recommandé au droit (en face) de découverts, lorsqu'on veut réussir à isoler parfaitement des niveaux réservoir (horizon aquifère).

Le choix des gratteurs se fait en fonction du mouvement que l'on compte imposer à la colonne lors de la cimentation, soit donc :

- ✓ Un mouvement de rotation : gratteurs rotatifs ;
- ✓ Un mouvement de va-et-vient (reciprocating) : gratteurs alternatifs.

1 – Les gratteurs rotatifs : ce sont des barres métalliques qui ont une forme longitudinale et qui sont hérissées de fils d'acier (*scratcher*) ou équipées d'un câble formant des boucles (*wiper*). Ils sont utiles surtout quand on fait tourner le tubage (en puits très déviés ou avec le liner).

2 – Les gratteurs alternatifs : ils sont conçus comme leur nom l'indique, et sont très pratiques lorsqu'on pratique le va – et – vient (reciprocating).



Fig(18) : Différents types des gratteurs.

7 – Déroulement de l'opération d'une cimentation :

Une fois la colonne de tubage (casing) descendue au fond du puits (en place), on procède aux opérations dans l'ordre chronologique suivant :

- 1** – Visser la tête de cimentation avec ses deux bouchons (inférieur et supérieur) ;
- 2** – Faire une circulation pendant 1 ou 2 cycles pour :
 - ✓ Remonter tous les cuttings en suspension ;
 - ✓ Nettoyer le puits ;
 - ✓ Homogénéiser la boue...
- 3** – Injecter un bouchon laveur (de 1 à 3 m³), qui est un produit chimique liquide, qui permet de séparer le laitier de la boue et assure le lavage des parois du trou pendant la remontée dans l'annulaire ;
- 4** – Lancer le bouchon de cimentation inférieur ;
- 5** – Pomper le volume de laitier ;
- 6** – Lancer le bouchon de cimentation supérieur ;
- 7** – Faire une chasse avec de la boue ;
- 8** – Arrêter le pompage ou la circulation (les pompes).

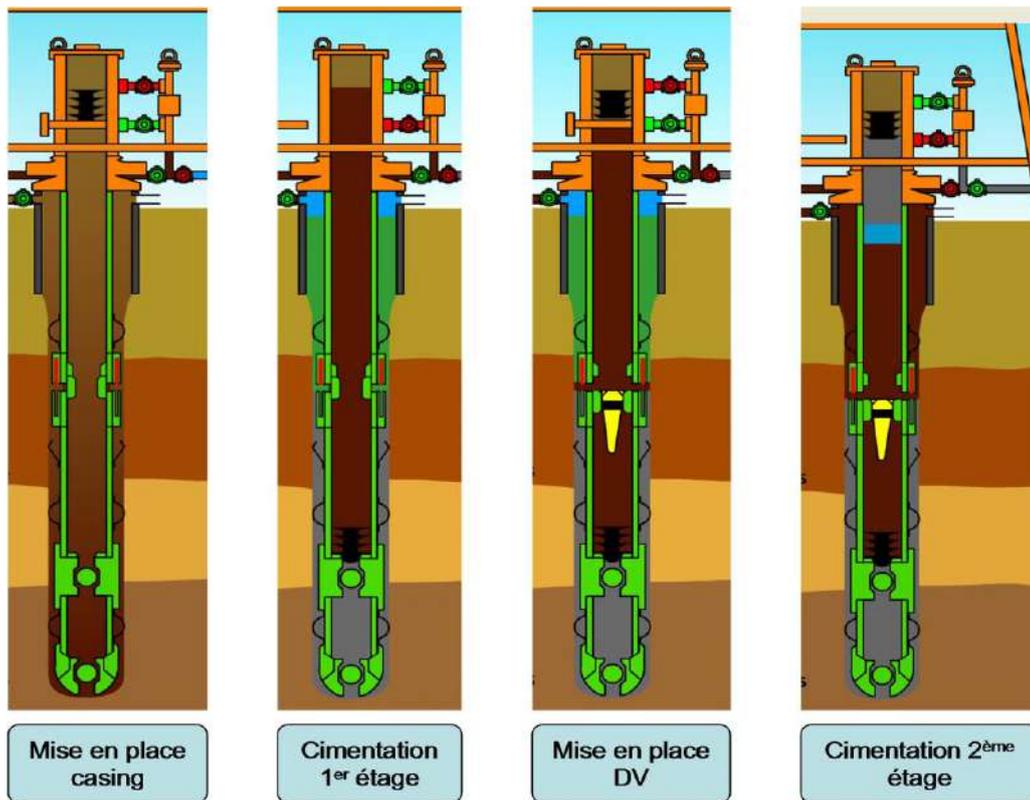


Fig (19) : déroulement de l'opération de cimentation.

8 – Programme de cimentation :

Le programme de cimentation est celui qui détermine, la hauteur du ciment dans l'annulaire, le volume de ciment à pomper et les caractéristiques du laitier, ce qui dépend de :

- La température de fond sous circulation, lors de la mise en place du laitier, qui influence sur le temps de prise d'où le temps de pompabilité ;
- La pression des formations traversées qui impose la densité du laitier ;
- La présence de divers agents susceptibles de dégrader le ciment (eaux corrosives, haute température de fond) ;
- Le profil de puits qui impose les caractéristiques rhéologiques du laitier.
- Le bon choix du laitier et du régime d'écoulement lors du pompage, conduit à une bonne cimentation, d'où une longue vie du casing et par conséquent du puits.

8 – 1 – Détermination des hauteurs de cimentation :

Les hauteurs de cimentation dépendent du rôle et du type des colonnes de tubage.

A – La colonne de surface : Elle est autant que possible cimentée sur toute sa hauteur, pour lui permettre de supporter les dispositifs de sécurité et d'être parfaitement ancrée en surface.

B – La colonne technique : Dans cette colonne il faut que :

- ✓ Le sabot soit bien cimenté, ce qui nécessite une hauteur de ciment d'au moins 150m ;
- ✓ L'espace annulaire soit cimenté lorsque des raisons particulières rendent cette opération indispensable :

- Zone contenant des fluides corrosifs ;
- Couche contenant des fluides devant être protégés.

La cimentation de l'espace annulaire des colonnes techniques sera d'ailleurs, suivant le cas, réalisée en un seul étage à partir du sabot ou en deux étages.

C – La colonne de production : L'opération de cimentation est, dans ce cas, très importante car le ciment doit non seulement ancrer la colonne, mais aussi réaliser une étanchéité aussi parfaite que possible entre le trou et le tubage.

La hauteur de ciment dépendra en plus de :

- ✓ La disposition de la colonne par rapport à la couche, au toit ou au mur ;
- ✓ La hauteur de la zone productrice ;
- ✓ La hauteur de la couverture.

9 – Les différentes méthodes de cimentation :

Dans le domaine du forage, plusieurs méthodes de cimentation existent :

- 1 – La cimentation par le biais des tiges ;
- 2 – La cimentation par le biais du tube ancré ;
- 3 – La cimentation par l'intermédiaire du tube suspendu ;
- 4 – La cimentation à l'aide d'une canne dans l'annulaire.

Les trois premières méthodes de cimentation (par les tiges, par le tube ancré et celle par le tube suspendu) s'appliquent seulement pour les forages ayant de gros diamètres et qui sont relativement profonds. La quatrième (cimentation par canne dans l'annulaire) est utilisée pour les ouvrages de moins de 50 mètres.

9- 1 – La cimentation par les tiges :

Le casing qu'on a à cimenter doit être muni d'un sabot destructible (équipé d'une balle en plastique ayant la grosseur d'une balle de tennis) faisant office de valve.

Le ciment est injecté sous pression, par les tiges pénètre ensuite dans l'espace annulaire, par l'orifice du sabot, qui est obturé par la balle dès l'arrêt de l'injection de ciment.

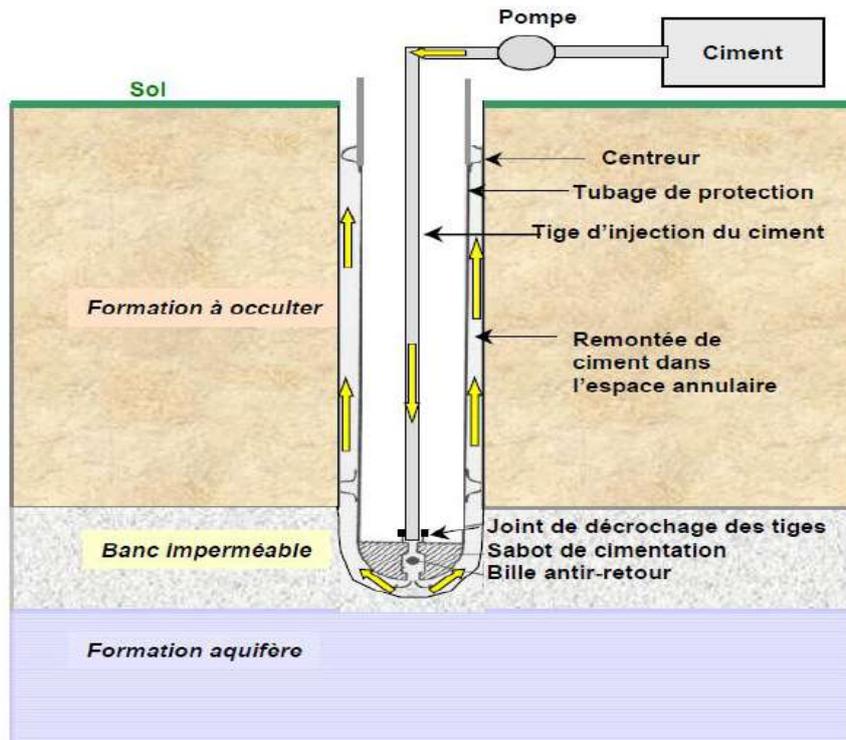


Fig (20) : Dispositif de cimentation par les tiges (source documentaire BRGM).

9- 2 – La cimentation par le tube ancré :

Le tubage à cimenter, doit être muni de fenêtres, à sa base (percées au préalable), pour permettre la circulation de la boue puis de ciment.

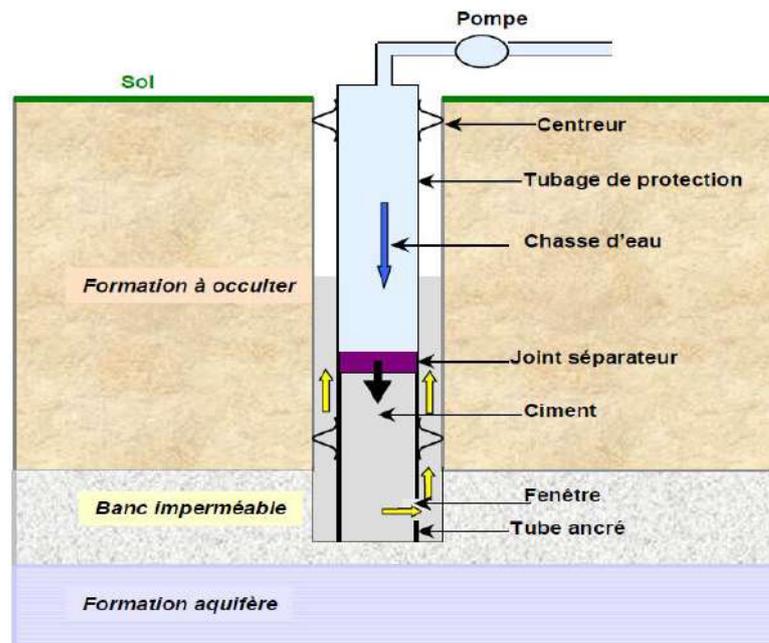


Fig (21) : Dispositif de cimentation par le tube ancré (source documentaire BRGM).

Le volume théorique de laitier est introduit dans l'ouvrage, et remonte ensuite dans l'espace annulaire, sous pression exercée par un joint séparateur, poussé par un volume d'eau ou de boue, et qui vient obturer les fenêtres de pied de tubage, lorsque la cimentation est terminée.

9-3 – La cimentation par le tube suspendu :

Le volume de laitier de ciment théorique qu'on veut introduire dans le tubage, sera poussé dans l'espace annulaire, par un bouchon destructible (joint séparateur), sous l'effet d'une chasse d'eau ou de boue.

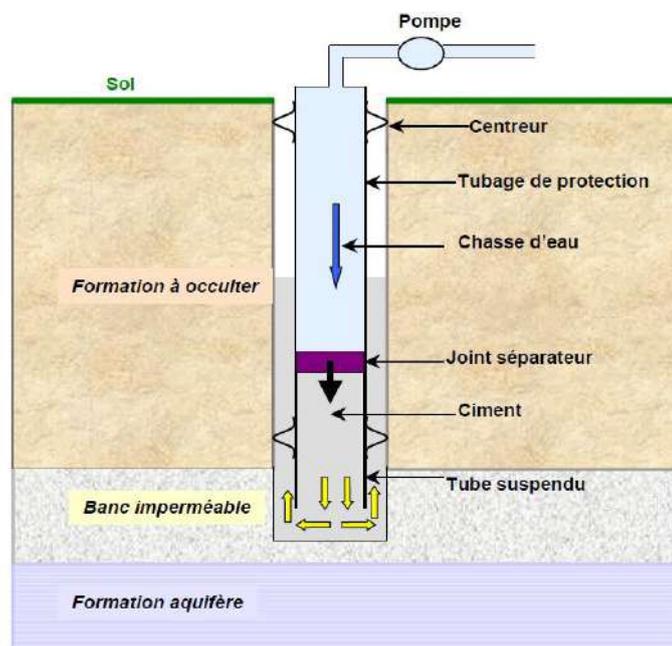


Fig (22) : Dispositif de cimentation par le tube suspendu (source documentaire BRGM).

9-4 – La cimentation par canne dans l'annulaire :

Type 1 :

On fait descendre une garniture de petit diamètre ($\approx 1''$) dans l'espace annulaire, jusqu'au pied du tubage qui est ancré dans au fond du terrain, et on injecte le ciment (dans l'annulaire) sous pression. Il faut faire remonter la canne progressivement, si nécessaire.

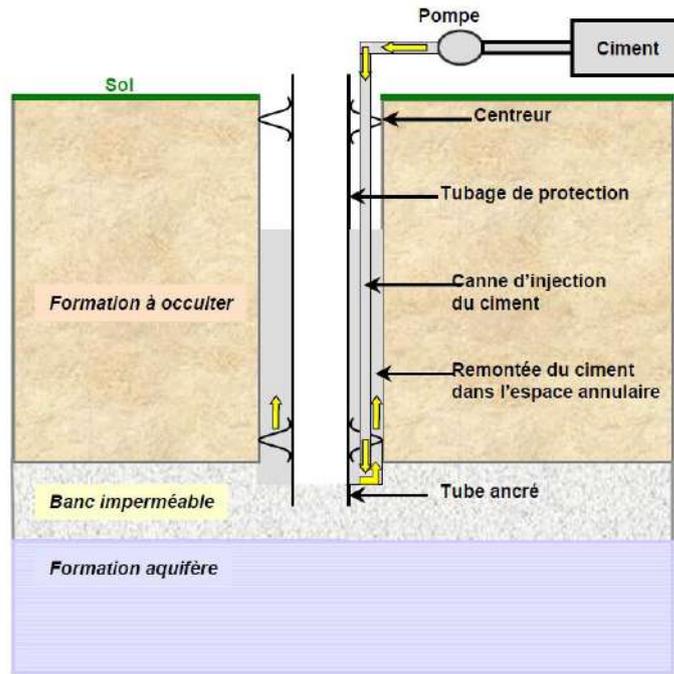


Fig (23) : Dispositif de cimentation par canne dans l'annulaire. Source documentaire BRGM.

Type 2 :

Dans certains cas (exemple suivant fig 21), on procède à la cimentation, une fois l'ouvrage terminé (après mise en place du tubage, du massif de gravier additionnel et du joint étanche desobranite).

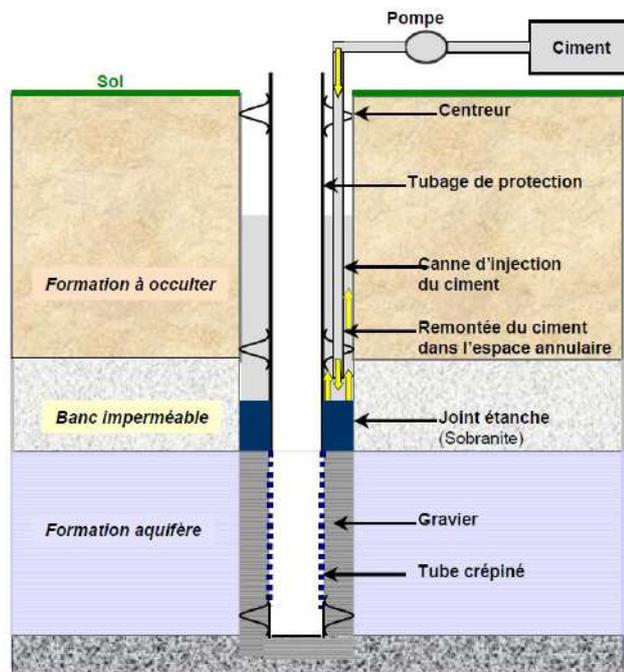


Fig (24) : Dispositif de cimentation par canne dans l'annulaire, après mise en place du MGA. Source documentaire BRGM.

Dans ce cas, la seule méthode qui permet l'injection sous pression est la cimentation par canne.

9- 5 – La cimentation au Stinger :

La technique de cimentation au Stinger est utilisée dans les colonnes de grands diamètres, notamment les colonnes de surface (Colonne 18^{5/8}" dans un trou 24" ou 26").

Elle a pour objectif :

- ✓ De minimiser l'excès de ciment ;
- ✓ D'éviter la contamination ;
- ✓ De réduire le temps de cimentation.

Pour ce faire, on utilise un outil spécial, appelé Stinger, qui sera vissé au bout d'une garniture de tiges.

Les puits concernés par cette technique ont une profondeur inférieure à 500 m. La colonne de tubage doit être munie d'un sabot spécial, pour recevoir le Stinger. Il faut alors :

- ✓ Descendre la garniture de tiges à l'intérieur du tubage, jusqu'au sabot ;
- ✓ Ancrer le Stinger, dans le sabot spécial.

Ensuite, on effectue les opérations suivantes :

- ✓ Circuler à l'intérieur des tiges (le retour de boue se fait normalement par l'annulaire Trou – Casing) ;
- ✓ Injecter 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 remarque un à-coup de pression.

- ✓ Désancrer le Stinger ;
- ✓ Circulation à l'intérieur des tiges (le retour de boue doit se faire par le tubage, cette circulation a pour but de vérifier l'étanchéité du sabot ;
- ✓ Remonter la garniture et attendre la prise de ciment.

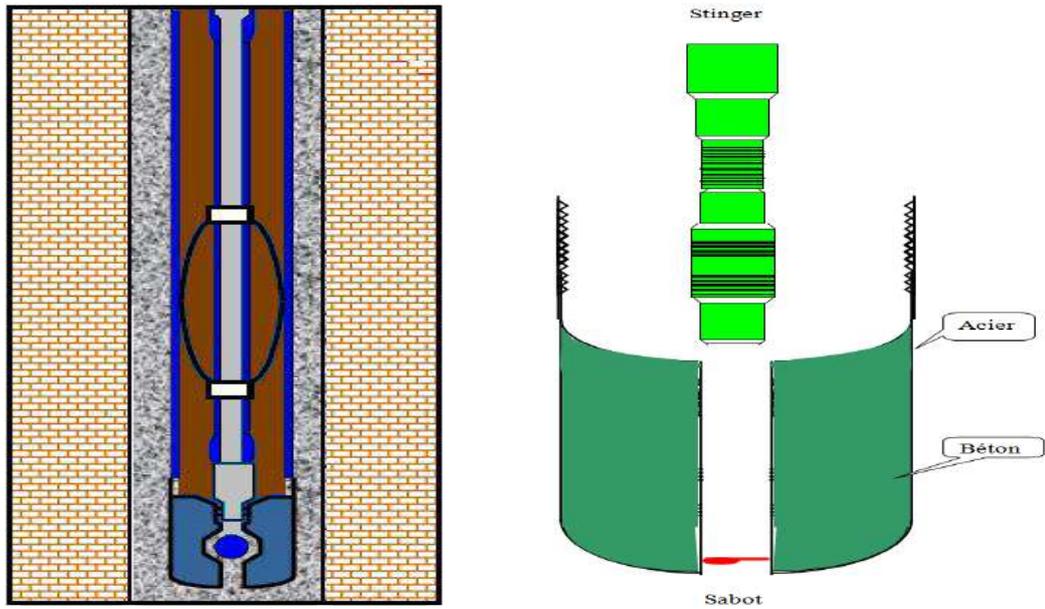


Fig (25) : Procédés de cimentation au Stinger.

Conclusion :

La réussite d'une opération de cimentation nécessite en premier lieu la sélection d'une classe de ciment adéquate aux conditions de orage (T°, pression, types de formations ...), le bon choix du matériel de cimentation, un bon habillage de la colonne de tubage et passe nécessairement par l'option à la méthode de cimentation convenable et ce, selon la disponibilité du matériel, le coût de l'opération et surtout le temps et l'efficacité de l'exécution.

CHAPITRE II
DESCRIPTION DU
PUITS

1 – Situation géographique de la région d'étude (et du puits) :

A. Introduction :

Au de ce qui suit, nous nous proposons de présenter les principales données qui concernent de la région d'étude.

B. Situation géographique de la commune d'El Hedjira :

La région d'El-Hedjira, jadis faisant partie des départements de la wilaya de Ouargla, est désormais une circonscription administrative de la wilaya de Ouargla, nouvellement promue, selon le découpage administratif récent.

Elle est situé, presque à mi-chemin, entre Ouargla et Touggourt, sur la route nationale numéro 3. Plus précisément au Nord – est de Ouargla, au Sud de Touggourt et au Sud – ouest de la wilaya de Ouadi Souf.

Elle se positionne conformément aux coordonnées géographiques suivantes :

Une Latitude: 32.6134, et Longitude : 5.51209, (32° 36' 48" Nord, 5° 30' 44" Est).

Elle est située dans le prolongement du grand bassin de la partie Nord-est du Sahara, qui s'étend sur une superficie de 9114,49km², et qui se caractérise par un ensemble de chottes tel que : Chott El Malah et Chott Baghdad, qui sont des dépressions d'orientation NE – SW.

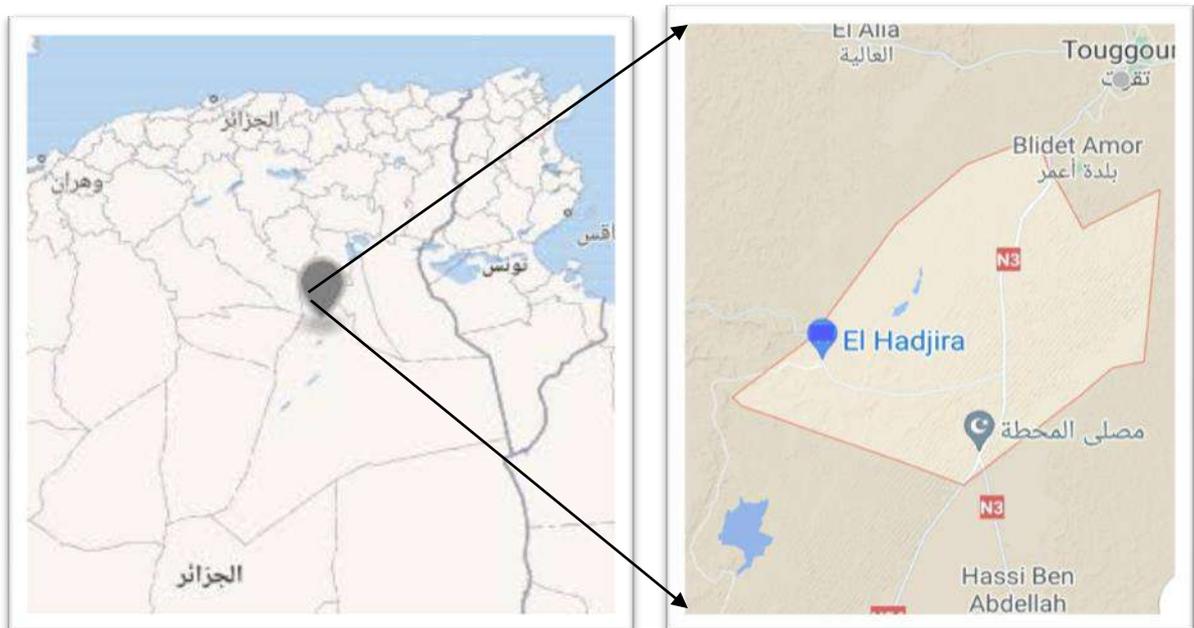


Fig (1) : Situation géographique de la commune d'El Hedjira.

Les données relatives à la région sont récapitulées dans le tableau suivant (Tab. 1).

Tableau (1) : Résumé de données relatives à El Hedjira.

Pays	<u>Algérie</u>
Wilaya	Ouargla
Nombre d'habitants d'El Hadjira	14 965 habitants
Coordonnées géographiques d'El Hadjira	Latitude: 32.6134, Longitude: 5.51209 32° 36' 48" Nord, 5° 30' 44" Est
Superficie d'El Hadjira	245 900 hectares 2 459,00 km ²
Altitude d'El Hadjira	119 m
Climat d'El Hadjira	Climat désertique sec et chaud (Classification de Köppen : BWh)

Le puits, qu'on s'est fixé pour objectif dans la présente étude, dénommé Debidibi, se situe à l'Ouest d'El Hedjira (W. Touggourt), et se trouve exactement localisé conformément aux coordonnées :

X = 32 ° 36'47 "N, Y = 5 ° 27'31" E, et sur une Altitude moyenne de l'ordre de 120m.

**Fig (2) : Situation géographique du forage Debidibi.**

3 – Données du puits :

Dans le présent travail, nous allons suivre le déroulement d'opérations de cimentations de colonnes de tubage en phases différentes lors de la réalisation d'un forage d'eau, dans la région d'El Hedjira – w. de Touggourt, Rig Tassili 117.

Les paramètres envisagés et visés pour ce puits sont :

Tableau (2) : Paramètres envisagés relatifs au puits Debidibi.

Localisation géographique :	<ul style="list-style-type: none"> – Le nom du site : Dibdibi. – Région : Touggourt. – Commune : El Hadjira. – Daïra : El Hedjira.
Destination du forage :	Alimentation en Eau Industriel (AEI).
Maitre de l'ouvrage :	ANRH
Entreprise de réalisation :	Tassili. Rig : 117.
Durée de réalisation :	8 Mois

4 – La fiche technique du puits :

Les données, constituant la fiche technique, caractérisant le puits Debidibi, faisant objet de cette étude, et où nous étions affectés pour faire notre stage et récolter les données nécessaires, sont récapitulées dans le tableau suivant (Tab. 3).

Tableau (3) : Données de la fiche technique du puits Debidibi.

Type d'appareil utilisé.	Tassili. Rig 117. Appareil à 2 tiges.
Cordonnées géographiques.	X : 05° 30' 44" E Y : 32° 36' 48" N
Altitudes.	Z : 115m.
Profondeur totale de l'ouvrage.	1500 m
Nombre de phases.	Quatre (04) Phases.
Caractéristiques de chaque phase, (Diamètre de l'outil, diamètre du tubage, profondeur de la phase).	<p style="text-align: center;">Outil : 36"</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tube guide : Tubage : 28" Profondeur : 30 m. <p style="text-align: center;">Outil : 26"</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phase 1 : Tubage : 18^{5/8} Profondeur : 300 m <p style="text-align: center;">Outil : 17^{1/2}</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phase 2 : Tubage : 13^{3/8} Profondeur : 1140 m. <p style="text-align: center;">Outil : 12^{1/4}</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phase 3 : Tubage : 9^{5/8} Profondeur : 360 m
Crépine	377 m

5 – Objectif du puits :

La convention signée par les deux contractants, l'ANRH, en tant que Maître de l'ouvrage et l'entreprise Tassili, en tant qu'Entrepreneur, a pour objectif la réalisation d'un forage, dénommé Debidibi (El Hedjira), destiné à des fins d'exploitation industrielle.

6 – Le programme de forage :

Le programme de forage dépend de plusieurs paramètres et facteurs et principalement du type d'exploitation et de la géologie du site. Des programmes bien définis existent pour chaque configuration.

Pour le choix de notre programme de forage, nous avons étudié différentes variantes adoptés universellement, pour choisir la méthode de forage adéquate, qui répond le mieux à notre situation.

Tableau (4) : Paramètres de forage. Ouvrage Debidibi.

Forage		
De (mètre)	Jusqu'à (m)	φ de l'outil (")
0	30	36"
30	300	26"
300	1140	17" ^{1/2}
1140	1500	12" ^{1/4}

7 – Le programme de tubage :

Après avoir foré en profondeur pour une phase donnée, il est indispensable de descendre, dans le puits, une colonne de tubage, afin de pouvoir continuer le forage des phases suivantes en toute sécurité et le faire fixer à l'aide d'un bouchon de laitier du ciment.

Tableau (5) : Programme de tubage. Ouvrage Debidibi. Tubage (casing)

De (mètre)	Jusqu'à (m)	φ du casing (")
0	30	28"
0	300	18" ^{5/8}
0	1120	13" ^{3/8}
0	1140	9" ^{5/8}
0	1500	Crépine 8" ^{5/8}

Ce programme (de forage et notamment de tubage) doit être établi selon des critères de bases essentielles qui doivent correspondre aux diverses formations géologiques qu'on doit rencontrer.

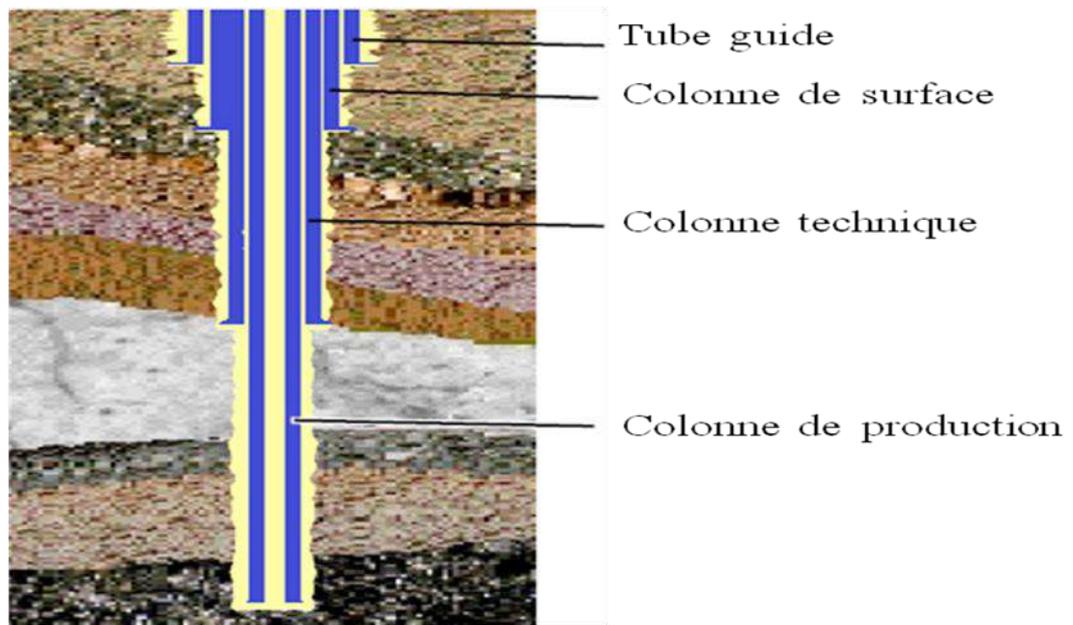


Fig (4) : Diverses colonnes de tubage.

8 – Durée des travaux de forage :

Suite à plusieurs contraintes techniques et notamment la pandémie du Covid 19, les travaux de forage ont pris du temps. Une lenteur a été donc enregistrée, ce qui a fait que la durée de réalisation de cet ouvrage était de huit (08) mois.

Conclusion :

Les travaux de forage, pour la réalisation du puits Debidibi (région d'El – Hedjira – Touggourt), qui est destiné à des fins purement industrielles, ont duré pratiquement huit (08) mois, lors desquels, on a suivi une architecture imposée par la nature du terrain.

Quatre (04) phases donc ont été réalisées (y compris celle du tube guide), sur une profondeur totale de 1500m, dont 1140m ont été tubés conformément au programme de phase préalablement établi, le reste a été crépiné sur une profondeur de 377m.

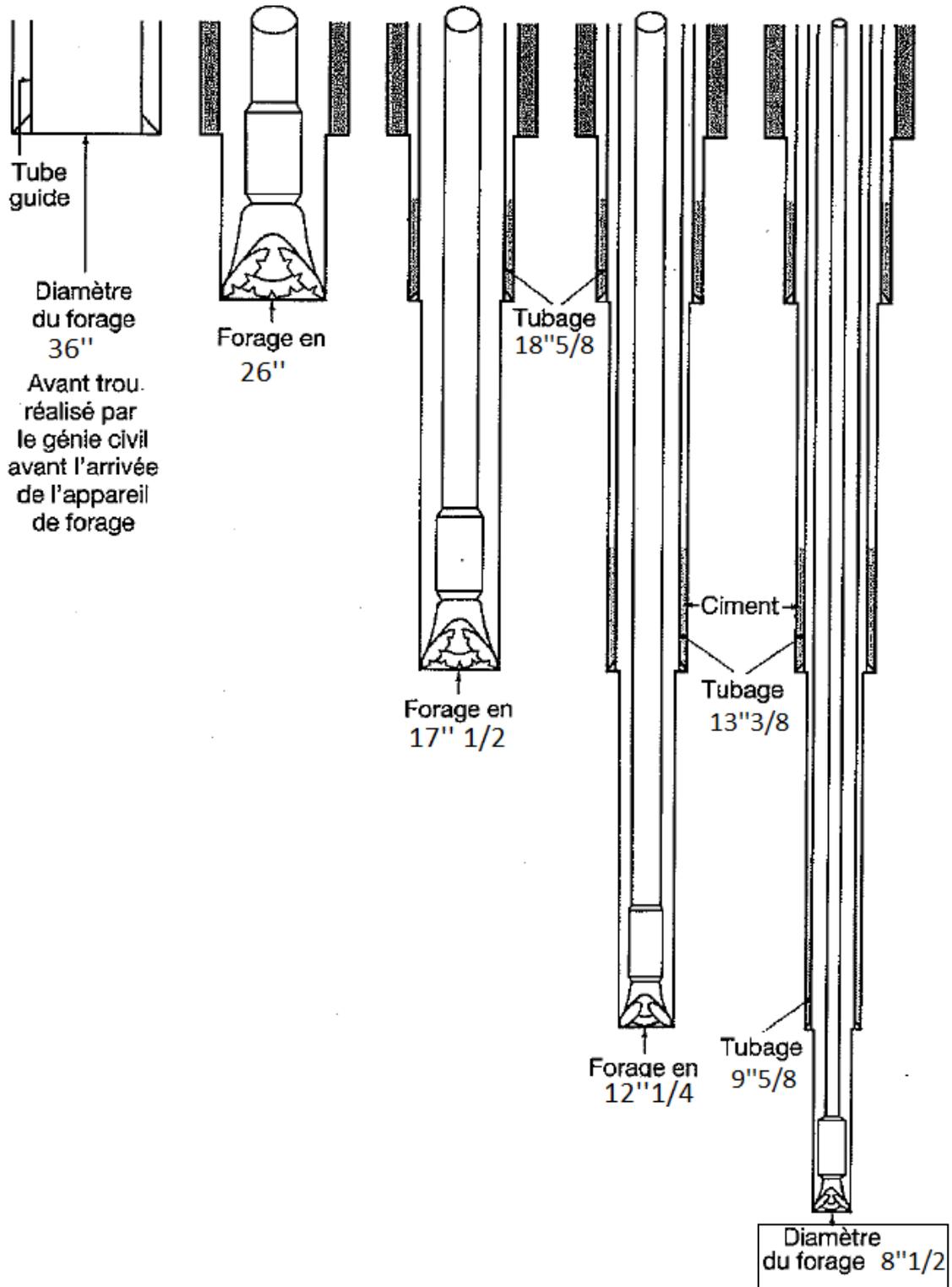


Figure (5) : Programme de forage et tubage type, lors du forage dans la région de Debdibi (région d'El - hedjira - Touggourt).

CHAPITRE III
LES LAITIERS DE
CIMENT

1 – Les laitiers de ciment :

Introduction :

Le coulis de ciment peut être choisi en fonction des conditions de température, de pression et d'éventuelle contamination en éléments chimiques. Différents ciments seront utilisés surtout suivant certains facteurs environnementaux et/ou internes de l'ouvrage (profondeur, fluides contenus dans les horizons traversés). Il s'avère judicieux d'avoir recours ou d'envisager l'ajout de certains adjuvants (retardateur, accélérateur, viscosifiant ...) et ce, selon la situation.

Les services de l'American Petroleum Institute (API) ont établis des normes définissant les critères de production des ciments Portland utilisables dans l'industrie du forage. La fabrication du coulis, que ce soit pour mettre en place un bouchon de ciment ou une cimentation ordinaire, doit être homogène en accordant une importance particulière et une certaine rigueur quant au calcul de son volume.

Le temps de prise est déterminé en fonction des conditions de fond et de la résistance mécanique du bouchon (ou du coulis).

2 – Définition :

Les ciments sont des liants hydrauliques, qui consistent en un mélange de la chaux et des pouzzolanes (terres volcaniques). Ces liants hydrauliques désignent une sorte de liants qui font prise, une fois gâchés avec l'eau, même s'ils y sont immergés.

Lorsque les constituants minéralogiques de ces liants hydrauliques (ciments), sont en contact avec de l'eau, ils vont subir une hydratation et forment par conséquent une pâte qui durcit et devient un matériau ayant certaines propriétés mécaniques lui conférant l'aptitude de lier d'autres matériaux ; on parle alors de laitier de ciment.

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

3 – Choix du laitier de ciment :

Comme avancé plus haut, l'API a mis au point une classification des ciments, en fonction de la profondeur à atteindre, de la température du fond de puits et surtout leur résistance aux sulfates. Cette sélection est dictée par :

- ✓ La température statique du fond du puits ainsi que la pression ;
- ✓ La densité des laitiers est fonction de la pression hydrostatique des formations traversées ;
- ✓ Le temps de Pompabilité ;
- ✓ La résistance à la compression ;
- ✓ Les caractéristiques rhéologiques du laitier à employer ;
- ✓ La résistance du laitier aux différentes attaques tels que :
 - Les eaux minéralisées (agressives) ;
 - Les températures élevées ;
 - La problématique des gaz jaillissant de la formation jusqu'au jour.

4 – Préparation d'un laitier de ciment :

Les laitiers sont préparés en laboratoire dans les conditions qui stimulent les conditions du puits (température, pression). Ils se composent essentiellement de ciment, d'eau et d'additifs (si nécessaire) ayant un rôle bien déterminé.

Ils se préparent donc de trois éléments principaux : eau de gâchage plus ciment pur plus additifs (si besoin est).

- **L'eau de gâchage** : L'eau qu'on utilise pour confectionner du laitier de ciment, peut être, selon le cas, soit de l'eau douce, de l'eau salée, de l'eau salée saturée, ou de l'eau de chantier.
- **Le ciment pur** : pesé avec la balance électronique (ciment vrac ou conditionné).
- **Les additifs** : Ce sont des produits qu'on est amené à employer comme adjuvants pour améliorer les caractéristiques du laitier ainsi que son rendement. Parmi lesquels on peut utiliser des réducteurs de filtrat, des accélérateurs ou des retardateurs de prise, des allégeants ou des alourdissants, des dispersants et des agents divers (des fluidifiants, des anti – moussants, les gélifiants, les additifs liquides).
- **Le mixage** : Dans l'ordre, l'eau et les additifs sont mixés à une vitesse de 4000 tr/mn, pendant 30 secondes. On ajoute ensuite le ciment (ne pas dépasser 15s) puis on mixe à 12000 tr/mn pendant 35s.

4-1 – Caractéristiques et propriétés d'un laitier de ciment :

a) Densité des laitiers :

Ce paramètre a une influence certaine sur :

- La pression hydrostatique, en cours de cimentation ;
- Le temps de pompabilité;
- La résistance à la compression du ciment durci ;
- La perméabilité du ciment.

Il est à noter que la densité du ciment varie de 3,15 à 3,22 et ce, suivant les lots et les types. La densité du laitier peut donc être calculée d'une manière simple à partir de la densité de ciment (poudre), de celle de l'eau de gâchage, et de celles des différents additifs entrant dans la composition du laitier, en utilisant l'expression suivante :

$$D_L = \frac{M_c + V_e \cdot d_e + \Sigma M_{ad}}{\frac{M_c}{d_c} + V_e + \Sigma V_{ad}}, \text{ avec :}$$

M_c = masse du ciment.

V_e = volume d'eau.

ΣM_{ad} = somme des masses des additifs.

ΣV_{ad} = somme des volumes des additifs.

V_e = Volume (L).

d_c = densité du ciment.

d_e = densité de l'eau.

L'eau de gâchage peut avoir une densité supérieure à 1 (l'eau de mer : $d = 1,03$ et une saumure : $d = 1,23$).

Le calcul de densité se fait pour les programmes de cimentations néanmoins, la mesure in situ ou au laboratoire reste indispensable. Elle peut s'effectuer avec la même balance que celle employée pour les boues de forage. Toutefois, la mesure de densité est d'une grande importance, car c'est en fonction de cette valeur, il nous est aisé de connaître le rapport E/C. Une amélioration est apportée par la balance pressurisée.

b) Le rendement :

C'est le volume de laitier obtenu par tonne de ciment. Il n'est plutôt pas mesurable, mais peut se calculer en utilisant l'expression suivante :

$$R = \frac{\frac{M_c}{d_c} + V_e + \Sigma V_{ad}}{M_c} \times 1000$$

NB : tous produit, autre que le ciment, est considéré comme un additif, même s'il apparait en quantité considérable (farine de silice, allégeant,...).

c) Le filtrat :

Le laitier de ciment, qui est une suspension de solides dans l'eau, influe sur les caractéristiques mécaniques du ciment durci. Quand il est en face d'une formation perméable, et soumis à une pression, il va perdre de ce fait, une quantité de son eau.

Le phénomène de filtration va entraîner déshydratation prématurée du laitier qui pourra devenir impompable et fera prise dans de mauvaises conditions. La filtration de laitier de ciment peut être mesurée, de la même façon que celle de la boue, par l'intermédiaire d'un filtre – presse API, à température ambiante et sous une pression de sept (7) bars, ou à l'aide d'un filtre – presse H.P – H.T. Lorsqu'on veut simuler les conditions de fond.

d) L'eau libre :

C'est le volume d'eau surnageant au – dessus du laitier après un certain temps de repos. Elle peut former un anneau d'eau à la partie supérieur de la gaine de ciment.

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 (1cc correspondant à 0.4 %). Cette mesure va caractériser le phénomène de sédimentation de la suspension de particules de ciment dans l'eau.

On l'a volontairement associé à la mesure de filtrat pour pouvoir préciser clairement que, contrairement à ce que l'on pourrait penser, ces deux mesures sont totalement indépendantes.

Un même laitier peut avoir un filtrat important et une eau libre réduite et vice versa.

e) Le temps de pompabilité :

C'est le laps de temps que le laitier, maintenu en agitation sous condition de pression et de température, met pour atteindre une consistance de 100 Uc.

En pratique, il correspond au temps durant lequel le laitier reste pompable, dans les conditions de température et de pression normalisées, en fonction du type de cimentation envisagée.

La prise du ciment étant influencée par plusieurs facteurs ; l'agitation, la température et la pression et de la température qu'il subira lors de son refoulement du le puits.

Ces tests sont opérés par un outil dit le consistomètre (appareil normalisé par l'API).

f) Résistance à la compression :

Le ciment doit supporter certaines contraintes (mécanique, thermique, les vibrations) pendant toute la durée de vie de puits.

Toutefois, on ne doit jamais parler du ciment sans expliquer, ne serait ce d'une manière brève, ce qui se passe lorsqu'il fait prise et qu'il durcit.

On peut distinguer trois principales étapes successives :

- Le mouillage ;
- La prise ;
- Le durcissement.

Lorsque l'on gâche le ciment avec l'eau on va avoir les phases chronologiques suivantes :

- **Réactions initiales** : d'une durée de quelques minutes où les alcalins passent en solution, et on assiste à la dissolution d'une partie du gypse, générant des ions sulfates SO_4^{2-} , et la combinaison des sulfates et des aluminates formant l'ettringite (C_3A , 3CaSO_4 , $32 \text{H}_2\text{O}$), qui se développe en fines aiguilles autour des grains d'aluminates, formant une barrière étanche et bloquant l'hydratation de ces derniers. Début d'hydratation des silicates, la phase aqueuse se sature rapidement en chaux. Formation d'une pellicule de silicate de calcium hydraté (noté CSH) étanche à la périphérie des grains de C_3S .

- **Période dormante** : d'une durée de quelques heures (selon la température). À ce stade, tout semble s'arrêter, et l'aspect du ciment reste inchangé pendant un certain temps (correspondant à ce que l'on appelle la période dormante). Cet intervalle correspond schématiquement au temps que va mettre l'eau pour franchir la barrière de gel de silicate hydraté enrobant les grains de C_3S .

- **Prise et durcissement** : d'une durée de quelques minutes, lorsque l'eau entre de nouveau en contact avec les grains de C_3S , il se développe des cristaux hydratés qui brisent la barrière de gel, ce qui correspond au début de la prise. Cette hydratation va ensuite se poursuivre régulièrement au fur et à mesure que les cristaux d'hydratés se développent. On assiste d'abord à un épaissement puis à un durcissement du ciment résultant de l'enchevêtrement cristallin ainsi formé.

Conclusion :

Pour que le mélange eau/ciment, appelé laitier, dans le jargon du forage, puisse accomplir ses fonctions, il faut qu'il soit préparé avec rigueur. Il doit faire face à des températures de fond et pressions inattendues, ce qui peut anéantir son efficacité. Il doit avoir certaines propriétés (densité, viscosité, prise ...) sinon l'ajout de certains adjuvants peut lui conférer les qualités requises. Selon les conditions du trou, on se voit amener à établir des formulations, en ajoutant des fluidifiants, des viscosifiants, des accélérateurs ou retardateurs de prise) pour contourner les problèmes pouvant surgir lors du forage.

CHAPITRE IV
CALCUL DE
CIMENTATION
ET ÉTUDE DE CAS DU
FORAGE DE BIDIBI – EL
HEDJIRA – OUARGLA

Introduction :

Une opération de cimentation doit être effectuée avec art et rigueur. La réussite des phases suivantes et de l'ouvrage tout entier est fortement conditionnée par le bon déroulement d'une cimentation.

Outre les paramètres qu'il doit acquérir (densité, viscosité, filtrat, pompabilité, prise initiale et finale ...), une cimentation doit être calculée avec précision tout en suivant les consignes et directives des experts.

1 – Volume nécessaire du laitier de ciment :

L'opération se fait en fonction de la construction du trou (cimentation totale ou partielle) et l'obtention du volume de laitier nécessaire sera possible en utilisant l'expression suivante :

$$V_L = 0,785[(K_1 \times D_{tr}^2 - d_{exTub}^2) \times H + d_{inTub}^2 \times h_0], \quad \text{avec :}$$

V_L = volume de laitier de ciment nécessaire.

K_1 = coefficient dépendant de la nature du terrain (cavernes, fissures) $K_1=1,05$ à 2).

H = hauteur à cimenter dans l'espace annulaire. h_0 = hauteur de sécurité qui est de 10 à $20m$.

Ou autrement avec l'expression suivante :

$$V_L = (V_T - V_E) H \cdot K + V_S. \quad \text{Avec :}$$

V_L = Volume de laitier.

V_T = Volume du trou.

V_E = Volume extérieur du tubage.

H = Hauteur d'espace annulaire à cimenter.

V_S = Volume de sécurité = $d_{inTub}^2 \times h_0$.

$$V_t = \frac{\pi D^2 \text{trou}}{4} \times H \times K$$

D : Diamètre de trou. $13^{3/8}$. H : Hauteur de l'espace annulaire à cimenter = 1140 (m).

K : coefficient dépendant de la nature du terrain. ($K_1 = 1.1$).

$$V_t = \frac{3.14(12.25 \times 0.0254)^2}{4} \times 1140 \times 1.1$$

$$V_t = 95.30m^3$$

$$V_e = \frac{\pi D^2 \text{tubex}}{4} \times H \times K$$

D : Diamètre extérieur du tubage = $9^{5/8}$ (m).

$$V_e = \frac{3.14(9.625 \times 0.0254)^2}{4} \times 1140 \times 1.1$$

et donc $V_e = 58.83 m^3$

- **Volume de sécurité :**

$$V_S = d_{\text{inTub}}^2 \times h_0$$

d_{inTub}^2 = Diamètre intérieur du tubage = $8^{5/8}$ (m).

$$V_S = \frac{3,14(8.625 \times 0.0254)^2}{4} \times 10$$

$$V_S = 0.37 \text{ m}^3$$

- **Volume de laitier :**

$$V_L = (V_T - V_E) + V_S \text{ et donc } V_L = (95.30 - 58.83) + 0.37$$

$$V_L = 36.83 \text{ m}^3$$

2 – Quantité de ciment sec pour préparer 1 m³ de laitier :

Cette quantité peut être déterminée par l'emploi de la formule suivante :

$$q_C = \frac{\gamma_C \cdot \gamma_e}{\gamma_e + \omega \cdot \gamma_C} \equiv T/m^3 \text{ Avec :}$$

q_C = quantité de ciment.

γ_C = densité de ciment = 3.15.

γ_e = densité de l'eau de gâchage (prise = 1). ω = rapport eau/ciment. On prend $\omega = 46\%$, c à d, pour 100kg de ciment il me faut 46kg d'eau.

Donc :

$$q_C = \frac{3.15 \times 1}{1 + (0.46 \times 3.15)} = 1.28 \text{ T/m}^3$$

2 – 1 – Densité du laitier de ciment :

C'est un paramètre déterminant qui doit être choisi avec précaution, pour faire face aux conditions de fond, assurer l'étanchéité souhaitée et ne pas causer de complications. Il est aisé de déterminer la densité du laitier par la formule suivante :

$$\gamma_L = q_C (1 + \omega). \text{ Avec :}$$

q_C = quantité de ciment.

ω = rapport eau/ciment.

γ_L = densité du laitier de ciment. Donc :

$$\gamma_L = 1.28 \times (1 + 0.46) = 1.86$$

NB : La valeur de densité trouvée sur le site de forage était de : $d = 1.70$

2 – 2 – Poids total de ciment sec :

La quantité totale de ciment sec (vrac ou en sac), nécessaire pour mener à bien diverses opérations de cimentation peut se calculer selon la formule suivante :

$$Q_C = q_C \cdot V_L \cdot k_2 \text{ (en tonne). Avec :}$$

Q_C = quantité total de ciment.

q_C = quantité de ciment pour 1 m^3 de laitier.

k_2 = coefficient tenant compte des pertes de ciment lors de la fabrication. Prendre $k_2 = 1.05$;

V_L = volume de laitier de ciment.

Donc :

$$Q_C = 1.28 \times 36.83 \times 1.05 \text{ alors : } Q_C = 49.49 \text{ t}$$

3 – volume d'eau de gâchage (mixage) :

L'eau de gâchage peut être de l'eau douce, salée, salée saturée ou l'eau de chantier, tout dépend du cas et des conditions où l'on est. Son volume peut être obtenu par :

$$V_e = \frac{\omega \cdot Q_C}{\gamma_C}$$

Où :

V_e = volume d'eau de gâchage.

Q_C = quantité total de ciment.

γ_C = densité de ciment.

ω = rapport eau/ciment.

Donc :

$$V_e = \frac{0.46 \times 49.49}{3.15} = 7.22 \text{ t}$$

$$1\text{ t} \longrightarrow 1000\text{ L}$$

$$7.22\text{ t} \longrightarrow x \text{ L}$$

$$\text{Donc : } x = 7\,220 \text{ L} = 7.22 \text{ m}^3$$

4 – Volume de fluide de chasse :

Le fluide de chasse est, comme avancé aux chapitres précédents, utilisé pour pousser le laitier vers les zones à cimenter. Son volume pourra être calculé par :

$$V_{ch} = 0.785 \cdot k_3 [(H - h_0) \cdot d_{inTub}^2]. \text{ Où :}$$

V_{ch} = volume de fluide de chasse.

h_0 = hauteur de sécurité qui est prise h_0 de 10 à 20m.

H = hauteur à cimenter dans l'espace annulaire.

K_3 = coefficient dépendant de

l'état intérieur du tubage (rugosité, pas de cavernes ni fissures..., pris $K_3 = 1$).

Donc :

$$V_{ch} = 0.785 \times 1[(1140 - 10) \times (8.625 \times 0.0254)^2] \quad \text{et donc : } V_{ch} = 42.57\text{m}^3$$

5 – Pression de refoulement à la fin de la chasse :

C'est la pression nécessaire pour vaincre les pertes de charges ainsi que la pression provoquée par la différence de densité des fluides employés. Elle est donnée par :

$$P_{\max} = P_1 + P_2$$

P_1 = pression due à la différence de densité laitier/boue.

P_2 = pertes de charges.

$$P_1 = 0.1 \times \gamma_L \times H - [(H - h_0) \times \gamma_b + h_0 \times \gamma_L] \times 0.1$$

Cette relation est déduite de la formule $P_h = [(\gamma \cdot H) / 10]$.

P_2 = pertes de charges au cours de la chasse.

Sa détermination se fait soit à l'aide des abaques soit à l'aide de formules pratiques.

$P_2 = 0.02 \times H + 10$ (kgf/cm²) : pour les grandes profondeurs ($Q > 30\text{l/s}$).

$P_2 = 0.01 \times H + 08$ (kgf/cm²) : pour les petites profondeurs ($Q < 30\text{l/s}$).

Donc :

- Calcule de la densité de la boue : $P_h \geq P_c$

Et comme $P_h = \frac{\gamma_b \times H}{10}$ et $P_c = \frac{\gamma_e \times h}{10}$

$$P_h \geq P_c. \quad \text{Donc :} \quad P_h = \frac{\gamma_b \times H}{10} \geq P_c = \frac{\gamma_e \times h}{10} \quad \text{et } \gamma_e = 1.$$

$$\gamma_b = \frac{h}{H}. \quad \text{Donc :} \quad \gamma_b = \frac{10}{1140} = 0.008$$

Calcul de P :

$$P_1 = 0.1 \times 1.28 \times 1140 - [(1140 - 10) \times 0.008 + (10 \times 1.28)] \times 0.1$$

$$P_1 = 143.73 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}.$$

$$P_2 = 0.02 \times 1140 + 10. \quad P_2 = 32.8 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}.$$

$$P_{\max} = 32.8 + 143.73 = 176.53 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}.$$

Une fois qu'on détermine la pression max, on pourra par la suite choisir l'unité de cimentation, c à d, la pompe et donc le débit.

$$P_{\max} \text{ de l'unité} > P_{\max} \text{ calculée.}$$

6 – Calcul du débit :

$$Q_{\max} = 0.785 \times (K_1 \times d_{\text{trou}}^2 - d_{\text{extTub}}^2) \times V_{\text{asc}}$$

Si les pompes ne sont pas en mesure de fournir un débit assurant le régime turbulent, il faut travailler avec le régime sublaminaire, avec une vitesse ascensionnelle ($V_{\text{asc}} \leq 0,3 \text{ m/s}$).

$$Q_{\max} = 0.785 \times [1.1 \times (12.25 \times 0.0254)^2 - (9.625 \times 0.0254)^2] \times 1.2$$

$$Q_{\max} = 0.044 \text{ m}^3/\text{s} = 44 \text{ l/s}$$

7 – Le temps de cimentation :

C'est le temps suffisant pour la confection et l'injection du laitier auquel on ajoute la durée nécessaire pour la chasse augmenté encore de quelques minutes (15') pour le changement des accessoires utiles pour chaque injection (laitier, chasse, spacers).

$$T_{\text{total}} = T_{\text{Laitier}} + T_{\text{chasse}} + 15'$$

T_L = temps d'injection du laitier de ciment.

T_{ch} = temps de chasse.

15' = 15 minute équivalent du temps de passage de l'injection du laitier à la chasse.

7 – 1 – Le temps d'injection :

C'est l'équivalent du temps nécessaire pour injecter le laitier de ciment, il est donné par :

$$T_L = V_L / Q_{\max}$$

$$T_L = \frac{36.83}{0.044} = 837.04 \text{ s} = 14 \text{ min}$$

7 – 2 – Le temps de chasse :

Ce temps équivaut la durée suffisante pour chasser le laitier de la garniture et le faire atteindre la cote voulue. Il est donné par :

$$T_c = V_c / Q_{\max}$$

$$T_c = \frac{42.57}{0.044} = 967.5 \text{ s} = 16 \text{ min}$$

- **Le temps total :**

$$T_{\text{total}} = 14 + 16 + 15 = 45 \text{ min}$$

7 – 3 – Le temps de prise :

Il doit satisfaire à la condition :

$$T_{\text{total}} \leq 0.75 T_{\text{prise initial}}$$

Connaissons le temps total (déterminé au 7°), on peut alors calculer le temps de prise.

Donc : $(T_{\text{total}} / 0.75) = \text{Temps de prise initiale.}$

$$T_p = \frac{45}{0.75} = 60 \text{ min} = 1 \text{ h}$$

7 – 4 – La durée de cimentation :

$$D_C = T_{inj} + T_{ch}$$

$$D_c = 14 + 16 + 30 \text{ min.}$$

8 – Contrôle de la cimentation :

Après avoir cimenté, il est nécessaire de vérifier ce qui suit :

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

8 – 1 – Contrôle de la hauteur de ciment dans l'espace annulaire :

La méthode la plus courante consiste à effectuer une thermométrie du trou, de 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 thermométrie sur la courbe du diamètre effectué avant la descente du tubage.

8 – 2 – Contrôle de la qualité de la cimentation :

Si la thermométrie donne quelques renseignements sur la présence ou non de zones polluées dans la cimentation, elle ne précise pas si le ciment adhère correctement aux parois du tubage. L'enregistrement (cement bond log ou CBL) permet de déterminer les zones de bonnes et mauvaises cimentations.

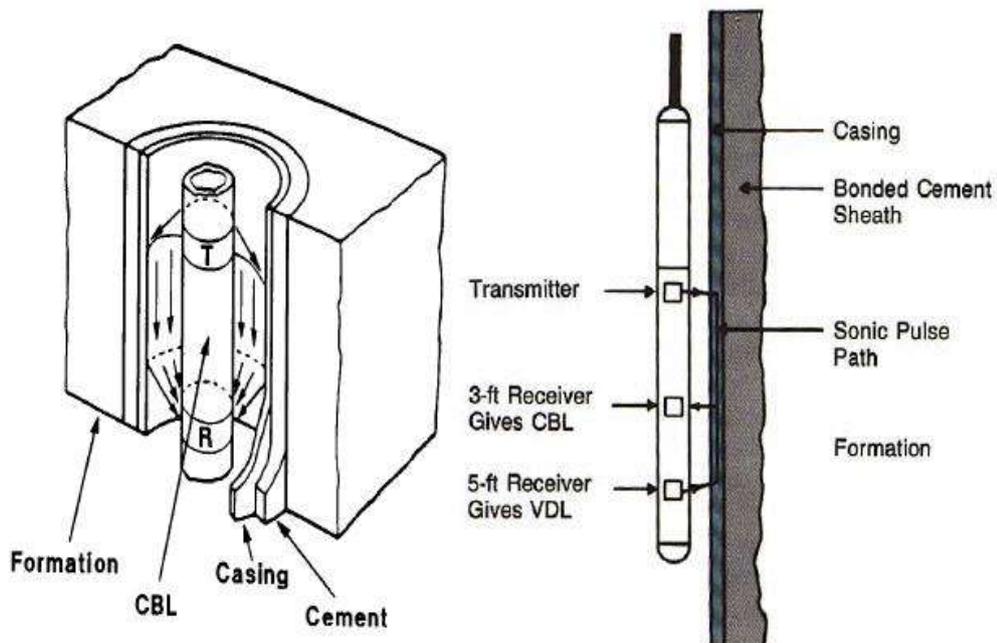


Figure (01) : Schéma du CBL.

Le principe de l'appareil est le suivant :

On a constaté que l'amplitude d'un signal acoustique donné subissait une atténuation notable lorsque l'onde sonore était transmise à travers le ciment, ce qui se produit lorsque ce dernier est adhérent au métal des tubes et à la formation.

Dans le cas contraire, la totalité de l'onde est transmise par l'acier sans diminution d'amplitude. L'appareil comporte donc un émetteur acoustique et un organe récepteur qui enregistrent les variations d'amplitude du signal reçu.

8 – 3 – Contrôle de l'étanchéité du tubage et de la cimentation du sabot :

Après cimentation, il s'avère judicieux de procéder à la vérification de l'étanchéité de la colonne.

Cet essai se fait, soit :

- Peu après l'arrivée du bouchon supérieur sur l'anneau de retenue.

Une fois l'à-coup de pression obtenu, on branche à nouveau les pompes de cimentation haute pression sur la tête de cimentation et on pompe jusqu'à ce que la pression atteigne la pression d'essai (de l'ordre de 80% de la pression d'éclatement du tubage).

- Après reforage d'une partie du ciment et forage de 1 ou 2m au dessous du sabot.

Conclusion :

À la fin de ce chapitre, nous avons constaté que l'ensemble des opérations de calcul que nous avons utilisées nous ont donné les mêmes valeurs utilisés sur chantier. Cela signifie que les formules employées sont approuvées. Il faut signaler qu'il y a une exception relative à la valeur de la densité. Celle de chantier était de 1,7 alors que celle calculée était de 1,86.

Cette différence est expliquée par le fait qu'on a exagéré un peu lors de l'estimation de certains paramètres, alors que sur chantier, on était contraint de diminuer la densité suite aux difficultés de forage.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de ce travail, et suite à plusieurs constatations faites sur le terrain, lors de notre stage, ainsi que pendant les discussions au cours de la réalisation de ce manuscrit, nous avons pu retenir ce qui suit :

Une opération de cimentation nécessite vraiment une préparation particulière, tant sur le côté matériel, dispositif et staff, vu les ennuis qu'elle peut présenter. Sa réussite demeure donc l'objectif tant cherché de tous les concernés.

Elle consiste à injecter un certain volume de laitier, préalablement calculé, dans l'espace annulaire sans pertes et ce, sur des hauteurs et endroits désignés auparavant, que ce soit pour mettre en place un bouchon de ciment ou pour ancrer un casing. Après prise, ce laitier formera une gaine de cimentation étanche et résistante.

Certaines phases imposent la mise en place de longues colonnes de casing, pouvant aller jusqu'à des centaines de mètres, voire plus, ce qui rend délicate leur cimentation (longueur, épaisseur, poids ...) et par conséquent leur réalisation ne peut être octroyée qu'à des firmes reconnues et spécialisées dans ce domaine.

En ce qui concerne l'ouvrage Debidibi, objet de ce travail, sis à la région d'El Hedjira, localisé conformément aux coordonnées $X = 32^{\circ} 36'47''$ N, $Y = 5^{\circ} 27'31''$ E, et sur une altitude moyenne de l'ordre de 120m. Sa réalisation était confiée aux services de l'entreprise Tassili (Rig. 117 à deux tiges), qui ont mis huit (08) mois pour l'achever.

- ✓ Sa profondeur est de 1500m, forée en quatre phases ; y compris celle du tube guide. Ce dernier était foré au 36" et tubé au 28" (sur 30m) ;
- ✓ La première phase, forée au 26" et tubée au 18"^{5/8} (sur 300 m) ;
- ✓ La deuxième phase, forée au 17"^{1/2} et tubée au 13"^{3/8} (sur 1140 m) ;
- ✓ La troisième phase, forée au 12"^{1/4} et tubée au 9"^{5/8} (sur 360m, tube crépiné).

La cimentation de notre ouvrage a consommé un volume de laitier de l'ordre de 37m³, nécessitant un volume d'environ 8m³ d'eau. Pour cela il a fallu une quantité de 49,49T de ciment sec (990 sacs de 50kg), et pour la réussir il a fallu une pression de refoulement de 176.53 (kgf/cm²) en la faisant injecter et circuler selon un débit de 44l/s. l'opération a duré 45minutes.

Conclusion Générale

Lors de notre séjour sur le chantier Tassili, nous nous sommes rendu compte de la gravité de la situation, où on a constaté qu'une telle opération nécessite un personnel qualifié, différents équipements et machines spécifiques. Le succès de la cimentation est très important et demande une très grande vigilance de la part de tous (personnel, visiteurs, intervenants ...).

Il est donc recommandé d'effectuer les calculs nécessaires pour la cimentation et être très vigilant lors des travaux, pour la bonne réussite de l'opération.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Albert mabilhot. *Le forage d'eau* Guide pratique écrit par *Albert MABILLOT*, éditeur LAVOISIER / TEC ET DOC, année 1995.
2. API 10: Materials and Testing for Well Cements. American Petroleum Institute.
3. Baker Hughes Intel: Liner hanger catalogue.
4. Cours de forage (IAP).
5. Le Forum International de Control de Puits (*IWCF*).
6. Le forage J. P. NGUYEN. Edition Technip. 1993.
7. Livre du forage et cimentation de SONATRACH.
8. Livre Forages géothermiques au Dogger en Île-de-France, réalisation et contrôle des cimentations.
9. Manual of Dowell Schlumberger/ Halliburton /Sperry-Sun/ ABB Vetco Gray Ltd/ Hughes – Christensen/ Hydril /Gyrodax /Smith International/ American Petroleum Institute/ Varco.
10. Mémoire de fin d'études (UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA) : Procédure de cimentation dans un forage de bassin d'Illizi.
11. Mémoire de fin d'études (Université Kasdi Merbah – OUARGLA) : Caractérisation de la nappe moi – pliocène, région d'El hedjira.
12. Polycopte de forage d'eau.
13. https://www.viamichelin.fr/web/Cartes-plans/Carre_plan-El_Hadjira-Ouargla-Algerie
14. Site de l'entreprise Tassili : <http://www.tassili.co/en/>.

ملخص :

تتمثل دراستنا المنجزة في موقع الديبيديبي 'الحجيرة' ولاية ورقلة في معرفة أهمية عملية الاسمنت والأدوات المستخدمة فيها، وهذا لانجاز عملية حفر سائل ذو خصائص فيزيائية في الفراغ الحلقي من اجل عزل طبقات الأرضية . وبعدها كيفية انجاز كل الحسابات اللازمة (حجم السائل, كتلة الاسمنت, حجم ماء المزيج, حجم الطين الدافع, مدة الحقن, ضغط دفع السائل) وبعد تحقيق وتركيب الأسمنت ، يتم فحص الأخير بواسطة جهاز CBL. **الكلمات الرئيسية:** الأسمنت, المعهد الأمريكي للبترول (API) , صمام التحويل (DV) , خبث الأسمنت , CBL (سجل السندات الأسمنتية).

Résumé :

Notre étude porte sur le suivi de la pose et cimentation d'une colonne de casing, d'un forage hydraulique, réalisé sur le site Debidibi, El-Hadjira, Wilayat de Ouargla, et de connaître l'importance du processus cimentaire et des outils qui y sont utilisés, afin d'accomplir le processus d'injection d'un laitier de ciment ayant des propriétés physiques spécifiques et adaptées aux conditions du site. Ce laitier est introduit dans l'espace annulaire afin de parvenir à isoler les couches et ancrer les colonnes de casing. Ensuite, faire les calculs nécessaires (le volume et la densité de laitier, la masse de ciment sec, le volume d'eau de gâchage, le volume de chasse, le temps d'injection et la pression de refoulement). Après prise de ciment, ce dernier doit être vérifié par le train de CBL (Ciment Bound Log), afin de s'assurer de l'étanchéité.

Mots clés : Américain petroleum Institute (API), Cimentation, ciment sec, la Diverting Valve (DV), Laitier de ciment, CBL (cement bond log).

ABSTRACT:

Our study was carried on a following of a drilling water borehole, at the Dibidibi site, El-Hadjira, district of Ouargla. The structure was drilled in different phases (in telescopic architecture), and completed by installing casing columns. To ensure good anchoring of these columns, the annular space (casing – annulus) must be cemented by introducing a cement slurry with some additives, if necessary. The slurry must be prepared with care, strictly respecting the appropriate formulations (with or without additives), to give it the required properties and never affect it.

These formulations allow us to have the previously calculated volume of slag, knowing, of course, the volume of mixing water, the quantity of useful dry cement, as well as the volume of essential flushing fluid. Our task was to know and follow the importance of the cementitious process and the tools used in it, and the calculation must include the determination of the discharge pressures, the circulation rate, the setting time, to arrive at the choice of the cementing unit and accessory material.

It is imperative to carry out operations to check and evaluate the quality of the cementation, by various logging techniques (CBL - VDL), to check the casing – hole tightness.

Key words : American petroleum Institute (API), CBL (cement bond log), Cementation, Dry cement, Diverting Valve (DV), Cement slag.