

N° Série : / 2024

Université Kasdi Merbah Ouargla



Faculté des Hydrocarbures, Energies Renouvelables et Science de la Terre et de l'Univers

Département De Forage Et de mécanique Des Chantiers Pétroliers

MEMOIRE

Pour obtenir le Diplôme de Master

Option : Forage

Présenté Par :

Salami Rayane

-THEME-

**Investigation Expérimentale D'amélioration des propriétés
de laitier de Ciment**

Soutenue publiquement le :

Président:	Fenazi Bilal	Univ. Ouargla
Examineur:	Boudaha Mebarka	Univ. Ouargla
Rapporteur:	Chouicha Samira	Univ. Ouargla
Co-rapporteur:	Chati Djamel Eddine	Univ. Ouargla

Année Universitaire : 2023/2024

Dédicace

Je dois sans aucun doute exprimer ma grande gratitude à mes parents, sans qui, déjà, je ne serais pas là et surtout parce qu'ils sont toujours présents pour m'épauler dans les moments difficiles et pour partager les moments de bonheur.

A mon cher papa ,en témoignage de ma reconnaissance envers le soutien, les sacrifices et tous les efforts qu'il a fait pour ma réussite

A ma chère mama, la première personne qui m'a appris à écrire

Les lettres au primaire. Le grand amour, le soutien et l'attention que j'ai reçus de ma mère m'ont toujours fait sentir que j'étais aimée et prise en charge, même en étant éloignées l'une de l'autre, et m'ont aidé à surmonter les défis et les frustrations pendant mes études. Qui était mon modèle de vie depuis l'enfance, et le fidèle défenseur de mes intérêts.

À mamie, j'aimerais que tu sois avec moi en ce jour, je sais que tu es fière de moi, rebi yerhmak mamie, tu seras toujours dans mon cœur

À ton âme pure, je dédiee ce travail

Une profonde gratitude à mes sœurs et mes frères et notre petit poussin rahimo, les mots ne suffisent pas à les exprimer ce que je sens réellement,

Je pense également à tata saida. Elle était toujours une source d'un encouragement incessant,

J'adresse un énorme merci à mes amis, ceux que j'ai rencontré sur les bancs de l'université

*Je souhaite terminer la page en dédiant une dédicace chaleureuse et très spéciale à Moi-Même ;
je ne pourrais que dire :*

*وعلى تمام الساعة الخامسة صباحا اشكر تلك النفس المحتملة، شكرا لخيبات الامل التي تلقيتها، الوديان التي جرت من عياني
بعد منتصف الليل، لتلك العقبات والظروف الصعبة*

شكرا الابتسامة التي لم تفارقني رغم قهري، للنوبات التي اصابتني، لأدويتي التي ساهمت في راحتني

شكرا لخونة الثقة، للحاسدين من حولي والمنافقين في حياتي، وجودكم يحفزني للتقدم للامام والصمود أكثر وأكثر

شكرا للعتمة والضوء الذي أبهجها، لمخاوفي التي واجهتها. شكرا أنا الضعيفة التي علمت وربت أنا القوية

Enfin, je remercie tous ceux que je n'ai pas cités mais que je n'oublie pas.

Remerciement

Je commencerais par remercier et rendre grâce à ALLAH le Tout Puissant pour je avoir donné le courage et la volonté de mener à bon terme ce travail.

C'est avec enthousiasme réel et sincère que je tiens de rendre mérite à tous ceux qui à leur manière j'ai aidée à mener à bien ce mémoire.

Je remercie en premier lieu le directeur du halliburton et le chef département de cimentation, Mr K.Abdelkrim de me souhaiter la bienvenue au sein du laboratoire de cimentation halliburton, HMD.

Je souhaite exprimer mes plus sincères remerciements à mes encadrants professionnel, Mr B. Adel, et Mr G.Abdenour les ingénieurs au lab ciment. Ils ont permis le financement de ce travail. Je ne saurais jamais assez les remercier pour ses soutiens, sas patiences, ses orientations et ses compétences infinies et surtout pour ses confiances, ses écoutes et son esprit critique, que ce travail soit le témoin de la reconnaissance et le respect que je vous dois.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements au mme. S. Chouicha parce qu'elle enseigne avec passion et conseille dans UKMO. Merci d'accepté d'être mon encadrante.

Je remercie également les membres de jury MME.M.Bouhada et MR.B.Fenazi pour nous avoir fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nous remercions vivement les ingénieurs Mme Ibtisame et Mme Khaoula, pour leur aide et leur gentillesse et leur particularité à l'originalité de ce travail.

Et Merci à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de cet humble travail.

Résumé

Notre travail vise à identifier les combinaisons d'additifs les plus efficaces pour optimiser la qualité du ciment dans les puits de forage. À travers des expériences contrôlées, nous évaluons les performances des diverses combinaisons d'additifs (stabilisateur de la résistance, retardateur, contrôle de perte de fluide, dispersant, anti-mousse) pour l'amélioration de la qualité de laitier de ciment sous différents condition opératoire des puits. Les résultats montrent que l'ajout d'additifs, en particulier la silice flour, améliore significativement la durabilité et la résistance à la compression du ciment. D'autres additifs, utilisés à des concentrations appropriées, ont également montré des effets positifs sur la rhéologie et le contrôle de la perte de fluide, facilitant le pompage et le placement du ciment et prévenant les problèmes de migration de gaz et d'eau. Cette étude souligne l'importance de la sélection et de l'optimisation des additifs pour améliorer la performance des opérations de cimentation dans l'industrie pétrolière. Les résultats fournissent des indications précieuses pour développer des solutions de cimentation plus fiables et efficaces.

Mots-clés : Stabilisateurs de la résistance, Retardateurs, Dispersants, Anti-mousse, ciment

ملخص

عملنا يهدف الى دراسة تأثير المضافات الكيميائية لتحسين جودة الاسمنت في آبار الحفر. من خلال التجارب العملية قمنا بتقييم تأثير تراكيز مختلف المضافات الكيميائية التي تعمل بآليات مختلفة (مثبت المقاومة، مضافات التأخير، التحكم في فقد السوائل، مواد مخفضة للزوجة، مضادات الرغوة) لتحسين جودة الملاط الاسمنتي تحت ظروف عملية لمجموعة من الآبار

اظهرت النتائج ان اضافة مادة السيليكا تحسن بشكل كبير من صلابة ومقاومة الضغط على الاسمنتوقد اظهرت إضافات أخرى، عند استخدامها بتركيزات مناسبة، تأثيرات إيجابية على الريولوجيا والتحكم في فقد السوائل، مما يسهل ضخ وتثبيت الأسمنت ويمنع مشاكل تسرب الغاز والماء

تؤكد هذه الدراسة على أهمية اختيار وتحسين الإضافات لتحسين أداء عمليات التثبيت في صناعة النفط. توفر النتائج مؤشرات قيمة لتطوير حلول تثبيت أكثر موثوقية وفعالية.

الكلمات المفتاحية: مثبتات المقاومة، التحكم في فقد السوائل، مواد مخفضة للزوجة، مضادات الرغوة، السمنة

Abstract

Our work aims to identify the most effective combinations of additives to optimize cement quality in drilling wells. Through controlled experiments, we evaluate the performance of various combinations of additives (strength stabilizers, retarders, fluid loss control, dispersants, anti-foam) to improve the quality of cement slurry under different well operating conditions.

The results show that the addition of additives, particularly silica flour, significantly improves the durability and compressive strength of the cement. Other additives, used at appropriate concentrations, have also shown positive effects on rheology and fluid loss control, facilitating the pumping and placement of cement and preventing gas and water migration issues.

This study highlights the importance of selecting and optimizing additives to improve the performance of cementing operations in the oil industry. The results provide valuable insights for developing more reliable and effective cementing solutions.

Keywords: Strength stabilizers, Retarders, Dispersants, Anti-foam, cement

Table des matières

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Abstract.....	III
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	X
Introduction Générale.....	1

Chapitre I: Généralité sur la Cimentation

I.1	Introduction.....	3
I.2	Objectif de la cimentation.....	3
I.3	Principe de la cimentation.....	3
I.4	Les différents type de cimentation.....	4
I.4.1	Cimentation primaire.....	4
I.4.2	La cimentation à deux étages.....	4
I.5	Différentes méthodes de cimentation.....	6
I.5.1	Cimentation par les tiges.....	6
I.5.2	Cimentation par le tube ancré.....	7
I.5.3	Cimentation par le tube suspendu.....	8
I.5.4	Cimentation par canne dans l'annulaire.....	9
I.6	La technique de la cimentation.....	10
I.6.1	Préparation du trou avant l'injection du laitier.....	10
I.6.2	Cimentation proprement dites.....	11
I.6.3	Prise de ciment.....	12
I.6.4	Contrôle de la cimentation.....	12
I.7	Ciments et laitiers.....	13
I.7.1	Définition du ciment.....	13
I.7.2	Classification et application.....	14
I.7.3	Les différents types de laitiers de ciments.....	16
I.7.4	Les additifs de ciment.....	18
I.8	Conclusion.....	21

Chapitre II: Matériel et Methode

II.1	Introduction.....	24
II.2	Protocole expérimentale.....	24

II.2.1	Le balance	24
II.2.2	Le mixage.....	25
II.2.3	Le conditionnement	28
II.2.4	La rhéologie	29
II.2.5	L'eau libre	33
II.2.6	Filtrat (Fluid Loss)	34
II.2.7	Le temps de pompabilité (THICKENING TIME)	36
II.2.8	Ultrasonic Cement Analyser (UCA).....	38
II.3	Produits utilisé	41
II.3.1	Silica Flour	41
II.3.2	II.3.2. HALAD-9.....	42
II.3.3	D-AIR	43
II.3.4	SCR-100	44
II.3.5	CFR-3.....	45
II.4	Conclusion	46
Chapitre III: Analyse les Résultats Expérimentaux		
III.1	Introduction	47
III.2	Préparation des échantillons de laitier de ciment	47
III.3	Les données de puits	50
III.4	Étape de préparation pour les trois séries	51
III.5	Tests réalisés	52
III.5.2	Mix rhéologie	53
III.5.3	API rhéologie	53
III.5.4	L'eau libre (Free Fluid)	55
III.5.5	Filtrat (API Fluid Loss).....	56
III.5.6	Le temps de pompabilité (THICKENING TIME)	61
III.5.7	Analyseur de ciment ultrasonique (ACU) :	71
III.6	Discussion des résultats	77
III.7	Conclusion	78
Conclusion Générale.....		78
Références.....		80

Liste des figures

Figure I-1 : déroulement de la cimentation étagée.	5
Figure I-2 : La DV et jeu de bouchons.	5
Figure I-3 : Cimentation par les tiges.	7
Figure I-4 : Cimentation par le tube ancré.	8
Figure I-5 : Cimentation par le tube suspendu.	9
Figure I-6 : Cimentation par canne dans l'annulaire.	10
Figure II-1 : le balance.....	25
Figure II-2 : le mixeur API (Blander).....	26
Figure II-3 : type de mixabilité.	28
Figure II-4 : le consistomètre Atmosphérique.....	29
Figure II-5 : Un viscosimètre.....	30
Figure II-6 : Les composants de Rhéomètre.....	31
Figure II-7 : Bob & Sleeve et FYSA.....	32
Figure II-8 : Test l'eau libre.....	34
Figure II-9 : Testeur de double cellule et de cellule unique.....	35
Figure II-10 : les composants d'une cellule de Fluid Loss.....	35
Figure II-11 : l'écran (Screen).....	36
Figure II-12 : HPHT Consistomètre.....	37
Figure II-13 : Thickening Time Chart.....	38
Figure II-14 : UCA.....	39
Figure II-15 : les composants d'une cellule d'UCA.....	40
Figure II-16 : chart UCA.....	41
Figure II-17 : Le rayon des additifs.....	46
Figure III-1 : préparation du laitier sans SSA-1.....	49
Figure III-2 : préparation du laitier avec SSA-1.....	49
Figure III-3 : vortex 5.....	53
Figure III-4 : Test de rhéologie.....	54
Figure III-5 : : l'écran et les bouchant.....	57
Figure III-6 : la cellule.....	58
Figure III-7 : l'installation.....	58
Figure III-8 : la soupape de mise à l'air libre (Pressure Vent Valve).....	58
Figure III-9 : la soupape d'alimentation du collecteur.....	59
Figure III-10 : Soupape d'entrée de cellule (Cell Inlet Valve (Open)).....	59
Figure III-11: la soupape d'alimentation du collecteur (Manifold Supply Valve (Open)).....	59
Figure III-12 : Start du test FL.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III-13 : écran de saisie des informations du puits.....	61
Figure III-14 : écran de saisie la température et la pression du puits.....	62
Figure III-15 : La cellule de test de thickening time.....	62
Figure III-16 : écran pour démarrer le moteur.....	64
Figure III-17 : Placement du thermocouple.....	65
Figure III-18 : panneau de contrôle manuel.....	65

Figure III-19 : fin du test.....	66
Figure III-20 : confirmation de la fin du test	67
Figure III-21 : chart de thickening time de témoin série 1	67
Figure III-22 : chart de thickening time de testé série 1	68
Figure III-23 : chart de thickening time de témoin série 2	68
Figure III-24 : chart de thickening time de testé série 2	69
Figure III-25 : chart de thickening time de témoin série 3	69
Figure III-26 : chart de thickening time de testé série 3	70
Figure III-27 : placement du jauge.....	72
Figure III-28 : remplissage de la cellule	72
Figure III-29 : Montage de la cellule d'ACU	73
Figure III-30 : Start du test ACU	73
Figure III-31 : chart d'ACU de témoin série 1	74
Figure III-32 : chart d'ACU de testé série 1	74
Figure III-33 : chart d'ACU de témoin série 2	75
Figure III-34 : chart d'ACU de testé série 2	75
Figure III-35 : chart d'ACU de témoin série 3	76
Figure III-36 : chart d'ACU de testé série 3	76

Liste des tableaux

Table I-1 : Composition chimique du CPA.	13
Table I-2 : Composition minéralogique du CPA.	14
Table I-3 : Les différentes classes de ciment selon API.....	14
Table II-1: La déférence entre Bob & Sleeve et FYSA	32
Table II-2 : Interprétation de test rhéologie	33
Table II-3 : Les valeurs typiques.....	34
Table II-4 : les propriétés de silica flour	42
Table II-5 : les propriétés de HALAD-9	42
Table II-6 : les propriétés de D-AIR	43
Table II-7 : les propriétés de D-AIR	44
Table II-8 : les propriétés de HALAD-9	45
Table III-1 : préparation des échantillons expérimentés	47
Table III-2 : : donné de puits ENF32 pour série 1	50
Table III-3 : donné de puits ENF29 pour série 2	50
Table III-4 : donné de puits ENF32 pour série 3	50
Table III-5 : les résultats du teste de mixabilité	52
Table III-6 : les résultats de mix rhéologie	53
Table III-7 : les résultats d'API rhéologie.....	54
Table III-8 : les résultats d'eau libre	56
Table III-9 : les résultats de FL	60
Table III-10 : résultats du thickening time	70

Liste des abréviations

API	American petroleum Institut
CPA	Ciment Portland artificiel
HPHT	Haut pression haut température
UCA	Ultrasonic Cement analysis
BHCT	Bottom hole circulating temperature
BHST	Bottom hole static temperature
Yp	Yield point
Vp	Viscosity plastic
°F	Degré Fahrenheit
°C	Degré Celsius
Lb	Pound
Ft	Feet

Introduction Générale

Introduction Générale

Le domaine pétrolier repose en grande partie sur les opérations de forage, des processus complexes et cruciaux pour l'extraction des ressources énergétiques enfouies sous la surface terrestre. Ces opérations, bien que techniquement sophistiquées et coûteuses, sont indispensables pour répondre à la demande mondiale croissante en énergie.

Le forage pétrolier est étroitement lié à des considérations économiques et de sécurité, tant pour les employés que pour le matériel utilisé. Les défis liés à ces opérations comprennent non seulement les coûts élevés, mais aussi les risques associés aux conditions de travail difficiles et aux exigences de sécurité rigoureuses. Le forage est le processus initial de création du trou de puits pour accéder aux réserves souterraines, tandis que la cimentation est une étape critique pour sécuriser et stabiliser le puits après le forage. Ensemble, ces processus permettent de maximiser l'efficacité et la sécurité des opérations d'exploration et de production dans l'industrie pétrolière et gazière.

La cimentation des puits est le processus d'injecter du ciment dans l'espace annulaire entre le tubage de production (ou tubage de surface) et la paroi du puits. L'objectif principal est de sceller cette zone pour prévenir les fuites de fluide vers la surface et assurer la stabilité structurelle du puits. Ce processus est essentiel pour sécuriser les opérations de forage, protéger les formations géologiques et garantir la sécurité environnementale.

La cimentation présente des problématiques spécifiques, notamment en termes de qualité et de durabilité du laitier de ciment, qui peuvent être affectées par divers facteurs environnementaux et opérationnels.

Les additifs jouent un rôle essentiel dans l'amélioration et l'adaptation des propriétés du laitier de ciment, contribuant ainsi à améliorer sa qualité, sa durabilité et son efficacité tout en réduisant les coûts et l'impact environnemental de sa production.

L'étude des variations de concentration des additifs dans la préparation des laitiers de ciments joue un rôle essentiel dans l'amélioration des performances du ciment, la garantie de la qualité du produit, la réduction des coûts et l'innovation continue dans l'industrie du ciment.

Ce travail vise à étudier l'effet de l'ajout d'additifs à différentes concentrations sur la qualité du laitier de cimentation dans des conditions des puits variés.

Cette étude se divise en trois chapitres principaux. Le premier chapitre fournit une généralité sur la cimentation, expliquant ses principes de base, ses objectifs et ses défis. Le deuxième chapitre se concentre sur les matériaux et les méthodes utilisés dans les expériences, détaillant les différents additifs et leurs propriétés. Enfin, le troisième chapitre analyse les résultats expérimentaux, évaluant l'impact des additifs sur la performance du laitier de ciment et tirant des conclusions sur les meilleures pratiques à adopter.

Chapitre I: Généralité sur la Cimentation

I.1 Introduction :

La cimentation de la colonne de tubage est une opération clé de la construction du forage. Elle détermine d'une part l'étanchéité des annulaires et d'autre part sécurise et protège les puits et les terrains traversés. Ce maintien en pression met en œuvre un laitier de ciment dans tout l'espace annulaire entre le tubage et le trou foré, sur toute ou partie de la longueur hors des têtes. Ce laitier, après sa prise, permettra de faire adhérer intimement le tubage à la formation géologique. Pour cela, les ciments de base utilisés sont caractérisés par une certaine composition chimique et de granulométrie dont, une fois mélangés à l'eau de gâchage. On obtient des laitiers de densité. Qui varie normalement entre 1,78 et 1,98 , sur lequel l'opérateur souhaite une moyenne ou un laitier de 1,90.

I.2 Objectif de la cimentation :

En raison de ses divers rôles, la qualité des cimentations de tubage influence directement la durabilité de la structure et la sécurité de l'environnement des puits. En fait, on peut dire que les fonctions des cimentations comprennent:

- La fixation des tubages installés dans les puits par des travaux de sur-perforation sur les terrains sollicités;
- Le soutien des parties des efforts supportés par les parois à travers les différents cuvelages, et par tubage de production : pression des formations, pression colonne de fluide, surpression pour réinjection, dilatations axiales et frontales dues aux variations de température, etc. ;
- La protection de l'extrados des tubages contre les agressions chimiques facteurs de corrosion ;
- La contribution à l'intégrité mécanique et hydraulique des colonnes de production. [1].

I.3 Principe de la cimentation :

La cimentation d'une colonne de tubage s'effectue par pompage d'un laitier de ciment dans l'espace annulaire existant entre l'extérieur du tubage en place et la paroi de trou foré en injectant directement à l'intérieur du tubage ou à travers les tiges de forage, de façon à le faire ensuite

remonter dans cet annulaire jusqu'à une hauteur prédéterminée [2]. Le ciment en faisant prise assurera la liaison entre la colonne de tubage et le terrain. Pour qu'une cimentation soit correctement effectuée, il faut que:

- le trou doit être propre et régulier (pour ne pas provoquer le changement de régime d'écoulement),
- le tubage doit bien centrer dans le trou,
- le laitier doit déplacer toute la boue sans se mélanger à elle,
- l'opération ne doit pas entraîner de perte,
- le ciment adhère bien aux parois,
- Calculer le volume du laitier de ciment à injecter
- Calculer le volume de chasse.

I.4 Les différents types de cimentation :

I.4.1 Cimentation primaire :

Les laitiers de ciment injectés s'écoulent à travers le sabot pour remonter ensuite dans l'annulaire. 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. Un à-coup de pression crève le bouchon inférieur pour laisser circuler le laitier dans l'annulaire. Le laitier pousse directement la boue de forage et au même temps lave les parois du puits et l'extérieur de casing [2]. On libère le bouchon supérieur qui 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). En fin de chasse on doit remarquer une montée en pression qui signifie l'arrêt du bouchon supérieur, on peut faire un test d'étanchéité de la colonne.

I.4.2 La cimentation à deux étages :

Figure (I.1) (ex: cimentation casing 13" 3/8) C'est une cimentation à deux étages qui représente les avantages suivants:

- Réduction de risque de craquage de la formation,
- Réduction de la pression finale de refoulement,

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 [6] : il s'agit d'un raccord spécial comportant des ouvertures que l'on peut ouvrir à la demande pour permettre au laitier injecté dans la colonne de passer dans l'annulaire. L'ouverture et la fermeture de cet équipement, appelé « Diverting Valve » (DV), est contrôlée au moyen de bouchons (ou bombes) lancés dans le tubage et agissant mécaniquement ou hydrauliquement sur des volets (chemises). Des bouchons spécifiques en tête et en queue de laitier permettent le contrôle de l'injection. Ils servent également de séparateur entre le laitier et les fluides présent dans le forage.

Il existe trois types principaux d'utilisation du ciment dans le sondage:

- La cimentation des colonnes de tubage,
- La pose des bouchons de ciment,
- Le squeeze ou injection sous pression.

I.5 Différentes méthodes de cimentation :

Il existe plusieurs méthodes de cimentation :

- Cimentation par les tiges,
- Cimentation par le tube ancré,
- Cimentation par le tube suspendu,
- Cimentation par canne dans l'annulaire.

Les trois premières méthodes de cimentation s'appliquent uniquement pour les forages en gros diamètres et relativement profonds. La quatrième est utilisée pour les forages de moins de 50 mètres. [7]

I.5.1 Cimentation par les tiges :

Le tubage à cimenter est muni d'un sabot destructible équipé d'une balle plastique (de la grosseur d'une balle de tennis) faisant office de valve. Le ciment injecté sous pression par les tiges pénètre dans l'espace annulaire par l'orifice du sabot qui est obturé par la balle dès l'arrêt de

l'injection. C'est le cas de la cimentation avec stinger. Cette méthode est appliquée à des gros échos amortissants diamètres et faibles profondeurs. [6]

Les avantages de cette méthode:

- Éviter la contamination du ciment,
- Limiter le « Channelling »,
- Déplacement plus contrôlable.

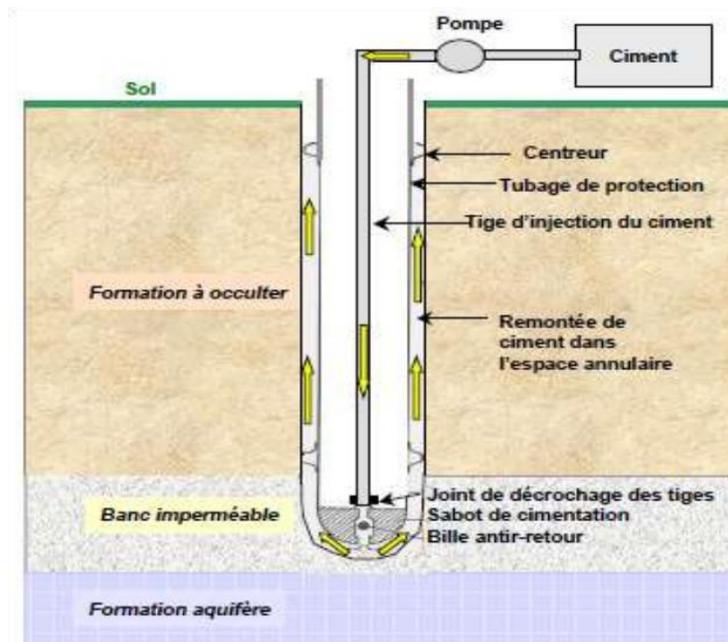


Figure I-3 : Cimentation par les tiges. [6]

I.5.2 Cimentation par le tube ancré :

A la base du tubage à cimenter des fenêtres ont été préalablement percées pour permettre la circulation de boue puis de ciment. Le volume théorique de ciment est introduit dans l'ouvrage et remonte dans l'espace annulaire sous la pression d'un joint séparateur poussé par un volume d'eau ou de boue et qui vient obturer les fenêtres de pied de tubage lorsque la cimentation est terminée. [6]

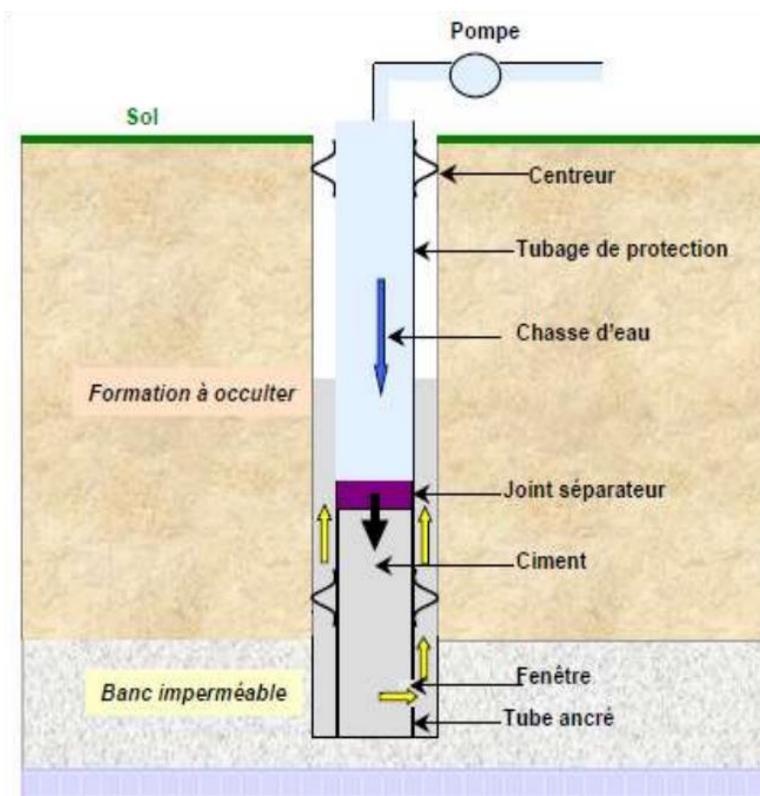


Figure I-4 : Cimentation par le tube ancré. [6]

I.5.3 Cimentation par le tube suspendu :

Sous l'effet d'une chasse d'eau ou de boue, un bouchon destructible (joint séparateur) pousse dans l'espace annulaire le volume de ciment théorique introduit dans le tubage. [6]

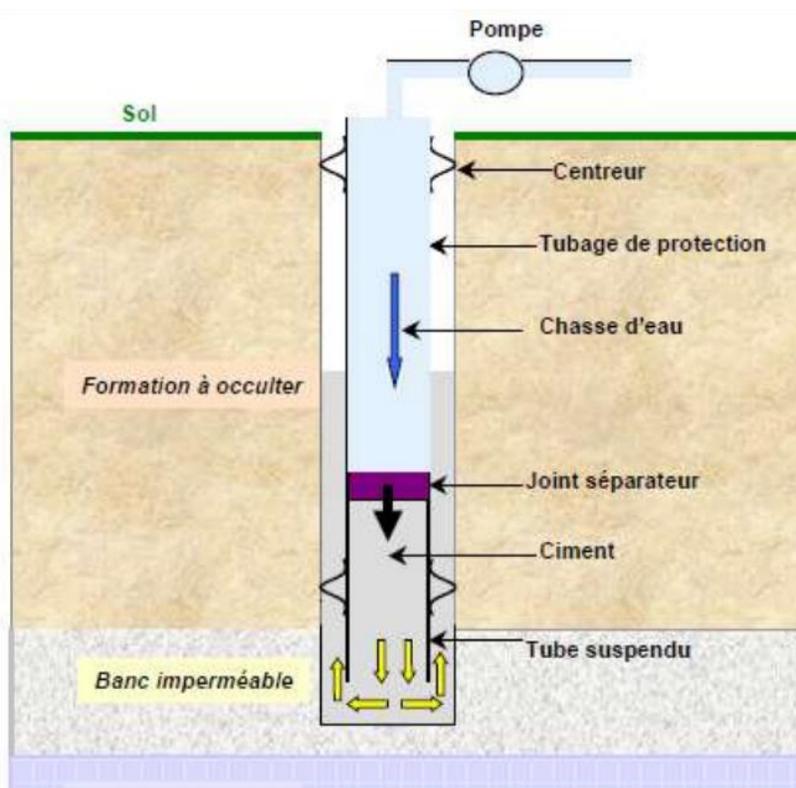


Figure I-5 : Cimentation par le tube suspendu. [6]

I.5.4 Cimentation par canne dans l'annulaire :

Une garniture de petit diamètre (environ 1") est descendue dans l'espace annulaire jusqu'au pied du tubage (ancré dans le terrain). Le ciment y est injecté sous pression, si nécessaire en remontant progressivement la canne de cimentation. [6]

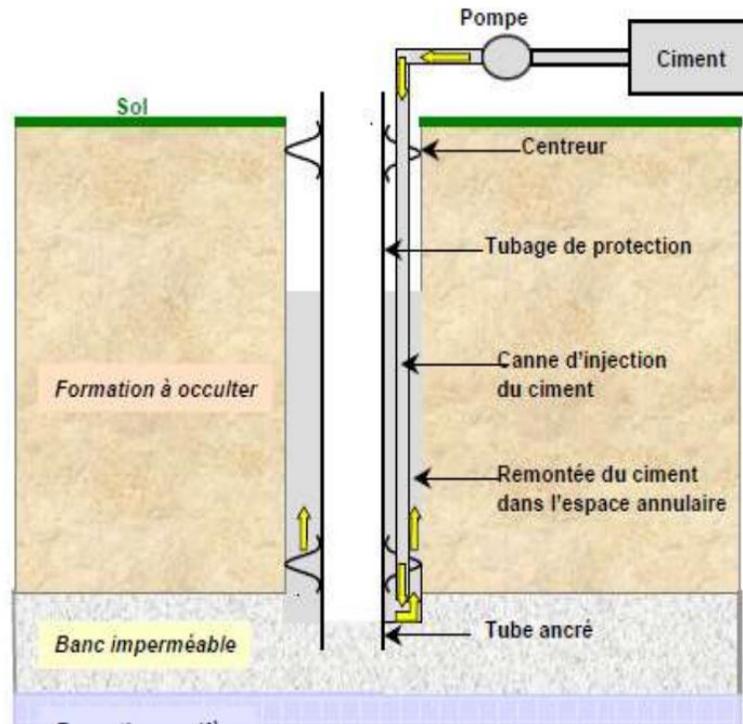


Figure I-6 : Cimentation par canne dans l'annulaire. [6]

I.6 La technique de la cimentation :

La cimentation comprend les opérations suivantes:

- Préparation du trou avant l'injection du laitier,
- Cimentation proprement dite,
- Prise de ciment,
- Contrôle de la cimentation. [8]

I.6.1 Préparation du trou avant l'injection du laitier :

La phase de nettoyage et d'assainissement des parois du trou : avant de couler le mélange pour cimenter le trou. On doit s'assurer que :

- Le puits a un diamètre suffisamment large.
- Tous les points de frottement sont alésés.
- On fait passer une circulation préliminaire 1ère et 2nde circulation à l'aide des pompes de forage jusqu'à l'évacuation complète des déblais (1 à 2heure).

- Également pendant cette circulation, manœuvre de la colonne permettant de gratter le cake avec les racleurs.
- Cependant, le fait avant l'injection du ciment est le bouchon d'eau 1 m³, parfois cette eau peut devenir une solution désagrégeant de cake par ajout de 5 % d'héscamétaphosphate. [9]

Il faut noter que la circulation se fait pour vérifier que les soupapes de l'anneau et du sabot fonctionnent correctement et qu'aucun bouchon bloque l'intérieur des tubes circulaires. Ça se fait aussi pour :

- Vérifier la stabilité du puits (pas de pertes, pas de gain),
- Eliminer les bouchons de gaz,
- Diminuer la température de fond et la stabiliser,
- Homogénéiser la boue.

I.6.2 Cimentation proprement dites :

Après avoir descendu la colonne de tubage au fond du puits, les opérations suivantes sont réalisées chronologiquement :

- a) La mise en place d'un bouchon laveur. De 1 à 3 m³, ce bouchon laveur est un liquide chimique qui permet de nettoyer les parois du puits pendant la remontée dans l'annulaire et de séparer le laitier de la boue.
- b) Établir le bouchon de cimentation situé en dessous.
- c) Augmenter la quantité de laitier. Lorsque l'anneau de retenue est touché par le bouchon inférieur, il est possible de constater une légère augmentation suivie d'une baisse de pression. Cela suggère que le laitier a traversé le bouchon.
- d) Démarrez le bouchon supérieur de cimentation.
- e) La chasse à la boue. Une augmentation de pression (ou coup de pression ou Bump Plug) est observée lorsque le bouchon supérieur se trouve sur l'anneau de retenue, ce qui indique le contact entre les deux bouchons. [10]

I.6.3 Prise de ciment :

Après le pompage, la pression finale de refoulement est maintenue jusqu'à ce que le ciment soit assez absorbé. La règle de "FARRIS" permet de déterminer le délai d'attente avant de reprendre le forage, en indiquant que le forage peut être repris lorsque la résistance à la traction du laitier atteint 8 psi. Il faut environ 3 fois plus de temps pour atteindre cette résistance de 8 psi que pour atteindre une viscosité de 100 poises. [11]

I.6.4 Contrôle de la cimentation [1] :

Une fois la cimentation terminée, il est essentiel de surveiller :

- La quantité de ciment dans l'espace annulaire,
- La qualité de la cimentation,
- La résistance de la tuyauterie et parfois de la cimentation du sabot.

Quelle est l'objectif de l'évaluation du ciment?

Afin de répondre à cette interrogation, il est important de comprendre qu'une mauvaise cimentation peut entraîner les problèmes suivants :

- La présence de fluides indésirables dans l'effluent produit,
- La migration des fluides en surface à travers les zones mal cimentées,
- La corrosion du tubage,
- La déformation du tubage (casing collapse), et le flux croisé.

L'objectif de cette évaluation est de :

- Identifier la couche supérieure du ciment,
- Vérifier l'intégrité de la gaine de ciment,
- Il est important de vérifier l'isolation des couches, de déterminer la résistance du ciment, de vérifier s'il n'y a pas de canalisation, et de déterminer si la restauration de la cimentation est nécessaire et si cela est possible.

En mesurant le dégagement de chaleur et l'augmentation de la contrainte d'adhérence du ciment à prise lors cimentation de tubage, on peut étudier la qualité de cette cimentation à l'aide des diagraphies suivantes [12]:

- Sonic (CBL-VDL (Cement Bond Log-Variable Density Log)),

- Outil d'imagerie du ciment (CET, USIT),
- Thermométrie,
- Méthode des traceurs radioactifs.

I.7 Ciments et laitiers :

I.7.1 Définition du ciment :

Les ciments sont des matériaux hydrauliques qui s'hydratent lorsqu'ils sont en contact avec de l'eau, créant une pâte ou un laitier qui se durcit et devient un matériau qui possède des propriétés mécaniques qui peuvent lier d'autres matériaux. Le ciment pétrolier est un matériau particulier employé pour cimenter les puits pétroliers ou de gaz. Son but principal est de séparer les différentes zones productrices ou les fissures mises en contact lors des forages. Le ciment est nécessaire de faire face à différentes conditions [13], comme :

- Une température élevée en fonction de la profondeur,
- Une pression élevée dans le puits.

A- Composition chimique du ciment :

Tableau I-1 : Composition chimique du CPA. [14]

Oxydes	Teneurs en %
CaO	60 – 67
SiO ₂	17 – 25
Al ₂ O ₃	3 – 08
Fe ₂ O ₃	0,5 – 06
MgO	0 ,5 – 04
ALCALIS	0,3 –1,2
SO ₃	2– 3,5

B -Composition minéralogique du ciment :

Tableau I-2 : Composition minéralogique du CPA. [15]

Constituants minéralogique	Teneurs en %
Silicate tricalcique C ₃ S	55
Silicate bi calcique C ₂ S	20
Aluminate tricalcique	12 -15
Ferro aluminate tétra calcique	5 - 7
Gypse CaSO ₄ -2H ₂ O	3 - 4
Chaux (CaO) libre	1
Verre et sulfates alcalins	1 - 2

I.7.2 Classification et application:

Les ciments pétroliers ont été classés par l'API « L'AMÉRICAIN PETROLEUM INSTITUT », principalement en fonction de leur profondeur d'utilisation, comme illustré dans le tableau ci-dessous :

Table I-3 : Les différentes classes de ciment selon API

classe	Utilisation
CLASSE « A »	Utilisé de la surface à 6000 ft (1829 m), lorsque aucune caractéristique particulière demandée. [14]
CLASSE « B »	Utilisé de la surface à 6000 ft (1829m) ft lorsque les conditions nécessitent une résistance modérée ou élevé aux sulfates. [14] [10]

CLASSE « C »	Utilisé de la surface à 6000 ft (1829m) lorsque la condition nécessite une haute résistance initiale (disponible en type ordinaire et en type à résistance modéré ou élevé aux sulfates). [15] [16]
CLASSE « D »	Utilisé de 6000 ft à 10 000 ft (1829 à 3048m) en conditions de température et de pression modérément élevées (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates). [16]
CLASSE « E »	Utilisé de 10 000 à 14 000 ft (3000 à 4268 m) sous des conditions de pression et de température extrêmement élevées (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates). [16]
CLASSE « F »	Utilisé de 10000 à 16000 ft (3048 à 4877m) dans les conditions de température et de pression très élevées, (disponible en type moyenne ou forte résistance aux sulfates). [16]
CLASSE « G »	Utilisé de la surface à 2440 m, est un ciment de base. Il peut être utilisé avec des accélérateurs ou retardateurs de prise pour couvrir une grande gamme de profondeurs et de températures. Existe en moyenne et fortes résistances aux sulfates. [10] [16] [17]
CLASSE « H »	Utilisé de surface à 2440 m, est un ciment de base. Il peut être utilisé dans les mêmes conditions que le ciment de classe G. il n'existe qu'en moyennes résistances aux sulfates. [18]

CLASSE « J »	Utilisé de 3660 à 4880 m pour des températures et pression extrêmement élevées. Existe uniquement en type résistant aux sulfates. [16]
--------------	--

I.7.3 Les différents types de laitiers de ciments :

Pour répondre à certaines exigences spécifiques, il nous arrive parfois d'utiliser des laitiers spéciaux ou des systèmes qui ne sont pas conformes à la normalisation API.

Par les laitiers ou systèmes non normalisés, les plus employés sont les suivants [19] :

I.7.3.1 Les laitiers allégés :

La composition chimique et la granulométrie des ciments de base utilisés pour la cimentation sont telles qu'une fois mélangés à l'eau de gâchage, on obtient des laitiers dont la densité est généralement comprise entre 1,78 et 1,98.

Parfois, ces densités peuvent entraîner des désavantages. Effectivement, certaines structures ne peuvent pas supporter des colonnes de ciment d'une telle ampleur. Il arrive parfois que les laitiers de ciment soient légèrement allégés afin de réduire les pressions hydrostatiques au niveau des couches fragiles et d'éviter ainsi les fractures.

En général, lors de l'utilisation des ciments allégés, on observe :

- La création de bouchons de ciment pour combler les pertes,
- La cimentation des cuvelages qui couvriraient ces zones.

I.7.3.2 Les laitiers denses ou alourdis :

Les densités d'un laitier de ciment varient de 1,78 à 1,98. L'utilisation de dispersants permet de repousser cette limite jusqu'à 2,15, mais pour obtenir des densités de laitier plus élevées, il est nécessaire d'incorporer des produits alourdissant. On utilise des densités élevées lorsque la pression hydrostatique est élevée pour contrôler le puits. Dans cette situation, la densité de la boue peut dépasser 2,00. Il faudra que celle du laitier soit légèrement plus élevée afin d'assurer un bon déplacement de la boue.

Pour être utilisé dans le ciment, tout produit alourdissant doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Limiter l'utilisation d'eau de mouillage au maximum,
- Ne pas diminuer la solidité du ciment,
- Ne pas avoir d'impact sur la durée de pompabilité,
- Avoir une taille homogène et similaire à celle du ciment,
- Induire une augmentation minimale du volume du lait,
- Être inerte chimiquement.

Il ne doit donc agir que grâce à sa propre densité.

Les alourdissant les plus utilisés sont :

- La baryte (sulfate de baryum $BaSO_4$) avec une densité de 4,2,
- L'hématite, un minerai de fer avec une densité de 4,9 et 5,3,
- L'ilménite, un oxyde de fer et de titane avec une densité de 4,7,
- La galène et l'arséniure de fer sont les plus denses (supérieures à mais leur prix étant très élevé, leur utilisation reste limitée à des cas très spécifiques).

I.7.3.3 Les laitiers pour température élevée :

On peut utiliser du ciment Portland jusqu'à une température d'environ $80^{\circ}C$; au-delà de cette température, on utilise des ciments dits retardés pour obtenir un temps de pompabilité adéquat pour installer les laitiers dans les puits.

Les ciments à haute température sont classés en trois catégories selon l'API :

- Classe D : 77 à $100^{\circ}C$,
- Classe E : 110 à $143^{\circ}C$,
- Classe F : 110 à $160^{\circ}C$.

En plus de ces trois, on ajoute le ciment de classe J (tentative). Afin d'être utilisée de 3660 à 4880 mètres.

I.7.3.4 Les laitiers pour régions froides :

La température de forage nécessaire pour cimenter diminue en dessous de $+10^{\circ}C$, ce qui entraîne des résultats insatisfaisants pour les ciments classiques. Cependant, si le point de

congélation de la phase aqueuse reste supérieur à la température, on observe un retard de prise de plus en plus marqué avec une résistance à la compression très lente à se développer.

Lorsque la température diminue, la phase aqueuse s'évapore, le ciment ne s'hydrate plus et la prise ne se produit plus. Il existe deux solutions possibles : soit augmenter la température afin d'accélérer la prise, soit utiliser des systèmes de ciment qui permettent une prise à basse température.

I.7.3.5 Les laitiers thixotropes :

Les ciments thixotropes sont des ciments laitiers qui présentent des caractéristiques rhéologiques spécifiques et qui sont associées à des caractéristiques mécaniques intéressantes. Ces ciments ont un fort pouvoir de thixotrope, ce qui signifie qu'un gel se forme rapidement sans agitation ou écoulement, mais ce gel est détruit si une agitation est reprise. Ces ciments sont flexibles, ce qui garantit une meilleure connexion entre les casings et les formations solides. La résistance mécanique de ces ciments est adéquate, même si elle évolue plus lentement que pour un laitier classique. Le laitier de ciment thixotrope semble être une solution efficace pour résoudre les problèmes de pertes dans des terrains fissurés :

- Les densités sont légèrement inférieures à celles des laitiers classiques.
- La thixotropie diminue les pertes en raison de la gelée du laitier dans les fissures, ce qui empêche le passage du gaz.
- Il n'exerce pas de pression hydrostatique quelques minutes après sa mise en place, en raison de son gel élevé.
- Bien que sa viscosité soit supérieure à celle des ciments classiques, les pertes de charge restent faibles en raison de sa mise en place à débit réduit.

Les autres caractéristiques sont similaires à celles observées sur les laitiers traditionnels :

- La durée de pompabilité reste constante pour des pressions et des températures basses.
- Le filtrat reste inchangé.

I.7.4 Les additifs de ciment :

I.7.4.1 Définition :

Les additifs sont des produits chimiques que nous ajoutons à la fois au ciment à sec ou à l'eau de mixage afin d'obtenir un laitier ou une prise du ciment avec des caractéristiques

spécifiques. Il est parfois nécessaire d'ajouter des additifs sélectionnés en fonction de leur stabilité à différentes températures. On utilise ces produits afin de modifier les caractéristiques d'un laitier afin de réaliser la cimentation du tubage dans diverses conditions. [14]

I.6.2.2. Les types d'additifs :

Selon leurs rôles, ces d'additifs subdivisent en plusieurs groupes:

I.7.4.2 Accélérateur :

Ces additifs sont destinés à accélérer le durcissement du ciment, mais ils provoquent également une diminution du temps de pompabilité. Précisons qu'à l'inverse une réduction du temps de pompabilité n'implique pas forcément un durcissement plus rapide. La résistance à long terme est, quant à elle inchangée sauf dans un cas particulier que nous verrons plus loin [18] [20]. Donc les accélérateurs permettent :

- D'accélérer la prise du ciment.
- D'augmenter la résistance initiale.
- De pouvoir reformer plus rapidement (gain de temps).

I.7.4.3 Retardateur :

Dans de nombreux cas, la prise de ciment est trop rapide pour permettre à l'opérateur de le mettre en place. Les retardateurs sont utilisés pour ajuster le temps de pompabilité du ciment à la valeur souhaitée. La prédiction de la concentration en retardateur à utiliser pour un temps de pompabilité spécifique est donc totalement impossible. La seule option consiste à effectuer un test en laboratoire sur le consistomètre en utilisant des échantillons provenant du chantier. [11][20]

I.7.4.4 Réducteur de filtrat :

Ils préviennent les pertes d'eau du laitier en le filtrant à travers des formations perméables telles que la bentonite, le latex et le FLAC [18]. Les situations les plus courantes où l'on utilise des agents de réduction de filtration sont :

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

I.7.4.5 Dispersant :

Ces agents sont utilisés pour résoudre le problème de libération d'eau causé par la précipitation des particules solides dans le laitier de ciment. Ces produits dispersants maintiennent toutes les particules en suspension pendant la prise du laitier en agissant de manière similaire aux retardateurs, en enveloppant les grains de ciment d'une fine pellicule chargée électriquement. La plupart des dispersants, ainsi que les retardateurs, sont généralement des lignosulfonates de calcium ou de sodium. [17]

I.7.4.6 Allégeant :

Ce sont des substances inertes légères mélangées au ciment qui ont pour effet, d'une part, de réduire la densité des scories et, d'autre part, d'en diminuer les coûts. Cependant, la plupart des agents allégeant ont une incidence sur le temps de prise et sur la résistance à la compression du ciment. Il faudra souvent compenser cela avec l'ajout d'additifs adaptés. [14] [16]

- L'eau : Elle est le principal élément utilisé pour alléger le ciment.
- Les solides à faible densité : Principalement constitués de billes de verre creuses ayant une densité comprise entre 0.3 et 0.7.
- L'incorporation d'agents moussants dans les scories tels que de l'azote ou de l'air via un compresseur ou une unité d'azote.

L'inconvénient de cette méthode réside dans sa mise en œuvre délicate.

I.7.4.7 Alourdissant :

Ils sont utilisés pour accroître la compacité du mélange de ciment sec. Ces matériaux inertes sont mélangés pour améliorer la densité du laitier. Les principaux Alourdissant utilisés sont: la Baryte ou sulfate de baryum $BaSO_4$ ($d = 4,2$), L'Hématite ou minerai de fer ($d = 4,9$ à $5,3$), L'Ilménite ou l'oxyde de fer ($d = 4,7$) [14] [17], La Galène et l'arséniure de fer ($d > 7$) Les alourdissant en pour rôle :

- Augmenter la densité du ciment,
- Améliorer le déplacement des boues par les laitiers,
- Augmenter le rendement du laitier sans réduire l'eau de mixage,
- Contrôler les pressions de fond élevées.

I.7.4.8 Additifs spéciaux et spécifiques [15]:

-La silice : qui est employée afin de préserver le ciment des températures élevées (plus de 110 °C statique). Elle est utilisée à une proportion de 30 à 40 %. Il est essentiel de la mélanger à sec avec du ciment.

- Les additifs utilisés pour cimenter les zones à gaz : qui sont conçus pour empêcher le gaz de pénétrer dans le ciment lors de sa prise.

- Les anti-moussants : cela permet d'éviter la formation excessive de mousse lors du mélange de certains ciments, ce qui pourrait perturber le bon fonctionnement des pompes.

-Les gélifiants qui sont des substances qui altèrent les propriétés thixotropiques de certains laitiers. Ils sont utilisés pour cimenter les zones à pertes afin que le ciment se durcisse dès l'arrêt du pompage afin d'éviter qu'il ne s'infilte dans les canalisations de la formation.

I.8 Conclusion :

Selon cette recherche bibliographique, il a été démontré que l'opération de cimentation est l'une des étapes les plus cruciales lors de la construction d'un puits de pétrole ou de gaz. On a prouvé qu'à la fin de sa mise en œuvre, le laitier de ciment durci est soumis à de nombreuses contraintes extérieures (température, pression et invasion chimique des formations géologiques environnantes). Ainsi, une conception et une analyse appropriées peuvent favoriser une mise en place efficace du laitier et une hydratation optimale du ciment, que ce soit dans les conditions les plus favorables ou les moins favorables. Dans la suite de cette étude, cette synthèse de données nous sera bénéfique pour développer nos formulations de laitiers de ciment.

Chapitre II: Matériel et Méthode

II.1 Introduction:

La cimentation est une étape cruciale dans l'industrie pétrolière et gazière, jouant un rôle essentiel dans la sécurisation des puits de forage et le maintien de leur intégrité structurelle. Les expériences et les équipements utilisés dans un laboratoire de cimentation revêtent une importance capitale, car ils permettent de tester et de valider les formulations de ciment ainsi que les procédures de placement. Dans ce contexte, la compréhension approfondie des matériaux et des techniques disponibles est indispensable pour garantir des opérations de cimentation efficaces et économiques dans l'industrie pétrolière et gazière.

Nous examinerons en détail les objectifs, les méthodes et les équipements utilisés pour mener à bien ces tests en permettant aux ingénieurs d'optimiser les formulations pour répondre aux exigences spécifiques de chaque opération de forage.

II.2 Protocole expérimental :

Dans un laboratoire de cimentation, on trouve une variété d'équipements et de matériels essentiels pour mener à bien diverses expériences et tests sur les matériaux de cimentation utilisés principalement dans l'industrie pétrolière et gazière. Parmi les équipements couramment utilisés, on peut citer les mélangeurs de ciment, qui sont utilisés pour préparer des mélanges de ciment selon des spécifications précises. On trouve également un consistomètre atmosphérique, essentiel pour simuler les conditions de haute température et de haute pression que l'on retrouve dans les puits de pétrole. Des appareils de mesure de la rhéologie, tels que les viscosimètres, sont utilisés pour évaluer la fluidité et la consistance des laitiers de ciment. Des tests de résistance à la compression sont effectués à l'aide de machines de compression pour s'assurer que le ciment durci peut supporter les charges auxquelles il sera soumis. Ces équipements et tests permettent d'assurer la qualité et la performance des matériaux de cimentation avant leur utilisation sur le terrain.

II.2.1 Le balance : [22]

Dans un laboratoire de cimentation, la balance joue un rôle crucial dans la préparation des différentes formulations des échantillons de laitiers de ciment. Voici quelques-unes des fonctions principales de la balance dans ce contexte :

Mesure des quantités de matières premières : La balance est utilisée pour mesurer avec précision les quantités de ciment, d'additifs et d'autres composants nécessaires à la préparation des formulations de ciment.

Contrôle de la proportion des mélanges : En pesant chaque composant, la balance permet de contrôler précisément les proportions des différents éléments dans les mélanges de ciment, ce qui est essentiel pour garantir la qualité et la performance du ciment final.

En résumé, la balance est un outil indispensable dans un laboratoire de cimentation, car elle garantit la précision et la fiabilité des mesures et des préparations, contribuant ainsi à la qualité et à la performance des opérations de cimentation dans l'industrie pétrolière et gazière.

Note : on mesure le volume des additifs liquide à l'aide des seringues.



Figure II-1 : le balance

- La balance est connectée à un ordinateur doté d'un système applé iFact.
- iFact est un système chargé sur l'ordinateur connecté la balance et le design de laitier pour minimisé les erreurs. C'est un lien entre laboratoire et ingénierie, tests et rapports des résultats de laboratoire, assurance des processus, base de données mondiale

II.2.2 Le mixage : [23]

II.2.2.1 Objectif :

Les indices de mixabilité établis en laboratoire peuvent fournir une indication générale de la capacité d'un laitier à mouiller et à se mélanger sur le terrain, mais ne sont pas destinés à être une mesure directe de la mixabilité à l'aide d'un équipement de terrain sur place. Bien que la mixabilité en laboratoire et la mixabilité sur site s'alignent généralement, en raison des différences

d'énergie/taux de mélange, il est possible que certains laitiers ne se conforment pas à cette tendance.

La mixabilité d'un laitier est évaluée sur une échelle de zéro à cinq en fonction de la facilité avec laquelle elle se mélange selon le programme prévu de 4 000 rpm pour le temps d'addition du mélange sec, suivi de 12 000 rpm pendant 35 secondes. Les critères de mixabilité dans cette méthode de travail ne doivent pas être appliqués aux laitiers préparés dans des conditions non standard, y compris les volumes de laitier de ciment autres que 600 ml, ou des fluides tels que des spacers qui peuvent nécessiter des temps de mélange et des taux de cisaillement prolongés uniques.

Le numéro de mixabilité est attribué en fonction des observations faites ou des actions prises pour faciliter le mélange pendant le programme de mélange prévu.



Figure II-2 : le mixeur API (Blander)

II.2.2.2 Type de mixabilité :

- **Mixabilité 5 :**
 - Grand vortex de 1 pouce ou 25 mm de diamètre ou plus est visible à 12 000 rpm
 - Mélange homogène

- Tous les solides ajoutés en 15 s
- S'écoule facilement du mixeur

—————> On utilise directement sans demander à l'ingénieur

- **Mixabilité 4 :**

- Vortex 4/5 po ou 21 mm de diamètre à 12 000 rpm
- Mélange homogène
- Tous les solides ajoutés en 30 s
- Aucune aide nécessaire avec une spatule pour mélanger
- S'écoule facilement du mixeur

—————> On utilise directement sans demander à l'ingénieur

- **Mixabilité 3 :**

- Vortex 3/4 po ou 18 mm de diamètre à 12 000 rpm
- Tous les solides sont ajoutés en 1 min, mais seront mouillés.
- Mélange non homogène
- Peut avoir besoin de l'aide d'une spatule pour mélanger et sortir du mixeur

—————> On discute le résultat avec l'ingénieur, il peut accepter ou non

- **Mixabilité 2 :**

- Vortex 2/5 po ou 10 mm de diamètre à 12 000 rpm
- Tous les solides sont ajoutés en 2 minutes, mais ils seront mouillés.
- Peut ne pas maintenir le vortex. A besoin de l'aide d'une raclette pour le retirer du mélangeur.
- Non recommandé sauf circonstances particulière

—————> Stop le mélange (bland) est unmixable

- **Mixabilité 1 :**

- Pas de vortex, à 12 000 rpm
- Peu ou pas de mélange, le mélange peut rester sur le dessus et ne pas se mélanger. Ne mouille pas complètement, sèche
- La poudre au mixeur.
- Je ne peux pas exécuter sur travail

————→ Stop le mélange (bland) est unmixable

- **Mixabilité 0 :**

- Le laitier devient impossible à mélanger avant que tout le ciment ne soit ajouté à l'eau de gâchage dans le bol du mélangeur à 4 000 rpm et 12 000 rpm.

————→ Refonte



Figure II-3 : type de mixabilité. [24]

II.2.3 Le conditionnement : [19]

Le consistomètre atmosphérique permet de conditionner le laitier en fonction de la température de fond BHCT pour les tests suivants :

1. Rhéologie
2. L'eau libre
3. API fluid-loss test



Figure II-4 : le consistomètre Atmosphérique

II.2.4 La rhéologie : [25]

II.2.4.1 Définition :

La rhéologie (du grec (rhéō) « flux » et (-logia) « étude de ») est l'étude de l'écoulement de la matière, principalement à l'état fluide (liquide ou gazeux), mais aussi sous forme de « solides mous » ou de solides sous conditions dans lesquelles ils réagissent avec un écoulement plastique plutôt que de se déformer élastiquement en réponse à une force appliquée. La rhéologie est une branche de la physique et c'est la science qui traite de la déformation et de l'écoulement des matériaux, solides et liquides.

Pourquoi?

- Impacts ECD (Densité de Circulation Equivalente)
- Capacité de la pompe



Figure II-5 : Un viscosimètre

II.2.4.2 Un viscosimètre :

Un viscosimètre (également appelé viscosimètre) est un instrument utilisé pour mesurer la viscosité d'un fluide [26]. Pour les liquides dont la viscosité varie en fonction des conditions d'écoulement, un instrument appelé rhéomètre est utilisé. Ainsi, un rhéomètre peut être considéré comme un type particulier de viscosimètre. Les viscosimètres ne mesurent que dans une seule condition de débit. Cet appareil permet de déterminer les caractéristiques rhéologiques du laitier de ciment qui sont :

- Viscosité plastique.
- Yield value.
- Les différents gels, 10 seconds et 10 minutes.
- **Viscosité plastique** : est la résistance du fluide à l'écoulement

$$v_p = (\text{lecture } 300 \text{ tr/min} - \text{lecture } 100 \text{ tr/min}) \times 1,5$$

II.1

Sachant que :

V_p : la viscosité plastique en centi poise

- **Yield value** : est la contrainte nécessaire pour déplacer le fluide

$$y_p = (\text{lecture } 300 \text{ tr/min} - v_p)$$

II.2

Sachant que :

Y_p : la yield value en $\text{lbf}/100\text{ft}^2$

- **Gel-Strength** : est une mesure de la capacité d'une dispersion colloïdale à développer et à conserver une forme de gel, en fonction de sa résistance au cisaillement.

II.2.4.3 Fonctionnement : [27].

Les mesures de viscosité sont effectuées lorsque le cylindre extérieur, tournant à un régime connu rpm, provoque l'exercice d'une traînée visqueuse par le fluide. La traînée crée un couple sur le bob, qui est transmis à un ressort de précision où sa déflexion est mesurée.

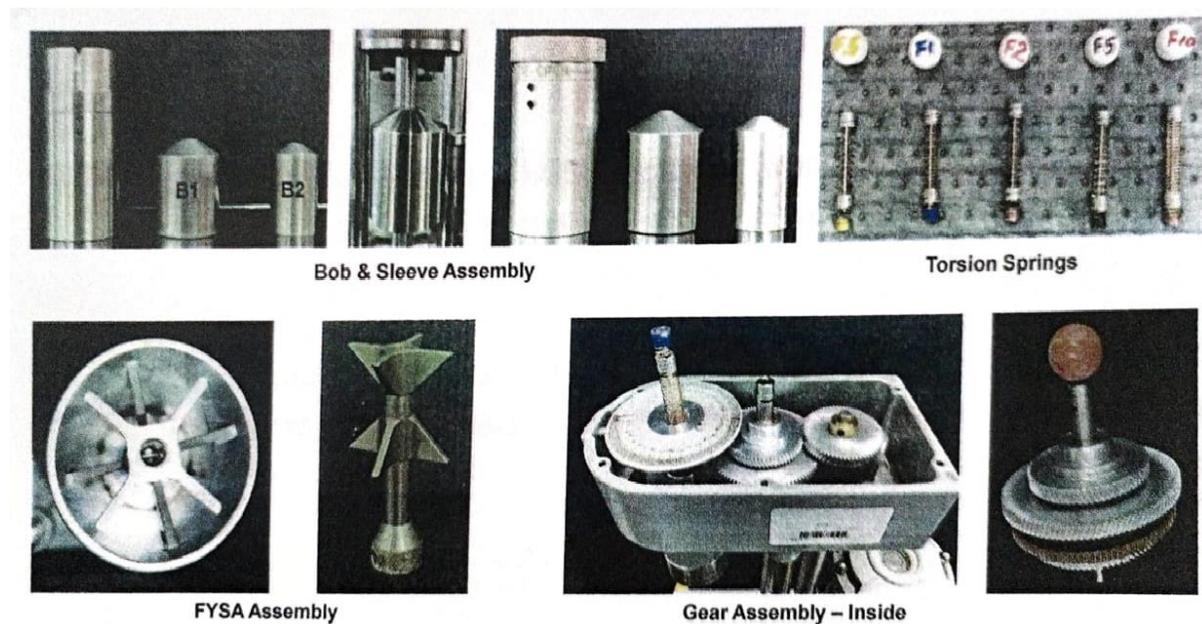


Figure II-6 : Les composants de Rhéomètre

II.2.4.4 La différence entre Bob & Sleeve et FYSA :

Table II-1: La différence entre Bob & Sleeve et FYSA

Bob & Sleeve	FYSA
<ul style="list-style-type: none"> - Petit volume de mesure - Flux de Couette - Solides collés dans l'annulaire - Effet de la force centrifuge 	<ul style="list-style-type: none"> - Grand volume de mesure - FYSA peut être utilisé de deux manières : <ul style="list-style-type: none"> • Mesure directe de YP • Rhéologie complète pour laitiers complexes : Foam, WellLife, Tuned Light

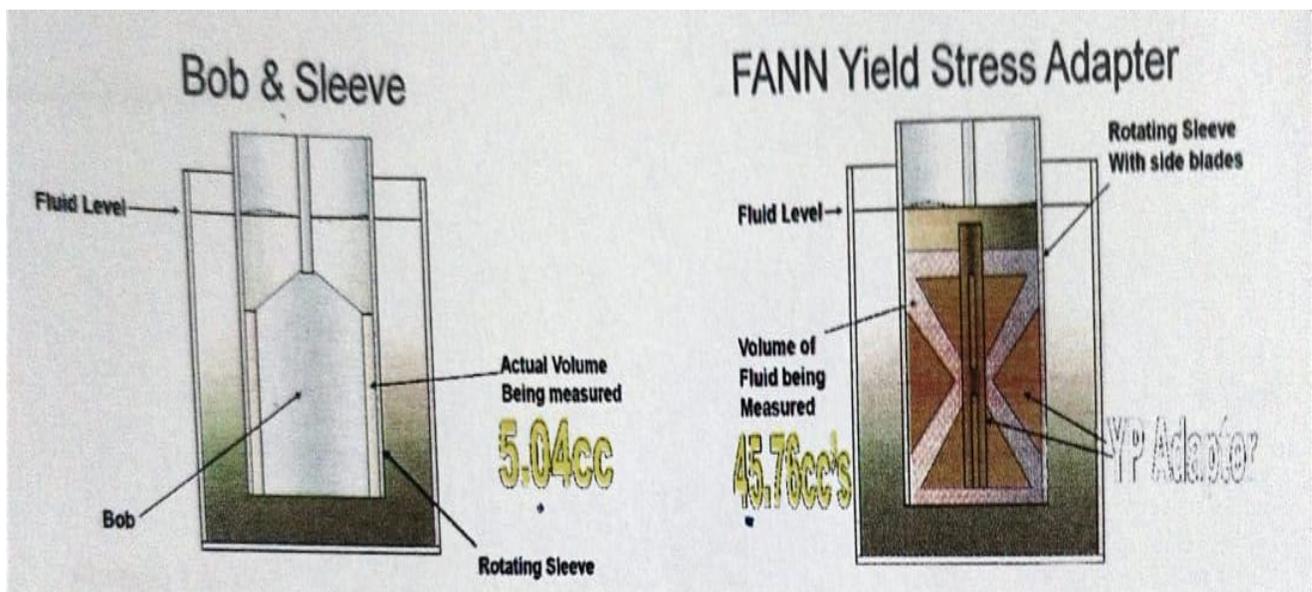


Figure II-7 : Bob & Sleeve et FYSA

Remarque : Le FYSA n'est pas destiné à remplacer le Bob & Sleeve. Les laitiers standard étendus à l'eau doivent toujours utiliser le Bob et le Sleeve. FYSA doit être utilisé pour les laitiers complexes ou les laitiers qui présentent une rhéologie dépendant du temps.

II.2.4.5 Interprétation de test rhéologie :

- Les valeurs rhéologiques élevées représentent un laitier épais.
- Les valeurs rhéologiques faibles représentent un laitier mince.

Table II-2 : Interprétation de test rhéologie

	300	200	100	60	30	6	3
Trop épais	+300	248	144	102	66	42	38
normal	172	124	72	51	33	16	14
Trop mince	66	42	26	15	11	7	2

II.2.5 L'eau libre : [28]

II.2.5.1 Objectif :

Le test de fluide libre permet de déterminer si un laitier de ciment subira une séparation de fluide dans des conditions constantes, pendant et après son placement dans un puits de forage. Un excès de liquide libre dans un laitier peut entraîner des problèmes tels que des poches d'eau, une canalisation, une sédimentation et une mauvaise isolation zonale globale.

- Halliburton a standardisé les aspects du test de fluide libre comme suit :
 1. Effectué dans un cylindre gradué de 250 ml.
 2. Lectures de fluides libres mesurées avec une précision de 0,2 ml.
 3. Un résultat global de fluide libre inférieur à 0,2 ml au total est signalé comme zéro dans iFacts. N'utilisez pas de « trace » pour caractériser les résultats de faible niveau de liquide libre.
 4. Effectué à un angle qui simule le mieux l'angle du puits de forage, 45 degrés étant le plus courant.

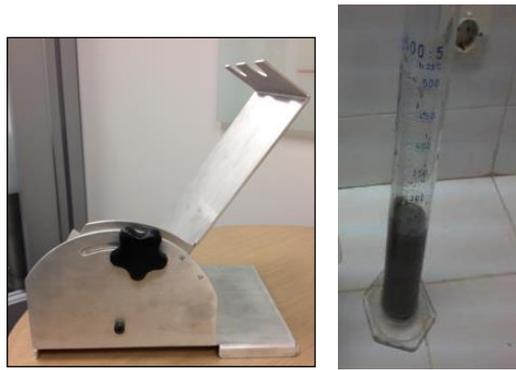


Figure II-8 : Test l'eau libre

II.2.5.2 Calcule de pourcentage Fluid libre:

$$\% \text{ Free Fluid} = \left(\frac{\text{mL Free Fluid Collected}}{250} \right) \times 100$$

II.3

II.2.5.3. Présentation des résultats d'eau libre :

Les valeurs typiques :

Puits vertical :

- Lead : < 2 %

- Tail : 0%

Puit dévié :

- Lead : 0% - 0,5%

- Tail : 0%

II.2.6 Filtrat (Fluid Loss): [27]

II.2.6.1 Objectif:

Deux types de tests de perte de fluide sont couramment effectués sur les laitiers de ciment : la perte de fluide statique pour les tests inférieurs à 190 °F et la perte de fluide sous agitation pour les tests supérieurs à 190 °F (pratique recommandée par Halliburton). Le testeur de perte de fluide sous agitation est un appareil capable d'effectuer le conditionnement de laitier et le test de perte de fluide dans la même cellule de test, et ainsi de simuler plus fidèlement les conditions réelles du puits.

II.2.6.2 Les équipements :

- 1- Les testeurs statiques de perte de fluide sont disponibles en deux styles différents. Un testeur à double cellule contenant deux cellules de perte de fluide séparées et deux régulateurs de température externes, et un testeur à cellule unique contenant une cellule et une unité de contrôle de température intégrée.



Figure II-9 : Testeur de double cellule et de cellule unique

- 2- L'image ci-dessous montre le type de cellule préféré, qui contient un capuchon inférieur et supérieur fileté qui sont vissés dans le réservoir de cellules. Ce style de cellule est compatible avec les testeurs de Fluid Loss à cellule unique et double.

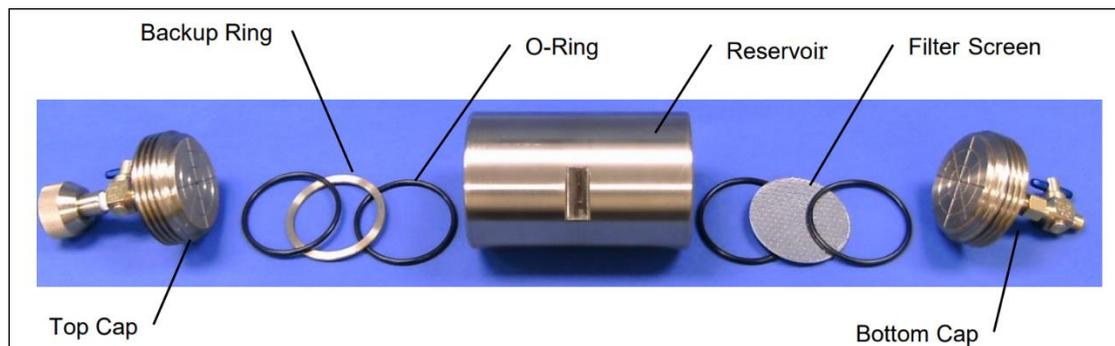


Figure II-10 : les composants d'une cellule de Fluid Loss

- 3- Les testeurs de Fluid Loss sont équipés d'un tamis de 325 mailles qui doit être utilisé pour tous les tests de routine. Un tamis de 600 mailles est également disponible mais ne doit être utilisé que lors des tests de laitier de ciment Micro-Matrix. Une mauvaise application des écrans peut affecter considérablement les résultats des tests. Il convient donc de veiller à

ce que le bon écran soit utilisé. Pour différencier les deux écrans, les écrans de 325 mailles (SAP P/N 100002402) sont marqués par le fabricant avec un « 3 » et les écrans de 600 mailles (SAP P/N 100033342) sont marqués d'un « 6 ».

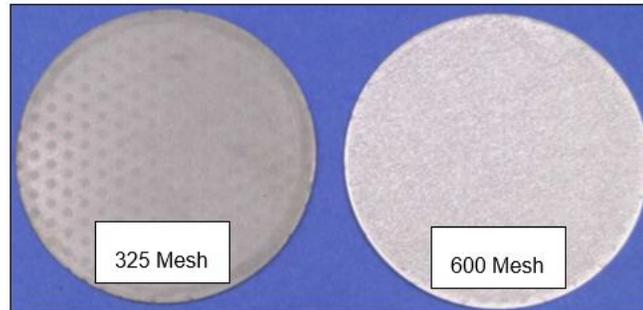


Figure II-11 : l'écran (Screen)

II.2.6.3 Calcul de Fluid Loss:

$$\text{Fluid Loss (ml)} = \text{Total Filtrate (ml)} \times 2 \times \sqrt{\frac{30}{\text{temps du test}}}$$

II.4

II.2.6.4 Interprétation de Fluid Loss :

- Intermediate casing <150cc's
- Typical Liner < 50cc's
- Migration de gas < 30cc's
- Plug across Permeable Zone <100 cc's.

II.2.7 Le temps de pompabilité (THICKENING TIME) : [27]

II.2.7.1 Objectif :

Le test de temps d'épaississement détermine la durée pendant laquelle un laitier restera pompable dans des conditions de puits simulées, notamment la température, la pression et la durée. Des facteurs tels que la contamination des fluides, la perte de fluide dans la formation, les variations imprévues de température, les arrêts imprévus du pompage (unplanned shutdowns in pumping), etc. ne peuvent pas être reproduits dans le test. Il est donc très important de simuler aussi précisément que possible les conditions connues du puits lors de la détermination du temps d'épaississement pour un travail.



Figure II-12 : HPHT Consistomètre [29]

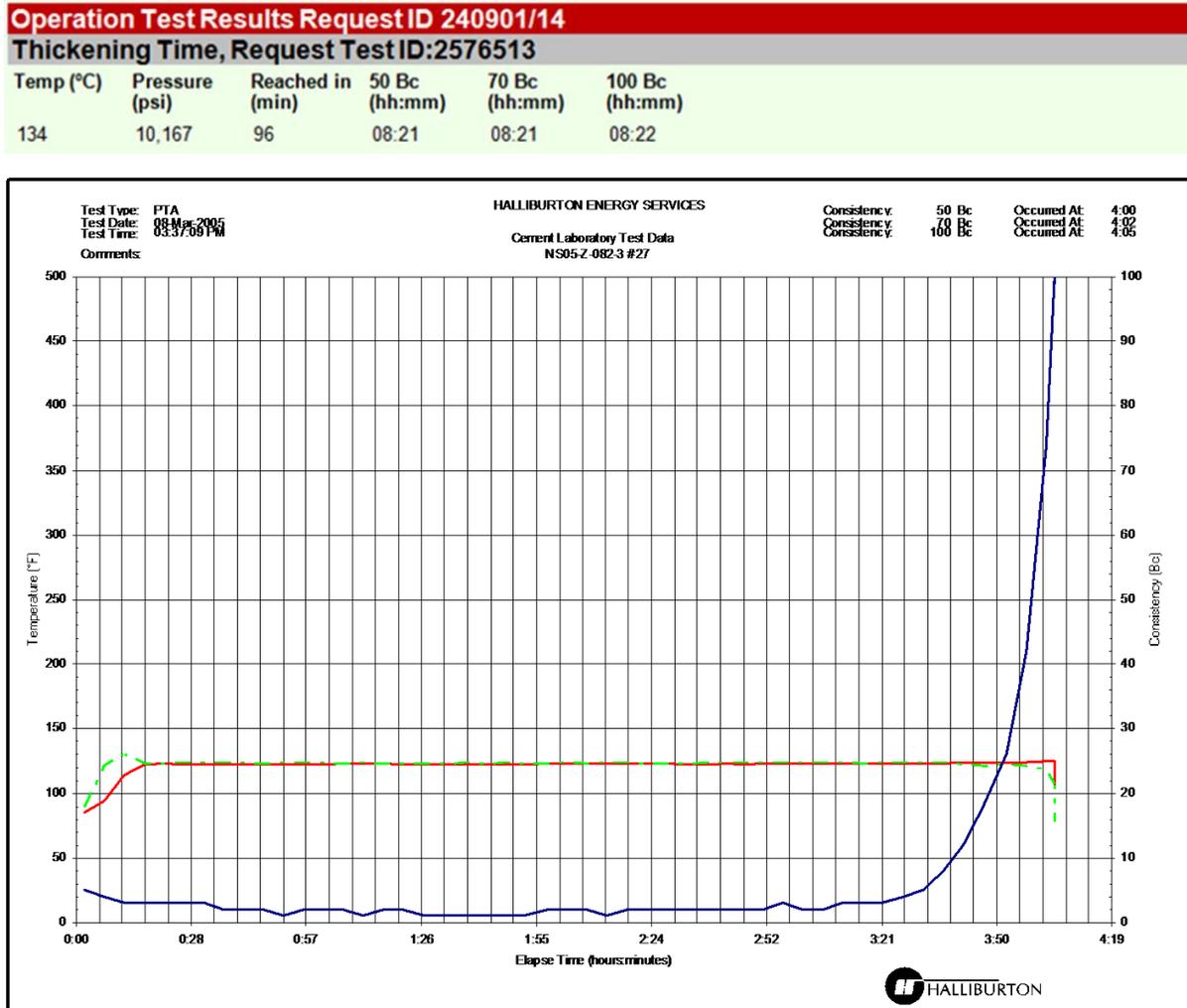


Figure II-13 : Thickening Time Chart

II.2.8 Analyseur de ciment ultrasonique (ACU) : [27]

II.2.8.1 Objectif :

L'analyseur de ciment à ultrasonique (ACU) propose un test indirect et non destructif d'un laitier pour estimer l'évolution de sa résistance à la compression (compressive strength) au fil du temps. Des corrélations ont été développées pour estimer la résistance à la compression d'une composition de cimentation en fonction du temps nécessaire au signal ultrasonore pour traverser le ciment lors de sa prise. Les valeurs de résistance à la compression déterminées par cette méthode et par écrasement peuvent varier considérablement en fonction de la température du test, de la composition du mélange, etc. Dans la plupart des cas, l'indication de la résistance sonique (sonic

strength) sera inférieure à la résistance à l'écrasement (crush strength). Dans certains cas, la force sonique peut représenter aussi peu que 50 % de la résistance à l'écrasement.

Il est important que le laitier testé dans un UCA soit une boue stable avec un minimum de fluide libre (fluid loss) et de décantation. Un fluide libre et/ou une décantation (settling) peuvent empêcher la surface supérieure du ciment d'entrer en contact avec le bas du revêtement supérieur. Sans un bon contact, le signal peut être affecté et poser des problèmes pour obtenir un bon signal pour la corrélation de force.

Pour les tests de résistance avec l'ACU, il existe 3 corrélations de résistance pour les différences de composition du laitier. La corrélation de résistance appropriée doit être sélectionnée pour la boue testée. Les corrélations sont :

- 1) pour toutes les laitiers dont la densité est inférieure à 14,0 lb/gal,
- 2) toutes les laitiers pesant 14,0 lb/gal ou plus, à l'exception de celles contenant des matériaux alourdissant métalliques,
- 3) toutes les laitiers contenant des matériaux alourdissant métalliques tels que l'hématite, le HiDens, la barite, le Micromax, etc., quelle que soit leur densité.



Figure II-14 : ACU [30]



Pressure chamber top cap

Sealing ring (short edge facing away from top cap)

O-ring

Retaining ring

Pressure chamber

Fiberglass sleeve

O-ring

Sealing ring (short edge facing away from bottom)

Pressure chamber bottom

Figure II-15 : les composants d'une cellule d' ACU [27]

UCA Comp. Strength, Request Test ID:2576516 & 2576517								
End Temp (°C)	Pressure (psi)	50 psi (hh:mm)	500 psi (hh:mm)	8 hr CS (psi)	12 hr CS (psi)	16 hr CS (psi)	23hr CS (psi)	45hr CS (psi)
121 (TOL)	3,000	ongoing	ongoing	0	0	0	0	281
138 (TD)	3,000	16:41	19:19	0	0	15	2,008	-

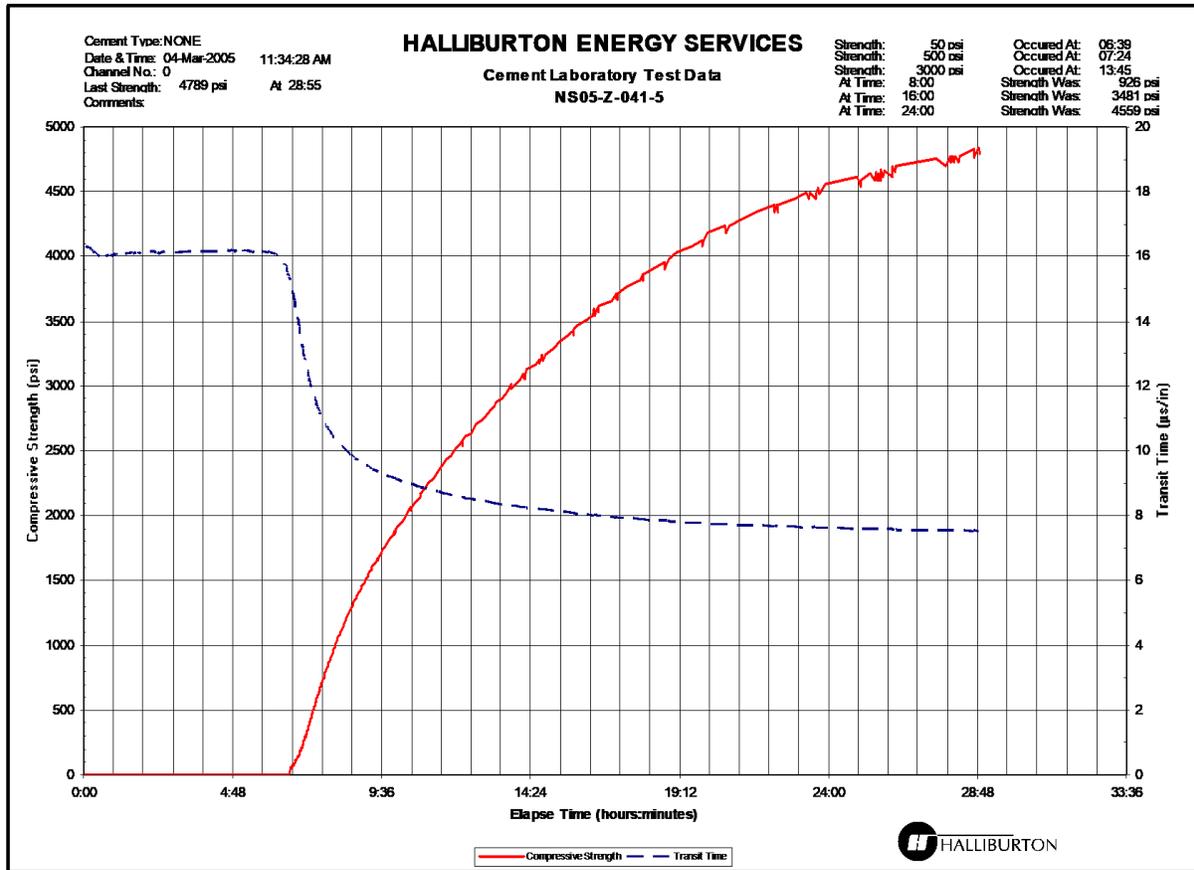


Figure II-16 : chart ACU

II.3 Produits utilisé : [31]

II.3.1 Silica Flour :

- **Description et fonction principale :** Silica Flour (Agent de stabilisation de la résistance n°1) est un sable en poudre utilisé pour stabiliser la résistance et la perméabilité du ciment là où les températures sont supérieures à 230 °F. Il est efficace pour prévenir la rétrogression de la résistance et réduire la perméabilité dans les systèmes de ciment
- **Effets secondaires :** aucun
- **Interaction avec d'autres additifs :** silica flour est compatible avec tous les ciments

- **Procédures de sécurité et de manipulation :** Il est préférable de ne pas utiliser du Silica flour dans les yeux et de ne pas créer et inhaler de la poussière. Remplir les zones touchées d'eau.

Tableau II-3 : les propriétés de silica flour

Densité	Forme	Couleur	Température	Concentration	Besoin en eau
2,63	poudre	blanc	230 F to 700 F (110 °C to 371 °C)	35 to 100% bwoc	40% en poids de silica flour

- **Restrictions d'utilisation :** non
- **Effet sur les propriétés du laitier :** peut augmenter de la viscosité du laitier sans eau requise

II.3.2 HALAD-9 :

- **Description et fonction principale :** HALAD-9 est un additif de contrôle des pertes de fluides. Dans certains cas, il améliore les propriétés rhéologiques du laitier de ciment
- **Effets secondaires :** HALAD 9 fonctionne comme un réducteur de friction du ciment lorsqu'il est utilisé dans des laitiers contenant de la bentonite
- **Interaction avec d'autres additifs :** Le sel peut augmenter la viscosité apparente et réduire le contrôle de la perte de fluide. HR-7 ou CaCl₂ améliorent généralement ses propriétés rhéologiques. CFR-2 ou CFR-3 augmentent normalement la viscosité apparente, mais améliorent le contrôle de la perte de fluide.
- **Procédures de sécurité et de manipulation :** Il ne faut pas générer et inhaler de la poussière. Si le produit entre en contact avec les yeux ou la peau, il faut le rincer à l'eau. En cas de persistance de l'irritation, il est recommandé de consulter un médecin.

Tableau II-4 : les propriétés de HALAD-9

Densité	Forme	Couleur	Température	Concentration
1,22	Poudre	beige clair	80 °F à 200 °F (27 °C à 93 °C)	0.4% to 1.5%

- **Restrictions d'utilisation :** HALAD-9 n'est généralement pas utilisé comme réducteur de friction à moins que la bentonite ne soit utilisée dans le laitier de ciment.
- **Effet sur les propriétés du laitier :**
 - Augmente l'eau de gâchage (légèrement), la viscosité (sans bentonite) et le temps de prise
 - Diminue la perte de fluide et la viscosité (avec bentonite)

II.3.3 D-AIR :

- **Description et fonction principale :** D-AIR est ajouté à l'eau de mélange pour minimiser la formation de mousse et l'entraînement d'air dans les boues de ciment
- **Effets secondaires :** En réduisant l'air entraîné, il est possible de mélanger les laitiers plus près de la densité prévue
- **Interaction avec d'autres additifs :** L'ajout de sel, de tensioactifs ou de latex peut augmenter les problèmes de formation de mousse
- **Procédures de sécurité et de manipulation :** Évitez le contact avec la peau et les yeux. Évitez les fumées. Rincez abondamment les zones exposées avec de l'eau.

Tableau II-5 : les propriétés de D-AIR

Densité	Forme	Couleur	Besoin en eau	Odeur	Température
1,01	Liquide	Clair, incolore	Non	Non	60 F à 400 F (16°C à 204 C)

- **Restrictions d'utilisation :** Ne pas utiliser dans le ciment mousse.
- **Effet sur les propriétés du laitier :** Réduit l'entraînement d'air

II.3.4 SCR-100 :

- **Description et fonction principale :** SCR-100 est un retardateur non-lignosulfonate qui simplifie la conception de laitier thixotropiques. Il est efficace dans les laitiers d'eau douce avec des températures de circulation aussi élevées que 250 F et dans les laitiers de sel saturé avec des températures de circulation de 250 F à 350 F. Lorsqu'il est combiné avec certains agents d'amélioration du retardateur, tels que HR-25, SCR-100 peut être utilisé dans les systèmes de refroidissement d'eau douce à des températures de circulation aussi élevées que 430 F.
- **Effets secondaires :** SCR-100 peut être utilisé avec HALAD 9, HALAD-22A, HALAD-24, ou Diacel LWL pour conférer une thixotropie.
- **Interaction avec d'autres additifs :** SCR-100 interagit bien avec d'autres additifs
- **Procédures de sécurité et de manipulation :** Évitez de mettre le SCR-100 en contact avec la peau et les yeux. Évitez de créer et d'inhaler de la poussière.

Tableau II-6 : les propriétés de D-AIR

Densité	Forme	Couleur	Besoin en eau	Odeur	Concentration	Température
1,42	Poudre	Blanc	Non	Non	0.1 à 2.0% bwoc	Jusqu'à 250 °F (121 °C) en circulation (eau douce) ; 250 °F à 350 °F (121 °C à 176 °C) en circulation (sel saturé)

- **Restrictions d'utilisation :** non.
- **Effet sur les propriétés du laitier :**
 - Augmente le temps d'épaississement
 - Confère de la thixotropie lorsqu'il est utilisé avec certains additifs de contrôle de la perte de fluide
 - Tends à donner des résistances à la compression initiale plus élevées par rapport aux laitiers équivalentes utilisant des retardateurs lignosulfonates
 - Dispersion

II.3.5 CFR-3:

- **Description et fonction principale :** CFR-3 avec antimousse est un additif de réduction de friction pour le ciment qui réduit la viscosité apparente et améliore les propriétés rhéologiques d'un laitier de ciment. Les fonctions et propriétés des laitiers de ciment contenant du CFR-3 sont très similaires à celles des laitiers contenant du CFR-2, sauf que le CFR-3 peut être utilisé dans des boues avec des concentrations en sel supérieures à 18 % (bwow)
- **Effets secondaires :** Il améliore le contrôle de la perte de fluide dans une certaine mesure et a normalement un léger effet retardateur.
- **Interaction avec d'autres additifs :** CFR-3 avec antimousse augmente la viscosité apparente des laitiers contenant certains matériaux à faible perte de fluide
- **Procédures de sécurité et de manipulation :** Évitez de créer et d'inhaler la poussière. En cas de contact avec les yeux ou la peau, rincez abondamment à l'eau.

Tableau II-7 : les propriétés de HALAD-9

Densité	Forme	Couleur	Température	Concentration
1,28	Poudre	Rouge foncé	Supérieur à 60 °F (16 °C)	0.3 à 1.5%

- **Restrictions d'utilisation :** Des concentrations excessives et une conception incorrecte du laitier peuvent entraîner un excès d'eau libre et/ou une ségrégation du laitier
- **Effet sur les propriétés du laitier :**
 - Augmente le temps d'épaississement et la densité (en réduisant l'eau de mélange)
 - Diminue la viscosité (et les pressions de friction), l'eau de mélange et la perte de fluide



Figure II-17 : Le rayon des additifs

II.4 Conclusion :

Les expériences et les tests effectués dans le laboratoire de ciment revêtent une importance cruciale pour garantir la qualité et la performance des formulations de ciment utilisées dans diverses applications industrielles. Ces tests permettent d'évaluer et d'optimiser les propriétés des laitiers de ciment, telles que la rhéologie, le temps d'épaississement, la résistance à la compression, et l'eau libre...etc. Ils assurent également que les formulations répondent aux spécifications techniques et aux exigences de sécurité.

Parmi les additifs les plus importants utilisés dans les formulations de ciment, on trouve :

- Réducteurs de friction : Comme le CFR-3, qui améliore les propriétés rhéologiques et réduit la viscosité apparente des boues de ciment.
- Agents de contrôle de la perte de fluide : Ils minimisent la perte de fluide pendant le processus de durcissement du ciment.
- Retardateurs : Comme le SCR-100, qui augmentent le temps d'épaississement pour permettre des opérations de cimentage plus longues.

L'intégration de ces additifs et la réalisation de tests rigoureux permettent de développer des formulations de ciment adaptées aux conditions spécifiques de chaque projet, qu'il s'agisse de températures élevées, de pressions extrêmes ou de compositions chimiques particulières. En fin

de compte, ces efforts contribuent à améliorer la durabilité, la sécurité et l'efficacité des infrastructures construites avec ces matériaux.

Chapitre III: Analyse les Résultats Expérimentaux

III.1 Introduction :

La qualité du ciment utilisé dans les puits pétroliers est d'une importance cruciale pour assurer la stabilité et la sécurité des opérations de forage. Les conditions extrêmes rencontrées dans ces environnements, telles que les hautes pressions et températures, exigent des formulations de ciment aux propriétés mécaniques et chimiques exceptionnelles.

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'utilisation du nanographène comme additif dans le ciment destiné aux puits pétroliers. J'ai mentionnée dans le chapitre précédant les propriétés de nanographène (silica flour). Ensuite, nous analyserons les résultats expérimentaux obtenus lors de l'incorporation de nanographène dans les formulations de ciment, en mettant en lumière les améliorations en termes de résistance à la compression, sous haute température et haute pression.

III.2 Préparation des échantillons de laitier de ciment :

Pour étudier l'effet des différents additifs sur la qualité de laitier de ciment on a proposé de réaliser des expériences en 3 séries pour six échantillons chaque échantillon expérimenté est préparer avec des additifs choisis selon un mode opératoire présenter en 3 séries.

- **Additifs utiliser** : les concentrations des additifs sont choisis selon les caractéristiques de puits.
- a- Stabilisateur de la résistance et la perméabilité** : silica flour (28%)
- b- Réducteur de filtrat** : HALAD-9 (0,5%), HALAD-344 (0,2-0,6%) et HALAD-413 (0,4-0,5%)
- c- Anti-mousse** : D-AIR (0,1%)
- d- Retardateur** : SCR-100 (0,3-0,4-0,65%), HR-25 (0,35%)
- e- Migration de gaz** : GasStop (0,25%)
- f- Dispersant** : CFR-3 (0,1-0,15%)

Tableau III-1 : préparation des échantillons expérimentés

Serie	Echantillon témoin	SG	Concentration %	Quantité G	Echantillon testé avec les additifs utilisé	SG	Concentration %	Quantité G

	avec les additifs utilisé							
01	Lafarge classe G	3,2	100	784.26	Lafarge classe G	3,2	72	601.32
	/	/	/	/	SSA-1	2,63	28	202.81
	D-Air	0,93	0.1	0.73	D-AIR	0,93	0.1	0.75
	HALAD-9	1,22	0.5	3.92	HALAD-9	1,22	0.5	4.02
	CFR-3	1,28	0.1	0.78	CFR-3	1,28	0.1	0.80
	SCR-100	1,42	0.3	2.35	SCR-100	1,42	0.3	2.41
	Eau	0,99	44.46	347.95	Eau	0,99	40.86	327.89
02	Lafarge Class G	3,2	100	781.80	Lafarge Classe G	3,2	72	599.38
	/	/	/	/	SSA-1	2,63	28	202.16
	D-Air	0,93	0.1	0.73	D-Air	0,93	0.1	0.75
	CFR-3	1,28	0.15	1.17	CFR-3	1,28	0.15	1.2
	HALAD-413	1,48	0.5	3.91	HALAD-413	1,48	0.5	4.01
	HALAD-344	1,22	0.2	1.56	HALAD-344	1,22	0.2	1.6
	GasStop	1,37	0.25	1.96	GasStop	1,37	0.25	2
	SCR-100	1,42	0.4	3.13	SCR-100	1,42	0.4	3.21
	Eau	0,99	44.31	345.74	Eau	0,99	40.4	325.69
03	Lafarge Class G	3.2	100	780.83	Lafarge Class G	3.2	72	780.83
	/	/	/	/	SSA-1	2,63	28	201.90
	D-Air	0.93	0.1	0.73	D-Air	0.93	0.1	0.74
	HALAD-344	1.22	0.6	4.69	HALAD-344	1.22	0.6	4.80
	HALAD-413	1.48	0.4	3.12	HALAD-413	1.48	0.4	3.20
	SCR-100	1.42	0.65	5.08	SCR-100	1.42	0.65	5.20
	HR-25	1.26	0.35	2.73	HR-25	1.26	0.35	2.80

	Eau	0,99	43.99	342.83	Eau	0,99	40.4	322.73
--	-----	------	-------	--------	-----	------	------	--------



Figure III-1 : préparation du laitier sans SSA-1



Figure III-2 : préparation du laitier avec SSA-1

III.3 Les données de puits :

Les tableaux (III.2,3,4) présentes les caractéristiques de puits pour conditionner le laitier de ciment pour les trois séries :

Tableau III-2 : : donné de puits ENF32 pour série 1

Rig	ENF 32	Puits	BEK-7	Localisation	Hassi-messaoud	Type de travail	Liner production
Dia de pipe	4,5 in	Type de laitier	Primaire	BHST	124°C / 255°F	BHCT	109°C / 228°F
Batch mix	45min	Heating time	33 min	MD	4112 m / 13491 ft	TVD	4112 m / 13491 ft
Pression	662 bar / 9600 psi	Densité du Boue	1.58 SG / 13.2 lbm/gal	Densité du laitier	1.9 SG / 15.856 lbm/gal		

Tableau III-3 : donné de puits ENF29 pour série 2

Rig	ENF 29	Puits	NHBHJ-7	Localisation	Hassi-messaoud	Type de travail	Liner production
Dia de pipe	4,5 in	Type de laitier	Tail	BHST	132°C / 270°F	BHCT	112°C / 234°F
Batch mix	90 min	Heating time	62 min	MD	4215 m / 13829 ft	TVD	4215 m / 13829 ft
Pression	400 bar / 5800 psi	Densité du Boue	1.43 SG / 11.9 lbm/gal	Densité du laitier	1.9 SG / 15.856 lbm/gal		

Table III-4 : donné de puits ENF32 pour série 3

Rig	ENF 32	Puits	BEK-7	Localisation	Hassi-messaoud	Type de travail	Liner production
------------	--------	--------------	-------	---------------------	----------------	------------------------	------------------

Dia de pipe	4 in	Type de laitier	bouchant	BHST	160°C / 320°F	BHCT	115°C / 239°F
Batch mix	45min	Heating time	28 min	MD	3525 m / 11565 ft	TVD	3525 m / 11565 ft
Pression	586 bar / 8500 psi	Densité du Boue	0.99 SG / 8.3 lbm/gal	Densité du laitier	1.9 SG / 15.856 lbm/gal		

III.4 Etape de préparation pour les trois séries :

La préparation d'un échantillon de laitier de ciment en utilisant Lafarge Classe G, les additifs choisis et de l'eau, nécessite une méthodologie rigoureuse pour assurer la précision et la reproductibilité des résultats. Voici les étapes détaillées pour réaliser cette préparation de manière professionnelle :

1. Préparation du Matériel et des Réactifs :

Équipements nécessaires : balance analytique, béchers, mixeur à haute vitesse, récipient de mélange, spatule, seringues de mesure, chronomètre, gants et lunettes de protection.

Réactifs : ciment Lafarge Classe G, SSA-1, SCR-100, HR-25, HALAD-9, HALAD-413, HALAD-344, D-Air, CFR-3, GasStop et eau.

2. Mise en Place de l'Équipement :

- Nettoyer et sécher tous les équipements pour éviter toute contamination.
- Vérifier le bon fonctionnement du mixeur et calibrer la balance analytique.

3. Pesée des Composants :

- Ciment Lafarge Classe G : On Pesé précisément la quantité nécessaire de ciment
- SSA-1: On Pesé précisément la quantité nécessaire de SSA-1
- CFR-3 : On Pesé la quantité requise de CFR-3 selon la concentration, on fait la même chose avec le reste des additifs
- D-AIR : On Mesure le volume requis de D-AIR par une seringue

4. Préparation de l'eau de Mélange :

Mesurer la quantité d'eau nécessaire en fonction de la formule du laitier de ciment

5. Incorporation des additifs et l'eau :

On vide l'eau dans récipient de mélange puis on met le mixeur, en marche à 4000rpm et on ajoute les additifs liquide (D-Air) et bien mélanger pour éviter la formation de mousse excessive, puis on ajoute les additifs solides selon l'ordre de tableau (III.2,3,4) (10 sec entre chaque ajout) et continuer à agiter.

6. Mélange du Ciment :

Verser le ciment Lafarge Classe G ou blend (Lafarge classe G + SSA-1) dans le récipient de mélange pour éviter la formation de grumeaux.

Augmenter la vitesse jusqu'à 12000 rpm du mélangeur pour obtenir un laitier homogène, en mélangeant pendant 35 sec.

III.5 Tests réalisés :

III.5.1.1 Mixabilité :

- **Mode opératoire :** Après l'augmentation de la vitesse jusqu'à 12000 rpm pendant 35 sec on voit le type de vortex
- **Résultats :**

Tableau III-5 : les résultats du teste de mixabilité

Série	Echantillon	Mixabilité	Avg. RPM Mélange sous charge (~12000 <i>tr/min</i>)	Temps d'ajout du blend (second)
01	Témoin	5	12000	8
	Testé	4	12000	20
02	Témoin	5	12000	10
	Testé	4	12000	23
03	Témoin	5	12000	10
	Testé	4	12000	20



Figure III-3 : vortex 5

III.5.2 Mix rhéologie :

- **Mode opératoire :** Mesurer la rhéologie du laitier à l'aide d'un rhéomètre à 72°F (la température de laboratoire) à des différentes vitesses pour s'assurer qu'il est dans les limites spécifiées, on utilise Bop&Sleeve.
- **Résultats :**

Tableau III-6 : les résultats de mix rhéologie

Série	300 (tr/min)		200 (tr/min)		100 (tr/min)		6 (tr/min)		3 (tr/min)	
	Témoin	Testé	Témoin	Testé	Témoin	Testé	Témoin	Testé	Témoin	Testé
01	102	210	70	176	42	120	6	14	5	12
02	170	231	120	177	73	105	8	10	6	8
03	192	254	167	185	109	115	9	12	8	10

III.5.3 API rhéologie :

- **Mode opératoire :** nous mettons le laitier dans la cellule, l'insérons dans le consistomètre atmosphérique et ajustez-le en fonction de la température de puits pendant 30 min et on relit la rhéologie.

- Résultats :

Tableau III-7 : les résultats d'API rhéologie

Série	300 (tr/min)		200 (tr/min)		100 (tr/min)		6 (tr/min)		3 (tr/min)	
	Témoin	Testé	Témoin	Testé	Témoin	Testé	Témoin	Testé	Témoin	Testé
01	72	187	60	131	41	81	7	11	3	9
02	124	198	101	158	65	98	6	13	5	11
03	162	173	118	136	68	76	7	10	6	8



Figure III-4 : Test de rhéologie

- Calcule P_v/Y_p :

- Série 1** : - Témoin : $P_v(cp)/Y_p(lb/100ft^2)$: 49,5/24,5
 - Testé : : $P_v(cp)/Y_p(lb/100ft^2)$: 159,75/ 27,25
- Série 2** : - Témoin : $P_v(cp)/Y_p(lb/100ft^2)$: 102/22
 - Testé : : $P_v(cp)/Y_p(lb/100ft^2)$: 150/48
- Série 3** : - Témoin : $P_v(cp)/Y_p(lb/100ft^2)$: 141,75/20,25
 - Testé : : $P_v(cp)/Y_p(lb/100ft^2)$: 146,25/26,75

Effet des additifs (D-Air, CFR-3 et GasStop) sur la Rhéologie du Laitier de Ciment :

- D-Air améliore la consistance du mélange, ce qui peut rendre le laitier plus homogène et réduire les bulles d'air qui peuvent affecter la performance du ciment
- CFR-3 réduit la viscosité apparente du laitier de ciment, facilitant son écoulement et son pompage, même à des concentrations élevées en sel.
- GasStop améliore la stabilité du laitier en empêchant la formation de canaux de gaz, ce qui peut autrement perturber la structure homogène du ciment

L'utilisation combinée de D-Air, CFR-3 et GasStop peut significativement améliorer la rhéologie du laitier de ciment. D-Air réduit l'air entraîné et améliore la fluidité, CFR-3 réduit la viscosité et améliore les propriétés rhéologiques, tandis que GasStop empêche la migration du gaz et maintient la consistance du laitier. Ces effets combinés contribuent à une meilleure performance du laitier de ciment, facilitant son pompage, son placement et assurant une meilleure qualité du ciment durci.

III.5.4 L'eau libre (Free water) :

- **Mode opératoire :**

1. Après le conditionnement du laitier pendant 30min.
2. Remuer le laitier avec une spatule pour assurer l'uniformité.
3. Verser 250 ml du laitier dans une éprouvette graduée de 250 ml.
4. Scellez le haut de l'éprouvette graduée avec du papier film ou un bouchon en caoutchouc.
5. Placez l'éprouvette graduée sur un support de fluide libre à l'angle souhaité. Le support de fluide libre doit reposer sur une surface sans vibrations.
6. Pour maintenir une température constante pendant le durcissement, assurez-vous que le support de fluide libre se trouve dans un endroit qui n'est pas sujet à de grandes variations de température ou à des courants d'air.
7. Après deux heures de durcissement, utilisez une seringue ou une pipette pour éliminer le liquide libre (clair et coloré) qui s'est séparé du haut de la colonne de ciment. Si le test a été effectué sous un angle autre que vertical, le fluide libre doit être siphonné pendant que l'éprouvette graduée se trouve toujours à l'angle de test souhaité. Placer l'éprouvette graduée en position verticale avant de retirer le fluide libre peut provoquer un mélange du fluide libre et du laitier.
8. Mesurer la quantité de liquide libre collecté avec une précision de 0,2 ml.
9. Calculez le pourcentage de fluide libre et enregistrez les résultats des fluides libres dans iFacts.

- **Résultats :**

Tableau III-8 : les résultats d'eau libre

série	Inclinaison °		%Fluide		SG Haut (top)		SG Bas (bottom)	
	Témoin	Testé	Témoin	Testé	Témoin	Testé	Témoin	Testé
01	90	90	0	0	1,88	1,89	1,89	1,9
02	90	90	0	0	1,9	1,89	1,9	1,9
03	90	90	0	0	1,9	1,89	1,9	1,9

Réduction de l'Eau Libre:

- D-Air: Amélioration indirecte via l'homogénéité.
- CFR-3: Réduction directe grâce à une meilleure rétention d'eau et propriétés rhéologiques.
- GasStop: Maintien de l'homogénéité et réduction de la séparation.
- HALAD-9: Réduction significative par amélioration de la rétention d'eau.
- HALAD-413: Réduction grâce à une meilleure rétention d'eau.
- HALAD-344: Réduction par amélioration de la rétention d'eau et stabilité.

III.5.5 Filtrat (API Fluid Loss):

- **Mode opératoire :**

1. Vérifiez les joints toriques en caoutchouc de la cellule pour déceler tout dommage, coupure ou aplatissement.
2. Vérifiez que l'écran n'est pas bouché ou coupé. L'écran doit être propre avec environ 95 % de surface débloquée et en bon état général.
3. Généralement, le fait de tenir l'écran devant une lumière donnera une bonne indication du branchement. La lumière brillera uniformément sur tout l'écran s'il est propre. S'il existe un branchement, il y aura des endroits sombres sur l'écran lorsque vous le tiendrez devant une lumière. Si un colmatage est observé, l'écran doit être nettoyé ou remplacé si nécessaire.

4. Une loupe peut être utilisée pour vérifier les coupures dans l'écran, en plus de la présence de bouchage.
5. Les ports d'entrée et de sortie de la cellule doivent être propres et dégagés afin que l'azote puisse facilement pénétrer dans la cellule et que le filtrat puisse en sortir.
6. La vanne de sortie du capuchon inférieur doit être fermée à ce moment-là et ne pas être ouverte avant le début du test.
7. Vérifiez qu'il y a un joint torique dans la rainure sous les filetages à l'extrémité de la cellule.
8. Placez le tamis filtrant sur le joint torique. Le côté à mailles fines du tamis doit être orienté vers l'intérieur de la cellule d'essai afin qu'il soit en contact avec le laitier.
9. S'assurer qu'un écran de 325 mailles est installé.
10. Placez un joint torique sur le tamis du filtre.
11. Insérez le capuchon d'extrémité et serrez fermement.

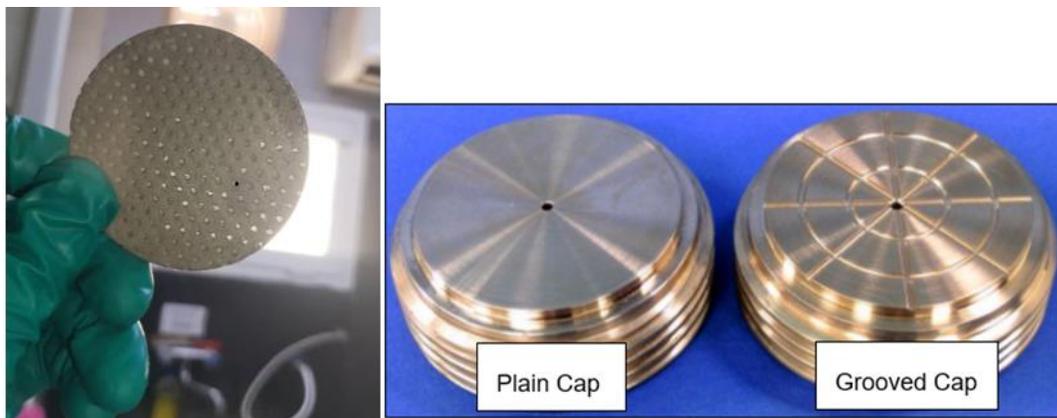


Figure III-5 : : l'écran et les bouchant

12. Après avoir conditionné du laitier, remuez-le avec une spatule pour assurer l'uniformité, puis versez le ciment dans une cellule de perte de fluide statique préchauffée pour tester la température. La valve du capuchon inférieur doit être en position fermée.
13. Laisser un vide de 1 ($\pm 1/4$) pouce au sommet de la cellule de 5 pouces ou de 2 ($\pm 1/4$) pouce au sommet d'une cellule de 10 pouces pour permettre l'expansion du laitier pendant le chauffage.



Figure III-6 : la cellule

14. Placer la cellule dans la chemise chauffante avec l'extrémité contenant le tamis filtrant en bas.
15. Soulevez la cellule/enveloppe chauffante et serrez-la solidement à l'aide de l'écrou à main.
16. Insérez le thermocouple sur le côté de la cellule.

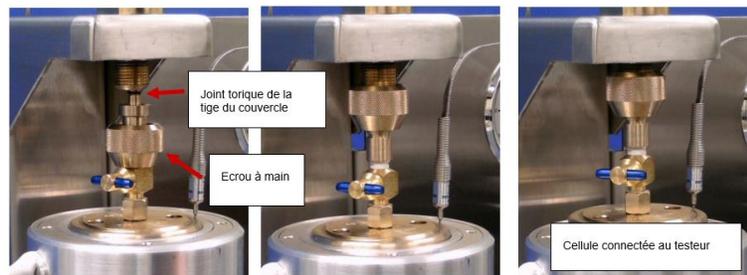


Figure III-7 : l'installation

17. Placer une éprouvette graduée sous la cellule de perte de fluide pour capter le filtrat.
18. Assurez-vous que la soupape de mise à l'air libre et la soupape d'alimentation du collecteur sont fermées.

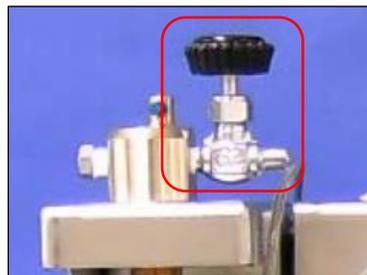


Figure III-8 : la soupape de mise à l'air libre (Pressure Vent Valve)



Figure III-9 : la soupape d'alimentation du collecteur

19. Tournez le bouton du régulateur de pression dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à ce que 1 000 psi soit atteint.
20. Assurez-vous que la vanne d'entrée de la cellule est ouverte, puis ouvrez lentement la vanne d'alimentation du collecteur pour charger la cellule de test.



Figure III-10 : Soupape d'entrée de cellule (Cell Inlet Valve (Open))



Figure III-11: la soupape d'alimentation du collecteur (Manifold Supply Valve (Open))

21. Ouvrez la valve dans le capuchon inférieur et démarrez simultanément une minuterie.
22. Un essai est terminé après 30 minutes, ou lorsque du nitrogène souffle à travers le laitier avant la marque des 30 minutes. Chaque fois que du nitrogène passe, même si du liquide s'écoule, cela doit être considéré comme la fin du test.
23. Fermez la vanne de sortie de cellule sur le capuchon inférieur.

24. Mesurer et enregistrer la quantité de filtrat recueillie pendant la période d'essai. Le filtrat doit être mesuré en millilitres avec une précision de 1 ml. Si l'azote s'échappe en moins de 30 minutes, notez également l'heure à laquelle l'éruption s'est produite.



Figure III 12 : Start du test FL

- résultats :

Tableau III-9 : les résultats de FL

Série	Temps du teste (min)		API FL (ml/30min)		Meas.volume (ml)		Filtre cake épaisseur (mm)	
	Témoin	Testé	Témoin	Testé	Témoin	Testé	Témoin	Testé
01	10	23	138,56	79,95	40	35	20	20
02	30	30	42	28	21	14	20	20
03	30	30	46	34	23	17	19	18

Réduction des Pertes de Fluide:

- D-Air: Effet indirect via l'amélioration de l'homogénéité.
- CFR-3: Réduction directe des pertes de fluide grâce à des propriétés de filtration améliorées.
- GasStop: Effet indirect via la prévention de la migration de gaz.
- HALAD-9: Réduction significative par amélioration des propriétés de filtration.
- HALAD-413: Réduction par amélioration de la formation de barrière contre les fuites de fluide.
- HALAD-344: Réduction par formation de barrière protectrice contre la migration des fluides.

III.5.6 Le temps de pompabilité (THICKENING TIME) :

- Mode opératoire :

- 1- Vérifiez que le ressort de l'aiguille du potentiomètre se déplace librement et est exempt de débris.
- 2- Basculez l'interrupteur du moteur en position marche et assurez-vous que le moteur s'active.
- 3- Allumez l'ordinateur de l'instrument et accédez au logiciel modèle 290.
- 4- Cliquez sur le bouton vert « Démarrer le test ». L'ordinateur vérifiera qu'il y a suffisamment d'espace disponible pour exécuter le test.
- 5- Saisissez les informations du puits dans « Assistant de démarrage - Étape 1 » en utilisant les données de la demande de test iFacts. Les champs obligatoires sont marqués d'un astérisque.

Figure III-13 : écran de saisie des informations du puits

- 6- Cliquez sur le bouton « Ouvrir l'éditeur de profil » sur l'écran pour l'étape 2 de « l'assistant de démarrage ».

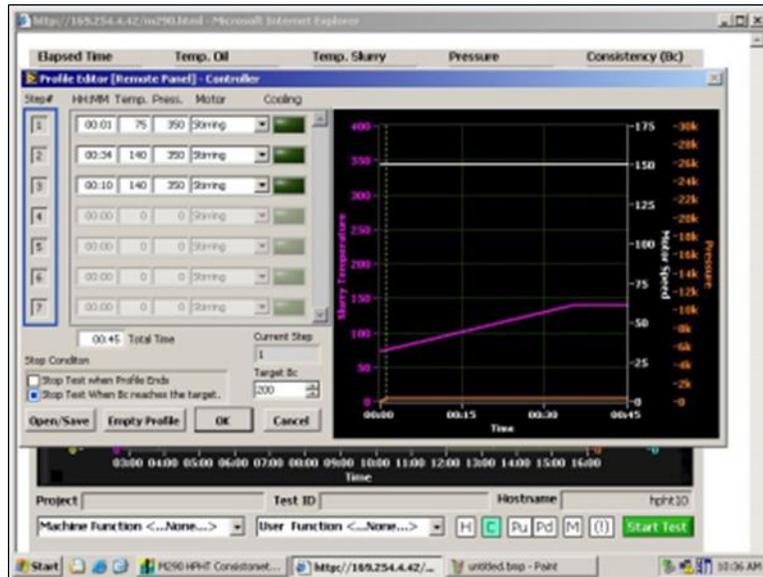


Figure III-14 : écran de saisie la température et la pression du puits

- 7- Saisir le calendrier des tests conformément à la demande de test iFacts
 8- Une fois le profil saisi, cliquez sur « OK », puis cliquez sur « Suivant ».
 9- À l'aide de l'interrupteur de remplissage/vidange sur le panneau avant, remplissez la chambre d'huile jusqu'à environ le niveau où le thermocouple d'huile entre dans la paroi latérale.
 10- La cellule du laitier doit être inspecté et rempli comme suit :
- Nettoyer et lubrifier les filetages de la cellule (uniquement)
 - Inspecter le diaphragme
 - Assemblez l'ensemble de l'arbre de la palette et fixez-le dans le manchon de la cellule.
 - Assurez-vous que la palette tourne librement



Figure III-15 : La cellule de test de thickening time

Remarque : la méthode préférée pour vérifier que la palette/la cellule peut tourner sans se coincer ni broyer est de placer la cellule en bas-bas sur un comptoir ou un support de la cellule du laitier, puis de faire tourner l'arbre à la main pour vérifier le jeu. Alternativement, la cellule peut être inversée, puis tenue par la tige dans une main et ensuite tournée avec l'autre. Si vous utilisez cette technique, la cellule doit être maintenue basse au-dessus d'un comptoir au cas où elle tomberait ou se déplacerait dans une direction inattendue. La coupe ne doit jamais être tenue au niveau du visage.

- e) Retourner l'ensemble du récipient à laitier et remplir jusqu'à 6 mm (1/4 po) du haut.
- f) Frapper légèrement le côté de la cellule pour éliminer l'air
- g) Vissez la plaque de base et assurez-vous que le laitier sort à travers le trou central.
- h) Visser le bouchon dans la plaque de base
- i) Essuyez tout le ciment des surfaces extérieures
- j) Vérifiez à nouveau la palette pour vous assurer qu'elle tourne facilement.

11- À l'aide de la bélière, abaissez la cellule remplie dans la machine et tournez dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à ce que les goupilles soient bien en place dans le plateau tournant.

12- Cliquez sur « Ouvrir le contrôle manuel », puis cliquez sur l'icône « Moteur » (l'icône deviendra verte et indiquera « ON »). Vérifiez la rotation fluide de la cellule dans la chambre. Si la cellule vacille, vérifiez le plateau tournant pour déceler des débris.

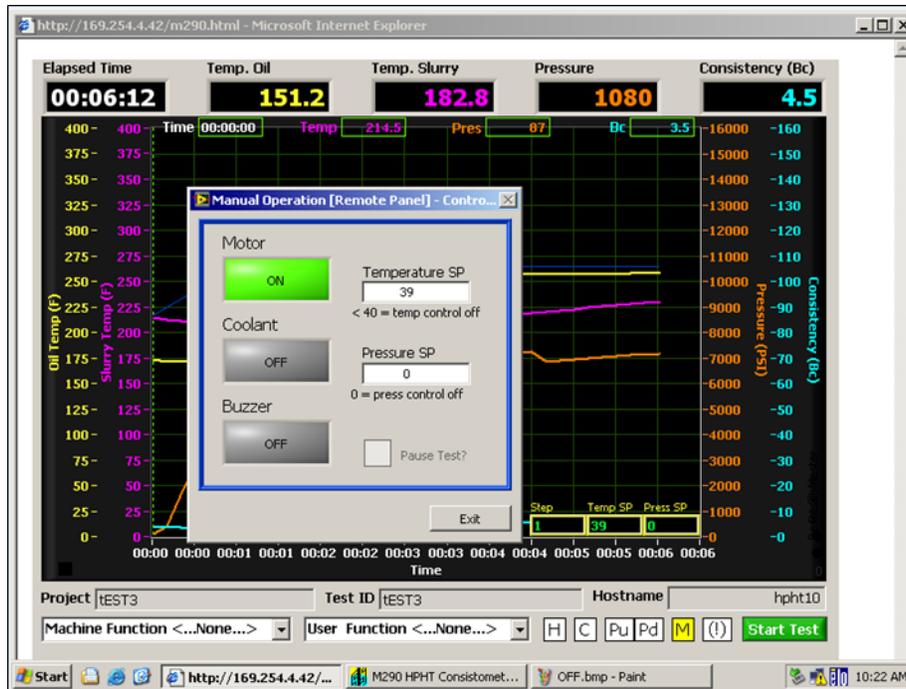


Figure III-16 : écran pour démarrer le moteur

13- Utilisez la bélière pour installer le potentiomètre. Assurez-vous que le potentiomètre repose sur le manchon protecteur du chauffage et non sur l'arbre de la palette.

14- Revérifiez le potentiomètre avec un tournevis à lame plate pour garantir un mouvement fluide du ressort du pointeur.

15- Vissez le couvercle de la chambre de pression en place. Pour le dernier pouce d'espace entre le bas du couvercle et le haut de la chambre, tournez lentement le couvercle jusqu'à ce qu'il atteigne un point d'arrêt, puis reculez-le d'environ $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{2}$ tour dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

16- Observez l'indication Bc pour vous assurer qu'elle ne dépasse pas ou ne passe pas à zéro lors du serrage du couvercle. Si cela se produit, la cause la plus courante est que le potentiomètre est réglé trop haut sur l'arbre de la palette ou que les ressorts de contact sur le côté du potentiomètre sont trop longs et touchent le bas du couvercle. Ceci doit être corrigé avant de poursuivre le test.

17- Vérifiez la rectitude du thermocouple et assurez-vous que le collier est vissé complètement vers le haut jusqu'au sommet de la partie filetée. Si le collier n'est pas correctement ajusté (réglé trop bas), le thermocouple ne se fermera pas et de l'huile jaillira du trou d'évacuation du mandrin.

18- Glissez le thermocouple dans le couvercle et serrez à la main. Assurez-vous que le trou d'évacuation du mandrin pointe vers l'arrière du HPHT (loin de l'opérateur).

19- Remplissez la chambre d'huile tout en tenant un chiffon sur le trou d'évacuation. Une fois l'air purgé du système, serrez l'écrou du thermocouple avec une clé et commencez le test.



Figure III-17 : Placement du thermocouple

20- La pression initiale peut être réglée avec l'interrupteur « Pressure Up ».



Figure III-18 : panneau de contrôle manuel

21- Cliquez sur « Quitter » dans la case « Fonctionnement manuel ». N'éteignez pas le moteur.

22- Cliquez sur le bouton « Suivant » pour passer à « Démarrer l'assistant - Étape 4 ».

23- Vérifiez que tous les éléments de la liste de contrôle « Étape 4 » sont terminés, puis cliquez sur chaque case « Cliquez sur moi, si terminé ».

24- Cliquez sur « Terminer » pour démarrer le test.

25- Les tests peuvent être arrêtés de deux manières :

- Automatiquement – arrêt programmé à la fin du programme de test ou lorsqu'un test atteint un Bc défini.

- Manuellement – en cliquant sur le bouton Arrêter le test sur l'écran.



Figure III-19 : fin du test

Dans les deux cas, un message d'action utilisateur s'affiche indiquant que le test est terminé et que les paramètres EoT (End of Test) sont opérationnels. Le test maintiendra la pression réglée jusqu'à ce que la machine atteigne une température de manipulation sûre.

26- Cliquez sur le bouton « Arrêter le test » sur l'écran Planification des tests pour quitter ce test avant d'en commencer un nouveau. N'essayez jamais d'exécuter un autre test sans quitter l'écran de test. Cela indique à l'instrument que le dernier test effectué n'est plus actif. Cette opération doit être effectuée que le test soit arrêté manuellement ou automatiquement.

27- Après avoir cliqué sur « OK » dans le message d'action de l'utilisateur, le contrôle EoT est désactivé. Ouvrez la commande manuelle et assurez-vous qu'une pression minimale de 1 500 psi est maintenue jusqu'à ce que le laitier atteigne une température sûre avant de retirer la cellule (au moins en dessous de 190 °F, 120 °F est préférable).

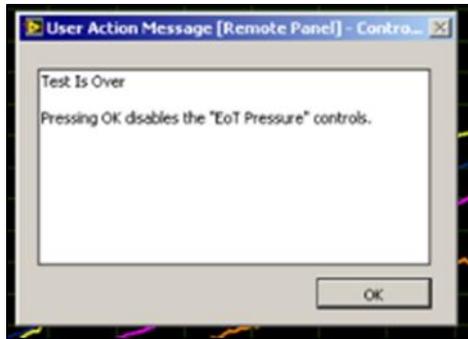


Figure III-20 : confirmation de la fin du test

- Résultat de test de thickening time pour les séries d'expériences :

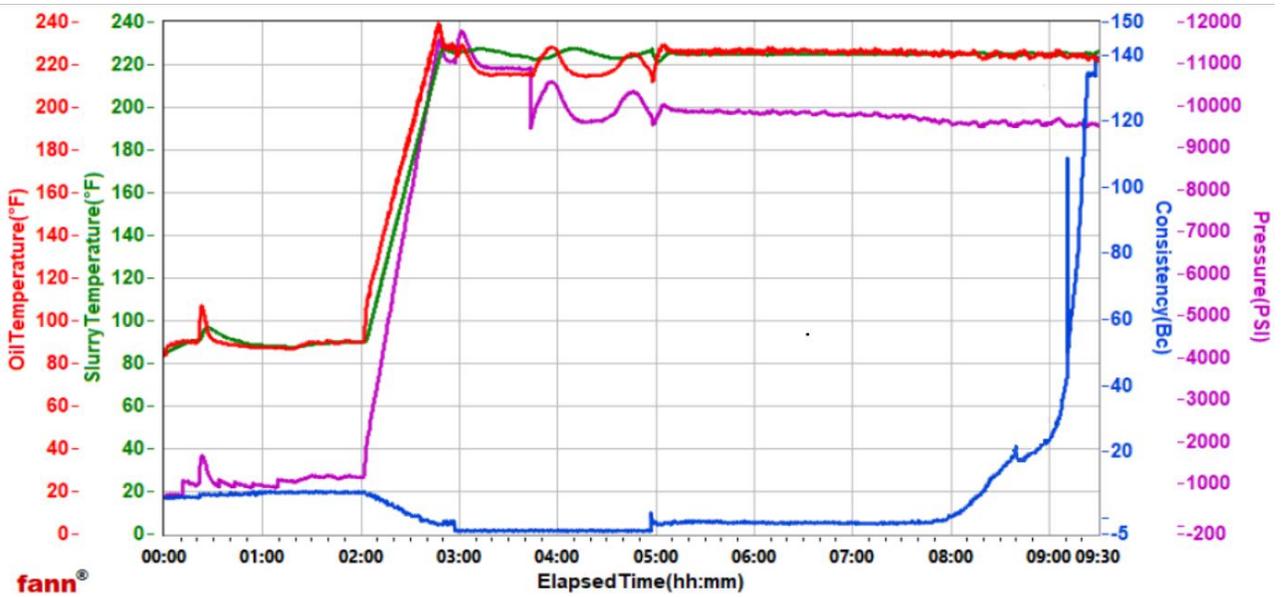


Figure III-21 : chart de thickening time de témoin série 1

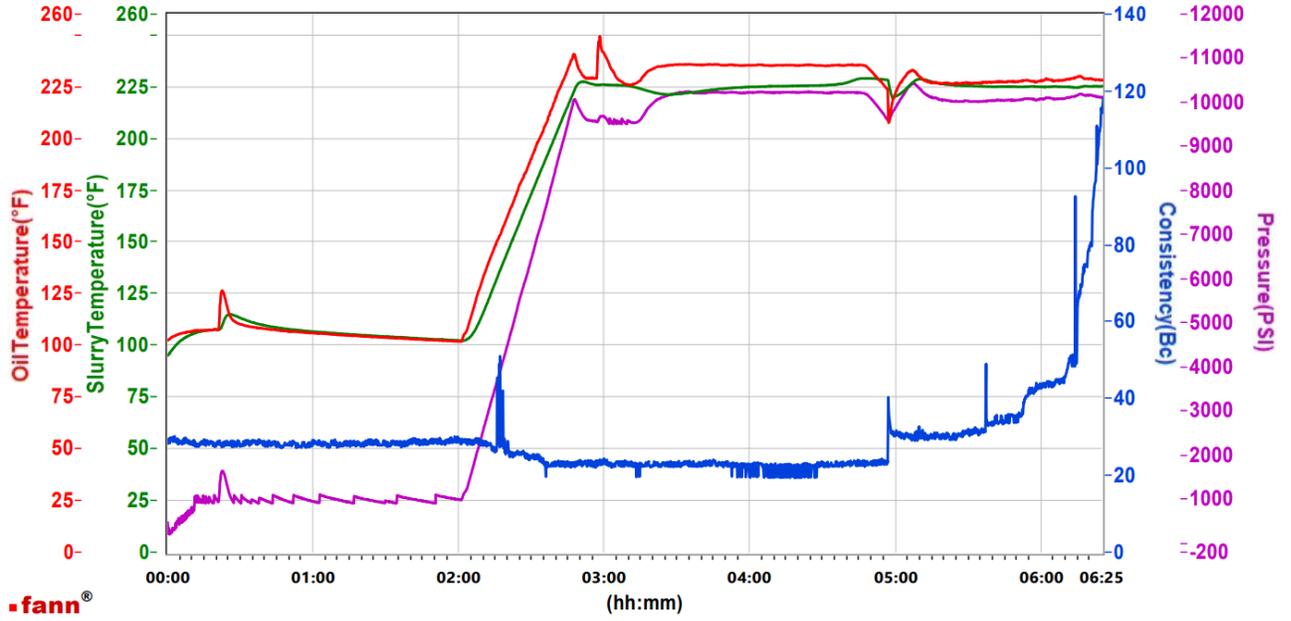


Figure III-22: chart de thickening time de testé série 1

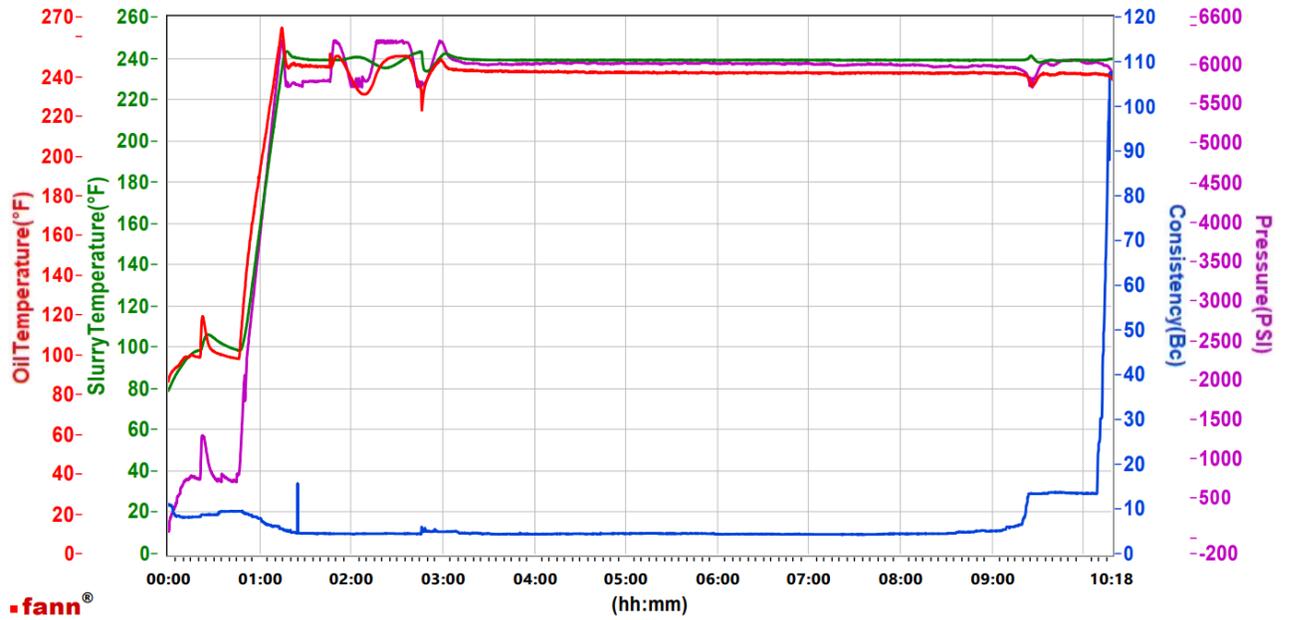


Figure III-23: chart de thickening time de témoin série 2

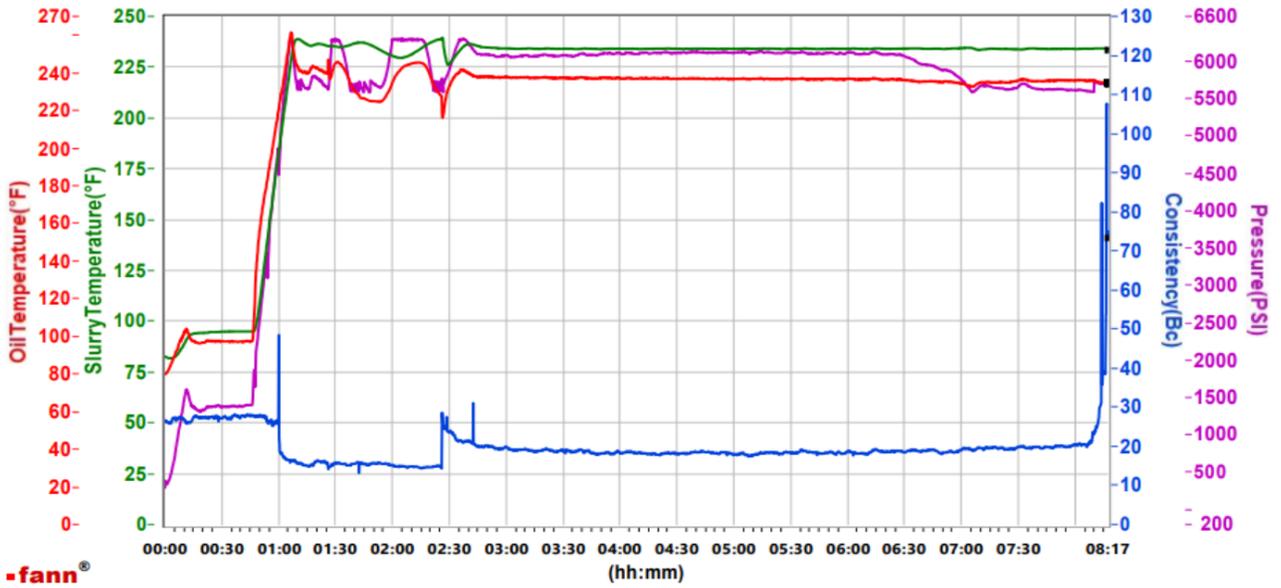


Figure III-24: chart de thickening time de testé série 2

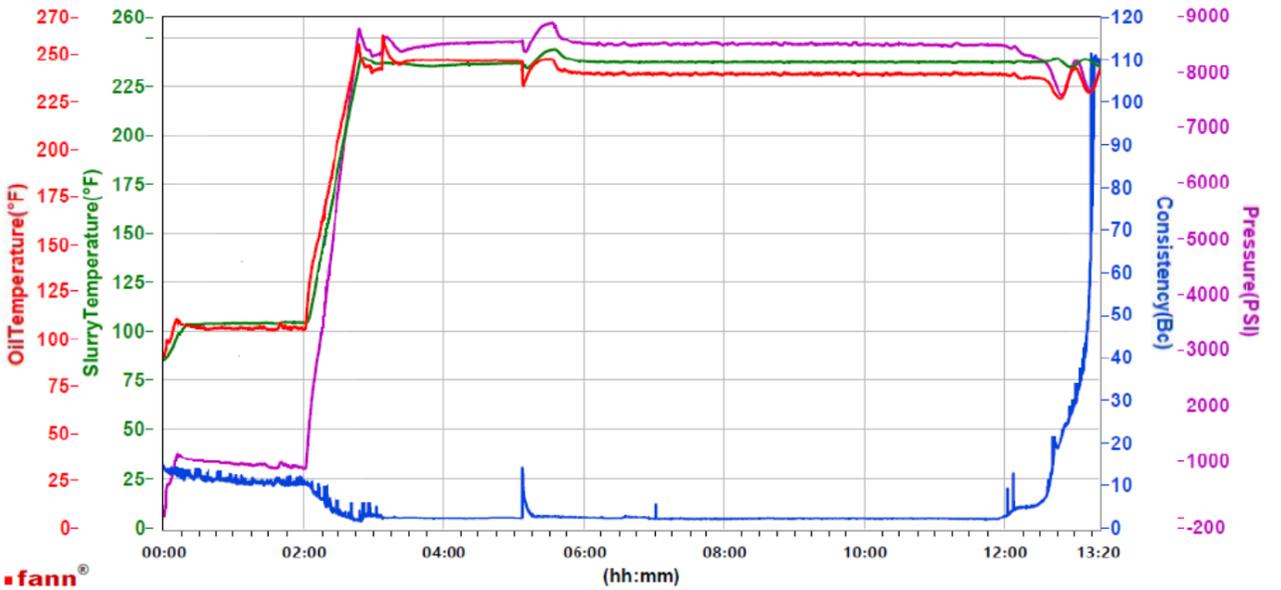


Figure III-25: chart de thickening time de témoin série 3

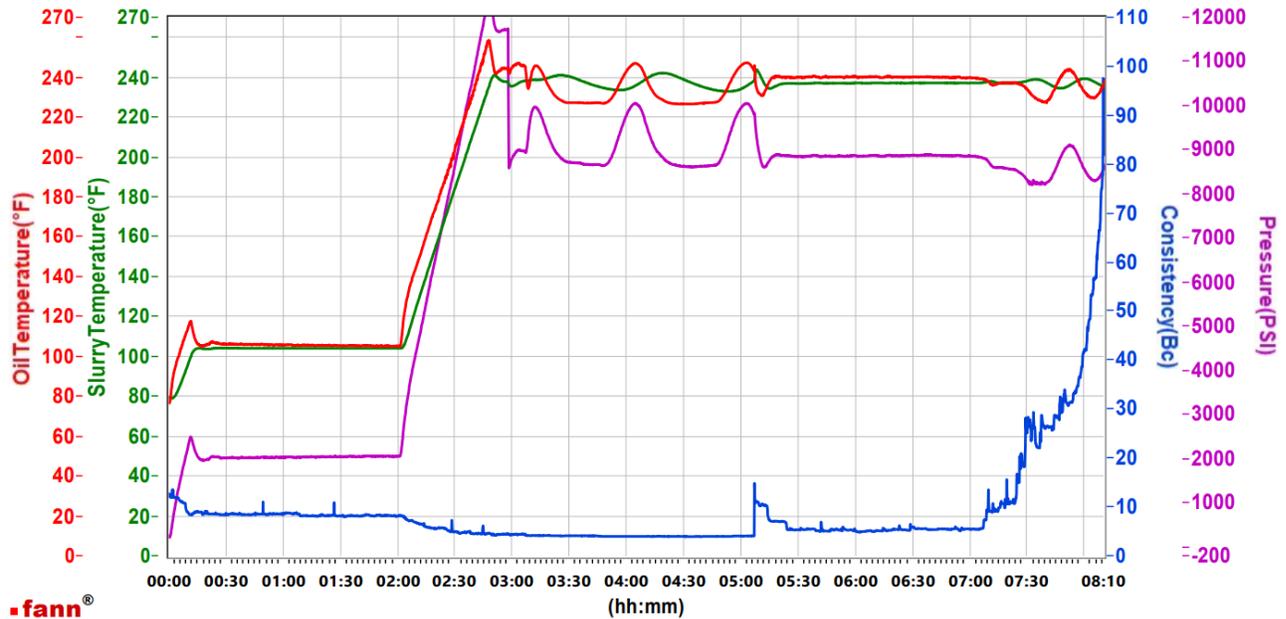


Figure III-26: chart de thickening time de testé série 3

Tableau III-10 : résultats du thickening time

Série	Batch Mix (Min)	Reched in (min)	Start Bc		40 Bc (HH:MM)		50 Bc (HH:MM)		70 Bc (HH:MM)		100 Bc (HH:MM)		Test Terminé (HH:MM)	
			T ₁	T ₂	T ₁	T ₂								
01	45	33	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂								
			10	22	9 :20	6 :00	9 :22	6 :12	9 :24	6 :16	9 :27	6 :23	9 :27	6 :23
02	90	62	20	25	10 :12	8 :17	10 :13	8 :17	10 :15	8 :17	10 :16	8 :17	10 :16	8 :17
03	45	28	12	15	13 :09	8 :00	13 :12	8 :03	13 :14	8 :09	13 :14	8 :10	13 :14	8 :10

Les retardateurs sont des additifs couramment utilisés dans les formulations de ciment pour prolonger le temps d'épaississement, permettant ainsi des opérations de pompage plus longues et plus contrôlées. L'impact de la concentration de retardateur SCR-100 sur le temps d'épaississement est présenté dans les figures (III.21,22,23,24,25,26)

- Pour l'essai 01 avec une concentration de 0,3% le temps d'épaississement pour les deux laitiers témoin et testé dans 40Bc égale respectivement (9 :20, 6 :00) et dans 70Bc égale respectivement (9 :24, 6 :16)

- Pour l'essai 02 avec une concentration de 0,4% le temps d'épaississement pour les deux laitiers témoin et testé dans 40Bc égale respectivement (10 :12, 8 :17) et dans 70Bc égale respectivement (10 :15, 8 :17)
- Pour l'essai 03 avec une concentration de 0,65% le temps d'épaississement pour les deux laitiers témoin et testé dans 40Bc égale respectivement (13 :09, 8 :00) et dans 70Bc égale respectivement (13 :14, 8 :09) l'effet de retardateur sur le temps de pompabilité est expliqué par :
 1. La formation une Couches Protectrices par les retardateurs qui agissent en formant une couche protectrice autour des grains de ciment. Cette couche inhibe temporairement l'hydratation des silicates de calcium. Plus la concentration de retardateur est élevée, plus cette couche protectrice est dense et efficace, retardant ainsi l'accès de l'eau aux grains de ciment.
 2. L'adsorption des molécules de retardateur se fixent aux surfaces des grains de ciment par adsorption. Cette adsorption bloque les sites réactifs, ralentissant la réaction d'hydratation. La densité de cette adsorption est proportionnelle à la concentration de retardateur du laitier de ciment.

L'effet de stabilisateur de la résistance silica flour sur le temps de pompabilité est significatif et apparait clairement la diminution du temps de pompabilité Pour les laitiers testés dans les 3 séries.

L'impact de silica flour est expliqué par :

1. Mécanismes d'action des Stabilisateurs de Résistance agissent en modifiant les interactions chimiques et physiques au sein du laitier de ciment. Ils peuvent interagir avec les particules de ciment et d'autres additifs pour améliorer la structure cristalline et la densité du ciment durci, tout en influençant les propriétés rhéologiques du mélange.
2. Formation de Produits d'Hydratation Les stabilisateurs de résistance peuvent influencer la formation de produits d'hydratation tels que le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et les hydrates de calcium (CH). Une hydratation plus lente et plus contrôlée peut prolonger le temps de pompabilité en retardant l'épaississement initial.

III.5.7 Analyseur de ciment à ultrasonique (ACU) :

- Mode opératoire :

- 1- Placer une jauge de niveau du laitier sur la cellule ouverte de l'analyseur ACU.

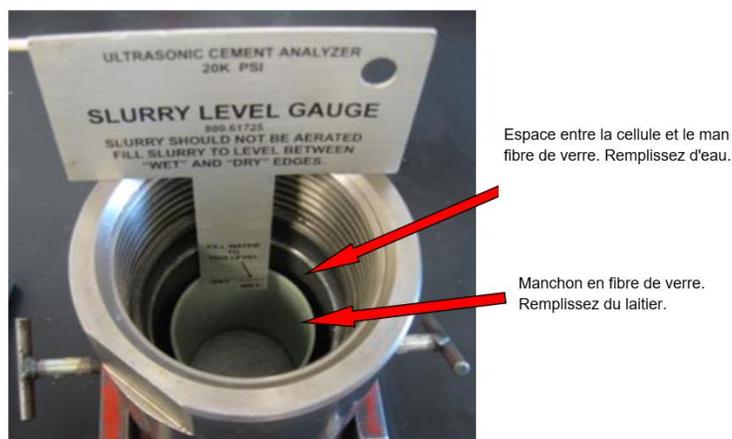


Figure III-27 : placement du jauge

- 2- Verser le laitier dans la cellule entre les niveaux « humide » et « sec » marqués sur la jauge.
- 3- Versez de l'eau sur le dessus du laitier jusqu'à ce que le volume atteigne le marqueur « Remplir d'eau jusqu'à ce niveau ».



Figure III-28: remplissage de la cellule

- 4- Vissez le couvercle dans la cellule. Un peu d'eau doit être évacuée par le raccordement d'eau.



Figure III-29: Montage de la cellule d'ACU

- 5- Nettoyer le transducteur au fond de la chambre.
- 6- Graisser le dessus du transducteur.
- 7- Placez la cellule dans la chambre.
- 8- Connectez la conduite de pression.
- 9- Connectez le thermocouple.
- 10- Connectez le câble du transducteur.



Figure III-30: Start du test ACU

- 11- Programmer les contrôleurs électroniques de pression et de température selon les rampes d'essai déterminées.
- 12- Démarrer le test.
- 13- Étiquetez l'ACU avec la référence du test, les conditions, le nom et les coordonnées, afin qu'un point de contact soit établi pour les situations d'urgence.

- Résultats Résultat de test d'ACU pour les séries d'expériences :

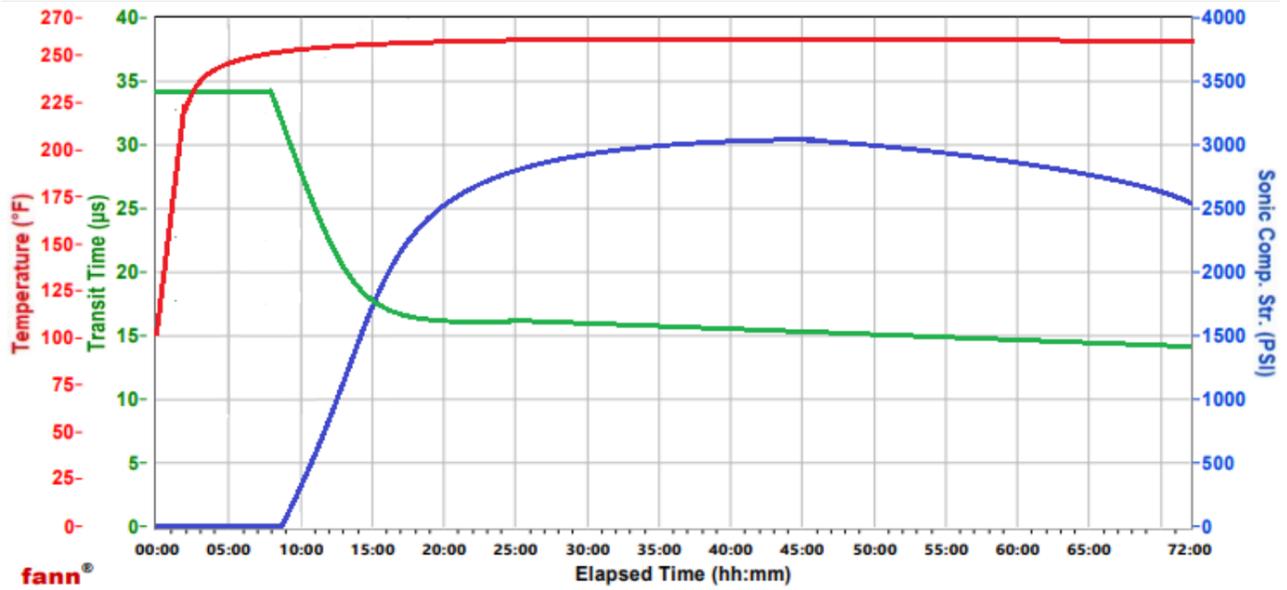


Figure III-31 : chart d'ACU de témoin série 1

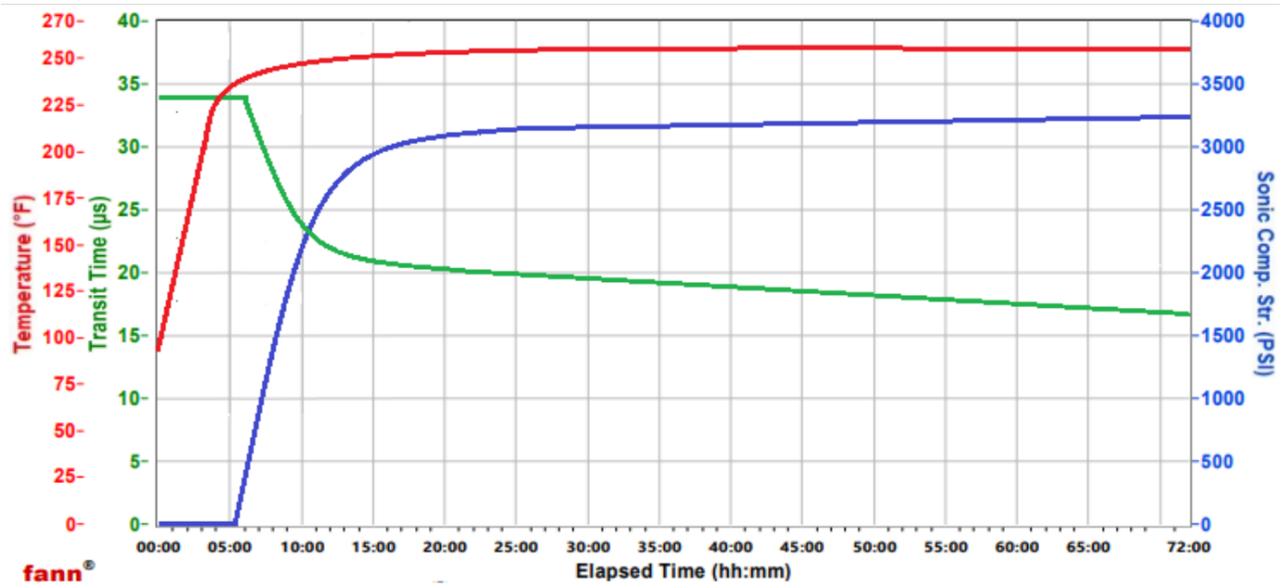


Figure III-32 : chart d'ACU de testé série 1

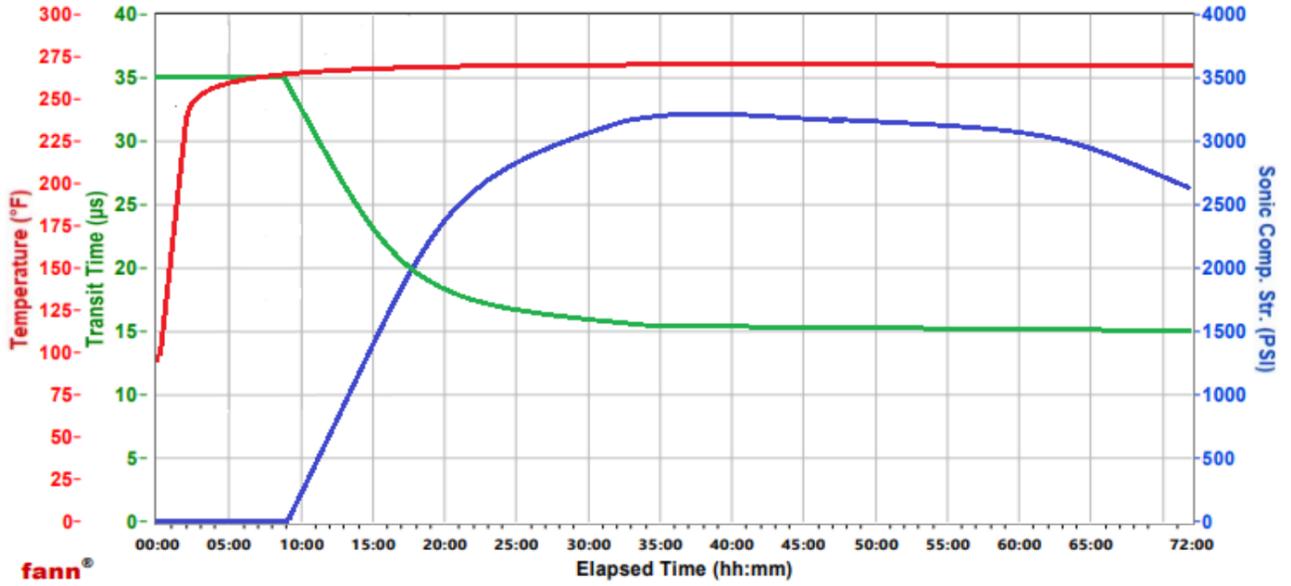


Figure III-33: chart d'ACU de témoin série 2

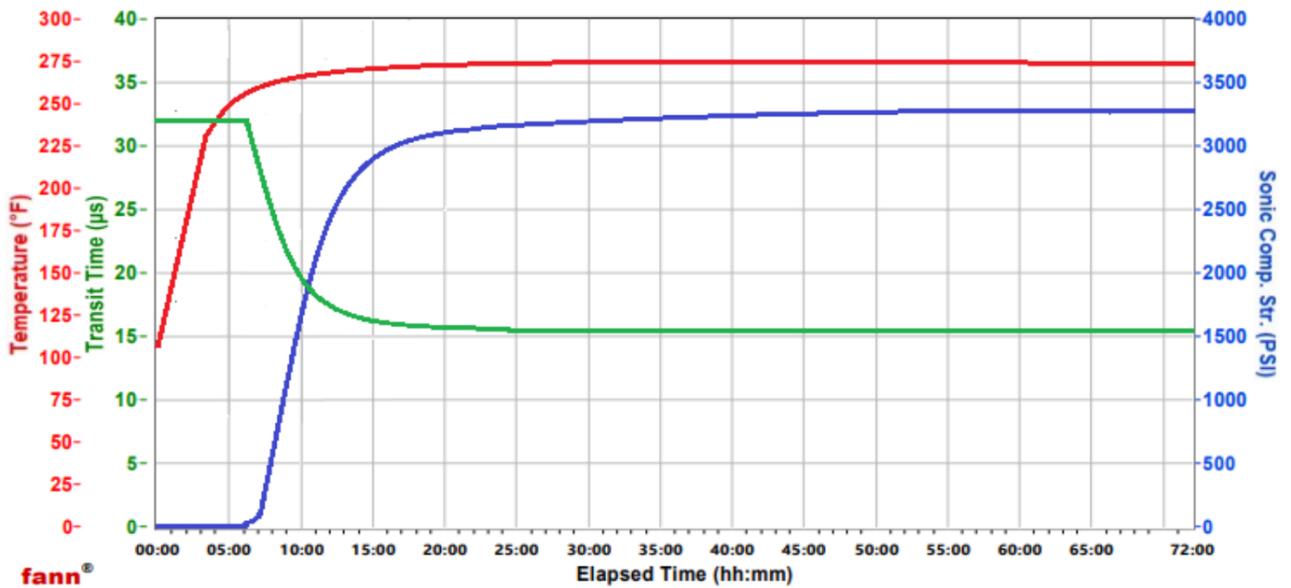


Figure III-34: chart d'ACU de testé série 2

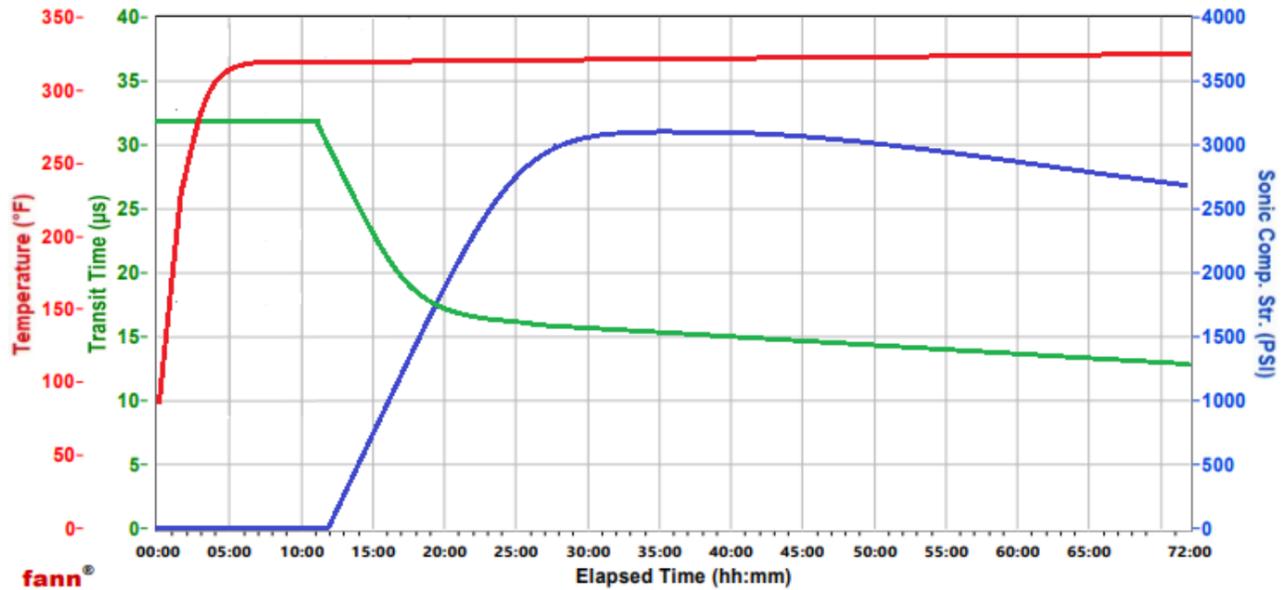


Figure III-35: chart d'ACU de témoin série 3

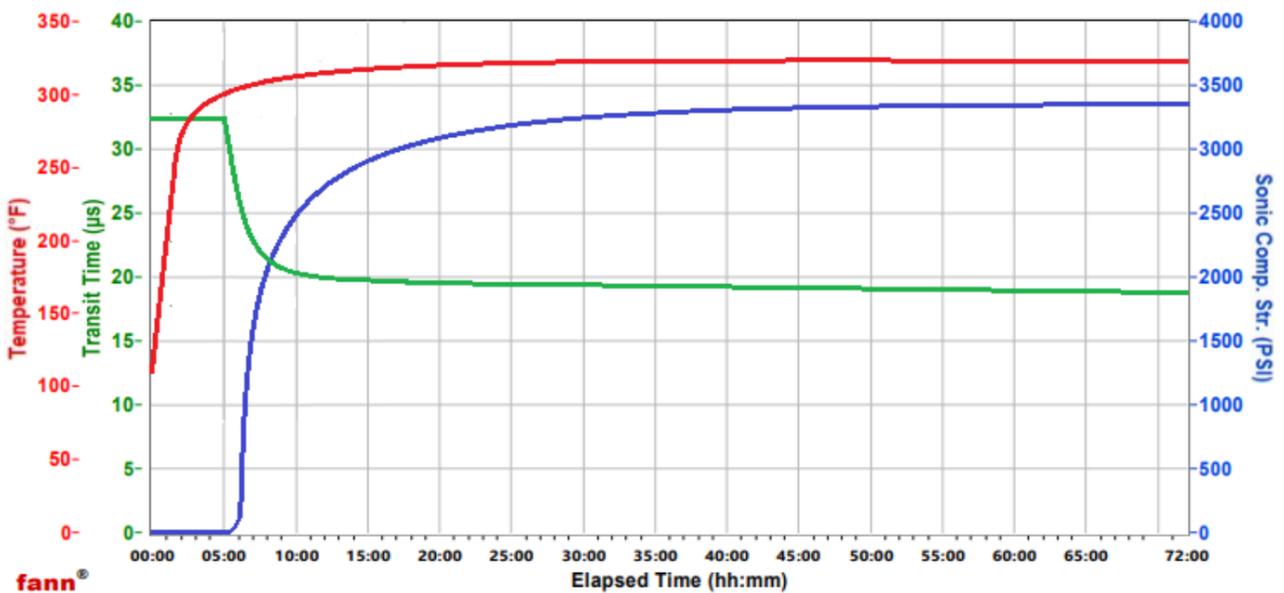


Figure III-36: chart d'ACU de testé série 3

Les courbes (III.31,32,33,34,35,36) présentent la variation de pression en fonction du temps pour le test Ultrasonique des 3 séries d'expérience.

Le test Ultrasonique montre que les échantillons témoins présentent une faible résistance à la compression à la température élevée ceci est montré depuis les résultats de test :

1. Pour l'essai 01 la pression maximale de résistance est égale 2754 psi après 24h on remarque la diminution de la résistance mécanique.
2. Pour l'essai 02 la pression maximale de résistance est égale 2760 psi après 24h on remarque la diminution de la résistance mécanique.
3. Pour l'essai 01 la pression maximale de résistance est égale 2600 psi après 24h on remarque la diminution de la résistance mécanique.

Les échantillons testés avec silica flour présentent une bonne résistance mécanique à la pression élevée. Ceci montré dans les résultats de test :

1. Pour l'essai 01 la pression maximale de résistance est égale 3233 psi
2. Pour l'essai 02 la pression maximale de résistance est égale 3210 psi.
3. Pour l'essai 01 la pression maximale de résistance est égale 3233 psi.

L'impact de silica flour est expliqué par :

1. Le Mécanisme d'action de la Silica Flour agit principalement en comblant les vides entre les grains de ciment, réduisant la porosité et augmentant la densité du ciment durci. Elle participe également aux réactions chimiques pendant l'hydratation, formant des produits secondaires qui renforcent la matrice du ciment
2. La silice flour limite la quantité de vides par réduisant de la porosité dans la matrice du ciment, ce qui diminue les chemins de migration pour les fluides agressifs et augmente la durabilité du ciment.

III.6 Discussion des résultats:

Les résultats obtenus au cours de cette étude expérimentale mettent en lumière l'impact significatif de l'ajout d'additifs sur les propriétés du laitier de cimentation, avec des observations particulières sur l'effet de la silice micronisée (silica flour) et d'autres additifs à différentes concentrations.

- **Effet de la Silica Flour**

Les tests d'Analyseur de ciment ultrasonique (ACU) ont révélé que l'ajout de silice micronisée dans le ciment améliore de manière notable la durabilité et la résistance à la compression du laitier.

Ces propriétés sont cruciales pour assurer la stabilité et la robustesse des puits de forage. La silice flour agit en réduisant la porosité et en densifiant la matrice du ciment, ce qui conduit à une meilleure résistance mécanique et à une durabilité accrue. Cette amélioration est particulièrement bénéfique dans les environnements de forage où la pression et les conditions géologiques peuvent compromettre l'intégrité du ciment.

- **Amélioration de la Rhéologie et du Contrôle de la Perte de Fluide**

Les autres additifs étudiés ont également montré des effets positifs sur différentes propriétés du laitier de cimentation, en fonction de leur concentration dans les trois séries de tests.

- **Rhéologie** : Certains additifs ont amélioré la rhéologie du ciment, facilitant ainsi son pompage et son placement dans le puits. Une bonne rhéologie est essentielle pour garantir une distribution uniforme du ciment et une couverture complète des parois du puits. Les résultats montrent que les additifs modifiant la viscosité et le comportement de cisaillement du laitier permettent une meilleure manipulation et application du ciment, ce qui est crucial pour des opérations de cimentation réussies.
- **Perte de Fluide** : La gestion de la perte de fluide est une autre préoccupation majeure dans le processus de cimentation. Les additifs spécifiques utilisés ont démontré leur efficacité à réduire la perte de fluide, ce qui est crucial pour maintenir l'intégrité du ciment pendant son durcissement. Une perte de fluide contrôlée empêche les migrations de gaz et d'eau, qui peuvent sinon affaiblir le ciment et compromettre la sécurité du puits.

- **Implications et Applications Pratiques :**

Les résultats obtenus indiquent clairement que l'ajout stratégique d'additifs peut grandement améliorer la performance du laitier de cimentation. L'utilisation de la silice flour est particulièrement recommandée pour les applications nécessitant une durabilité et une résistance à la compression élevée. Par ailleurs, les autres additifs doivent être sélectionnés en fonction des besoins spécifiques du projet, notamment pour améliorer la rhéologie et contrôler la perte de fluide.

III.7 Conclusion :

En conclusion, cette étude démontre que l'ajout de silice micronisée améliore de manière significative la durabilité et la résistance à la compression du laitier de ciment, tandis que d'autres additifs, selon leur concentration, peuvent optimiser la rhéologie et réduire la perte de fluide. Ces

résultats offrent des perspectives précieuses pour les pratiques de cimentation, suggérant que l'intégration réfléchie d'additifs peut améliorer la qualité et la performance globale des opérations de forage pétrolier. En appliquant ces connaissances, les ingénieurs peuvent développer des solutions de cimentation plus robustes et efficaces, répondant aux exigences strictes de l'industrie.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude vise à identifier les combinaisons d'additifs les plus efficaces pour optimiser la qualité du ciment dans des conditions spécifiques de puits. En évaluant systématiquement les performances de différentes combinaisons d'additifs à travers une série d'expériences contrôlées, nous cherchons à fournir des recommandations précises et scientifiquement fondées pour l'industrie du forage pétrolier. Ces recommandations viseront à améliorer la fiabilité opérationnelle, à réduire les risques environnementaux et à soutenir une meilleure gestion des ressources dans les opérations de forage.

Les résultats expérimentaux démontrent de manière convaincante l'impact positif de l'ajout d'additifs sur les propriétés du laitier de cimentation. En particulier, l'intégration de la silice micronisée (silica flour) dans le ciment s'est révélée significativement bénéfique pour améliorer la durabilité et la résistance à la compression du laitier. Ces améliorations sont cruciales pour assurer la longévité et la robustesse des puits de forage, contribuant ainsi à une meilleure stabilisation et à une réduction des risques d'échec structurel.

En outre, d'autres additifs, lorsqu'ils sont utilisés à des concentrations appropriées, ont montré des effets positifs sur divers aspects de la performance du laitier, certains additifs (CFR-3, D-Air) ont amélioré la rhéologie du ciment, facilitant ainsi son pompage et son placement dans le puits. D'autres additifs (HALAD-9, HALAD-413, HALAD-344) ont été efficaces pour contrôler la perte de fluide, un facteur essentiel pour maintenir l'intégrité du ciment pendant le processus de durcissement. La gestion de la perte de fluide est particulièrement importante pour prévenir les problèmes de migration de gaz et d'eau, qui peuvent compromettre la qualité de la cimentation.

Cette étude souligne l'importance de la sélection et de l'optimisation des additifs dans le processus de cimentation. L'utilisation de la silice micronisée améliore notablement la durabilité et la résistance mécanique du ciment, tandis que d'autres additifs, en fonction de leurs concentrations, apportent des avantages complémentaires en termes de rhéologie et de contrôle de la perte de fluide.

Ces résultats fournissent des indications précieuses pour les pratiques de cimentation, suggérant que l'ajout stratégique d'additifs peut grandement améliorer la performance globale des

opérations de forage pétrolier. En appliquant ces connaissances, il est possible de développer des solutions de cimentation plus fiables et plus efficaces, répondant aux exigences élevées de l'industrie pétrolière.

Références

- [1]. D. Zakaria., « Pose, cimentation d'une colonne de tubage et calcul de cimentation. Cas du forage Debidibi – El Hadjira », mémoire master, UKMO,2021.
- [2]. J. NGUEN., "Technique d'exploitation pétrolier le forage," TECHNPI, Paris1993.
- [3]. J.N. Furgier., " Manuel de forage à l'usage des géologues ", ELF. Aquitaine production, 1995.
- [4]. M.CHAIBI, contribution au développement d'un nouveau laitier allégé aux microsphères dans le cas d'une cimentation d'un tubage intermédiaire.IUT DE Marseille France 2011.
- [5]. La MRAe Forages géothermiques au Dogger en Île-de-France, réalisation et contrôle des cimentations,2021.
- [6]. M. Ahmed K.F, « L'effet des eaux chlorurées calciques pouvant des lais Ld2 sur la qualité de la ciment », Mémoire master, 2015.
- [7]. H.Nassima., « Procédure de contrôle de qualité du ciment pétrolier et de l'efficacité des additifs du ciment en deux systèmes de laitiers doux et salé », mémoire master,2017.
- [8]. H. Salah., « Descente et cimentation du liner 7" Dans le champ de Hassi-Messaoud, Application sur le puits OMN82bis », mémoire master,2014.
- [9]. A. SLIMANI et M. DADDOU, « Module M1 FORMATION JDF », DIVISION FORAGE Département Formation, Mars 2004.PP 48-49.
- [10]. IADC Drilling Manual - Eleventh Edition, International Association of Drilling Contractors, chapitre T: Cementing, 2000.
- [11]. "Drilling Data Handbook", 7ème édition, Edition TECHNIP, 1999.
- [12]. "diagraphies de cimentation", ENSPM Formation Industrie-training, 2005.
- [13]. "Drilling Engineering Workbook",Baker Hughes INTEQ, Houston, United States of America,1995.

- [14]. 'Drilling Engineering', Institute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University.
- [15]. 'Laitiers et Ciments', ENSPM Formation Industrie- training, 2005.
- [16]. 'Laitiers et Ciments', ENSPM Formation Industrie- training, 2006.
- [17]. "The ChevronTexaco and BP Cement Manual", Section 3, 2002.
- [18]. William Lyon, working guide to Drilling-Equipment-and-Operation, Elsevier, First edition 2010.
- [19]. B. Somia, "Etude et formulation d'un laitier de ciment pétrolier élaboré avec l'incorporation des additions naturelles," Ouargla, 2019.
- [20]. Dipl.-Ing. Wolfgang F. Prassl, "Drilling Engineering", Department of Petroleum Engineering, Curtin University of Technology.
- [21]. Bogue, R.H., 1955. The chemistry of Portland cement, LWW.
- [22]. J.-L. VIGNES. Centre de Ressources Pédagogiques en Chimie "Une vie de ciment", 1996.
- [23]. A.Hamza. Cementing Global PASQ, 2022.
- [24]. Norme API Spec 10A
- [25]. B. RANDA., « l'effet des eaux chlorurés calciques prévenant des Lias Id2 sur la qualité de la cimentation, mémoire de magister. UKMO, 2007/2008.
- [26]. ISO, « Viscosité de l'eau », Rapport technique, ISO/TR 3666:1998(F), 1998
- [27]. F.Rueda. Cementing Global PASQ, 2023
- [28]. P.Christopher. . Cementing Global PASQ, 2021.
- [29]. Fann Instrument Company, HPHT cement consistomètre, 2006.
- [30]. OFI Testing Equipment, Inc. - 11302 Steeplecrest Dr.Houston, TX 77065 USA

[31]. COREStaff Communication Services, Cementing Technology Manual HALLIBURTON

