

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Des Matériaux

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Génie de matériaux

Option : Construction Durable

THEME

Effet de la CemCRETE sur les propriétés physico-mécaniques et rhéologiques d'un laitier de ciment destiné à la cimentation des puits pétroliers

Réalisé Par :

HAMRIOUI MOHAMED

FSEIL SIDALI

Promoteur :

Pr. BENMOUNAH.M

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier () le tout puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

Nous remercions nos très chers parents pour leurs soutiens et leurs patiences.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre promoteur Mr BENMOUNAH. M pour son aide, ses conseils et sa disponibilité durant toute la période de notre projet.

Nous remercions Mr MALKI.Y, Mr CHAFAI, Mr TAYBIYA, Mr DELLAJH, Mr Djamel, Mr Mohamed et Toute l'équipe du laboratoire, pour leurs explication et leur disponibilité.

Nous remercions aussi vivement tous les membres du jury de l'intérêt manifesté pour notre travail.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à tous les enseignants qui nous ont formés du primaire à l'université.

En fin nous remercions tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail, surtout RAhla Kamel qui nous beaucoup aidé.

Dédicace

Pour que ma réussite soit complète je la partage avec tous les personnes que j'aime, je dédie ce modeste travail à :

A mes parents qui voient aujourd'hui leurs efforts et leurs sacrifices couronnés par ce rapport, Ils ont veillés à mon éducation avec un amour infini et affection dont je ne recevrai pas d'égale.

Que Dieu me permette de leur rendre au moins une partie.

A mon frère et ma sœur et mes cousins en témoignage des liens fraternels solides qui Nous unissent.

Aucune dédicace ne saurait leur exprimer mes sentiments, Je leurs souhaite beaucoup de bonheur et de réussite.

A mes grands-parents

A toute la famille Fseil

A mon binôme Hamrioui Mohamed

A tous mes amis et collègues sans exception.

A tous les enseignions de département génie des matériaux.

A tous ceux qui me sont chers.

Sidali

Dédicace

Pour que ma réussite soit complète je la partage avec tous les personnes que j'aime, je dédie ce modeste travail à :

A mes parents qui voient aujourd'hui leurs efforts et leurs sacrifices couronnés par ce rapport, Ils ont veillés à mon éducation avec un amour infini et affection dont je ne recevrai pas d'égale.

Que Dieu me permette de leur rendre au moins une partie.

A mes frères et ma sœur et mes cousins en témoignage des liens fraternels solides qui Nous unissent.

Aucune dédicace ne saurait leur exprimer mes sentiments, Je leurs souhaite beaucoup de bonheur et de réussite.

A mes grands-parents

A toute la famille Hamrioui

A mon binôme Fseil Sidali

A tous mes amis et collègues sans exception.

A tous les enseignions de département génie des matériaux,

A tous ceux qui me sont chers.

Mohamed

Partie théorique

Chapitre 1 : Ciment Portland Artificiel

1. Introduction.....	(3)
2. Définition.....	(3)
3. Généralité sur la fabrication du ciment portland	(4)
4. Composition chimique des matières premières.....	(5)
5. Processus de fabrication du ciment Portland.....	(6)
6. Hydratation et durcissement du Ciment Portland.....	(9)
7. Durcissement et prise de ciment.....	(11)

Chapitre 2 : Les ciments pétroliers

1. Introduction.....	(13)
2. Définition.....	(13)
3. Processus de fabrication.....	(13)
4. Les caractéristiques « pétrolières » du ciment.....	(14)
a) La densité.....	(14)
b) La perméabilité.....	(15)
c) Rendement.....	(15)
d) La rhéologie.....	(16)
e) Le filtrat.....	(16)
f) L'eau libre.....	(17)
g) Le temps de pompabilité.....	(17)
h) La résistance à la compression.....	(17)
i) La finesse de ciment.....	(18)
j) Classe de ciments API.....	(18)

Chapitre 3 : Additifs

1. Introduction.....	(21)
2. Définition.....	(21)
3. Type d'additifs.....	(21)
➤ Accélérateurs.....	(21)
➤ Retardateurs.....	(22)
➤ Dispersants.....	(22)
➤ Réducteur de filtrat	(22)

➤ Alourdissant.....	(23)
➤ Allégeant.....	(23)
• Classification des allégeant.....	(24)
i. Bentonite.....	(24)
Définition et caractéristiques.....	(24)
Structure de la bentonite.....	(24)
Avantages de la « bentonite » dans le laitier de ciment.....	(25)
Inconvénients de l'utilisation de la « bentonite ».....	(25)
ii. Flyash (pouzzolane).....	(25)
iii. Le Lite (LW-6).....	(26)
➤ Agents divers.....	(27)
• Les additifs liquides.....	(27)
• Les anti-moussants.....	(27)
• Les gélifiants.....	(27)
• Les fluidifiants.....	(27)

Chapitre 4 : La cimentation

1. Introduction.....	(29)
2. Rôle de la cimentation.....	(29)
3. Principe de la cimentation	(31)
4. Objectifs de la cimentation.....	(31)
5. Principe de la méthode de cimentation.....	(31)
6. Type de cimentation.....	(32)
a) Cimentation primaire.....	(32)
b) Cimentation étagées	(32)
c) Cimentation de la colonne perdue (LINER).....	(34)
d) Le squeeze (injection sous pression).....	(35)
7. Difficultés de la cimentation.....	(35)
a) La profondeur du puits.....	(35)
b) La situation du puits.....	(35)
c) Conteneur homogène.....	(35)
8. Choix du laitier.....	(36)

9. Matériels de la cimentation.....	(37)
a) Tête de cimentation.....	(37)
b) Bouchon de cimentation.....	(37)
c) Sabot et anneau à bille.....	(37)
d) Centreurs.....	(37)
e) Gratteurs (Scartcher).....	(37)
10. Techniques de cimentation	(38)
a) Préparation du trou	(38)
b) Cimentation de l'espace annulaire	(38)
c) Contrôle d'étanchéité du casing	(38)
d) Causes et remèdes des cimentations.....	(38)

Chapitre 5 : La technologie LiteCRETE

1. Introduction.....	(45)
2. La Technologie LiteCRETE.....	(45)
3. Caractéristique Du Laitier LiteCRETE.....	(46)
4. Description Du LiteCRETE.....	(47)
5. Caractéristiques Techniques De CemCRETE.....	(50)
a) Pourcentage Des Solides Dans Le Laitier de la CemCRETE.....	(50)
b) Resistance à la Compression.....	(50)
c) Perméabilité réduite.....	(52)
6. Les Avantages de LiteCRETE.....	(52)

Partie Pratique

Chapitre I : Etude expérimentale

1. Problématique et objectif du travail.....	(55)
2. Caractérisation des matériaux.....	(56)
3. Effet du CemCRETE sur les propriétés physico-mécaniques et rhéologiques d'un laitier de ciment.....	(57)
➤ Organigramme des essais.....	(58)
➤ Préparation de l'échantillon.....	(59)
➤ Densité.....	(60)
➤ Consistomètre atmosphérique.....	(61)
➤ Eau libre.....	(62)

➤ Paramètres rhéologiques.....	(63)
➤ Filtrat (Fluid Loss).....	(65)
➤ Temps de pompabilité.....	(66)
➤ Résistance à la compression.....	(69)
➤ Filtration des gaz.....	(69)

Chapitre II : Résultats et discussions..... (71)

➤ Densité.....	(72)
➤ Eau libre.....	(73)
➤ Paramètres rhéologiques.....	(74)
➤ Filtrat (Fluid Loss).....	(76)
➤ Temps de pompabilité.....	(77)
➤ Résistance à la compression.....	(79)
➤ Filtration des gaz.....	(80)

Conclusion générale..... (82)

Bibliographie..... (85)

Annexe..... (86)

Tables des figures

Figure (1) : Processus de fabrication du ciment.....	(4)
Figure (2) : Illustration des différentes possibilités de migration des fluides dans et autour d'un tubage cimenté.....	(30)
Figure (3) : La DV et jeu de bouchons.....	(33)
Figure (4) : illustration de la cimentation étagée.....	(34)
Figure (5) : Remplacement de la cimentation étagée par une cimentation a un seul étage...	(46)
Figure (6) : Disposition des laitiers de ciment dans un puits de pétrole.....	(47)
Figure (7) : Distribution des particules d'un ciment conventionnel.....	(48)
Figure (8) : Distribution des particules du ciment LiteCRETE.....	(49)
Figure (9) : Pourcentage des solides dans le laitier de la CemCRETE.....	(50)
Figure (10) : comparaison de la résistance à la compression du LiteCRETE avec les laitiers de ciment traditionnels.....	(51)
Figure (11) : augmentation de la résistance a la compression en fonction du temps.....	(51)
Figure (12) : comparaison de la perméabilité du laitier de ciment LiteCRETE avec les laitiers de ciment traditionnels.....	(52)
Figure (13) : sacs de ciment pétrolier (ciment G).....	(57)
Figure (14) : Pesée du mélange LiteCRETE.....	(60)
Figure (15) : densimètre.....	(61)
Figure (16) : consistomètre atmosphérique.....	(62)
Figure (17) : laitier de ciment dans l'éprouvette gradué.....	(64)
Figure (18) : rhéomètre de FANN.....	(65)
Figure (19) : Filtre presse.....	(66)
Figure (20) : cellule de filtrat.....	(66)
Figure (21) : Consistomètre pressurisé.....	(68)

Figure (22) : Ultrasonic Cement Analyser UCA.....	(70)
Figure (23): Static Gel Strength Analyzer (SGSA).....	(71)
Figure (24) : Présentation des densités des différents laitiers de ciments utilisés.....	(72)
Figure (25) : Présentation des paramètres rhéologiques : Viscosité plastique (Vp) et Yield Value (Yv), des différents laitiers de ciments utilisés.....	(74)
Figure (26) : Présentation des paramètres rhéologiques : Gel 0 et Gel 10, des différents laitiers de ciments utilisés.....	(75)
Figure (27) : présentation du filtrat obtenu des différents laitiers de ciment utilisés.....	(76)
Figure (28) : Présentation du temps de pompabilité du LiteCRETE.....	(77)
Figure (29) : Présentation du temps de pompabilité du GASBLOK.....	(78)
Figure (30) : Présentation du temps de pompabilité du laitier allégé par la bentonite.....	(79)
Figure (31) : Présentation des résultats des résistances à la compression des différents laitiers de ciments.....	(80)
Figure (32) : évolution de la résistance à la compression du LiteCRETE de 100 à 500 psi en fonction du temps.....	(81)
Figure (33) : évolution de la résistance à la compression du GASBLOK de 100 à 500 psi en fonction du temps.....	(81)

Tables des tableaux

Tableau (1) : composition chimique du ciment portland.....	(6)
Tableau (2) : Chaleur dégagée par phase d'hydratation.....	(9)
Tableau (3) : la composition de la Bentonite de MAGHNIA.....	(25)
Tableau (4) : Composition chimique du flyash.....	(26)
Tableau (5) : Fiche technique résultats des tests sur ciment G selon les normes AP.....	(56)
Tableau (6) : Composition chimique du ciment classe G.....	(56)
Tableau (7) : Composition minéralogique du ciment classe G.....	(56)
Tableau (8) : Composants et quantités de l'échantillon.....	(61)
Tableau (9) : résultats des densités des différents laitiers de ciment.....	(72)
Tableau (10) : volume d'eau libre obtenu.....	(73)
Tableau (11) : variation des paramètres rhéologique en fonction des additifs.....	(74)
Tableau (12) : résultats du filtrat obtenu des différents laitiers de ciment utilisés.....	(76)
Tableau (13) : effet de la CemCRETE sur le temps de pompabilité.....	(77)
Tableau (14) : effet de la CemCRETE sur la résistance à la compression.....	(79)
Tableau (15) : temps de transition d'état du laitier en fonction de la résistance.....	(80)

Résumé

L'élaboration des laitiers composés de ciment, d'eau et d'additifs chimiques, dépend des conditions thermodynamiques et géologiques du puits. C'est le cas des puits contenant des couches fragiles et salifères, où on doit utiliser des ciments allégés pour éviter l'effondrement de ces couches. La Technologie CemCRETE utilisée dans la cimentation des puits de pétrole a remplacé l'ancienne méthode de cimentation qui se faisait en deux ou trois étages et avec des laitiers de ciment allégés par la bentonite. Elle se fait à un seul étage, ces laitiers fournissent l'isolement zonal supérieur dû à la perméabilité très basse et excellente résistance à la compression, même aux concentrations inférieures d'eau et de densités très faibles.

البترونية أهمية كبيرة في
الموجه لهذا الغرض ، إذ
التي تحتوي على طبقات هشة، يجب أن
البترونية. الحرارة
تستخدم الاسمنت خفيفة الوزن لمنع انهيار هذه الطبقات. التكنولوجيا
المستخدمة في تدعيم آبار النفط قد
حلت محل الطريقة القديمة المتمثلة في تدعيم يجري القيام به بطابقين
البترونية .
عالية النفاذية و المسامية المنخفضتين
بتراكيزات

Introduction générale

Introduction générale

Depuis plus de cinquante ans, les ciments sont largement utilisés dans les sondes pétroliers afin de réaliser la séparation des diverses zones productrices ou fissurées mises en communication au cours du forage. Ces ciments doivent posséder certaines propriétés dont les principales sont une facilité de mise en place et une résistance mécanique suffisante.

La densité est un paramètre essentiel dans la cimentation des puits de pétrole, car dans ces derniers où les couches des formations sont fragiles ne tolèrent pas des laitiers de ciment dense (alourdi), qui provoquera la filtration de ces derniers à travers les fracturations. Il est donc nécessaire de les allégés afin de réduire la pression hydrostatique exercée sur les couches fragiles.

Cependant, la nature salifère des formations traversées constitue l'un des problèmes qui risque d'entraver la bonne marche de l'opération de cimentation.

Pour remédier à ceci, la société multinationale **Schlumberger** a créé la technologie CemCRETE que vous trouverez les 3 ça description dans ce mémoire.

En forant des formations peu solides (fragiles), il peut être difficile de placer suffisamment de ciment derrière le tubage sans utiliser des laitiers de ciment prolongés de densité basse. Cette technologie offre une solution pour la construction des puits avec moins de perméabilité et à faible densité.

Pour la réalisation de ce travail, nous présentons tout d'abord une partie théorique, en mettant l'accent sur les différentes étapes liées à l'opération de cimentation ainsi que les diverses caractéristiques des ciments portland et pétroliers, puis nous aborderons les principales caractéristiques des ciments allégés et les ajouts utilisés à cet effet.

Ensuite, nous traiterons une partie expérimentale en commençant par la caractérisation des matières premières et ensuite par la réalisation et la discussion des différents résultats des tests rhéologiques et physico-mécaniques des ciments allégés ainsi élaborés.

A la fin de ce travail expérimental, nous donnons nos interprétations des résultats obtenus.

Partie théorique

Chapitre I :

Ciment Portland

artificiel

1. Introduction

Ce sont les romains qui, il ya plus de deux mille ans, fabriquèrent le premier liant hydraulique, en mélangeant de la chaux et de pouzzolanes (terres volcanique).

Ce terme « liant hydraulique » désignant un liant qui, gâché avec de l'eau, fait prise même immergé dans l'eau. Ce fut bien une caractéristique du ciment romain par rapport à ce qui se faisait jusque là .la chaux était obtenue par décarbonatation du calcaire dans des fours, les terres volcanique (silice et alumine) étaient recueillies dans les régions de pouzzolane, ce qui leur a laissé leur nom de pouzzolane. Le mélange de ces deux constituants fournissait, une fois gâché avec de l'eau, des cristaux d'hydrosilicate de chaux qui conféraient sa résistance au ciment .cette découverte ne survécut pas à la chute de l'empire romain.

On en revient par la suite à utilisé de la chaux vive, obtenue par décarbonatation à chaud du calcaire, comme liant. Au fur et à mesure des utilisations on s'aperçut que les meilleures chaux hydrauliques n'étaient pas obtenues par cuisson d'un calcaire pur, mais par cuisson d'un calcaire contenant de l'argile en quantité négligeable. C'est ainsi que naquit le ciment portland breveté a la fin de XVIII^e siècle .Et, malgré un certain nombre de perfectionnement, c'est toujours ce produit que l'on utilisé sous le nom commun de «ciment », que ce soit pour les ciments de construction que pour les ciments pétroliers.

2. Définition

Le Ciment Portland est un liant hydraulique, est une poudre minérale finement moulue qui gâchée avec de l'eau forme une pate faisant prise, qui durcit progressivement et qui conserve après durcissement sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Les ciments sont donc formés de constituants anhydres cristallisés ou vitreux, renfermant pour l'essentiel de la silice (SiO_2) ainsi que de l'alumine (Al_2O_3) et de la chaux (CaO). En se combinat avec l'eau ces constituants forment des silicates et des aluminates de calcium hydraté solides et stables.

La fabrication du ciment est énergivore, et la production du clinker (son principal constituant), est responsable d'approximativement de 5% des émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques, responsables du réchauffement climatique. [1]

3. Généralité sur la fabrication du ciment portland

Le ciment portland de silicates et d'aluminates de calcium est obtenu par cuisson à haute température d'un mélange de calcaire et de la matière argileuse. La cuisson et le broyage sont les deux étapes principales de la fabrication du ciment, mais aussi de grandes consommatrices d'énergie. Quand on sait que la consommation d'énergie intervient pour une grande partie dans le prix de revient du ciment, on comprend que les cimentiers aient tendance s'orienter vers des options à faible coût énergétique pour le four et le broyeur, ce qui ne va pas toujours dans le sens de la qualité du produit.

Le ciment résulte donc de la transformation de calcaires (ou de craie) et d'argiles (ou de marnes). Pour ne pas avoir des coûts exorbitants de transport, les cimenteries sont toujours sur un emplacement où l'on trouve associées une carrière de calcaire et une carrière d'argile (ou de marne). Malheureusement, toutes les carrières ont leurs hétérogénéités et leurs imperfections, ce qui va obliger les cimentiers à faire de sérieux efforts de dosage et d'homogénéisation des matières premières pour avoir un ciment, introduit dans le four, de composition constante. Sans cela le ciment obtenu varierait sa composition et donc ses caractéristiques varieraient dans le temps.

On trouve deux types de fabrication, par voie humide et par voie sèche, qui diffèrent par les techniques de transport et d'homogénéisation des matières premières. Le cimentier sera également obligé d'apporter, dans la plupart des cas, des produits complémentaires pour combler les déficits des matériaux des carrières ; ce pourra être, par exemple, des scories ou de la pyrite qui compenseront un manque de fer dans les marnes. [2]

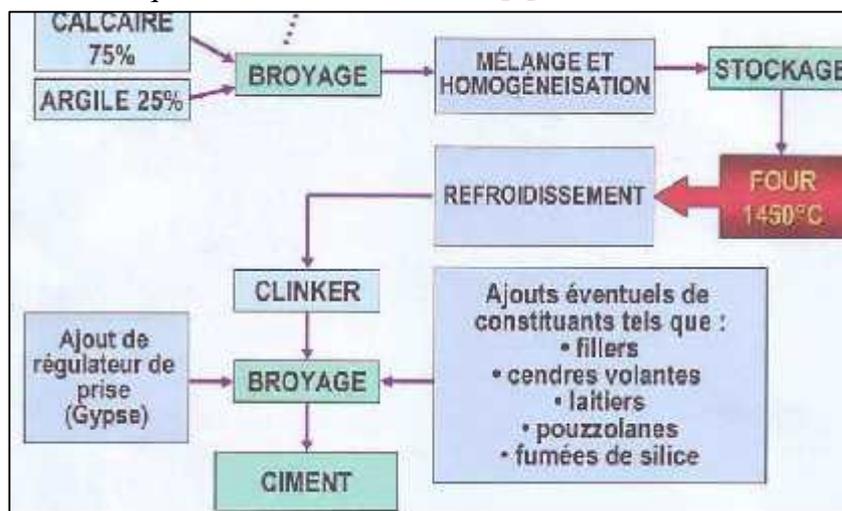


Figure (1) : Processus de fabrication du ciment

4. Composition chimique des matières premières

De la composition chimique des matières premières et de leurs proportions dans le mélange, on déduit la nature des éléments chimiques présents dans le ciment portland et leurs concentrations.

Le clinker comporte les oxydes suivants :

CaO : il est lié avec la silice, Al_2O_3 et Fe_2O_3 , CaO à l'état libre provoque une intégralité de changement de volume de ciment lors de l'hydratation (l'expansion).

La résistance du ciment augmente en cas d'augmentation du pourcentage de chaux liée, cependant, sa stabilité chimique diminue en milieu agressif. La teneur de CaO est de 63 à 67 % dans le clinker.

Si₂O₂ : il réagit avec CaO en donnant les silicates de calcium, un pourcentage élevé donne beaucoup C₂S. Dans ce cas le ciment durcit lentement, sa résistance augmente à long terme.

L'augmentation de C₂S donne une grande durabilité au ciment surtout aux milieux agressifs, sa teneur est de 21% à 24%.

Al₂O₃ : il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant une haute teneur en Al₂O₃ donne un ciment très sensible à la corrosion sulfaté. Sa teneur est de 4% à 7%.

Fe₂O₃ : il joue le rôle de fondant, il diminue considérablement la température de cuisson du clinker, il contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les eaux sulfatées, sa teneur est de 2,5 à 4%.

MgO : une quantité élevée en MgO à l'état libre se trouve sous forme de périclase (MgO cristallisé), provoque l'expansion pendant l'hydratation, sa teneur doit être inférieure à 5%.

TiO₂ : sa teneur est < 0,5 %, il provient des argiles.

MnO₂ : il fait partie du clinker au cas où le laitier de haut fourneau est utilisé comme matière première. Sa teneur 1,5 %.

P₂O₅ : il se trouve sous forme d'impuretés dans la composition du clinker, à une teneur de 1 à 2% il ralentit le processus de durcissement du ciment, sa teneur est de 0,2% à 0,3%.

Les alcalis Na_2O , K_2O : sa teneur est de 0,5% à 1%.

Les alcalis provoquent la diminution de la résistance du ciment, parce qu'ils ralentissent l'hydratation des minéraux principaux du ciment. [1]

Tableau (1) : composition chimique du ciment portland

Oxydes	Teneur (%)
CaO	63-67
SiO₂	21-24
Al₂O₃	4-7
Fe₂O₃	2,5-4
MgO	<5
TiO₂	<0,5
MnO₂	1,5
Alcalis (Na₂O, K₂O ...)	0,5 - 1

5. Processus de fabrication du ciment Portland

Le processus de fabrication du ciment Portland se déroule selon les étapes suivantes :

Extraction et concassage Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits, en éléments d'une dimension maximale de 15mm dans des concasseurs situés, en principe sur les lieux même de l'extraction.

Préparation de la matière première Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « cru ». A ce niveau, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant, en faible proportion, de la bauxite, de l'oxyde de fer, etc. le mélange cru est préparé automatiquement en fonction de la technique de fabrication utilisée.

Pré-homogénéisation Cette phase initiale de réaliser un mélange préliminaire. Elle consiste à déposer les matériaux en couches mince successives.

Broyage –Séchage Le mélange précédant est repris par des gratteurs ou roues-pelles pour être acheminé à la station de broyage pour être réduit en grains de granulométrie inférieur à 160µ. Un dispositif de séparation permet de renvoyer au broyage les grains de matières grossières insuffisamment broyés.

Homogénéisation L’Homogénéisation est réalisée par un brassage mécanique ou pneumatique efficace qui aboutit à l’obtention d’un produit de caractéristiques uniformes et parfaitement homogène.

Cuisson Le cru apte à être cuit, est enfourné dans un four rotatif. Ce produit est constitué d’un mélange ‘oxyde de calcium (Cao) provenant du calcaire, d’oxyde de silicium (Sio₂) d’oxyde d’aluminium (AL₂O₃) et d’oxyde de fer (Fe₂O₃) apportés par l’argile.

La cuisson a lieu dans un four de type cylindre rotatif de dimension moyenne 100m e longueur pour un diamètre de 5m, à la température moyenne de **T=1450°c**.

Lors de la cuisson, le cru se transforme en clinker par deux méthodes : voie sèche et voie humide

La phase de cuisson comporte les étapes suivantes:

a) four à voie humide

500° à 600°	Décarbonatation 700° à 1250°	Réaction à l’état solide 1100° à1250°	Clinkerisation 1300° à1450°C	Refroidissement 1450° à 1100°C
-------------	---------------------------------	--	---------------------------------	-----------------------------------

b) four à voie sèche

Préchauffeur a cyclone	Décarbonatation 1000° à 1250°C	Réaction à l’état solide 1100°à1450°c	Clinkerisation 1300°à1450°C	Refroidissement 1450°à 1100°C
------------------------	-----------------------------------	--	--------------------------------	----------------------------------

Refroidissement Cette opération est rendue nécessaire dans le but 'abaisser sensiblement, avant sa sortie du four, le clinker est refroidis jusqu'à 1100à1200°C, la deuxième étape de refroidissement s'effectue dans le refroidisseur jusqu' à la température de 80 à 100°C a une vitesse élevée. La quantité du clinker dépend sensiblement de la vitesse de refroidissement.

Obtention du Clinker Le broyage finale est assuré dans des broyeur en continu avec un séparateur pour obtenir une poudre ont des diamètres des particules inferieur a 20µm, le clinker est broyer conjointement avec le gypse dont le rôle est éviter une prise rapide du ciment.

A l'intérieur du broyeur la température ne doit pas dépassé 150°C pour éviter la déshydratation du gypse en plâtre qui provoque le phénomène de fausse prise.

Après l'opération de broyage on aura le ciment comme produit fini, qui est stocké dans des trémies de stockage.

✓ **Caractéristiques principales des minéraux de clinker**

Les silicates de calcium C_3S et C_2S sont les constituants les plus importants du ciment portland. Ils sont responsables de la prise du ciment, ils génèrent les propriétés mécaniques de la pâte durcie.

- Le C_3S permet l'obtention de résistance élevée à court et moyen terme.
- C_2S participe à l'acquisition de la résistance à long terme. En quantité importante il réduit la chaleur d'hydratation du ciment.
- Le C_3A accélère la prise. En quantité notable, il génère de forte chaleur d'hydratation initiale. Il permet d'obtenir des ciments à résistance initiale élevée.
- Le C_4AF qui réagit avec une vitesse faible avec le C_3A , ne peut pas être considéré comme un produit inerte. Ce sont les oxydes de fer inclut qui confèrent au ciment sa couleur grise caractéristique.

6. Hydratation et durcissement du Ciment Portland

Les réactions d'hydratation de toutes les phases du ciment se passent en même temps et contribuent avec une intensité différente de dégagement de chaleur du ciment.

Tableau (2) : Chaleur dégagée par phase d'hydratation

Phase	Chaleur dégagée (j/g)
C₃S	500
C₂S	250
C₃A	1340
C₄AF	420
CaO	1150
MgO	840
CPA ordinaire	375 - 525
CRS et CHF	355 - 440
CPZ	315 - 420
Ciments alumineux	545 - 585

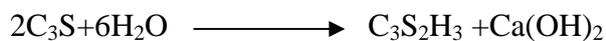
a) Hydratation de silicate tricalcique C₃S

L'hydratation du C₃S est la phase la plus importante du ciment. La chaleur dégagée dans cette phase est l'une des plus élevées. La majeure partie de son hydratation se passe dans les 28 premiers jours. La réaction complète peut prendre jusqu'à une année.

✓ Produits d'hydratation de C₃S

L'hydratation des silicates conduit à la formation de deux types d'hydrates :

C₃S₂H₃ (tobirmorite) Ca(OH)₂ portlandite

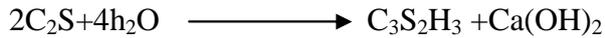


Les CSH sont peut cristallisés (gel) lorsqu'ils se forment, se sont les hydrates les plus importants. Le rapport CaO /SiO₂ est compris entre 1,6 et 1,8.

La formule C₃S₂H₃ est approximative, car le produit est très peu cristallin et il existe plusieurs variétés de CSH.

Le CSH est le produit d'hydratation qui développe les résistances de la pâte de ciment.

Une partie des ions SO₄⁻² qui proviennent du gypse utilisé dans le ciment, entre dans la structure du CSH et permet d'améliorer sa résistance.

b) Hydratation De Silicate Bi-calcique C2S

La formule de $C_3S_2H_3$ est approximative. La quantité de portlandite formée dans ce cas est plus faible de 1/3 que dans le cas de C_3S .

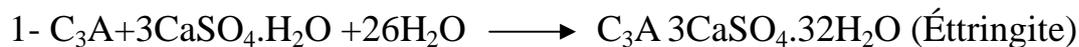
La vitesse d'hydratation de C_2S est beaucoup plus faible que celle de C_3S . La faible quantité de la portlandite va favoriser le développement de meilleures résistances que dans le cas de C_3S .

Le C_2S participe surtout au développement des résistances après 28 jours.

Comme dans le cas de C_3S , une partie des ions SO_4^{2-} qui proviennent du gypse ajouté, entre dans la structure de CSH et permet d'améliorer sa résistance.

c) Hydratation Des Aluminate C3A

L'hydratation des aluminates, C_3A en particulier, obéit à la séquence des réactions suivantes, dans l'ordre 1 ; 2 ; 3.



L'effet régulateur de prise de gypse est lié au fait que :

La réaction 2 ne démarre que quand tout le gypse est consommé dans la réaction 1

La réaction 3 ne démarre que quand toute l'étringite est consommée dans la réaction 2.

d) Hydratation des aluminoférites de calcium C4AF

L'hydratation de C_4AF se déroule suivant la réaction :



Parmi ces produits, on remarque la présence de C_2AH_8 . A la température $> 30 - 35^\circ C$, on a formation de solutions solides cubiques de C_3AH_6 . Et à la température comprise entre 15 et $35^\circ C$, on a l'existence simultanée des solutions cubiques et hexagonales.

7. Durcissement et prise de ciment

Le mécanisme de durcissement du ciment est très différent de celui de la chaux. Le ciment durcit par hydratation des silicates et des aluminates de chaux, alors que la chaux durcit lentement à l'air en se carbonatant.

Le ciment Portland contient quatre constituants principaux : le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ou, C_3S ; le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ou, C_2S ; l'aluminate de chaux ou, C_3A , le ferro-aluminate tricalcique $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ou, C_4AF .

L'élément noble du ciment est le silicate tricalcique, qui lui donne ses fortes résistances.

Par hydratation, les silicates tri- et bi-calciques donnent du silicate mono-calcique hydraté et dégagent de la chaux libre hydratée. Ce sont les cristaux de silicate mono-calcique hydraté « **CSH** » qui, en se fixant entre eux et aux granulats, confèrent au ciment sa résistance.

L'aluminate tricalcique donne, par hydratation, l'aluminate mono-calcique hydraté « **CAH** » et dégage de la chaux libre hydratée. C'est aussi un élément actif de la résistance des ciments, il contribue notamment beaucoup, par la rapidité relative de sa réaction, aux résistances dans les 1^{ers} temps. C'est également la première cristallisation du tri-sulfo-aluminate (ou ettringite) produite par l'hydratation de C_3A en présence de gypse, ainsi que des réactions physico-chimiques complexes qui sont à l'origine du raidissement de la pâte de ciment : ce qu'on appelle "**La prise du ciment**". [3]

Chapitre II :

Ciment pétrolier

1. Introduction

Les ciments sont largement utilisés dans les sondages pétroliers. Leur objectif essentiel réside dans la séparation des diverses zones productrices ou fissurées mise en communication au cours de forage. C'est pour cela que des recherches ne cessent de se faire sur leur comportements dans les sondages à fin de contribuer à leur meilleure connaissance, en vue de réduire le nombre d'échecs de cimentation. Cependant, bien qu'ils soient couramment employés dans la cimentation des puits pétroliers.

2. Définition

Le ciment pétrolier est un ciment spécial ; à pour objectif de séparer les différentes zones productrices ainsi que la protection de casing des milieux et des eaux agressives qui peuvent provoquer la corrosion du tubage.

Le ciment est soumis à certaines conditions telles que :

- ✓ La température qui augmente avec la profondeur.
- ✓ La pression.
- ✓ Les eaux agressives (les sulfates, les chlorures et les hydrocarbonates).

3. Processus de fabrication

Le ciment pétrolier est un ciment à base de portland broyé plus ou moins finement et mélangé avec d'autres produits. Le mélange est composé de calcaire, d'argile et de quelques adjuvants comme le laitier de haut fourneau. A la température de 500°C, le mélange est déshydraté et à 800°C le calcaire se décarbonate. Au-dessus de 900°C les réactions entre composants, commencent à se produire, et le mélange s'agglomère et donne naissance au clinker.

Quand la température atteint 1450°C on aura la formation du liquide qui est ensuite refroidi brusquement et se transforme en clinker granule. Ce dernier est concassé et stocké.

Enfin, il est broyé en lui ajoutant du gypse et essentiellement d'autres additifs, et prend la forme connue sous le nom de ciment.

4. Les caractéristiques « pétrolières » du ciment

Dans les premiers instants qui suivent le gâchage de l'eau et du ciment, très peu de composés sont passés en solution, ou ont réagi avec l'eau. Le laitier de ciment peut donc être assimilé à une suspension aqueuse de fines particules solides.

a) 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 de différents additifs entrant dans la composition du laitier.

$$D_L = \frac{M + V_e + d_e + \sum M_a}{M_c / d + V + \sum V_a}$$

M = Masse (kg)

V = VOLUME (l)

d = Densité

c = Ciment

E = Eau

ad = Additifs

L = Laitier

✓ L'eau de gâchage peut avoir une densité supérieure à 1 (par exemple eau de mer : 1,03 ; saumure : 1,23)

✓ La densité du ciment varie de 3,15 à 3,22 suivant les lots et les types.

Le calcul de la densité se fait pour les programmes de cimentations, mais la mesure reste indispensable au laboratoire et sur le site. Cette mesure peut se faire avec la même balance que celle utilisée pour les boues de forage. Toutefois, la mesure de densité ayant une grande importance, car c'est celle qui permet de connaître le rapport E/C, une amélioration est apportée par la balance pressurisées.

➤ **Domaine de densité des ciments usuels**

$D > 2,10$: Ciments Alourdis (avec baryte, oxydes de fer).

2 à 2,10 : ciments densifiés par réduction du E/C.

1,96 -2 : classes E, F, H.

1,96 -1,92 classe G.

1,85 : classe A, B, ciments de construction.

1,40 à 1,80 : ciment allégés classiques.

0,9 à 1,40 : ciment mousse ou allégés aux bulles de verre.

b) Rendement

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

$$R = 1000 \times \frac{M/d + V + \sum V}{M} \text{ l/t}$$

Précisons que tous produits, autre que le ciment, est considéré comme un additif même s'il apparait en grande quantité (farine de silice, allégeant,...).

c) 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 exemples, si on considère le cas classique d'un ciment G, mixé à une densité de 1.90, on a 42% de solides en volume.

Il est indispensable de connaître le comportement des laitiers de ciment comme il s'agit de déterminer les propriétés on peut citer :

✓ La force de cisaillement.

✓ La viscosité plastique.

Connaître les paramètres rhéologiques nous permet de déterminer le débit de pompage optimal pour placer le laitier de ciment, et pour travailler à la limite de la pression de fracturation.

d) 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 au moins d'eau. Le phénomène de filtration va entraîner déshydratation prématurée du laitier qui pourra devenir impompable et fera prise dans des mauvaises conditions. La filtration de laitier de ciment est mesurée comme celle de la boue par l'intermédiaire d'un filtre-presse API à température ambiante et sous 7 bars ou d'un filtre –presse H.P – H.T. Lorsqu'on veut simuler les conditions de fond.

Le laitier déshydratant souvent complètement avant le temps normalisé de 30 minutes, on exprime alors le résultat en valeur extrapolée à 30 minutes, par la formule approchée :

$$F_{30} + F_t(30/t)^{1/2}$$

Avec F_{30} filtrat 30 min

F_t : filtrat obtenu au temps t

T : temps de l'essai

e) L'eau libre

C'est le volume d'eau surnageant au-dessus 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 (1cc 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.

Un même laitier peut avoir un filtrat réduit et une eau libre importante et vice versa.

Le moteur de la filtration étant une différence de pression, celui de l'eau libre une différence de densité. En fait « l'eau libre » ne correspond pas à une libration d'eau, mais à une sédimentation de particules solides dans l'eau.

f) Le temps de pompabilité

C'est le temps mis par le laitier, maintenu en agitation sous condition de pression et de température, pour atteindre une consistance de 100 Uc. Pratiquement, il correspond à la durée pendant laquelle le laitier reste pompable dans les conditions de température et de pression normalisés en fonction du type de cimentation envisagée.

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

Ces tests sont effectués par des consistomètre qui sont des appareils normalisés par l'API.

g) La résistance à la compression

On mesure la résistance mécanique à l'écrasement du ciment conservé en température sous une pression maximal 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 laitier de ciment est conservé le temps voulu en pression et température mais la mesure, elle se fait à pression atmosphérique et à température ambiante.

h) 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 plus de 23mm de diamètre servant à la mesure sont prélevés par carottage sur les mêmes cubes, de 5 cm de côté, servant aux mesure 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 une évaluation similaire de la résistance à la compression et de la perméabilité du ciment.

i) La finesse de ciment

La finesse du ciment peut être repérée soit par une analyse granulairé soit par des mesures de surface spécifique .la surface spécifique s'exprime en g/cm^2 et correspond à la surface externe des grains de ciments compris dans 1g 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.

j) Classe de ciments API

L'américaine petroleum Institute (API) a établi un classement de ciments pour sondages basé principalement sur la profondeur d'utilisation. Le classement API est suivant :

- **Classe A** : Utilisé de la surface à 6000 ft (1829 m) lorsqu'une caractéristique particulière n'est demandée.

- **Classe B** : Utilisé de la surface à 6000 ft (1829 m) lorsque les conditions nécessitent une résistance modérée ou élevée aux sulfates.

- **Classe C** : Utilisé 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 de classe C se caractérisent par une grande finesse, ce qui permet une vitesse d'hydratation élevée et donc une forte résistance initiale.

- **Classe D** : Utilise de 6000 à 10000 ft (1829 à 3048m) en condition de température et pression modérément élevées. (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates).

- **Classe E** : Utilise de 10000 à 14 000 ft (3048 à 4268 m) dans des conditions de température et pression élevées (disponible en type ou forte résistance aux sulfates). Son temps de pompabilité est réglé par un retardateur ajouté en usine par le cimentier.

- **Classe F** : Utilise de 10 000 à 16 000 ft (3048 à 4877 m) dans des conditions de température et pression élevées (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates). Son temps de pompabilité est réglé par un retardateur ajouté en usine par le cimentier.

- **Classe G** : étudier pour être utilisé de la surface à 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 classe G mais prévu pour des densités de laitier supérieurs (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 classe G et H.

Après avoir précisé les classes de ciments normalisées, nous reproduisons les caractéristiques chimiques et physiques exigées par l'API. [2]

Chapitre III :

Les additifs

1. Introduction

Pour la cimentation des puits de pétrole ou gaz, il faut avoir des ciments ayant des caractéristiques correspondant à celles du milieu de cimentation, donc il faut avoir des ciments qui répondent à certaines exigences pour faire face aux problèmes provoqués par les conditions du puits, mais dans certains cas, et sous l'effet de différentes couches géologiques, la température et la pression ainsi que la profondeur de puits, le ciment ne peut répondre aux exigences de la cimentation.

Afin de réussir la cimentation et améliorer certaines caractéristiques du ciment et du laitier de ciment, on ajoute au ciment à sec ou dans l'eau de gâchage certains additifs qui peuvent apporter des changements à ces propriétés.

2. Définition

Un additif est une substance chimique inerte ou active, ajoutée souvent à faible quantité à sec, pendant le mixage ou dans l'eau de gâchage, afin d'améliorer certaines propriétés, ou dans le but de diminuer le coût de revient du ciment. Comme exemple on peut citer :

- ✓ L'hématite pour alourdir le laitier de ciment.
- ✓ La bentonite pour alléger le laitier de ciment.
- ✓ Le CaCl_2 pour accélérer la prise.
- ✓ Lw-6 pour donner une meilleure résistance à la compression.
- ✓ Les gélifiants.

3. Type d'additifs

➤ Accélérateurs

Les accélérateurs sont des produits utilisés afin d'accélérer la prise du ciment et le développement des résistances mécaniques initial à basse température, et permettent de réduire le temps de pompabilité, des laitier ainsi que le temps d'attente avant reprise des opérations de forage.

Le mécanisme d'action des accélérateurs sur le ciment se traduit par l'augmentation de caractère ionique (Ca^{2+} , Cl^{2-}) du laitier de ciment en utilisant CaCl_2 . La présence du Cl, renforce la formation de l'étringite. Le gypse est rapidement consommé. Parmi les accélérateurs, on peut citer : le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de calcium (CaCl).

➤ **Retardateurs**

Ils ont pour but de retarder la prise de ciment et accroissent par la même le temps de pompabilité, au cas où, soit une haute température de fond de puits, soit un effet accélérateur dû à un additifs risquerait de réduire dangereusement le temps disponible à la mise en place. La majorité des retardateurs agissant en enveloppant les particules de ciment et ralentissent la réaction d'hydratation.

Le lignosulfonate de calcium, mélangé à sec au ciment, et un retardateur le plus courant il est compatible avec toutes les classes de ciment et la plus part des additifs. La concentration normale se situe entre 0.2 et 0.4 % P.P.C. en générale, l'ajout de 0.1% de lignosulfonate de calcium, augmente 30 min le temps de pompabilité.

➤ **Dispersants**

La fonction principale de ces additifs dans les laitiers de ciment, est la séparation des particules de ciments et leur suspension dans l'eau de mixage.

Les dispersants sont par conséquent utilisés pour réduire la viscosité d'un laitier dans le but d'obtenir un profil découlement turbulent facilitant un déplacement du fluide de forage par le laitier. Les dispersants ont une autres fonction tel que :

- ✓ Réduction des pertes de charge, ce qui permet dans certaine mesure de réduire les pertes de circulation.
- ✓ Permettent une plus grande pompabilité aux laitier lourd dans la teneur en eau est faible.

➤ **Réducteur de filtrat**

Le phénomène de filtration se produit, quand un laitier de ciment est placé sous pression le long d'une formation perméable. La phase aqueuse de laitier s'infiltré dans la formation, en quittant les particules de ciment. Ce phénomène s'appelle perte de filtrat. Le réducteur de filtrat affecte toutes les propriétés du laitier de ciment, c'est principalement dû à la réduction d'eau contenue dans le laitier comme filtrat à travers les zones perméables, on aura alors :

- ✓ Le volume du laitier se réduire et la densité augmente avec l'élévation des pressions de fracturation.
- ✓ La prise et la résistance à la compression améliorée.

Certains réducteurs de filtrat ont un effet retardateur, suite à l'adsorption du filtrat par les grains de ciment, par conséquent, l'hydratation se réduit.

Le mécanisme d'action de réducteurs de filtrat n'est pas encore maîtrisé, mais plusieurs processus qui se produisent sont connus :

- ✓ Augmente la viscosité de la phase aqueuse qui réduit la filtration.
- ✓ Le réducteur de filtrat construit une molécule qui permet de créer une enveloppe de chaîne d'interaction par conséquent la fermeture des pores et leur imperméabilité.

➤ **Alourdissant**

On alourdit le ciment soit par "densification" (réduire le rapport E/C) et emplois de dispersants, soit par ajouts de produit a densité élevée.

Les alourdissant sont des produits de poids spécifique généralement élevé qui ne nécessite pas l'addition supplémentaire d'eau de mixage pour maintenir la pompabilité du laitier.

Ils ont mélangé avec le ciment à sec afin de :

- ✓ Augmenter la densité de laitier.
- ✓ Améliorer le déplacement de boue par les laitiers.

L'hématite est un oxyde de fer, minérale inerte sous forme de granulés rouge dont la densité est égale à **4.95**. Il est mélangé à sec avec les ciments, néanmoins, il faut assurer que la viscosité du laitier soit suffisante pour empêcher les particules de se déposer pendant le mixage.

➤ **Allégeant :**

Les ciments de base utilisé pour la cimentation des puits de pétrole, possède des caractéristiques (composition chimique, granulométrie...), qu'une fois mélangé à l'eau de mixage, on obtient des laitier de densité normale comprise entre **1.78** et **1.98**. Après le durcissement et l'obtention d'une pierre de ciment, on remarque qu'une pression s'exerce sur le tubage et la formation.

Il est donc parfois nécessaire d'alléger les laitiers de ciment pour diminuer la pression hydrostatique aux endroits des couches fragile, et éviter ainsi les fracturations, par conséquent, les allégeant permettent une addition supplémentaire d'eau aux laitiers, sans qu'il reproduise une séparation excessive du volume d'eau libre, c'est un moyen très économique pour alléger les laitiers de ciment.

- **Définition**

Les allégeant sont des matières inerte légers, mélangé au ciment dont l'effet est d'une part de réduire ma densité du laitier et d'autre part de réduire le coût. Pour la plupart des allégeant ont un effet sur le temps de prise et la résistance à la compression du laitier de ciment. Il sera souvent de compenser par des additifs appropriés.

- **Classification des allégeant**

i. Bentonite

Définition et caractéristiques

La bentonite est un mélange naturel de minéraux composés en majeure partie de montmorillonite (une argile minérale) .la caractère unique de la montmorillonite, dû aux propriétés particulières de sa structure et réside dans sa capacité de gonfler dans l'eau en écartant les feuillets. La bentonite est utilisée couramment dans la boue de forage et aussi comme ajout au laitier de ciment.

La bentonite est pré-hydraté avec l'eau dans des proportions allant de 0,5 à 5% **P.P.C**, pour des densités de laitier comprise entre 1,82 et 1,40, le ciment est ajouté par la suite pour chaque addition de 1% de bentonite sec .la quantités d'eau de gâchage doit être augmentée de 5,3% par rapport au poids du ciment.

Structure de la bentonite :

La bentonite est composée de particules plates d'un diamètre allant de quelques micros à plusieurs centaines de micros. Ces particules en elles mêmes sont constituées de feuillets unitaires .les feuilles de bentonite sont constituées d'une couche octaédrique (Aluminium ou magnésium) emprisonnés entre deux couches de Silice en coordination tétraédrique (structure dite T.O.T ou 2=1).

L'épaisseur total des feuillets et de l'espace inter feuillets associés est d'environ 14 .

Cependant, ces minéraux argileux ont la capacité de gonfler en présence d'eau et cette épaisseur et alors par conséquent susceptible d'augmenter.

Avantages de la « bentonite » dans le laitier de ciment

- Diminution de la densité du laitier de ciment.
- Diminution de l'eau libre.
- Réduction de la quantité de ciment.
- Augmentation de rendement avec l'élévation de la concentration de la bentonite.

Inconvénients de l'utilisation de la « bentonite »

- Faible résistance à la compression.
- Mixage difficile à des concentrations élevées.
- Formation de gel.
- Faible résistance aux attaques des Sulfates.

La composition de la bentonite (MAGHNIA)

Tableau (3) : la composition de la Bentonite de MAGHNIA

Composants	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	Na₂O	K₂O
Pourcentage	51.52	19.03	1.98	0.16	3.08	1.17	0.36

ii. Flyash (pouzzolane)

C'est une roche d'origine volcanique, elle ne possède pas comme le ciment des propriétés hydrauliques sous forme pulvérisées.

Les pouzzolanes sont des matières siliceuses non hydrauliques par elle-même, mais renfermes les constituants, qui à des températures ordinaires peuvent se combiner à la chaux en présence d'eau, pour donner naissance à des composés peu soluble de propriété cimentiers.

Flyash est essentiellement un allégeant, mais du fait leur réaction avec la chaux libre de ciment et la portlandite elle assure :

- ✓ La résistance aux eaux sulfatées.
- ✓ Accroissement de la résistance à la compression.
- ✓ Augmentation de la durée de vie.

La composition chimique du flyash

Tableau (4) : Composition chimique du flyash

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
Pourcentage	45.21	17.85	9.84	9.99

iii. Le Lite (LW-6)

Se sont des micros sphères d'aluminium, son nom commerciale est LW-6 et on peut la définir encore comme une perle en céramique à basse densité, qui est comprise entre 0,7 et 0,8.

Il est employé pour concevoir les laitiers du ciment qui peuvent être mélangée de 8,5 à 14 **P.P.C** sans addition d'eau, il a été développé pour l'usage à travers des formations faible et aussi a été développé particulièrement pour des applications à des cimentations primaires , dans les puits ou la pression hydrostatique ne dépasse pas 6000psi.

Caractéristiques et avantage du LW-6

- ✓ Utiliser pour formuler des laitiers de ciment qui peuvent être mixés à des densités faibles 1.01 à 1.60.
- ✓ Sa résistance à la compression est considérablement plus grande que les laitiers conventionnels allégés et bentonitique.
- ✓ Obtenir des laitiers à des densités réduites pour éviter les problèmes de perte de circulation.
- ✓ Compatibilité avec tous les ciments API ainsi que la majorité des additifs de ciment.
- ✓ Utilisable pour toutes applications de la cimentation avec laitier allégés.

➤ **Agents divers**

- **Les fluidifiants**

Ils servent à compenser une grande viscosité, ou une tendance à gélifier de certains laitiers et facilitent l'établissement du régime d'écoulement turbulent lorsqu'ils sont exigés.

- **Les anti-moussants**

Ils évitent l'excès de masse produite au mixage de certains ciments, lequel risque d'interférer avec le bon fonctionnement des pompes.

- **Les gélifiants**

Ils modifient les caractéristiques thixotropies de certains laitiers.

- **Les additifs liquides**

Ils peuvent être ajoutés à l'eau de mixage ou bien d'être intégrés à sec au ciment avant gâchage. [2]

Chapitre IV :

La Cimentation

1. Introduction

La cimentation des tubages est un des éléments clés de la construction des forages, elle détermine l'étanchéité des annulaires et participe à la sécurité et à la protection des puits et des terrains traversés. Le maintien des tubages et l'étanchéité du forage sont assurés par le remplissage des annulaires avec du ciment. La réussite des opérations de cimentation sera donc essentielle pour garantir l'exploitation des ouvrages.

2. Rôle de la cimentation

Du fait de ses nombreux rôles, la qualité des cimentations des tubages va influencer directement sur la pérennité des ouvrages et sur la sécurité de l'environnement des puits. On peut en effet considérer que les cimentations ont pour rôle :

- ✓ De maintenir les tubages installés dans les puits en les fixant aux terrains traversés.
- ✓ De prendre en charge une partie des contraintes mécaniques supportées par les différents cuvelages et par le tubage de production : pression des formations, pression de la colonne de fluide, surpression dû à la réinjection, dilatations axiales et verticales dues aux variations de température.
- ✓ De protéger l'extrados des tubages contre les agressions chimiques facteurs de corrosion.
- ✓ De participer à l'intégrité mécanique et hydraulique des colonnes de production.

Une cimentation devra impérativement garantir l'étanchéité de l'ouvrage et protéger du mieux possible son intégrité mécanique et hydraulique pendant toute la durée de sa vie. La cimentation participe également à l'étanchéité de l'ouvrage après abandon.

C'est un élément primordial pour la sécurité des aquifères traversés par l'ouvrage et pour le contrôle de l'environnement des puits.

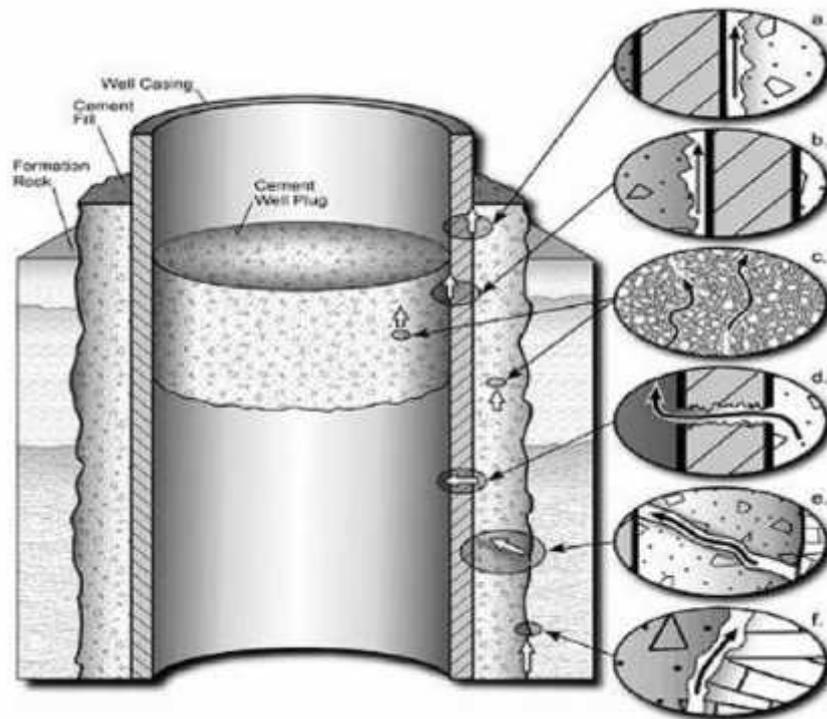


Figure (2) : Illustration des différentes possibilités de migration des fluides dans et autour d'un tubage cimenté.

- a) Mauvais accrochage du ciment sur le tubage. Formation d'un micro-annulaire (bonding défectueux) Retrait du ciment au séchage, effets mécaniques.
- b) Idem à l'intérieur du tubage pour un bouchon de fermeture.
- c) Ciment de mauvaise qualité. Porosité trop importante, fissuration et fracturation Pollution du laitier par la boue de forage.
- d) Tubage percé (DV, corrosion) ou déboité.
- e) Ciment endommagé Fracturation mécanique.
- f) Mauvais accrochage du ciment sur les formations. Cake trop épais, retrait du ciment, effets mécaniques.

3. Principe de la cimentation

Cimenté une colonne de tubage consiste à mettre un laitier de ciment dans tout en partie de l'espace annulaire entre le tubage et le trou foré.

Le ciment on faisant prise assurera la liaison entre la colonne de tubage et le terrain. Une opération de cimentation nécessite donc de :

- ✓ Définir les objectifs de la cimentation.
- ✓ Calculer le volume du laitier de ciment à injecter.
- ✓ Calculer le volume de chasse.
- ✓ Préparer le trou avant l'injection.
- ✓ Utiliser le ciment et les additifs.
- ✓ Réaliser la cimentation.
- ✓ Tester la colonne après la cimentation.

4. Objectifs de la cimentation

- ✓ Ancrer la colonne au sol.
- ✓ Prévenir le dévissage du tube pendant le forage.
- ✓ Canaliser en surface les fluides exploités.
- ✓ Éviter la pollution des nappes phréatiques.
- ✓ Réaliser la séparation entre les différentes couches productrices qui pourront contenir des fluides différents à des pressions différentes.
- ✓ Fermer les couches à haute pression pour éliminer les risques d'éruptions.
- ✓ Protéger les colonnes contre les agents chimiques et la corrosion électrochimique.

5. Principe de la méthode de cimentation

La cimentation est une opération qui consiste à remplir l'espace annulaire entre le tubage et la formation forée, où la mise en place d'un laitier de ciment approprié à une cote donné du puits. Il s'agit d'injecter directement à l'intérieur de tubage à cimenter un laitier de ciment, de façon à faire ensuite remonter dans l'espace annulaire jusqu'à une hauteur prédéterminée.

Le laitier est généralement mixé en surface de façon continue au moyen de deux D'eau sous pression qui mouillent et entraînent le ciment pulvérulent jusqu'à un petit bac tampon pour avoir un laitier dont la densité est contrôlée en permanence. Il est ensuite repris par des pompes à pistons pour être injecté dans le puits.

Le réglage de la densité du laitier est obtenu par la variation de débit d'eau. L'alimentation en ciment sec se fait par gravité à partir d'un silo, mais les équipements modernes comportent une alimentation de ciment en conduite sous pression d'air jusqu'au contact avec l'eau de mélange, c'est le cas d'installation offshore.

6. Type de cimentation

a) Cimentation primaire

A l'intérieur du casing il y a un anneau de retenue, qui sert à bloquer le bouchon inférieur qui encadre le volume du laitier dans le casing.

Le premier coup de pression crève le bouchon inférieur pour que le laitier circule dans l'annulaire à travers le sabot. Le laitier pousse directement la boue de forage et au même temps lave les parois du puits et l'extérieur de casing. Le bouchon supérieur est déplacé par circulation de la boue de forage. Cette opération est appelée « la chasse » (volume de boue entre l'anneau et la tête de cimentation).

Quand tout le volume de chasse est circulé, on doit remarquer une montée en pression qui signifie l'arrêt du bouchon supérieur. Avec un deuxième coup de pression pendant quelques minutes, on peut faire un test d'étanchéité de la colonne.

b) Cimentation 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.

✓ Dans un dernier temps, après séchage définitif, on refore l'ensemble du matériel utilisé pour la cimentation : bouchons et sièges de bouchons, bombes et résidus de ciment, ainsi que le sabot du tubage. [4]

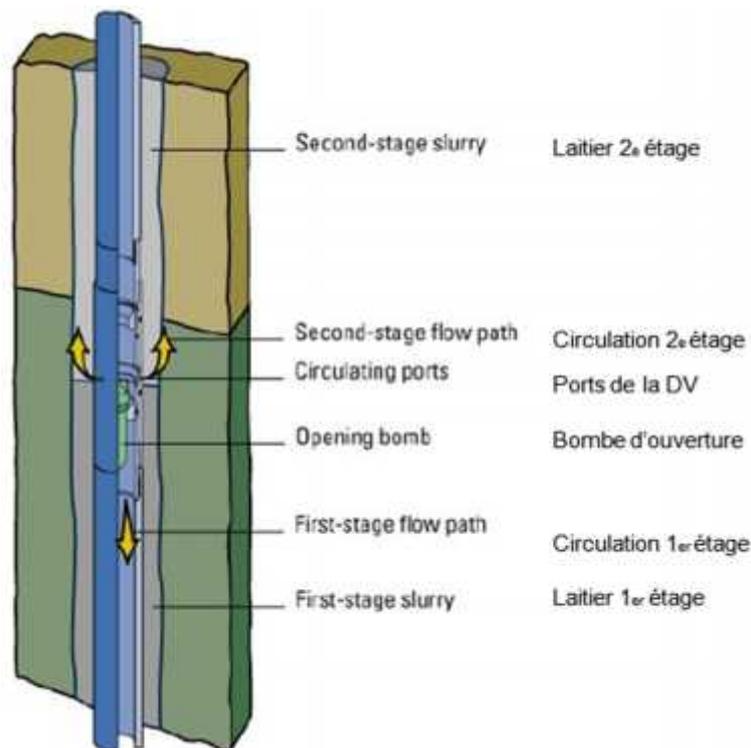


Figure (4) : illustration de la cimentation étagée.

c) Cimentation de la colonne perdue (LINER) :

La différence qui existe entre ce type et d'autres types, c'est que la colonne perdue ne remonte pas jusqu'à la tête du puits. Elle est cimentée avec un recouvrement dans le dernier tubage (overlap).

La cimentation des colonnes perdues est effectuée aux endroits des zones productrices puis perforée pour une mise en production sélective du puits, il faut avoir une bonne cimentation de cette colonne pour permettre d'isoler les différents niveaux de réservoirs et de limiter les venues indésirables d'eau et de gaz.

d) Le squeeze (injection sous pression) :

Le but de cette opération est de remédier à un défaut d'étanchéité. L'opération consiste à placer un laitier à un point donné du puits et d'appliquer une pression sur une formation perméable, pour que le laitier se déshydrate et forme une pâte de ciment et colmatant les défauts d'étanchéité dans les zones à perte.

Le calcul de volume du laitier est basé sur le volume de recteur.

Les buts de cette opération sont :

- ✓ Abondant d'un puits par isolement des couches perméable et fermeture définitive par bouchon des ciments.
- ✓ Fermeture d'un niveau aquifère.
- ✓ Bouchon de déviation en cas des problèmes rencontré durant le forage.
- ✓ Colmatage de la perte de circulation.

7. Difficultés de la cimentation :**a) La profondeur du puits :**

La qualité de la cimentation dépend de la profondeur, ainsi que la température et la pression du puits. Avec l'augmentation de la température, il y'a le risque de prise rapide (flash set), le ciment fait prise rapidement, donc dans une profondeur, une quantité de laitier préparé par un retardateur de prise, on détermine le temps de pompabilité avec une marge de sécurité (pour réaliser la cimentation du mélange jusqu'à la mise en place du laitier).

b) La situation du puits :

La garniture du ciment, placé entre le tubage et les parois doit être, continue, homogène, dure, imperméable et adhérente.

c) Homogénéité du contenu :

Il faut que toute la boue remplacé par le laitier dans l'espace annulaire, et éviter la contamination entre la boue et le laitier, pour y remédier il faut :

- ✓ L'utilisation d'un séparateur entre la boue et le laitier (spacer), avec une densité intermédiaire.

✓ Il est nécessaire que le régime de déplacement des fluides pendant le pompage soit turbulent pour avoir un bon déplacement de la boue.

✓ Le tube soit bien centré.

✓ Adhérence du laitier au tube et aux parois : Pendant le forage il y a la formation de dépôt sur les tubes et du cake déposé sur les parois du puits causé par la boue, pour y remédier il faut :

- Pomper un bouchon laveur avant le laitier pour le but de laver et dissoudre le cake.
- Equiper le tube des « Scartcher » pour détacher le cake.
- Equiper le tube par des centreurs pour garder la même épaisseur d'enrobage de la garniture du ciment et éviter la contamination du laitier par la boue.

8. Choix du laitier :

D'après l'API les ciments sont classés selon la profondeur et surtout la température du fond de puits et la résistance aux sulfates, la sélection du laitier est imposé par :

- ✓ La température statique du fond et la pression.
- ✓ La densité des laitiers dépend de la pression hydrostatique de la formation rencontrée.
- ✓ Les caractéristiques rhéologiques du laitier.
- ✓ Le temps de pompabilité (début et fin de prise).
- ✓ La résistance à la compression.
- ✓ La résistance du laitier aux différentes attaques tels que :
 - Les eaux agressives.
 - Les hautes températures.
 - Le problème des gaz sortant de la formation jusqu'à la surface.

Les laitiers sont préparés en laboratoire dans les conditions qui stimulent les conditions du puits (température, pression). Les laitiers sont composés essentiellement du ciment et d'eau et additif ayant un rôle bien déterminé.

9. Matériels de la cimentation :**a) Tête de cimentation :**

La tête de cimentation fixée au sommet du tubage, équipée de deux bouchons de cimentation, à pour but de circuler la boue de forage, injection des bouchons laveurs (spacer), largage du bouchon inférieur, l'injection du laitier, la chasse du bouchon supérieur avec la boue de forage.

b) Bouchon de cimentation :

Il y a deux types, inférieur supérieur. Leur rôle principal réside dans la séparation des différents fluides (boue, laitier, spacer) et d'éviter le plus possible la contamination pendant leur déplacement à l'intérieur des casings.

c) Sabot et anneau à bille :

Les tubages sont équipés d'un sabot et d'un anneau à bille, (clapet anti-retour) qui a pour but d'éviter toute circulation inverse.

d) Centreurs :

La réussite d'une cimentation est basé sur le bon centrage du tubage, afin d'assurer :

- ✓ Une garniture du ciment régulière autour du tubage.
- ✓ Le nettoyage du trou.

e) Gratteurs (Scartcher) :

Les gratteurs doivent permettre la destruction du cake pour assurer une bonne adhérence du ciment avec la formation.

10. Techniques de cimentation :

a) Préparation du trou :

La préparation du trou est basé sur le nettoyage des parois et le casing, par une circulation préliminaire de boue jusqu'à l'évacuation complète des déblais. Pendant la circulation de la boue, on fait manœuvrer la colonne pour gratter le cake avec le racleur, afin d'obtenir une bonne adhérence, et une bonne étanchéité du ciment.

b) Cimentation de l'espace annulaire :

Quand le puits est prêt à cimenter, on injecte le bouchon laveur, on lâche le bouchon inférieur, puis on injecte le laitier. On lâche le bouchon supérieur, puis on injecte le volume de boue de chasse en poussant devant lui le bouchon supérieur.

Si le casing est équipé d'un sabot à soupapes (clapet-anti-retour), on débranche la tête de cimentation. Sinon, on laisse la tête de cimentation brancher et on maintient la pression finale de refoulement jusqu'à ce que le laitier fasse prises.

c) Contrôle d'étanchéité du casing :

Dés que le laitier fait prise, on pompe la boue à l'intérieur du tubage, puis on exerce une pression qui ne doit pas dépasser 80% de pression d'éclatement du tubage la plus mince, on arrête le pompage, et on observe si elle maintient pendant 30 min (la pression ne doit pas baisser de 10% de sa valeur).

d) Causes et remèdes des cimentations :

La durée de vie du tubage et basé sur la bonne cimentation, mais des fois on aura des mauvaises et cela est due à différentes cause :

- **La perte totale ou partielle du laitier :** Pour y remédier ce problème, il faut effectuer une cimentation complémentaire.
- **Prise rapide (flash set) :** Cette prise prématuré qui peut être dû à :
 - ✓ Mauvaise qualité du ciment.
 - ✓ Teneur en accélérateur de prise très élevée.

- ✓ Non suivie du programme de la cimentation.
- ✓ Mauvais control de la densité.
- ✓ Manque d'eau de mixage.

Pour remédier à ce problème, il faut étudier le temps de pompabilité du laitier.

➤ **Dégradation des résistances mécaniques :**

Il est très important d'avoir de bonnes résistances mécaniques du laitier, surtout lors du forage. La dégradation peut être provoqué par :

- ✓ La composition du laitier défectueuse.
- ✓ Le pourcentage élevé d'eau.
- ✓ Les additifs qui empêchent le processus de durcissement.

Pour éviter ce problème, il faut bien étudier la formulation du laitier.

➤ **Dégradation des laitiers :**

La dégradation du laitier est due aux plusieurs facteurs :

- ✓ La température du fond.
- ✓ L'âge du ciment.
- ✓ Les eaux agressives.

Pour éviter ce problème, il faut faire des réparations des lieux dégradés, par l'injection du laitier sous pression après perforation du tubage (Squeeze).

➤ **Manque d'étanchéité de la graine de ciment**

Le manque d'étanchéité de la graine de ciment peut être dû à :

- ✓ La présence du cake déposé sur les parois du puits.
- ✓ La contamination du laitier par la boue.
- ✓ La formation du micro-annulaire après la cimentation qui provoque la corrosion du tubage.
- ✓ La prise affectueuse du ciment, qui est la conséquence de la filtration de l'eau dans la formation, avant la fin de prise.

Le remède est de faire un bon nettoyage du puits, avant la cimentation pour assurer une bonne adhérence de laitier avec la formation et d'ajouter des additifs convenables pour ajuster le temps de prise et les propriétés de filtration ainsi que le choix du mode d'écoulement du laitier de ciment en fonction des débits de pompage et du modèle rhéologique choisit auparavant lors des simulation par des logiciels prévu pour des opérations de cimentations.

➤ **Contamination du laitier par la boue**

La contamination du laitier par la boue provoque les problèmes suivants :

- ✓ Diminution de la résistance à la compression.
- ✓ Dégradation du ciment.
- ✓ Manque d'étanchéité de la graine de ciment.

Pour éviter ces problèmes, on doit utiliser un bouchon inférieur racleur, et un fluide tampon (spacer) entre la boue et le laitier afin d'éviter tout contact. Le bouchon laveur est étudié de telle manière qu'il soit compatible avec la boue et le laitier. Des tests de compatibilité sont réalisés afin de prévoir tout incident durant la cimentation.

➤ **Corrosion de la pierre de ciment**

Le ciment est comme autres matériaux, subissent des altérations chimiques dans les milieux agressifs, qui peuvent provoquer la dégradation de l'ouvrage.

La durée de vie du ciment dans les milieux agressifs dépend de :

- ✓ La formulation de laitier.
- ✓ Les compositions chimiques et minéralogiques du ciment.
- ✓ La qualité de cimentation.
- ✓ Le degré d'agressivité du milieu.

La meilleure protection de la pierre de ciment dans les milieux agressifs, est d'avoir une pierre de ciment compacte (sans pores), afin d'éviter la pénétration des agents agressifs à l'intérieur de la pierre du ciment durci.

i. Altération chimique :

La corrosion de la pierre de ciment est due à l'interaction chimique entre les composants et les constituants d'eau agressive (sulfates, chlorures...).

- **Corrosion par lessivage :**

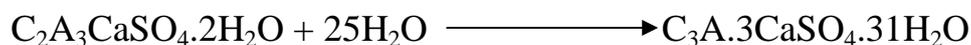
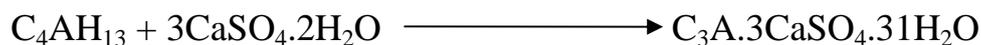
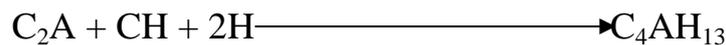
La corrosion par lessivage c'est la dissolution de la chaux de ciment, qui laisse derrière lui des vides communicants.

Les ciments pétroliers, ont une meilleure protection à ces agents agressifs à cause de la fixation de chaux hydratée (portlandite).

- **Corrosion sulfaté :**

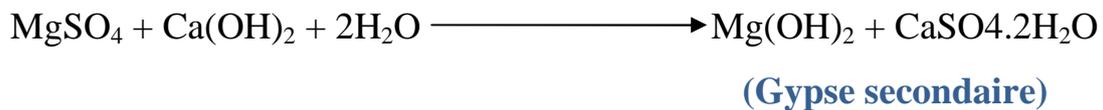
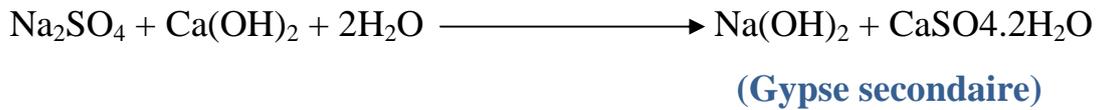
L'interaction entre les eaux agressives et les composants du ciment donne naissance à des composants expansifs qui déforment la structure de la pierre de ciment. Le mécanisme d'attaque sulfatique est le suivant :

✓ La formation d'hydro-sulfo-aluminate de calcium se déroule selon les réactions suivantes :



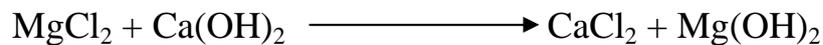
(Etraingite)

Formation de gypse secondaire :



Le gypse obtenu va réagir avec l'aluminate tricalcique (**C₃A**) et donne naissance à l'hydro-sulfo-aluminate de calcium qui provoque la destruction de la pierre de ciment durci par l'augmentation de volume. La chaux et l'aluminate tricalcique sont les phases les plus faibles devant l'attaque des eaux agressives.

- **Corrosion magnésienne :**



Pour remédier à ce problème d'agression sulfatée et magnésienne, il est nécessaire d'avoir des ciments avec des faibles teneurs en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et C_3A , par l'ajout de laitier de haut fourneau.

- **Corrosion par les chlorures :**

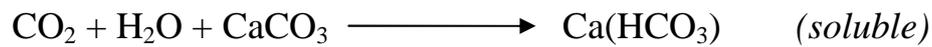
Les eaux chlorures ont une grande influence sur le système de cristallisation de ciment, à cause de la pression osmotique entre les solutions fortement concentrées et le ciment. Le manque d'eau de cristallisation permet une chute des résistances du ciment, et la dégradation du ciment.

- **Action de l'acide carbonique :**

On peut considérer l'acide carbonique (H_2CO_3) comme la solution aqueuse de CO_2 , qui existe sous forme de :

CO_2 : gaz.

$\text{Ca}(\text{HCO}_3)$ soluble : semi lié chimiquement



❖ Dans le cas où le ciment ne contient pas de CaCO_3 :



Chapitre V :
La technologie
CemCRETE

1. Introduction

Les ciments pétroliers ont des caractéristiques qui font que quand ils sont mélangé à l'eau de gâchage donnent des laitiers de ciments ayant une densité comprise entre 1.78 – 1.98 ; ce qui fait que certaines formations ne supportes pas les colonnes de ciments de tel poids, pour régler ce problème il faut alléger le laitier de ciment par des allégeant comme la bentonite, afin de diminuer la pression hydrostatique aux endroits des couches fragiles et la filtration des laitiers à travers.

Avant on utilisait des ciments allégés par la bentonite ou la mousse qui a pris naissance en 1989 (foamed cement) pour pouvoir pomper les volumes importants à des profondeurs très longues et éviter de cracker la formation, mais ces ciments ont des mauvaises caractéristiques mécaniques ce qui a obligé les spécialistes du domaine à chercher un autre laitier plus performant et en **1997** un laitier de meilleurs caractéristiques mécaniques et de densité requise a apparaît au monde de cimentation des puits pétroliers. C'est le **LiteCRETE**.

2. La Technologie LiteCRETE

Le programme de tubage a été remodelé en utilisant la technologie de **LiteCRETE** pour remplacer le tubage intermédiaire à deux étages avec un seul tubage en une seule étape exigeant seulement un laitier de ciment. Ceci nous a permet de gagner le temps de fonctionnement de la DV et des coûts associés d'installation, et à éliminer le risque lié à une DV.

La technologie de LiteCRETE offre une solution pour la construction des puits avec moins de perméabilité et à faible densité. Des colonnes de ciment de qualité supérieure peuvent être pompées plus haut dans l'annulaire ce qui a rendu la cimentation étagée inutile.

En forant des formations peu solides, il peut être difficile de placer suffisamment de ciment derrière le tubage sans utiliser des laitiers de ciment prolongés de densité basse.

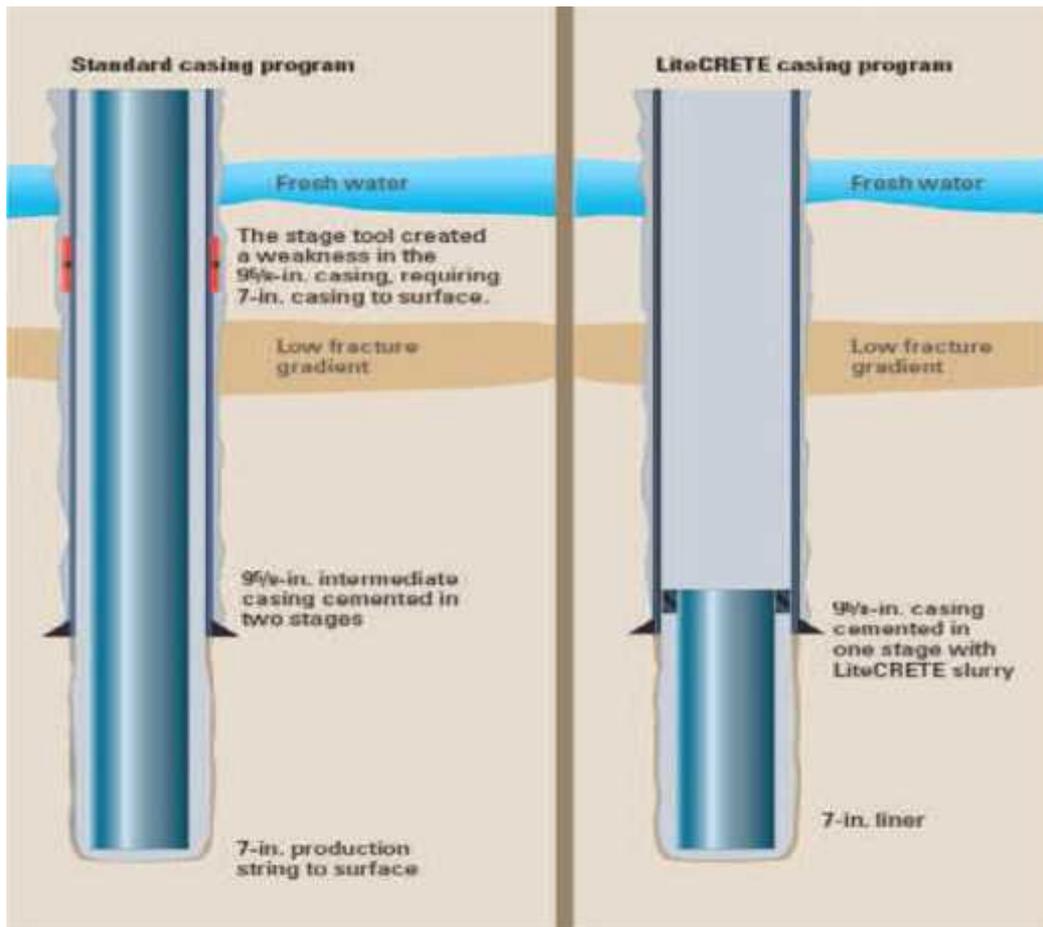


Figure (5) : Remplacement de la cimentation étagée par une cimentation a un seul étage.

3. Caractéristique Du Laitier LiteCRETE

- La technologie de LiteCRETE (un système de CemCRETE) fournit des propriétés de qualité de production de ciment aux laitiers de basse densité.
- ✓ C'est un laitier simple à faible densité fonctionnant comme un ciment de densité conventionnelle. Peut éliminer ces restrictions et nous permettre de placer des colonnes de tubage plus longues et peut-être éliminer des rangs de tubage.
- ✓ Les laitiers de LiteCRETE peuvent être mélangés à des densités de 0.96 à 1.5 sg et sont ainsi mis en place facilement à travers des zones faibles.
- ✓ Avec le laitier LiteCRETE, on peut fréquemment éliminer la cimentation étagée dans des intervalles longs, et nous pouvons obtenir une qualité exceptionnelle de perforation sans réduire l'intégrité de ciment.

- ✓ Les systèmes de LiteCRETE sont même assez forts pour des traitements de rupture hydrauliques.

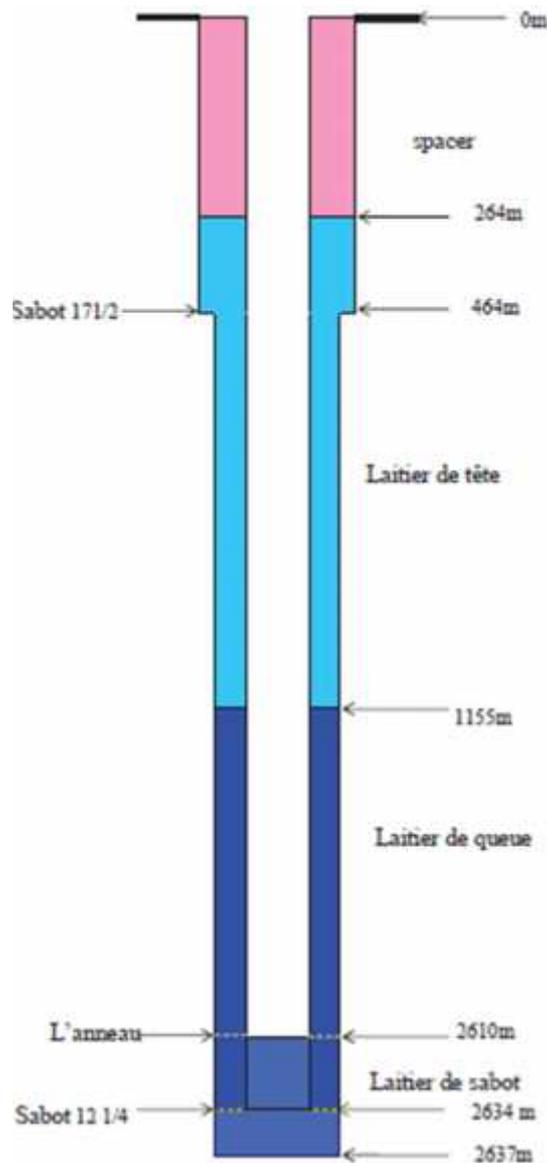


Figure (6) : Disposition des laitiers de ciment dans un puits de pétrole.

4. Description Du LiteCRETE

Aujourd'hui les besoins se limitent à demander d'une part une faible perméabilité de façon à obtenir l'isolation requise et à minimiser les attaques chimiques éventuelles, et d'autre part une bonne résistance à la compression. Ces deux propriétés vont d'ailleurs de pair pour la plupart des coulis de ciment Portland traditionnel.

Le ciment Portland est la plus ancienne technologie utilisée dans la cimentation des puits. Le ciment durci, à toujours plus ou moins les mêmes propriétés mécaniques qui sont directement liées à son contenu en eau c'est à dire à la densité du coulis.

En effet, plus il y a d'eau (plus le coulis est léger), plus les résistances mécaniques et chimiques sont faibles, tout en augmentant légèrement sa flexibilité. Inversement, moins il y a d'eau ou plus le coulis est lourd, plus les résistances mécaniques et chimiques sont généralement fortes, et sa flexibilité diminuée.

Or l'on recherche maintenant à obtenir un matériau performant, c'est à dire ayant à la fois des fortes résistances et une flexibilité importante, quelle que soit la densité initiale du coulis de ciment. On ne peut donc pas utiliser le ciment Portland brut, et il faut inventer un nouveau matériau.

Pour simplifier, nous allons considérer le ciment comme un matériau de taille à peu près homogène. Ce matériau à taille unique et à fonction unique est transporté et modifié par l'eau de gâchage. La quantité d'eau donne accès aux propriétés du coulis, tandis que la quantité de ciment contrôle les propriétés du solide.

Les laitiers standards de ciment exigent un haut rapport d'eau pour le mixage et la mise en place.

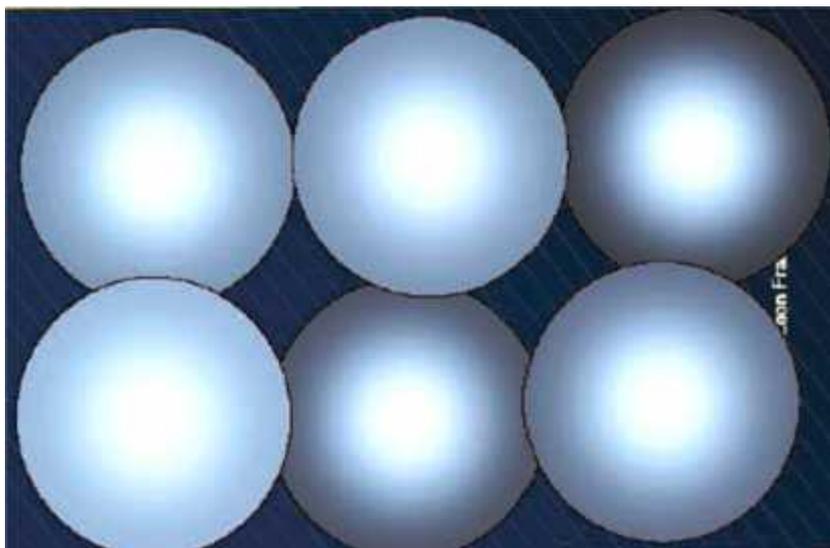


Figure (7) : Distribution des particules d'un ciment conventionnel.

(Particules supposées homogènes)

Il faut donc construire un nouveau matériau qui utiliserait l'eau uniquement pour la fonction transport, et se composerait de différents solides qui contrôlèrent à la fois la densité (propriétés du coulis) et les propriétés mécaniques du solide final.

Pour construire ce matériau il faut tout d'abord utiliser des solides de taille et répartition de taille très contrôlées. Ensuite il faut choisir et ajuster la nature des différents solides en fonction de la densité du coulis et des propriétés mécaniques du solide final. Ceci permet d'avoir un rapport eau/solide très faible, et toujours le même, quelle que soit la densité.

Cette technologie, appelée CemCRETE, permet donc de construire un solide à la demande, en fonction des propriétés exactes requises pour l'application, car pour la première fois dans l'industrie pétrolière, les propriétés du coulis et du matériau durci sont totalement ajustables indépendamment de la densité.

Les laitiers de CemCRETE remplissent l'espace vide par des petits solides, permettant le mélange et le placement avec des concentrations inférieures de l'eau et des propriétés supérieures de placement.

Les systèmes de CemCRETE fournissent l'isolement zonal supérieur dû à la perméabilité très basse et excellente résistance à la force, même aux densités très faibles.

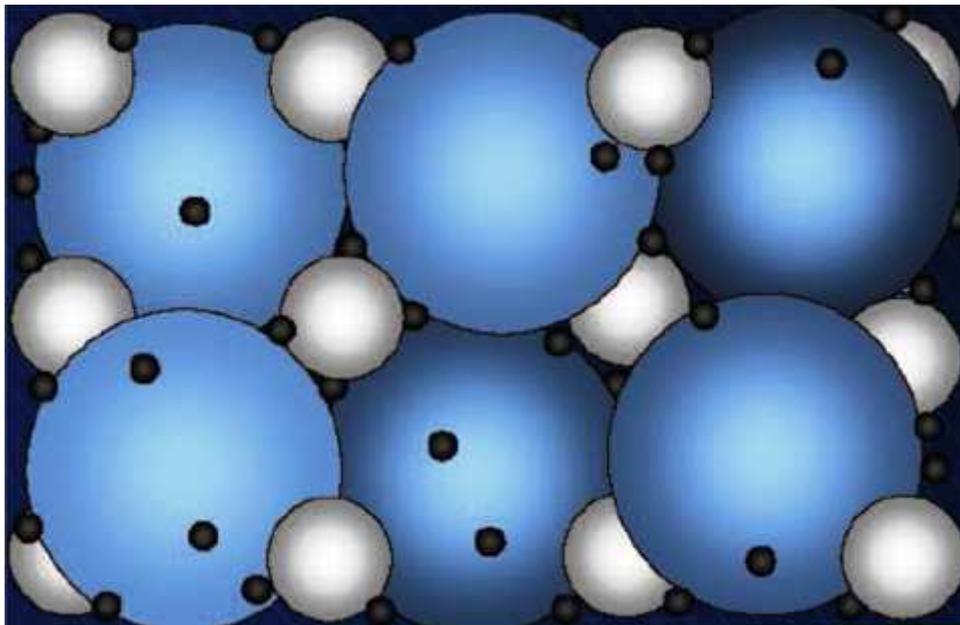


Figure (8) : Distribution des particules du ciment LiteCRETE.

5. Caractéristiques Techniques De CemCRETE

- ✓ Plus de solides en votre ciment.
- ✓ Une plus grande résistance à la compression
- ✓ Perméabilité réduite à travers le ciment.
- ✓ Une plus grande résistance aux fluides corrosifs.

a) Pourcentage Des Solides Dans Le Laitier de la CemCRETE

Le pourcentage des solides dans le laitier influence sur les propriétés mécaniques du ciment durcis, plus le laitier contient un pourcentage élevé de solides plus il possède de bonnes caractéristiques mécaniques.

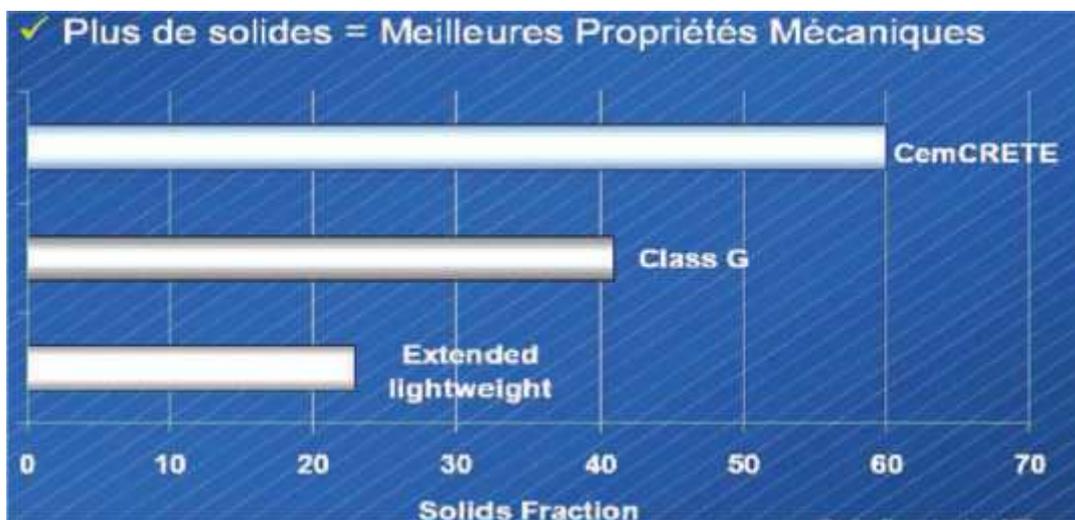


Figure (9) : Pourcentage des solides dans le laitier de la CemCRETE.

b) Résistance à la Compression

La technologie de LiteCRETE fournit au ciment durcis, dans le temps, une résistance à la compression plus élevée par rapport aux autres types de laitier. Cette résistance à la compression est obtenue grâce à la distribution et la nature des grains des solides dans laitier.

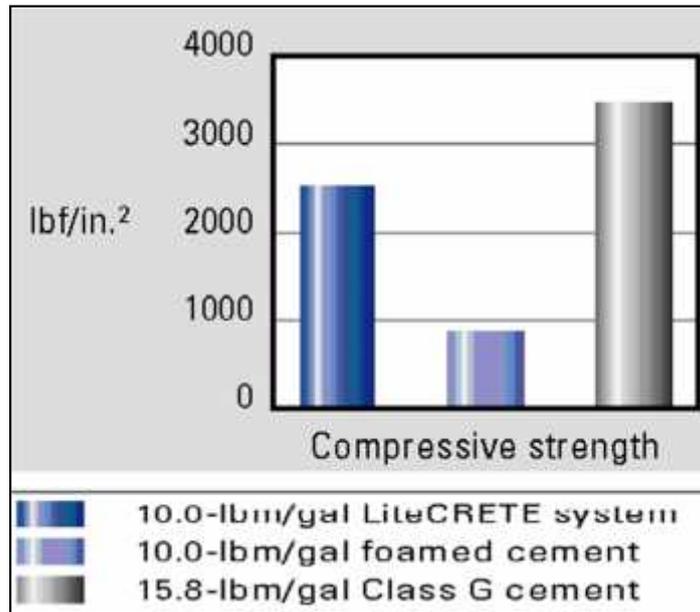


Figure (10) : comparaison de la résistance à la compression du LiteCRETE avec les laitiers de ciment traditionnels.

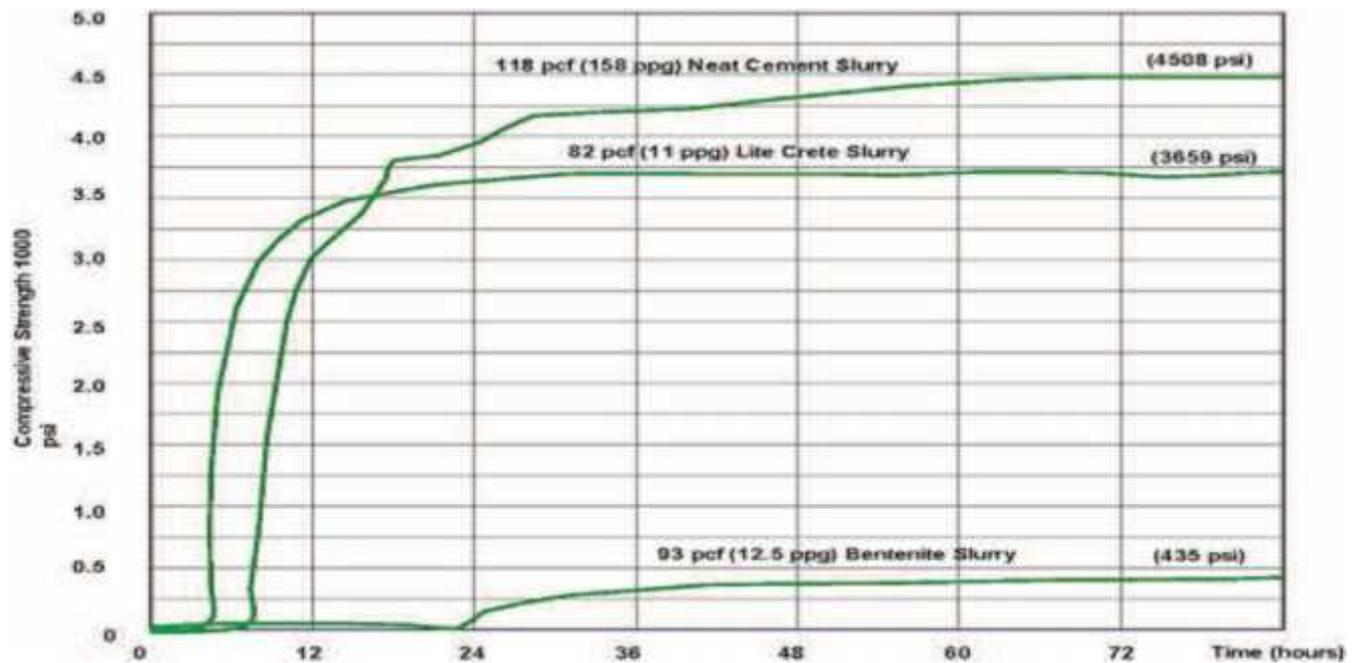


Figure (11) : Augmentation de la résistance a la compression en fonction du temps.

c) Perméabilité réduite

La perméabilité est parmi les caractéristiques les plus exigées afin d'empêcher le passage des fluides indésirables à travers le ciment et d'assurer une bonne isolation des zones d'eau. Le ciment LiteCRETE présente une perméabilité réduite et par conséquent une très bonne isolation des aquifères et une grande protection du tubage contre les fluides corrosifs.

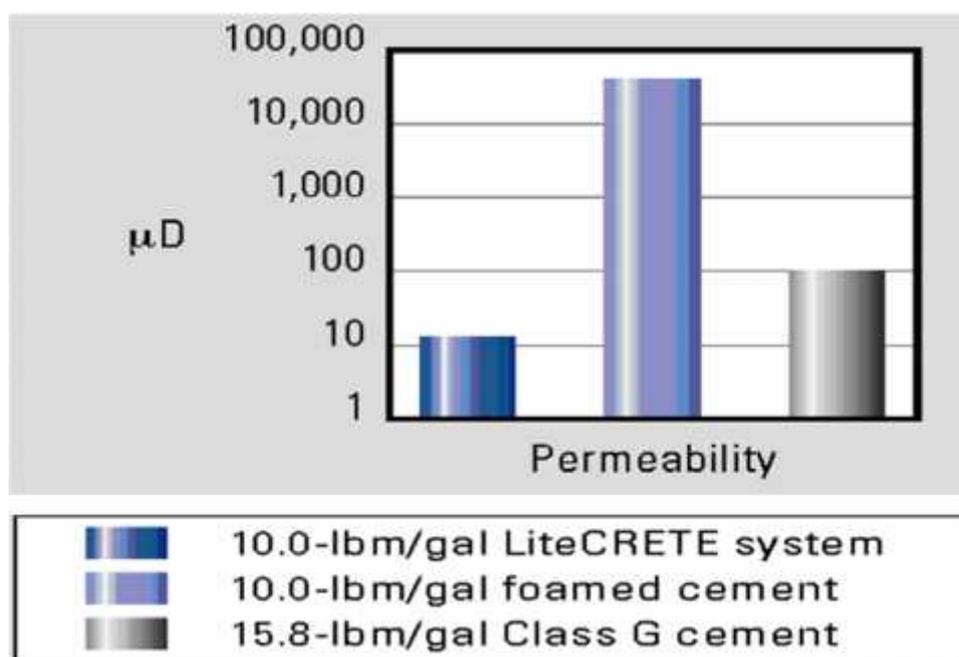


Figure (12) : comparaison de la perméabilité du laitier de ciment LiteCRETE avec les laitiers de ciment traditionnels.

6. Les Avantages de LiteCRETE

- ✓ Elimination potentielle de la cimentation étagée.
- ✓ Isolement des zones productrices à travers des formations de fracturation facile.
- ✓ De plus longues colonnes de ciment sans pertes dues aux pressions hydrostatiques.
- ✓ Cimentation de liner avec un seul laitier de faible densité.
- ✓ Bouchons de Whipstock à de plus faibles densités.
- ✓ Opération sûres et sans risques et logistique simple une fois comparé au ciment à la bentonite ou à la mousse.
- ✓ Un laitier de ciment de faible densité avec des propriétés nécessaires d'emplacement du ciment pour l'isolement des zones.
- ✓ Préparation de laitier sans équipement spécial ou personnel additionnel.
- ✓ Propriétés d'emplacement du ciment supérieures à d'autres systèmes légers à des densités équivalentes. [5]

Partie expérimentale

Chapitre I :

Etude expérimentale

1. Problématique et objectif du travail

L'une des préoccupations majeures dans les puits de pétrole demeure une bonne cimentation afin d'assurer une bonne étanchéité et garantir l'exploitation des ouvrages.

D'où la nécessité de faire un bon choix de laitier utilisé pour la cimentation des puits de pétrole. La durabilité de cette cimentation dépend de plusieurs paramètres tels que : la densité, eau libre, filtrat, résistance à la compression d'un laitier de ciment qui servira à réaliser l'ouvrage.

Notre travail s'est intéressé au choix du laitier de ciment à utiliser pour une bonne cimentation et garantir la durabilité d'exploitation des puits de pétrole.

Notre objectif consiste à élaborer un laitier de ciment allégé nommé **LiteCRETE**, et un laitier de ciment allégé nommé **GASBLOK** d'une densité $d= 1.30$, et $d= 1.90$ respectivement pour la cimentation des zones fragiles des puits pétroliers et la vérification des caractéristiques physico-mécaniques et rhéologiques de nos laitiers par rapport aux laitiers traditionnels (laitiers allégés par la **bentonite**).

➤ Caractéristiques générales du puits de pétrole :

Notre étude s'effectue sur la cimentation du casing **9 5/8"** du puits de pétrole **GMD-8** de Haoud Berkawi, ses caractéristiques sont :

- Profondeur : 1000 m.
- Température de circulation : 45° C.
- Température statique : 70° C.

Dans cette étude on utilise un laitier de ciment allégé **LiteCRETE** composé de trois types de particules :

- Des particules larges.
- Des particules moyennes (ciment classe G).
- Des particules fines.

Le ciment pétrolier de classe G est le plus utilisé dans la cimentation des puits en Algérie.

2. Caractérisation des matériaux

➤ Ciment Classe G

Tableau (5) : Fiche technique résultats des tests sur ciment G selon les normes API

Propriétés	Conditions des tests			Normes API	Résultats
	E/C	Temp.°C	Pression (psi)		
Résistance à la Compression (psi) (à 8 heures)	0.44	38	Atmos	> 300	730
		60	Atmos	> 1500	2736
52		5160	> 90 < 120	110	
52		5160	< 30	16.1	
Eau libre %		25	-	> 5.9	2.9

Tableau (6) : Composition chimique du ciment classe G

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
%	20.2	3.77	4.92	64	1.77	2.65	0.41	0.61	1.40

Tableau (7) : Composition minéralogique du ciment classe G

Minéral	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur %	59	16	2	12



Figure (13) : sacs de ciment pétrolier (ciment G)

3. Effet du CemCRETE sur les propriétés physico-mécaniques et rhéologiques d'un laitier de ciment :

➤ Les différents essais au niveau du laboratoire :

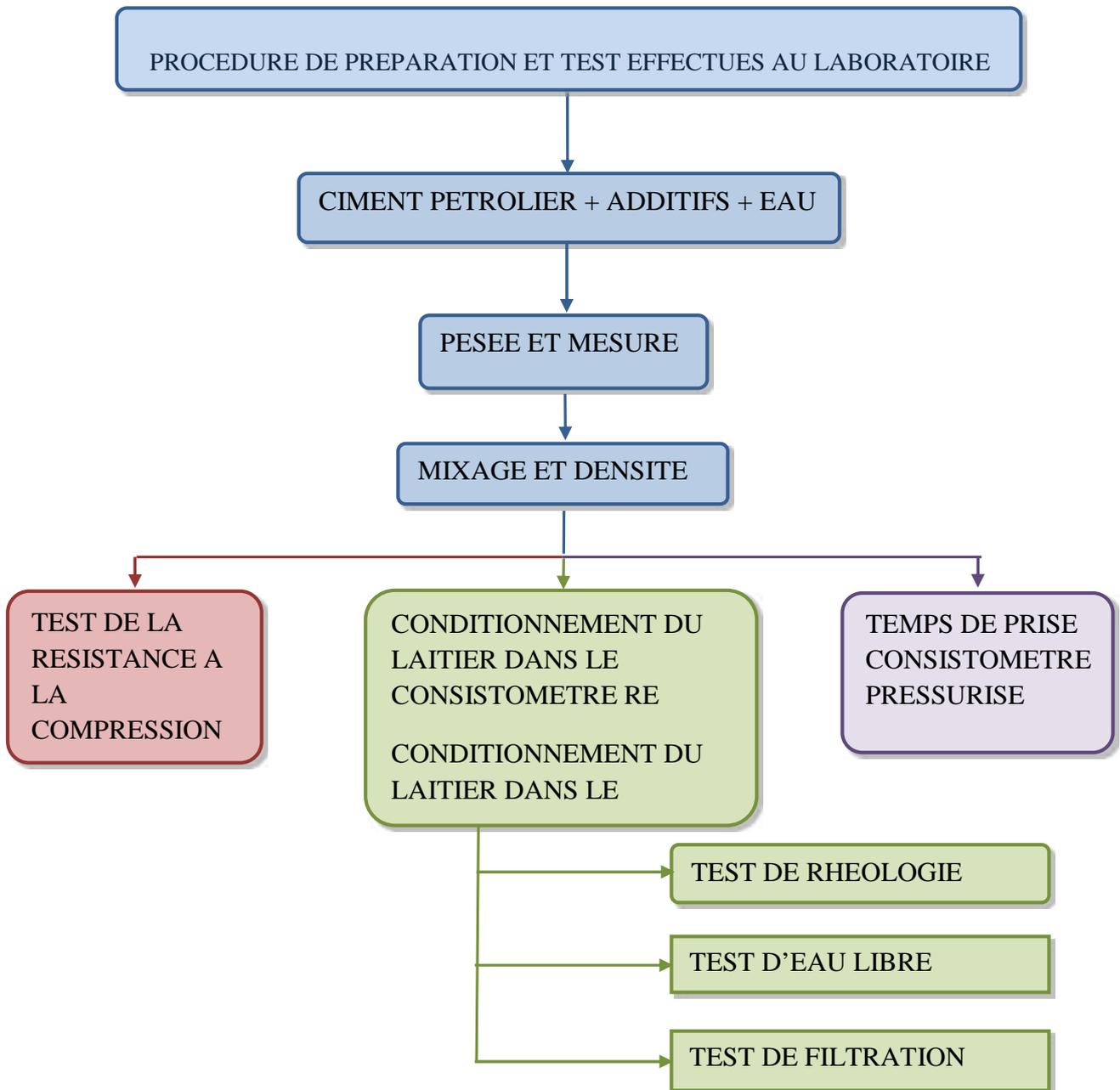
Avant de procéder à la mise en évidence du laitier qu'on a étudié et choisis comme colmatant des pertes lors de l'opération de cimentation, on doit savoir que les normes sont de l'**API** « **American Petroleum Institut** » et que les nomenclatures des additifs sont celle de la compagnie américaine **Schlumberger** au niveau de la région de **Hassi Messaoud**.

On a travaillé selon ces normes et utilisé l'appareillage suivant :

- ✓ Un mixeur pour constituer le laitier de ciment «blend ».
- ✓ Un densimètre pour confirmer que la densité calculer est correct.
- ✓ Un consistomètre atmosphérique pour conditionner le laitier de ciment afin de déterminer : l'eau libre, le filtrat et les paramètres rhéologiques.
- ✓ Un consistomètre pressuré HP-HT pour déterminer le temps de pompabilité dont il simule l'opération de cimentation.
- ✓ UCA (Ultrasonic Cement Analyser) : instrument qui nous prévient le développement de la résistance à la compression dans le temps.
- ✓ SGSA (Static Gel Strength Analyzer): instrument qui mesure le temps réel du développement de la force du gel de laitier de ciment.

➤ **Organigramme des essais :**

Les essais qu'on a effectués au laboratoire de **Schlumberger**, sont représentés sur le diagramme suivant :



➤ Préparation de l'échantillon :

Pour préparer notre échantillon ($V = 600$ ml) du laitier de ciment allégé avec de l'eau douce, il faut :

- ✓ Vérifier que les additifs et l'échantillon de mélange sont représentatifs de l'échantillon du terrain.
- ✓ Confirmer que tous les équipements sont étalonnés avant de commencer les tests.
- ✓ Peser la quantité requise du ciment ou mélange dans un récipient propre et sec.
- ✓ Peser la quantité requise des matériaux secs.
- ✓ Peser la quantité requise d'eau et des différents additifs liquides.
- ✓ Verser les quantités requises d'eau et des additifs liquides et solides dans la tasse du mélangeur.
- ✓ Mélanger les additifs dans l'ordre décrit dans la fiche du laboratoire.
- ✓ Tourner le mélangeur à 4000 tr/min +/- 250 tr/min pendant 15 sec minimum pour une bonne homogénéisation du mélange.
- ✓ Ajouter du ciment à un taux uniforme au mélangeur en moins de 15 secondes.
- ✓ Augmenter la vitesse du mélangeur à 12000 tr/min pendant 35 secondes. [6]



Figure (14) : Pesée du mélange LiteCRETE

Le tableau ci-dessous présente les différents composants et quantités de notre échantillon

Tableau (8) : Composants et quantités de l'échantillon

Code	Concentration (g)	Composant
Mélange LiteCRETE	487.348	/
Eau douce	221.790	Eau (H ₂ O)
D206	0.487	Anti-moussant
D500	49.22	Gasblok LT
D080A	4.834	Lien salé (NaCl)
D081	1.228	Retardateur
D185	2.522	Dispersant

➤ Densité

- Objectif de l'essai

La densité est un paramètre essentiel dans la cimentation des puits de pétrole, car dans les puits où les couches des formations sont fragiles et ne tolèrent pas des laitiers de ciment dense (alourdi), qui provoquera par la suite la filtration des laitiers de ciments à travers les fracturations. Il est donc nécessaire d'alléger le laitier de ciment afin de réduire la pression hydrostatique exercée sur les couches fragiles.

- Mode opératoire



Figure (15) : densimètre.

Le densimètre nous sert à tester la densité du laitier après sa préparation et l'opération s'effectue comme suit :

- ✓ Remplir le godet de laitier de ciment.
- ✓ Mettre le couvercle et évacuer l'excès de laitier qui sort du trou central.
- ✓ Placer le curseur jusqu'à ce que le bras soit horizontal, ce que l'on contrôle à l'aide d'un niveau à bulle incorporée dans le bras.
- ✓ Lire la densité sur le bras.

➤ Consistomètre atmosphérique

- Objectif de l'essai

Le principe du consistomètre atmosphérique est le même celui du consistomètre pressurisé, sauf que le premier consiste à simuler les conditions du puits en température et cela afin de déterminer :

- ✓ L'eau libre.
- ✓ Propriétés rhéologiques.
- ✓ Filtrat.



Figure (16) : consistomètre atmosphérique.

- **Mode opératoire**

Suite à la préparation du laitier de ciment on remplit soigneusement la cellule jusqu'au trait indiquant la capacité voulue. La coupelle de laitier insérée est fixée à la cellule par un système d'agrafes.

Le moteur est actionné, ainsi que le système de chauffage de l'huile, on mesure les caractéristiques après 20 min de conditionnement à la température désiré.

- **Eau libre**

- **Objectif de l'essai**

L'eau qui ne participe pas à l'hydratation du laitier de ciment, après le durcissement l'eau libre va être portée sur le laitier de ciment. Donc s'il y aura une quantité importante d'eau libre, on aura une partie du puits non cimenté, ce qui va menacer exploitation et la durabilité du puits.

Cet essai sert à voir le volume d'eau libre qu'on aura après le durcissement du laitier de ciment.

- **Mode opératoire**

Le laitier de ciment conditionné dans le consistomètre atmosphérique à 27° C pendant 20 min. à sa sortie on le remixe pendant 35s à une vitesse de rotation élevée.

On remplit une éprouvette gradué de 250 ml et après 2 heures de repos on lit le volume d'eau libre.



Figure (17) : laitier de ciment dans l'éprouvette gradué

➤ **Paramètres rhéologiques**

• **Objectif de l'essai**

Cet appareil permet de déterminer les caractéristiques rhéologiques du laitier de ciment qui sont :

- ✓ Viscosité plastique.
- ✓ Yield value.
- ✓ Le gel 0 après 10 secondes et gel 10 après 10 minutes

• **Principe de travail du rhéomètre (Rhéomètre ou viscosimètre de FANN)**

C'est un appareil à cylindres coaxiaux dont le rotor est entraîné par un moteur électrique, on mesure la résistance au cisaillement du laitier contenu dans le godet dont lequel on immerge les cylindres coaxiaux. On lit directement sur le cadran gradué la résistance au cisaillement à différentes vitesses de rotation du rotor.



Figure (18) : rhéomètre de FANN

- **Mode opératoire**

Après la préparation du laitier et son conditionnement dans le consistomètre atmosphérique, on remplit le godet du rhéomètre, on immerge les deux cylindres jusqu'à ce que le repère du rotor effleure la surface du laitier.

- ✓ **Viscosité plastique V_p**

$$V_p = (\text{lecture } 300 \text{ tr/min} - \text{lecture } 100 \text{ tr/min}) \times 1.5 \text{ (centiPoise)}$$

- ✓ **Yield value**

$$Y_v = \text{lecture } 300 \text{ tr/min} - V_p \quad (\text{lbf}/100\text{ft}^2)$$

➤ **Filtrat (Fluide Loss)**

• **Objectif de l'essai**

Lors de cimentations complémentaires sous pression. En effet, le laitier de ciment se déshydrate très rapidement sous pression, ce qui provoque une prise rapide au début d'opération avant qu'on ait eu le temps de mettre le ciment en place et dans les conditions désirées. Lors de cimentations primaires, lorsqu'on veut éviter une déshydratation du laitier en face de zones très perméables ou s'il y a risque d'endommagement de la zone productive par le filtrat.

Le filtre presse, permet de déterminer la filtration du laitier de ciment. La filtration se rencontre, en zone perméables.

Le réducteur de filtrat a pour effet d'augmenter la viscosité du laitier et donc de réduire la filtration d'eau de gâchage vers les parois de la couche. Après déshydratation, le laitier de ciment passe à l'état de transition, dans lequel existe une certaine perméabilité avant le durcissement.

Dans un laitier de ciment contenant un réducteur de filtrat, la perméabilité est très basse pendant l'état de transition vers l'état solide.



Figure (19) : Filtre presse



Figure (20) : cellule de filtrat

- **Mode opératoire :**

Après le conditionnement à la température d'opération au consistomètre atmosphérique, on verse le laitier dans une cellule muni d'un tamis et porter initialement à la température d'opération. La cellule est ensuite placée dans le système de chauffage.

On effectue la filtration à la pression 1000 psi pendant 30 minutes. La filtration du laitier de ciment est mesurée comme celle de la boue de forage en utilisant le filtre presse API à la température ambiante, sous 7 bars (1000 psi) où le filtre presse haute température et haute pression, standardisé lorsque l'on veut simuler les conditions du fond.

- **Temps de pompabilité**

- **Objectif de l'essai**

Le temps de pompabilité représente le temps nécessaire pour la réalisation de l'opération de cimentation, il est contrôlé par l'ajout des retardateurs ou accélérateurs de prise.

- **Principe de travail du Consistomètre pressurisé**

Après avoir déterminé l'eau libre, les caractères rhéologiques, on détermine le temps de pompabilité. Le temps de pompabilité du laitier de ciment est mesuré à l'aide du Consistomètre pressurisé HP-HT. C'est un appareil normalisé par API, reproduisant les variations simultanées de température et de pression rencontrés dans le puits. Le temps de pompabilité est le laps de temps maximum pendant lequel le laitier est pompable.



Figure (21) : Consistomètre pressurisé

- **Mode opératoire**

Le laitier de ciment est contenu dans un cylindre maintenu en rotation à 150 tr/min, au centre de ce cylindre se trouve un axe porteur de palette. Celui-ci est soumis à un couple d'entraînement d'autant plus important que la viscosité du laitier augmente, un rhéostat couplé sur l'axe permet de donner une lecture et un enregistrement de la consistance. Il s'exprime en unité de consistance (UC), ce consistomètre est conçu de telle sorte que le laitier peut être soumis à des variations conjointes de température et de pression, afin de permettre la simulation des conditions de pompage dans le puits.

On remplit la cellule de laitier de ciment après l'opération de mixage, on place la cellule dans le puits, puis le potentiomètre qui permet de mesurer la consistance du laitier. On ferme le puits du consistomètre.

En plaçant le thermocouple qui permet de suivre la température du puits et celle du laitier, l'opération se termine quant la consistance du laitier atteint 100 UC, c'est ce que l'on appelle temps de pompabilité ou temps de prise du laitier de ciment.

Le temps de pompabilité d'un laitier est principalement influencé par la température et la pression.

❖ La température du puits de forage

Son effet sur un laitier de ciment est le plus remarquable, à mesure que la température s'accroît, l'hydratation du ciment s'accélère et la viscosité augmente. On distingue deux types de température :

- ✓ La température statique du fond (**Bottom Hole Static Temperature BHST**) : C'est la température atteinte au fond du puits après sa fermeture pendant un laps de temps suffisamment long pour refléter la température ambiante de la formation.
- ✓ La température de circulation du fond (**Bottom Hole Circulating Temperature BHCT**) : C'est la température d'un fluide au fond du puits en cours de circulation. Celle-ci est toujours inférieure à la température statique à cette même profondeur, on raison du refroidissement créer par le fluide circulé.

❖ La pression du puits de forage

Bien que son effet soit moins prononcé, l'augmentation de la pression a tendance à réduire le temps de pompabilité d'un laitier donné. Pour tout laitier, les effets simultanés de la pression et de la température réduisent le temps de pompabilité en fonction de la profondeur.

Le temps de pompabilité ainsi déterminé doit être supérieur au temps minimal moyen nécessaire pour la mise en place du volume de laitier à la profondeur désirée.

➤ **Résistance à la compression**

- **Principe de travail du Consistomètre pressurisé Ultrasonic Cement Analyzer (UCA)**

Il s'agit de déterminer la résistance à la compression par UCA qui consiste à la propagation d'onde à travers le laitier dans les conditions réelle du puits après 24 heures.



Figure (22) : Ultrasonic Cement Analyser UCA.

- **Mode opératoire**

On prépare Le laitier de ciment à tester suivant la norme API, on le verse dans une cellule placée dans le puits de l'appareil qu'on la règle à la pression et température des puits de forage pour arriver aux conditions de ce dernier à étudier.

➤ **Filtration des gaz**

- **Static Gel Strength Analyzer (SGSA):**

La filtration des gaz se passe à la phase de transition du laitier de ciment de l'état liquide à l'état solide, c'est-à-dire la phase intermédiaire liquide → solide, (gel du laitier de ciment).

Pour éviter ce problème, nous avons introduit dans notre laitier de ciment l'additif **GASBLOK** qui accélère la transition de ce dernier de l'état liquide vers l'état solide, alors ce teste il s'agit de suivre ce temps de transition à l'aide de la **SGSA**, son principe de travail est le même que la UCA, qui consiste à la propagation d'onde à travers le laitier.

Suivant la norme API, le temps de transition est obtenu en fonction de l'augmentation de la résistance du laitier de 100 à 500 **psi**.

(La norme API $T_{\text{transition}} < 45 \text{ min}$).



Figure (23): Static Gel Strength Analyzer (SGSA).

- **Mode opératoire:**

On a préparé le laitier de ciment suivant la norme API, on le verse dans une cellule et la place dans le puits de l'appareil qu'on la règle à la pression et température des puits de forage pour arriver aux conditions de ce dernier à étudier.

Chapitre II :

Résultats et discussions

Nous allons présenter dans ce chapitre les résultats et l'analyse des différents essais effectués durant notre stage sur les laitiers de ciment traditionnels et celles de la technologie CemCRETE confectionnés sous les mêmes conditions du puits de pétrole à cimenter.

➤ Densité

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau (9) : résultats des densités des différents laitiers de ciment

VARIANTES	BENTONITE	LITECRETE	GASBLOK
DENSITE	1.58	1.30	1.90

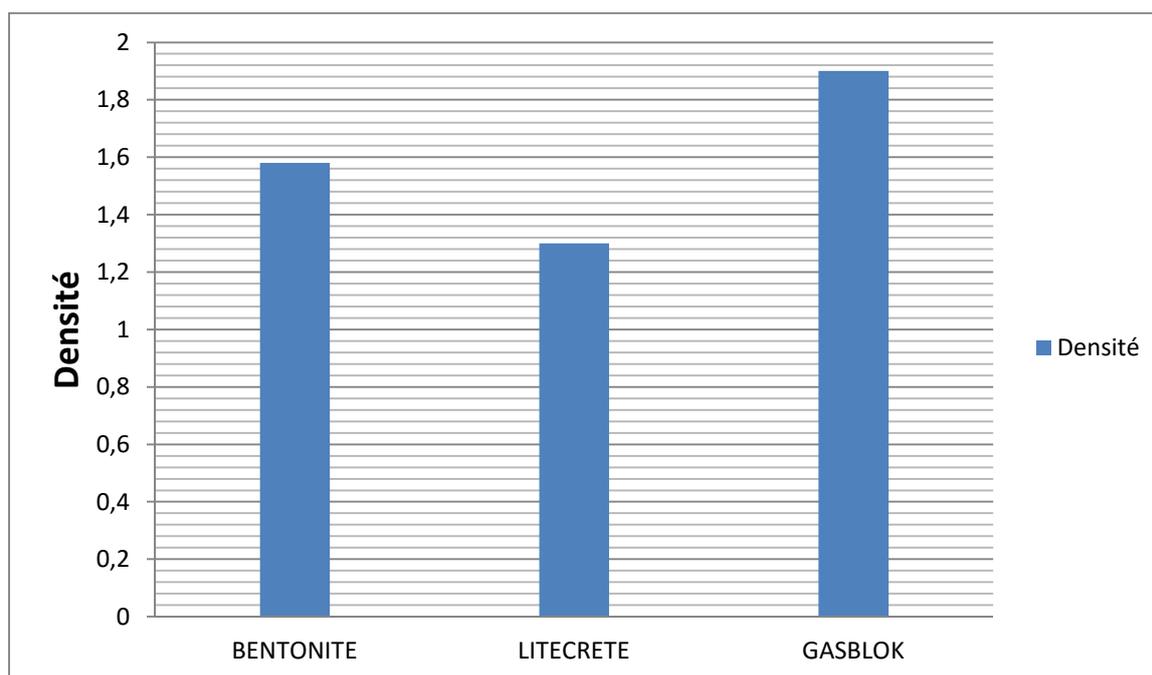


Figure (24) : Présentation des densités des différents laitiers de ciments utilisés

❖ Constat :

D'après les tests on constat que les résultats répondent aux normes **API**. On distingue que le laitier de ciment LiteCRETE est plus favorable comme laitier de tête pour la cimentation vu que les couches de formation sont fragiles, cela est dû à sa faible densité (moins de 17% par rapport au laitier de ciment Bentonitique). Afin de réduire la pression hydrostatique exercée sur ces couches.

➤ Eau libre

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau (10) : volume d'eau libre obtenu

VARIANTES	Bentonite	LiteCRETE	GASBLOK
Eau libre (ml)	0.5	0	0

❖ Interprétation des résultats:

D'après les résultats on constat que le volume d'eau libre du laitier bentonitique est sensiblement élevé, cela est expliqué par la perte des propriétés de gonflement de bentonite en présence de sel. Par contre dans le laitier de ciment LiteCRETE et le laitier de ciment "GASBLOK le volume est nul, cela est dû à la participation de toute la quantité d'eau de gâchage à l'hydratation, donc il n'y a pas d'eau en excès. Le laitier LiteCRETE et le Ciment "GASBLOK" donnent d'excellente résultats par rapport au laitier allégé par la bentonite.

La quantité d'eau libre diminue aussi avec ajout des différentes concentrations d'allégeant, ceci est dû à l'adsorption d'eau en excès qui ne participe pas à l'hydratation du ciment (cas de la bentonite).

➤ Paramètres rhéologique

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau (11): variation des paramètres rhéologiques en fonction des additifs.

VARIANTES	Vp (cps)	Yv (lbf/100ft ²)	GEL 0	GEL 10
BENTONITE	28.9	21.10	9	17
LiteCRETE	95.9	15.53	10	23
GASBLOK	90.7	26.18	9	23

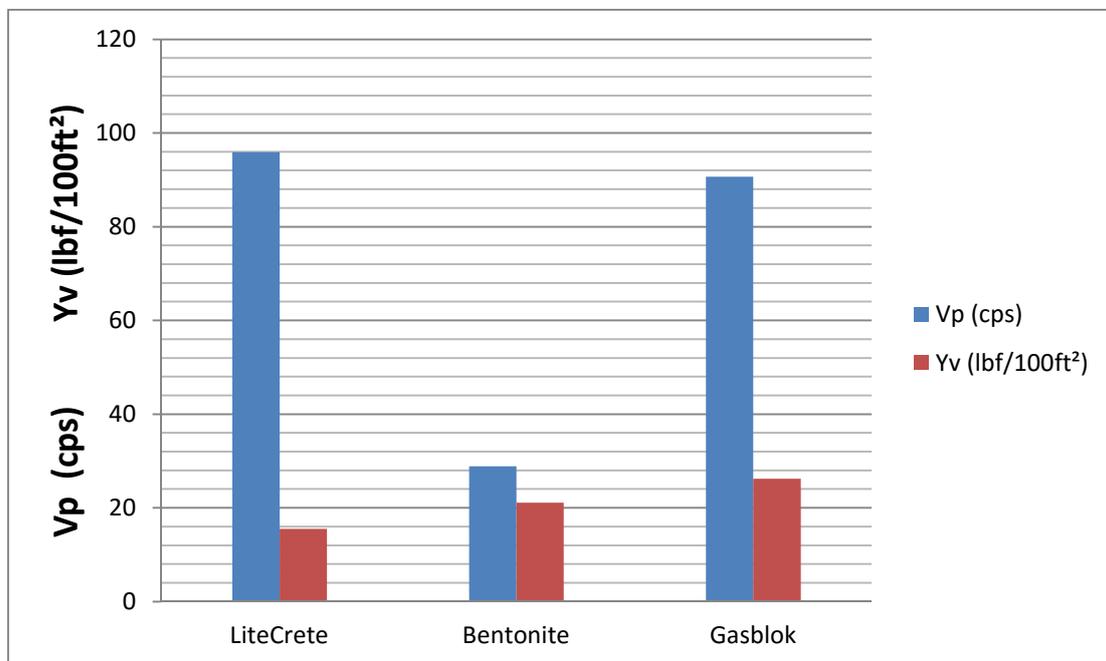


Figure (25) : Présentation des paramètres rhéologiques : Viscosité plastique (vp) et Yield Value (Yv), des différents laitiers de ciments utilisés

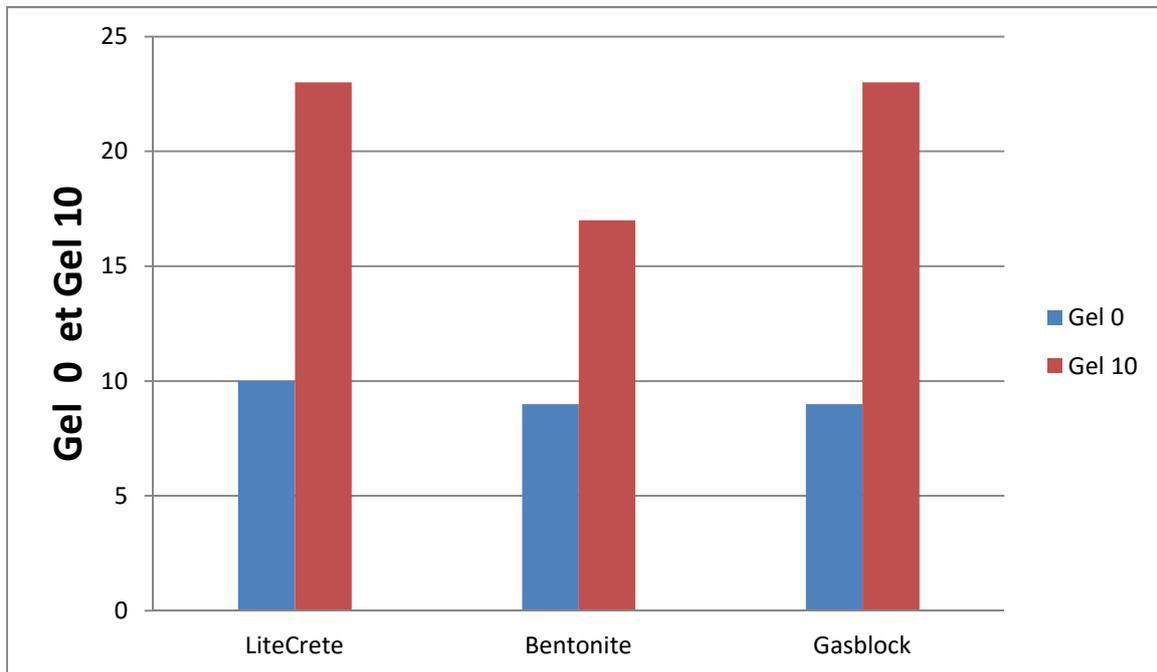


Figure (26) : Présentation des paramètres rhéologiques : Gel 0 et Gel 10, des différents laitiers de ciments utilisés

❖ Interprétation des résultats

On remarque que le laitier de ciment LiteCRETE et GASBLOK donnent de bons paramètres rhéologiques, elles sont conformes aux propriétés de la boue de forage.

Notant que le laitier de ciment allégé par la bentonite donne des paramètres rhéologiques très faibles. Mais elles sont acceptables pour la cimentation du puits de pétrole.

Pour améliorer les propriétés rhéologiques d'un laitier de ciment on ajoute un additif dispersant, qui diminue les propriétés rhéologiques.

➤ Filtrat (Fluide Loss)

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau (12) : résultats du filtrat obtenu.

Variantes	Bentonite	LiteCRETE	GASBLOK
Filtrat (ml)	98	24	22

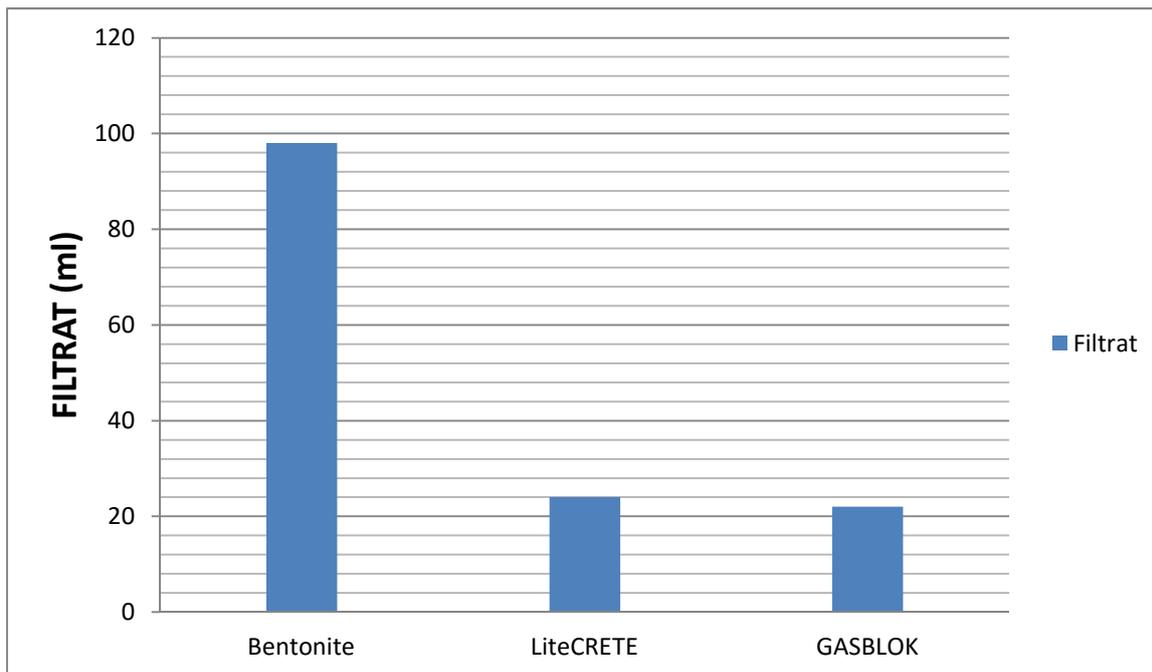


Figure (27) : présentation du filtrat obtenu des différents laitiers de ciment utilisés.

❖ Constat :

On constate que le LiteCRETE et GASBLOK donne de très bons résultats, tandis que le filtrat du laitier de ciment allégé par la bentonite est très élevé (près de 76% de celle du LiteCRETE et GASBLOK). Cela est dû à la fragilité de la bentonite du coup avec la force appliquée sur elle, la bentonite perd l'eau qu'elle a absorbée. La porosité importante du laitier allégé par la bentonite (77% par rapport au LiteCRETE et GASBLOK qui est à 40%) accélère et facilite la perte de cette quantité d'eau.

➤ Temps de pompabilité

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau (13): effet de la CemCRETE sur le temps de prise.

Additifs	Bentonite	LiteCRETE	GASBLOK
40 uc (h : mn)	05h : 00 mn	04h : 58 mn	04h : 00 mn
100 uc (h : mn)	07h : 27 mn	05h : 18 mn	04h : 21 mn

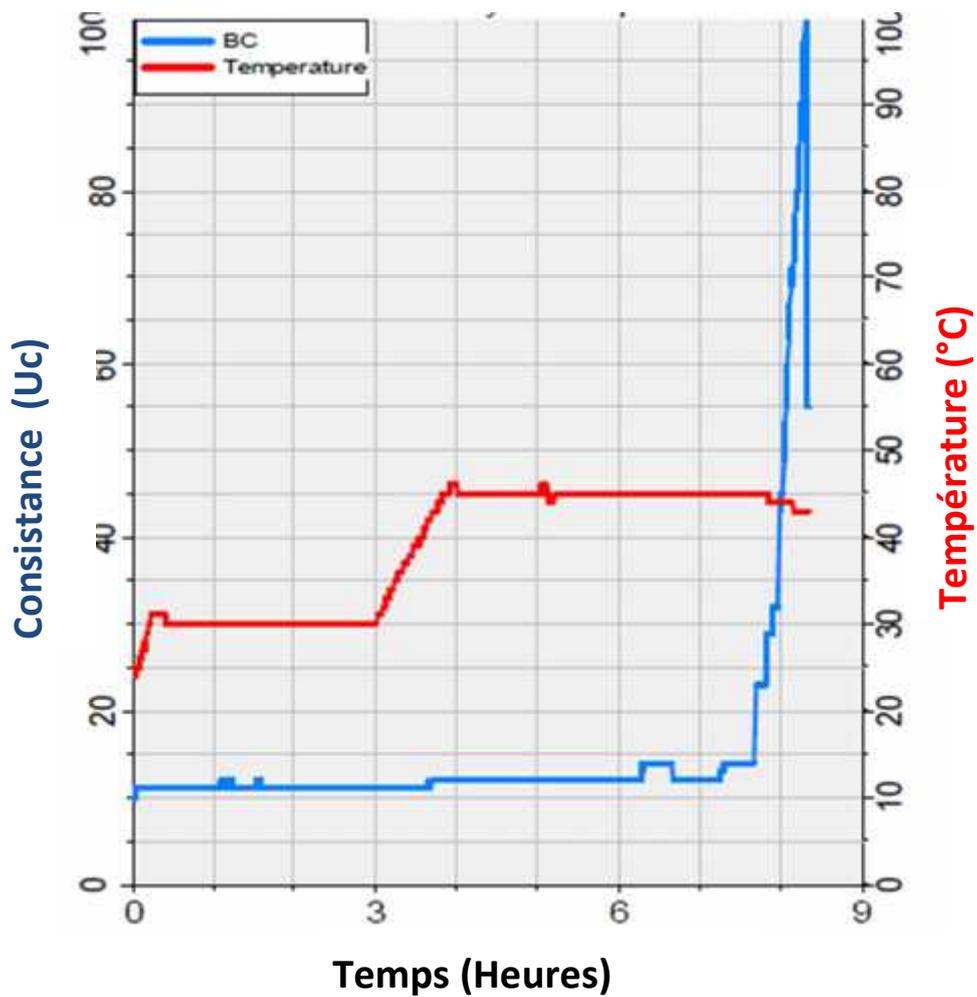


Figure (28) : Présentation du temps de pompabilité du LiteCRETE

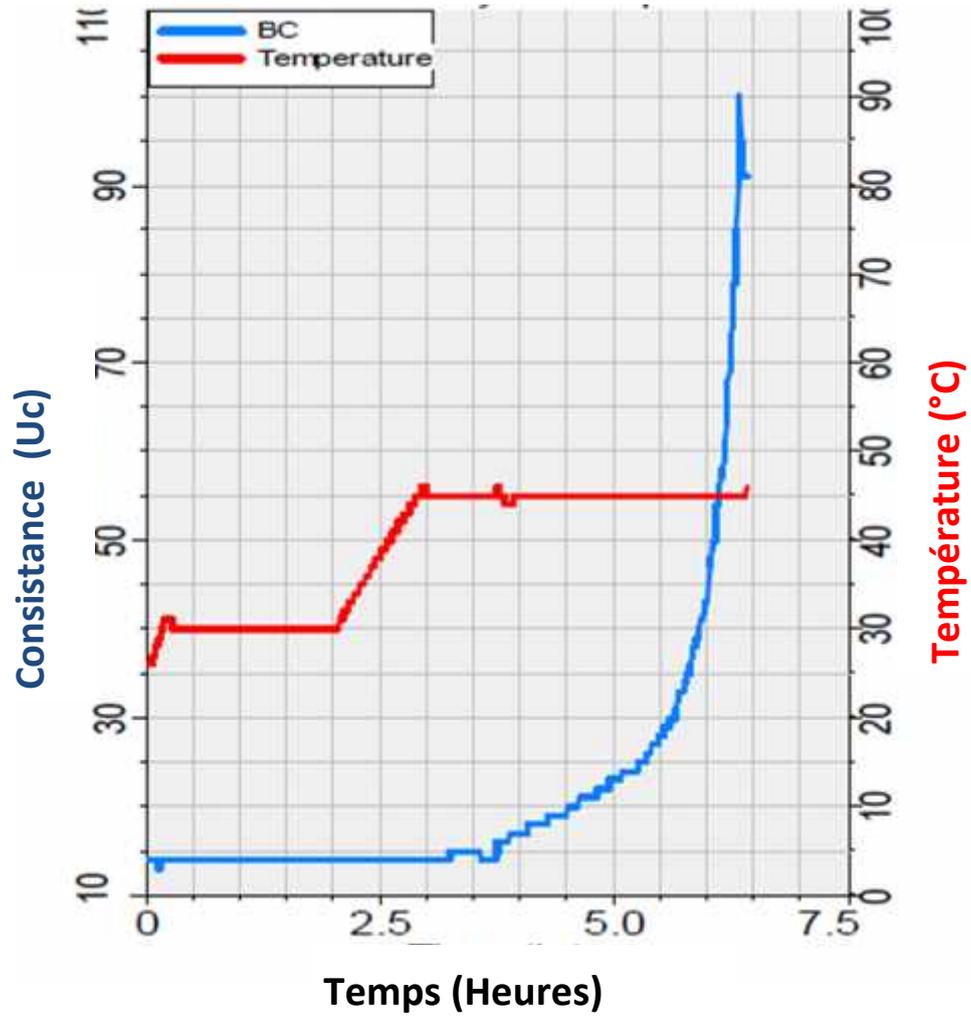


Figure (29) : Présentation du temps de pompabilité du GASBLOK

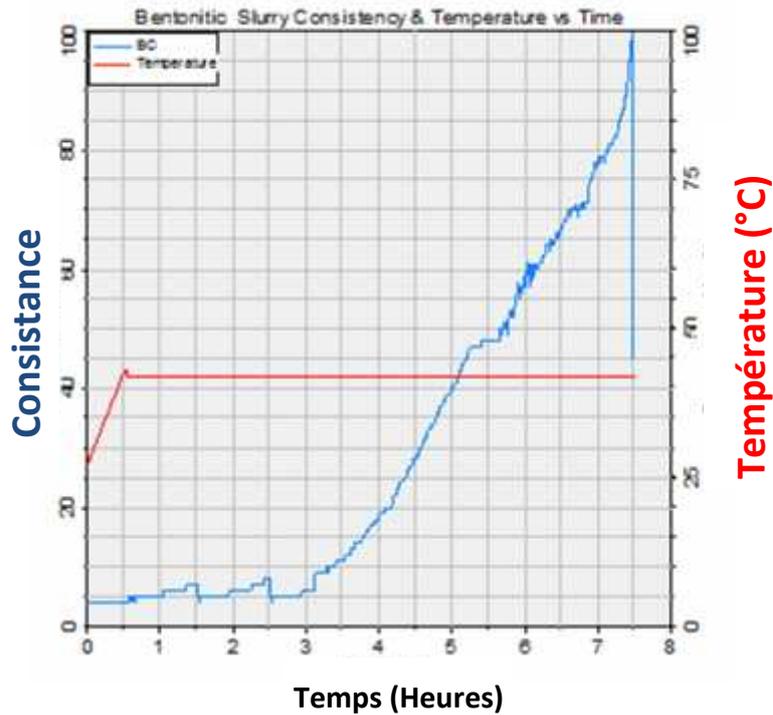


Figure (30) : Présentation du temps de pompabilité du laitier allégé par la bentonite.

❖ Constat :

D’après les résultats des différentes testes on constat que le temps de pompabilité qui représente le temps nécessaire pour la réalisation de l’opération de cimentation est contrôlé par l’ajout des retardateurs ou accélérateurs de prise. Les résultats obtenus sont bonne et conforme selon la norme **API (Tp > 90 min)**. La CemCRETE influe sur le temps de pompabilité et la prise du laitier de ciment et le diminue, donc c’est un gain du temps et financiers (prix de revient du projet).

➤ Résistance à la compression

Les résultats obtenus sont regroupé dans le tableau suivant :

Tableau (14) : effet de la CemCRETE sur la résistance à la compression.

Variantes	Bentonite	LiteCRETE	GASBLOK
Résistance à la compression (psi)	435	2573	4131

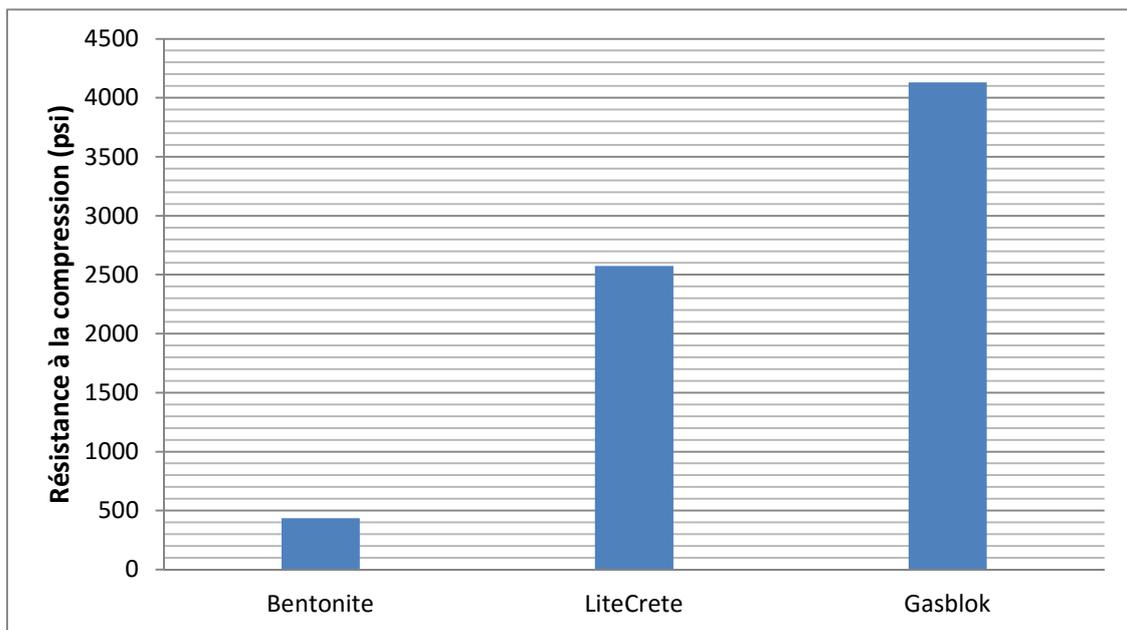


Figure (31) : Présentation des résultats des résistances à la compression des différents laitiers de ciments.

❖ **Interprétation des résultats :**

On constate que la résistance à la compression du laitier allégé par la bentonite est très faible par rapport aux laitiers de la CemCRETE, cela est dû au pourcentage élevé de particules solide et à la diminution du rapport E/C dans les laitiers de la CemCRETE et un pourcentage faible de perméabilité (porosité faible) de ces derniers. La résistance à la compression est essentielle pour l'isolement des zones fragiles et le support des casings comme objectifs de la cimentation.

➤ **Filtration des gaz**

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau (15) : temps de transition du laitier de ciment.

Variante	LiteCRETE	GASBLOK
100 psi	8 :14 h : mn	4 :05 h : mn
500 psi	8 :28 h : mn	4 :16 h : mn
Temps de Transition	14 minutes	11 minutes

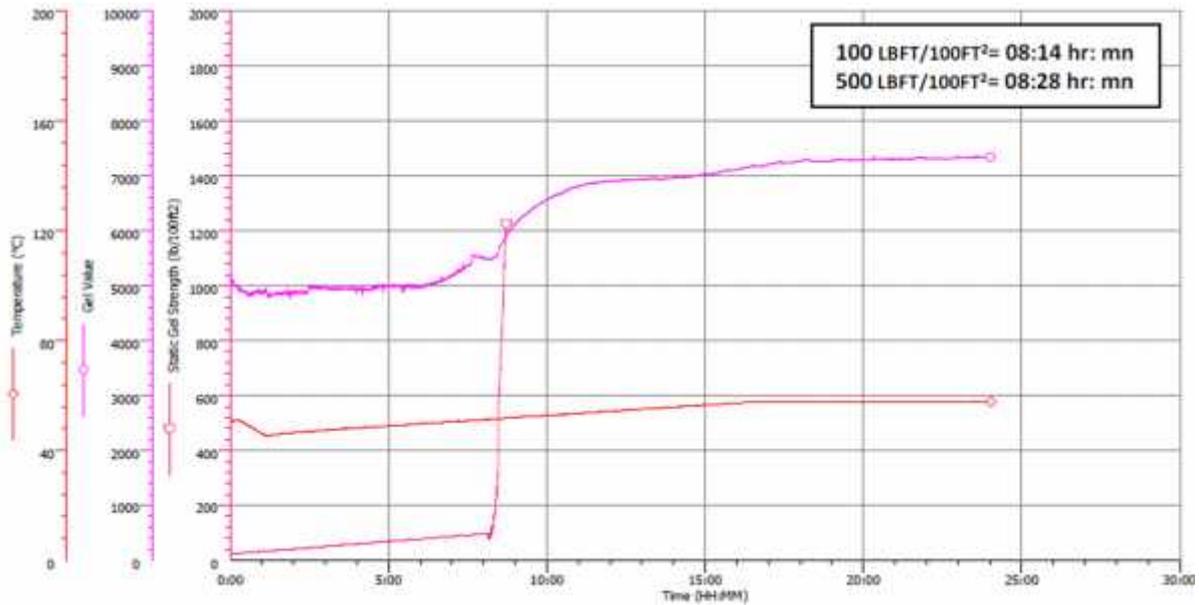


Figure (32) : évolution de la résistance à la compression du LiteCRETE de 100 à 500 psi en fonction du temps.

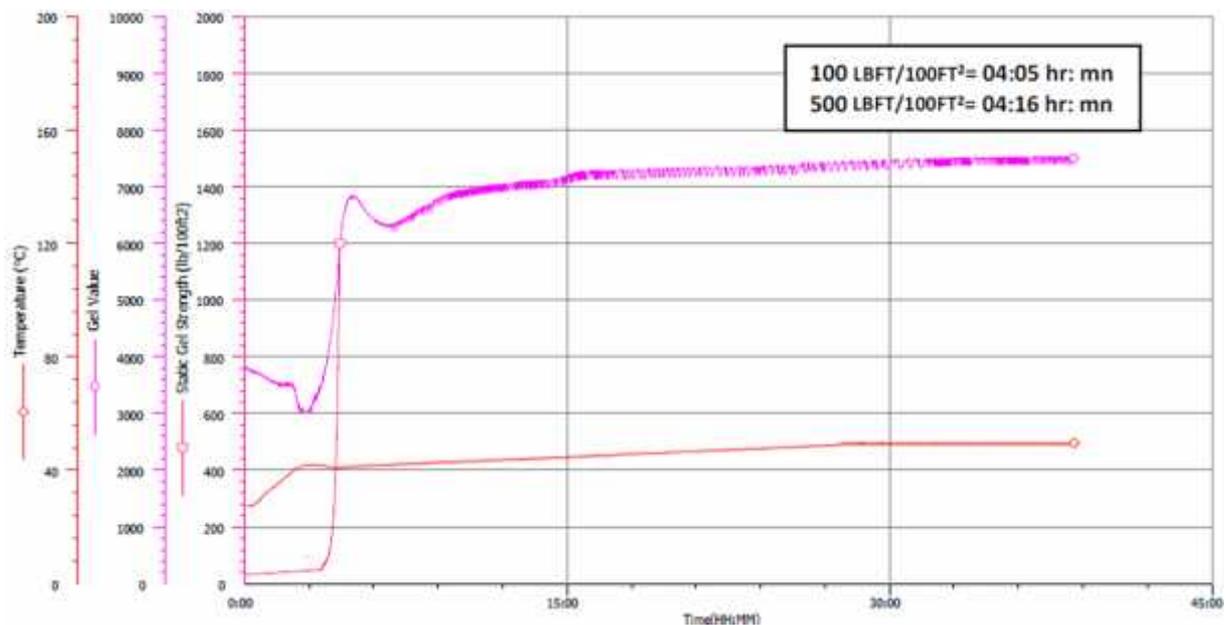


Figure (33) : évolution de la résistance à la compression du GASBLOK de 100 à 500 psi en fonction du temps.

❖ **Constat :**

D'après les résultats on constat qu'ils sont excellents et répondent à la norme API, le temps de transition et rapide, donc on évitera le risque de filtration des gaz.

Conclusion générale

Conclusion générale

La cimentation des puits de pétrole rencontre d'énormes problèmes vu les conditions des puits entre autres : pression, température, structure géologique des formations...etc.

De nouvelles recherches en cimentation de puits ont permis de redéfinir la performance du coulis de ciment et de mettre au point de nouveaux matériaux. En redéfinissant ces performances, on peut maintenant influencer l'architecture du puits, le coût et la viabilité de certains projets qui n'étaient pas sûr de réussir avec l'emploi seul des laitier de ciment traditionnels.

La technologie CemCRETE est basée sur l'optimisation des types, nombre et taille des particules dans ces nouveaux ciments, donc elle est très versatile. Par exemple, des ciments plus légers et de bonne qualité d'isolation permettent d'effectuer des cimentations en un seul étage, des ciments denses très versatiles atteignent de très fortes résistances. Les ciments légers pour faibles températures prennent plus vite, et les ciments de réparation s'injectent plus facilement.

D'une manière générale avec le système LiteCRETE (système de la CemCRETE) on peut avoir les avantages suivants :

- ✓ Elimination du DV, signifie éliminant une source importante pour des fuites dans la colonne, de ce fait réduisant la fréquence de workover.
- ✓ Les propriétés de laitier de ciment LiteCRETE fournissent un cycle de vie bon accru si comparé aux systèmes prolongés conventionnels.
- ✓ Avoir la bonne intégrité de liaison de la colonne et de ciment réduira au minimum l'échec, par conséquent réduisant au minimum les dommages environnementaux à l'eau souterraine.
- ✓ Chaque travail devrait être conçu a basé sur des données réelles de pression de réservoir pour éviter des problèmes de stabilité.

Notre étude au laboratoire de **Schlumberger** s'est basée sur deux points :

- ✓ Ciment Lafarge class « G » HSR.
- ✓ Effet de la CemCRETE sur les propriétés des laitiers de ciment utilisés pour la cimentation du casing 9 5/8" du puits de pétrole GMD-8 de Haoud Berkawi.

Selon les différents tests qu'on a réalisé au laboratoire, et suite à l'étude comparative des laitiers de ciment allégés utilisés pour la cimentation du casing 9 5/8", nos résultats nous ramènent à conclure que la CemCRETE offre la meilleure solution pour la cimentation des puits avec de biens meilleurs performances : excellente résistance à la compression, faible porosité et moins de perméabilité et à faible densité dont un intérêt technico-économique satisfaisant.

Bibliographie

- 1- Mémoire de fin d'étude de Rahla Kamel 2016.
- 2- Mémoire de fin d'étude de Haltim Adel 2010.
- 3- Livre du forage et cimentation de SONATRACH.
- 4- Livre Forages géothermiques au Dogger en Île-de-France, réalisation et contrôle des cimentations.
- 5- Mémoire de fin d'étude de Kechache Hamada 2012 univ de Ouargla.
- 6- Manuel de procédure laboratoire de Schlumberger.

Laboratory Cement Test Report GASBLOK

Fluid No : HAL17_0550_002	Client : JV GAS	Location / Rig : T-222
Date : Mar-26-2017	Well Name : GMD-8	Field : GMD

Signatures	
Alessandra	
Zoubir/Hicham	

Job Type	9 5/8" Casing	Depth	1000.0 m	TVD	1000.0 m
BHST	70 degC	BHCT	45 degC	BHP	2000 psi

Composition

Slurry Density	1.90 SG	Yield	790.09 L/tonne	Mix Fluid	461.76 L/tonne
Solid Vol. Fraction	41.6 %	Porosity	58.4 %	Slurry type	Conventional

Code	Concentration	Component	Mixing time	Lot Number
G-L		Cement		10/28/2017
Fresh water	334.76 L/tonne	Base Fluid		
1-D206	2.000 L/tonne	Antifoam	5min	2Q00006539
2-D080A	7.000 L/tonne	SALTBOND II	20min	B1301922700
3-D185	3.000 L/tonne	Dispers. LT	20min	15224
4-D500	105.000 L/tonne	GASBLOK LT	20min	CY62813094
5-D081	1.000 L/tonne	Retarder	20min	CP150211

Rheology

Temperature (rpm)	27 degC			45 degC		
	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)
300	118.0	118.0	118.0	104.0	104.0	104.0
200	86.0	83.0	84.5	72.0	69.0	70.5
100	58.0	54.0	56.0	57.0	54.0	55.5
60	49.0	45.0	47.0	37.0	36.0	36.5
30	36.0	32.0	34.0	31.0	27.0	29.0
6	24.0	21.0	22.5	23.0	20.0	21.5
3	15.0	12.0	13.5	13.0	10.0	11.5
10 sec Gel				9		
10 min Gel				23		
Rheo. computed	Viscosity : 90.7 cP Yield Point : 26.18 lbf/100ft2			Viscosity : 83.0 cP Yield Point : 20.70 lbf/100ft2		

Thickening Time

Consistency	Time
Remark : Thickening time do not include batch time	
60 Bc	04:11 hr:mn
80 Bc	04:14 hr:mn
100 Bc	04:21 hr:mn
Batch Mix Time : 02:00 hr:mn at 27 degC	

Free Fluid

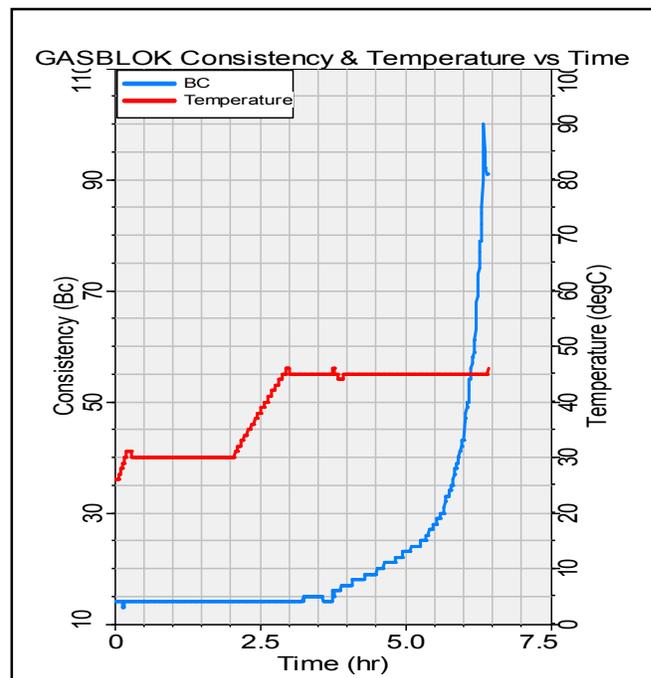
0.0 mL/250mL in 2 hrs
At 27 degC and 0 deg incl
Sedimentation : None

Fluid Loss

API Fluid Loss 22 mL
In 30 min at 45 degC and 1000 psi

Comments

Sampling:
- Rig water [Cl]= 278 mg/L (03/03/2017)
- Base 2 Cement, GO NO GO methode used
- The mixing order as per the design above



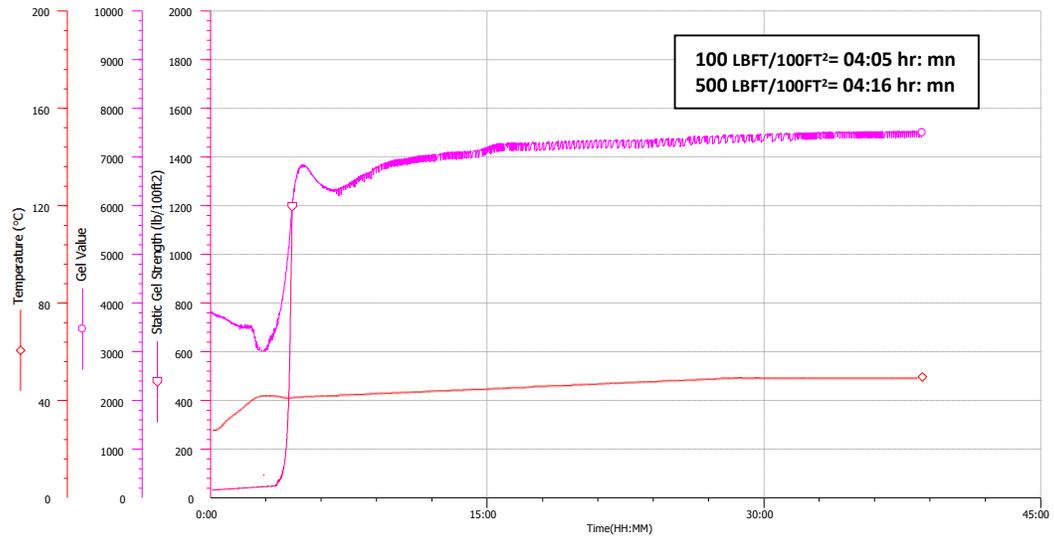
Client :
Formation :
Country :

Well :
District :

Instrument: NEW SGSA 735
Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 lb/gal)
Comments:

Test Start: 3/10/2017 5:04:42 AM
Algorithm: Static gel strength

Test Stop: 3/11/2017 7:40:09 PM



Client :
Formation :
Country :

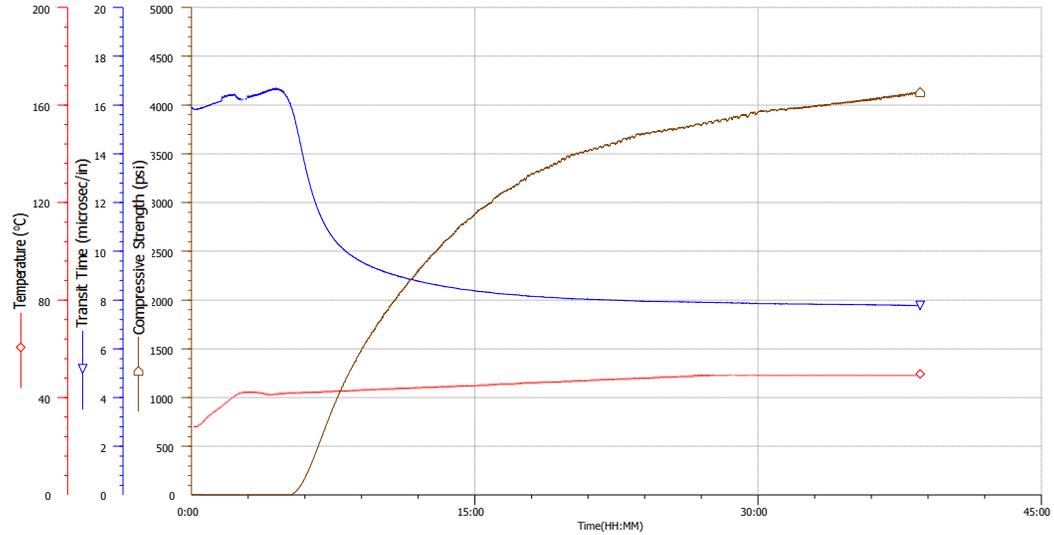
Well :
District :



Instrument: NEW SGSA 735
Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 lb/gal)
Comments:

Test Start: 3/10/2017 5:04:42 AM
Algorithm: Static gel strength

Test Stop: 3/11/2017 7:40:09 PM



CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: GMD -8_GASBLOK_1.SG@50C.tst
Printed: 3/11/2017 11:32:13 AM

Page 1

APPROVED-BP
By Zoubir Rahmani at 11:41, Mar 11, 2017

UCA Test Results

Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 lb/gal)
Initial Transit Time: 15.91 microsec/in
Final Transit Time: 7.77 microsec/in
50 psi Time: 5:36:00
500 psi Time: 6:43:00
Final Strength: 4131 psi

Laboratory Cement Test Report LiteCRETE CONFIRMATION TEST

Fluid No : HAL17_0711_001	Client : JV GAS	Location / Rig : KCA T-222
Date : Mar-24-2017	Well Name : GMD-8	Field : GMD

Signatures
Alessandra
Zoubir/Oussama

Job Type	9 5/8" Casing	Depth	1000.0 m	TVD	1000.0 m
BHST	70 degC	BHCT	45 degC	BHP	2000 psi

Composition

Slurry Density	1.30 SG	Yield	1231.15 L/tonne	Mix Fluid	572.48 L/tonne
Solid Vol. Fraction	53.5 %	Porosity	46.5 %	Slurry type	LiteCRETE

Code	Concentration	Component	Mixing time	Lot Number
BLD_LiteCRET		Blend		BN: 80-X
Fresh water	456.33 L/tonne	Base Fluid		
D206	1.000 L/tonne	Antifoam	5min	2Q00006539
D500	100.00L/tonne	GASBLOK LT	20min	CY62813094
D080A	8.000 L/tonne	SALTBOND II	20min	FAB1200043
D185	5.000 L/tonne	Dispers. LT	20min	15224
D081	2.000 L/tonne	Retarder	20min	CP150211

Rheology

Temperature (rpm)	27 degC			45 degC		
	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)
300	110.0	110.0	110.0	144.0	144.0	144.0
200	82.0	78.0	80.0	125.0	121.0	123.0
100	52.0	48.0	50.0	91.0	84.0	87.5
60	40.0	36.0	38.0	48.0	46.0	47.0
30	23.0	18.0	20.5	29.0	24.0	26.5
6	14.0	11.0	12.5	15.0	13.0	14.0
3	12.0	8.0	10.0	10.0	7.0	8.5

10 sec Gel		10
10 min Gel		23

Rheo. computed	Viscosity : 95.9 cP Yield Point : 15.53 lbf/100ft2	Viscosity : 141.7 cP Yield Point : 19.29 lbf/100ft2
----------------	--	---

Thickening Time

Consistency	Time
Remark : Thickening time do not include batch time	
40 Bc	04:58 hr:mn
80 Bc	05:08 hr:mn
100 Bc	05:18 hr:mn
Batch Mix Time : 03:00 hr:mn at 30 degC	

Free Fluid

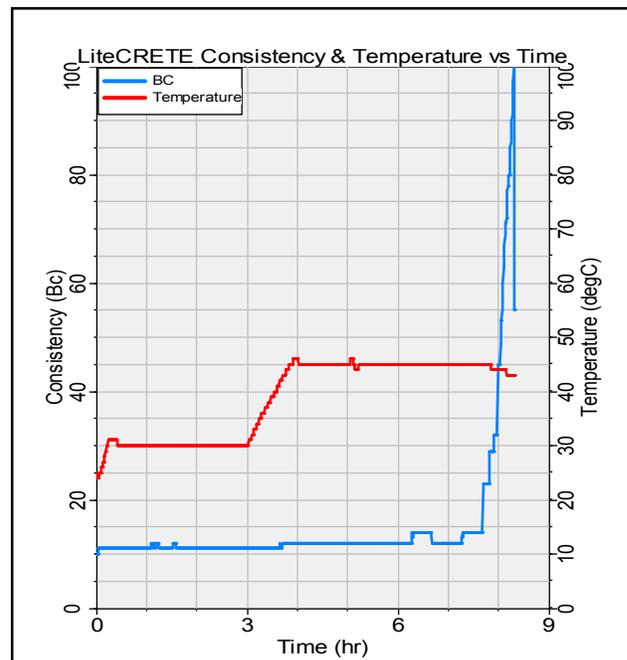
0.0 mL/250mL in 2 hrs
At 27 degC and 0 deg incl
Sedimentation : None

Fluid Loss

API Fluid Loss 24 mL
In 30 min at (degC) and (psi)

Comments

Sampling:
<ul style="list-style-type: none"> Rig water [Cl]= 278 mg/L (03/03/2017) Rig Blend QC= 1.30SG BN: 80-X The mixing order as per the design above
GO-NO-GO test used (2hr on, 10min off)



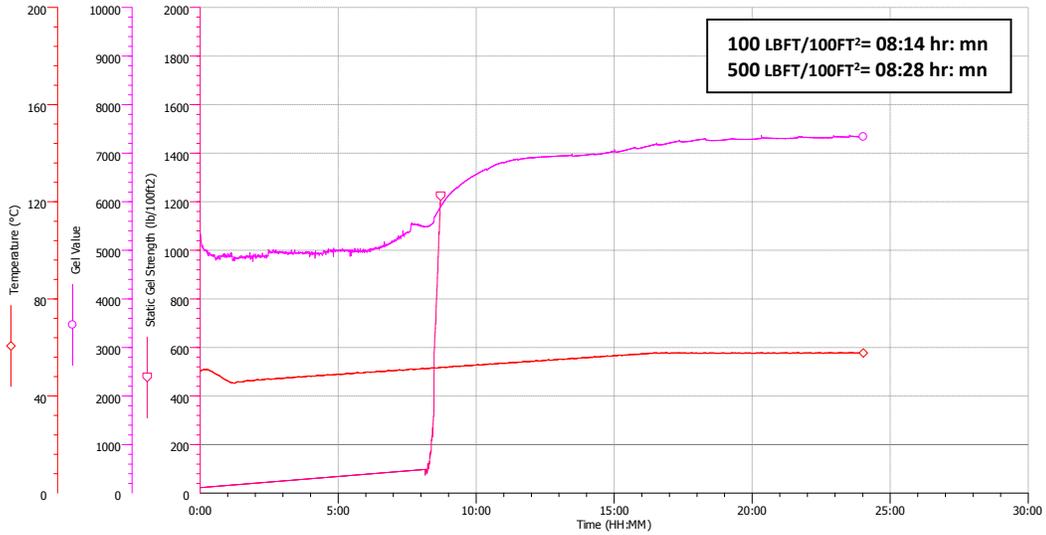
Client :
Formation :
Country :

Well :
District :

Instrument: NEW SGSA 735
Algorithm: Compressive strength type A (less than 14 lb/gal)
Comments:

Test Start: 3/14/2017 11:53:48 PM
Algorithm: Static gel strength

Test Stop: 3/15/2017 11:55:21 PM



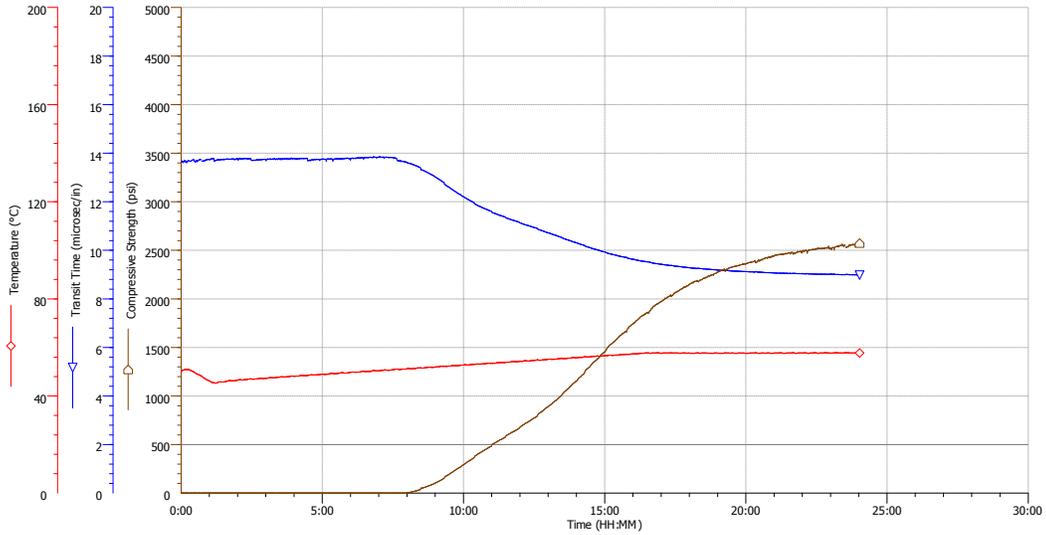
Client :
 Formation :
 Country :

Well :
 District :

Instrument: NEW SGSA 735
 Algorithm: Compressive strength type A (less than 14 lb/gal)
 Comments:

Test Start: 3/14/2017 11:53:48 PM
 Algorithm: Static gel strength

Test Stop: 3/15/2017 11:55:21 PM



CHANDLER
 ENGINEERING

Test File Name: GMD-8_LITECRETE_1.3SG@58C.tst
 Printed: 3/15/2017 4:42:41 PM

Page 1

UCA Test Results

Algorithm: Compressive strength type A (less than 14 lb/gal)
 Initial Transit Time: 13.62 microsec/in
 Final Transit Time: 8.97 microsec/in
 50 psi Time: 8:31:00
 500 psi Time: 11:01:00
 Final Strength: 2573 psi

APPROVED-BP
 By Zoubir Rahmani at 16:45, Mar 15, 2017