

N° Série : 2023/2024

Université Kasdi Merbah Ouargla



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

**Département de Forage et Mécanique des Chantiers Pétroliers.**

**MEMOIRE**

**Pour obtenir le Diplôme de Master**

**Option : Forage**

Présenté Par :

**KHELIFA MOUMENE MAHI EDDINNE, ABBASI ANIS, TOUATI HAMZA NOUR ELISLAM**

-THEME-

---

Analyse et optimisation des performances de la technologie Fulcrum pour la cimentation des puits horizontaux. Comparaison avec la méthode conventionnelle

---

Soutenu le : 25 / 06 / 2024 devant la commission d'examen

**Devant le Jury :**

Président	Mr. Mamanou Abdellatif	Pr	UKMO
Examineur	Mr. Toumi Nabil	Dr	UKMO
Rapporteur	Mme. Chelgham Fatiha	Dr	UKMO
Co-encadreur	Mr. Atlili Med Elhadi		UKMO

## **Remerciement**

Voici venu le temps de mettre un point final à ce manuscrit et à cette année dans l'université KASDI MERBAH, sous la direction de l'encadreur, Mr. Atlili Med Elhadi pour la confiance dont il a toujours fait preuve à mon égard et pour ses perpétuels encouragements.

Je tiens à remercier Mr. Mamanou Abdellatif pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Je présente également ma profonde reconnaissance à Mr. Toumi Nabil qui a accepté d'examiner mon travail.

Enfin, dans ces dernières lignes je tiens à remercier mes parents, mes sœurs et mes frères, les conseils et les encouragements qu'ils m'ont toujours prodigués ainsi que pour leur soutien tant moral que financier. Sans eux, je ne serais pas où j'en suis et ce que je suis. Merci encore à tous le département de forage.

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail :

Mes chères familles, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

- ❖ Ma source de joie de courage Ma mère, la raison de Mon existence
- ❖ Mon support Mon père, ma source d'inspiration. "Que Dieu ait son âme".
- ❖ Mon chère oncle Amine, ma source de motivation, de paix et de confiance.
- ❖ Ma sœur Nourane, Mon bon sens d'amour et de Joie.
- ❖ Ma grand-mère mama fatma, qui m'ont permis de croire en moi, et arrivé à ce point.
- ❖ Ma deuxième mère dans Ouargla Tata Soumaya, qui a toujours été à mes cotes en toutes circonstances et me soutien moralement.

Mes amis qui ont été là pour moi :

- ❖ Mes meilleurs Amies Salah Bouzaher ET skander; symbole d'amitié et fidélité.
- ❖ Remerciement spécial à Mr Elhadi Atlili, votre soutien et vos encouragements constants ont été d'une valeur inestimable pour la réussite de ce travail. Merci infiniment pour votre disponibilité et votre contribution significative.

**KHELIFA MOUMENE MAHI EDDINE**

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail :

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

❖ A mes parents qui voient aujourd'hui leurs efforts ET leurs sacrifices couronnés par Ce rapport, ILS ont veillés à Mon éducation avec UN amour infini ET affection dont je ne recevrai pas d'égale. Que Dieu me permette de leur rendre au moins une partie.

❖ Aucune dédicace ne saurait leur exprimer mes sentiments à Mon chère Amie aymen.

❖ Remerciement spécial à Mr Elhadi Atlili, votre soutien et vos encouragements constants ont été d'une valeur inestimable pour la réussite de ce travail. Merci infiniment pour votre disponibilité et votre contribution significative.

**TOUATI HAMZA NOUR ELISLAM**

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail :

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

❖ A mes parents qui voient aujourd'hui leurs efforts ET leurs sacrifices couronnés par Ce rapport, ILS ont veillés à Mon éducation avec UN amour infini ET affection dont je ne recevrai pas d'égale. Que Dieu me permette de leur rendre au moins une partie.

**ABBASSI ANIS**

## ملخص:

تهدف دراستنا إلى تحليل وتحسين أداء تكنولوجيا الفولكريم لسمنثة أكثر كفاءة مقارنة بالطريقة التقليدية في المرحلة 4/2" في الآبار الأفقية. تم تقسيم هذه الدراسة إلى عدة فصول، سيتم ربطها في النهاية لفهم المحتوى الذي تمت مناقشته. بدأنا بتصميم أسمنت مصنوع باستخدام برنامج السمنثة, بعد إجراء تحليل معلمي لفحص تكوين الإسمنت المستعمل لتقنية الفولكريم و المواد المضافة إليه. لتقييم حالة الإسمنت بعد سنتة البئر يتم استخدام أداة الفوق الصوتية. في حين نستعمل أداة س-بل ف-دل لتقييم جودة السمنثة التقليدية. و أخيرا , يمكننا إتخاذ قرار نهائي بشأن حالة الإسمنت و تقييم جودته من خلال المقارنة بين نوعي الإسمنت المستخدم , من خلال تحليل البيانات التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج محاكات تكلوق. تهدف هذه الأطروحة إلى تقديم تقديم تحليل متعمق وتوصيات بناء على النتائج التي تم الحصول عليها وهذا يساعد في تحسين المعرفة في مجال سمنثة الآبار الأفقية.

الكلمات المفتاحية: تكنولوجيا الفولكريم , السمنثة, الآبار الأفقية, برنامج السمنثة, أداة الفوق الصوتية, أداة س-بل ف-دل. ل, برنامج محاكات تكلوق.

## Résumé :

Notre étude vise à l'analyse et l'optimisation des performances de la technologie Fulcrum pour une cimentation plus efficace par rapport à la méthode conventionnelle dans les puits horizontaux de la phase 4 1/2". Cette étude a été divisée en plusieurs chapitres, qui seront liés à la fin afin de comprendre le contenu abordé. On commencé par un design de ciment réalisé à l'aide du logiciel CEMENTICS. Après ça une analyse en laboratoire est effectuée afin d'examiner la composition des ciments Fulcrum et de leurs additifs. Après la cimentation des puits, un outil IBC est utilisé pour évaluer l'étanchéité du ciment Fulcrum, tandis que l'outil CBL-VDL est utilisé pour le ciment conventionnel. Les résultats de ces tests sont une source précieuse d'informations sur la qualité et l'intégrité du ciment dans les puits respectifs. Enfin, En analysant les données obtenues à l'aide du logiciel TECHLOG, on peut prendre une décision finale sur l'état du ciment et évaluer les performances comparatives des deux types de ciments utilisés. Ce mémoire vise à fournir une analyse approfondie et des recommandations basées sur les résultats obtenus. Cela aide à améliorer les connaissances dans le domaine de la cimentation des puits horizontaux.

Mots-clés : la technologie Fulcrum, cimentation, les puits horizontaux, logiciel CEMENTICS, logiciel CEMENTICS, un outil IBC, l'outil CBL-VDL, logiciel TECHLOG.

**Abstract:**

Our study aims to analyze and optimize the performance of the technology Fulcrum for more efficient cementing compared to the conventional method in Phase 4 horizontal wells 1/2". This study has been divided into several chapters, which will be linked at the end to understand the content discussed. We started with a cement design made using the CEMENTICS software. After a laboratory analysis is performed to examine the composition of the cements Fulcrum and their additives. After cementing the wells, an IBC tool is used to assess the tightness of the cement Fulcrum, while the CBL-VDL tool is used for conventional cement. The results of these tests are a valuable source of information on the quality and integrity of cement in the respective wells. Finally, by analyzing the data obtained using the TECHLOG software, one can make a final decision on the condition of the cement and evaluate the comparative performance of the two types of cements used . This thesis aims to provide an in-depth analysis and recommendations based on the results obtained. This helps to improve knowledge in the field of cementing horizontal wells.

**Keywords:** the technology Fulcrum, cementing, horizontal wells, CEMENTICS software, IBC tool, CBL-VDL tool, TECHLOG software.

## Table des matières

<b>Remerciement</b>	I
<b>Dédicace</b>	II
<b>Résumé</b>	V
<b>Liste des figures</b>	XIII
<b>Liste des tableaux</b>	XVI
<b>Symboles –Notation- Abréviations</b>	XIX
<b>Introduction générale</b>	01
<b>Chapitre I : Généralités sur le Liner</b>	
<b>I. Introduction</b>	04
<b>I.1 Définition</b>	04
<b>I.2 Différents types de liner</b>	04
<b>I.2.1 Liner de forage</b>	05
<b>I.2.2 Liner de production</b>	05
<b>I.2.3 Le Stub Liner</b>	05
<b>I.2.4 Le Scab Liner</b>	05
<b>I.2.5 Le Tie-back liner</b>	05
<b>I.3 Les équipements constitutifs d'un liner conventionnel:</b>	06
<b>I.4 Les éléments de pose et de manipulation</b>	07
<b>I.4.1 La garniture de pose (setting string)</b>	07
<b>I.4.2 Le manchon de pose (Setting sleeve or setting collar)</b>	07
<b>I.4.3 L'outil de pose (setting tool)</b>	08
<b>I.4.3.1 L'outil de pose mécanique</b>	08
<b>I.4.3.2 L'outil de pose hydraulique</b>	08
<b>I.5 Système d'étanchéité</b>	09
<b>I.6 Mécanisme de suspension (Liner hanger)</b>	10
<b>I.6.1 Liner hanger mécanique</b>	10
<b>I.6.2 Liner hanger hydraulique</b>	10
<b>I.7 Le liner top packer</b>	11
<b>I.8 Polish Bore Receptacle (PBR)</b>	11
<b>I.9 Le joint rotatif (liner Swivel)</b>	12
<b>I.10 Habillage du liner</b>	12
<b>I.11 Les avantages du liner</b>	13



<b>I.12 Les inconvénients du liner</b>	13
<b>Chapitre II : Généralité sur la cimentation</b>	
<b>II. Introduction</b>	15
<b>II.1 Définition de la cimentation</b>	15
<b>II.2 Principe de cimentation</b>	15
<b>II.3 Les objectifs de la cimentation</b>	15
<b>II.5 Différentes types de cimentation</b>	16
<b>II.5.1 Cimentation des cuvelages ou des casings</b>	16
<b>II.5.2 La pose de bouchon de ciment</b>	16
<b>II.5.3 Squeeze (injection de ciment sous pression)</b>	16
<b>II.5.4 Cimentation ordinaire</b>	16
<b>II.5.5 Cimentation a deux étages</b>	16
<b>II.6 Les Equipements de Cimentation</b>	17
<b>II.6.1 La tête de cimentation</b>	17
<b>II.6.2 Les unités de cimentation</b>	17
<b>II.6.3 Les bouchons de cimentation</b>	18
<b>II.6.4 Bacs de recirculation et système d'ajout d'additifs liquides</b>	19
<b>II.6.5 Entonnoir et duses de gâchage</b>	20
<b>II.6.6 Compresseurs, silos et silo intermédiaire</b>	20
<b>II.7 Programme de cimentation</b>	20
<b>II.8 Les étapes de l'opération</b>	21
<b>II.9 Ciment et laitier</b>	22
<b>II.9.1 Définition</b>	22
<b>II.9.2 Choix du laitier</b>	22
<b>II.9.3 Les types de laitier de ciment</b>	22
<b>II.9.3.1 Les laitiers ordinaires</b>	22
<b>II.9.3.2 Les laitiers allégés</b>	23
<b>II.9.3.3 Les laitiers denses ou alourdis</b>	23
<b>II.9.3.4 Les laitiers pour température élevée</b>	23
<b>II.9.3.5 Les laitiers pour régions froides</b>	24
<b>II.9.3.6 Les Laitiers thixotropes</b>	24
<b>II.9.4 Volume de laitier</b>	24
<b>II.9.5 Classification des ciments pétroliers</b>	26

<b>II.9.6 L'eau de gâchage</b>	27
<b>II.9.7 Additifs pour ciments</b>	27
<b>II.9.8 Le fluide intermédiaire (washes et spacer)</b>	29
<b>II.9.8.1 Le bouchon laveur</b>	29
<b>II.9.8.2 Le bouchon déplaceurs</b>	30
<b>II.9.9 Réalisation d'un laitier du ciment en laboratoire</b>	30
<b>II.9.9.1 Mesure de la densité des produits de départ</b>	30
<b>II.9.9.2 La pesé</b>	31
<b>II.9.9.3 Le mixage</b>	31
<b>II.10 Paramètres affectant la cimentation</b>	32
<b>II.10.1 stand-off</b>	32
<b>II.10.2 Effet de rotation de colonne de tubage</b>	33
<b>II.10.3 L'effet de canal</b>	33
<b>II.11 Caractéristiques et propriétés d'un laitier de ciment</b>	34
<b>II.11.1 Densité de ciment</b>	34
<b>II.11.2 Le rendement</b>	35
<b>II.11.3 Le filtrat</b>	35
<b>II.11.4 L'eau libre</b>	35
<b>II.11.5 La durée de pompage</b>	35
<b>II.11.6 Résistance à la compression</b>	36
<b>II.11.7 La perméabilité</b>	36
<b>II.12 Choix des fluides et des écoulements</b>	36
<b>II.12.1 Généralités sur la rhéologie des fluides</b>	36
<b>II.12.2 Les type d'écoulements</b>	38
<b>II.13 Classification du comportement des fluides</b>	39
<b>II.13.1 Fluide Newtonien</b>	39
<b>II.13.2 Fluides non-Newtoniens</b>	40
<b>II.14 Tests en laboratoire</b>	41
<b>II.14.1 Mesure de densité</b>	41
<b>II.14.2 Mesure de rhéologie</b>	41
<b>II.14.3 Test de fluidité libre</b>	43
<b>II.14.4 Test de perte de fluide</b>	43
<b>II.14.5 Test de temps</b>	44

<b>II.14.6 Test de résistance à la compression</b>	44
<b>Chapitre III: Contrôle de la qualité de la cimentation</b>	
<b>III. Introduction</b>	47
<b>III.1 L'objectif d'évaluation du ciment</b>	47
<b>III.2 Les défauts de la cimentation qui peuvent perturber l'étanchéité</b>	47
<b>III.3 Les causes des défauts de la cimentation</b>	48
<b>III.4 Contrôle de la qualité de la cimentation</b>	48
<b>III.4.1 Les diagraphies de température</b>	49
<b>III.4.2 Les diagraphies acoustique (CBL-VDL)</b>	49
<b>III.4.2.1 Principe du CBL (Cement Bond Log)</b>	50
<b>III.4.2.2 Interprétation du CBL</b>	52
<b>III.4.2.3 Principe du VDL</b>	52
<b>III.4.2.4 Interprétation du CBL-VDL</b>	54
<b>III.4.2.5 Facteurs pouvant influencer la mesure CBL-VDL</b>	54
<b>III.4.2.6 Synthèse CBL-VDL</b>	55
<b>III.4.3 Ultrasonic Tools (L'outil d'imagerie ultrasonique (USIT), IBC (Isolation Scanner))</b>	56
<b>III.4.3.1 L'outil d'imagerie ultrasonique (USIT)</b>	56
<b>III.4.3.2 Principe de mesure</b>	57
<b>III.4.3.3 Le modèle de l'onde plane</b>	59
<b>III.4.3.4 Les modes d'opération</b>	60
<b>III.4.3.5 Les mesures de base</b>	61
<b>III.4.3.6 Réponse aux matériaux dans l'espace annulaire</b>	61
<b>III.4.3.7 Les avantages et les inconvénients d'USIT</b>	62
<b>III.4.3.8 IBC (Isolation Scanner)</b>	63
<b>III.4.3.9 Applications d'IBC</b>	
<b>III.4.4 Le micro annulaire</b>	64
<b>Chapitre IV: Tentative d'amélioration des performances du Fulcrum utilisé pour les puits MDZ 509/MDZ 663</b>	
<b>IV.1 CEMENTICS Job Design</b>	67
<b>IV.2 Présentation des puits</b>	68
<b>IV.2.1 Des informations générales sur le puits MDZ 509</b>	68
<b>IV.2.1.1 Schéma du puits MDZ 509</b>	69

<b>IV.2.2 Des informations générales sur le puits MDZ 663</b>	70
<b>IV.2.2.1 Schéma du MDZ 663</b>	71
<b>IV.3 Comparaison de la composition et les propriétés du Spacer</b>	72
<b>IV.3.1 la composition</b>	72
<b>IV.3.2 les propriétés</b>	73
<b>IV.3.2.1 Test de Rhéologie des deux Spacer</b>	73
<b>IV.4 Comparaison des compositions et les propriétés des Slurries</b>	74
<b>IV.4.1 Les compositions</b>	74
<b>IV.4.2 Les propriétés</b>	76
<b>IV.4.2.1 Test de Rhéologie des deux Slurries</b>	76
<b>IV.4.2.2 Test Fluidité libre (Free fluid) des Slurries</b>	77
<b>IV.4.2.3 Test de Perte de fluide (Fluid Loss) des Slurries</b>	77
<b>IV.4.2.4 Test de temps d'épaississement (Thickening Time, TT) des Slurries</b>	78
<b>IV.4.2.5 Test de UCA (Ultrasonic Cement Analyzer) des Slurries</b>	80
<b>IV.5 Etats des puits</b>	82
<b>IV.5.1 Washouts</b>	82
<b>IV.5.2 Centralisation</b>	85
<b>IV.5.3 Enlèvement de boue et de couverture de ciment</b>	85
<b>IV.6 Exécution de l'opération</b>	87
<b>IV.6.1 Conception et objectif de travail</b>	87
<b>IV.6.2 Défis</b>	87
<b>IV.6.3 Planning de pompage exécuté</b>	87
<b>IV.6.4 Acquisition du temps réel</b>	88
<b>IV.6.4.1 L'enregistrement des différents paramètres du puits MDZ 509</b>	89
<b>IV.6.4.2 L'enregistrement des différents paramètres du puits MDZ 663</b>	90
<b>IV.7 Analyse et interprétation des logs</b>	92
<b>IV.7.1 Softwares</b>	92
<b>IV.7.1.1 Techlog</b>	92
<b>IV.7.1.2 Tool planner</b>	93
<b>IV.7.1.3 whatif</b>	94
<b>IV.7.2 Interprétation</b>	95
<b>IV.7.2.1 Puits MDZ 663</b>	95
<b>IV.7.2.2 Puits MDZ 509</b>	98

<b>IV.8 Simulation avec des scénarios proposés</b>	99
<b>IV.8.1 Simulation avec rotation de liner</b>	99
<b>IV.8.2 Simulation avec rotation et optimisation des nombres des centralisateurs</b>	100
<b>Conclusion Générale</b>	
<b>Références bibliographiques</b>	

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Liner de forage	6
<b>Figure I.2</b> : Stub liner	6
<b>Figure I.3</b> : Liner de production	6
<b>Figure I.4</b> : Tie-back liner	6
<b>Figure I.5</b> : Scab liner	6
<b>Figure I.6</b> : Composition conventionnel d'un liner	6
<b>Figure I.7</b> : Manchon de pose mécanique	7
<b>Figure I.8</b> : L'outil de pose mécanique et hydraulique	9
<b>Figure I.9</b> : Le mécanisme d'étanchéité	9
<b>Figure I.10</b> : swab cups	9
<b>Figure I.11</b> : Liner hanger mécanique	10
<b>Figure I.12</b> : liner hanger hydraulique	10
<b>Figure I.13</b> : liner top packer	11
<b>Figure I.14</b> : Le PBR	11
<b>Figure I.15</b> : Liner swivel	12
<b>Figure I.16</b> : Centreur rigide avec stop collar	12
<b>Figure II.1</b> : La tête de cimentation	17
<b>Figure II.2</b> : Unité de cimentation a doublé pompe triplex	18
<b>Figure II.3</b> : Les bouchons de cimentation	19
<b>Figure II.4</b> : Schéma représente les différents volumes à cimenté	25
<b>Figure II.5</b> : Pycnomètre à hélium	31
<b>Figure II.6</b> : Exemple de pesé	31
<b>Figure II.7</b> : Mixeur API	32
<b>Figure II.8</b> : le stand-off	32
<b>Figure II.9</b> : Effet rotation de la colonne	33
<b>Figure II.10</b> : Canal (causé par la migration du gaz)	34
<b>Figure II.11</b> : Canal (cause par la boue )	34
<b>Figure II.12</b> : L'écoulement laminaire	38
<b>Figure II.13</b> : L'écoulement intermédiaire	38
<b>Figure II.14</b> : L'écoulement turbulent	38
<b>Figure II.15</b> : Représentation schématique d'un écoulement unidirectionnel cisailé	40
<b>Figure II.16</b> : Types des comportements non-Newtoniens indépendants du temps	40

<b>Figure II.17 :</b> Le densimètre	41
<b>Figure II.18:</b> Rhéomètre FANN	42
<b>Figure II.19 :</b> Test d'eau libre	43
<b>Figure II.20 :</b> Le filtre presse	44
<b>Figure II.21 :</b> consistomètre pressurisé HP/HT	44
<b>Figure II.22:</b> La presse hydraulique	45
<b>Figure II.23:</b> ultrason Cement Analyzer	45
<b>Figure III.1:</b> Conséquences d'une mauvaise cimentation	47
<b>Figure III.2 :</b> Les défauts de la cimentation qui peuvent perturber l'étanchéité	48
<b>Figure III.3 :</b> Relevé typique de la température	49
<b>Figure III.4 :</b> Principe du CBL	50
<b>Figure III.5 :</b> Les Chemins acoustiques possibles	51
<b>Figure III.6:</b> Exemple d'un bon CBL et d'un mauvais CBL	51
<b>Figure III.7 :</b> principe de VDL	52
<b>Figure III.8 :</b> schéma explicatif sur l'outil USIT	56
<b>Figure III.9 :</b> Des différentes tailles des transducteurs	57
<b>Figure III.10:</b> Le principe de l'Ultrasonique et ses mesures	58
<b>Figure III.11 :</b> Le modèle de l'onde plane	59
<b>Figure III.12 :</b> principe de fonctionnement du transducteur dans les propriétés du fluide	60
<b>Figure III.13 :</b> principe de fonctionnement du transducteur dans le mode de mesures	60
<b>Figure III.14 :</b> Impédance Acoustique des différents fluides	62
<b>Figure III.15 :</b> Exemples des résultats obtenus avec l'USIT	62
<b>Figure III.16 :</b> l'outil IBC	64
<b>Figure IV.1 :</b> La fenêtre de CEMENTICs	67
<b>Figure IV.2:</b> Design du puits MDZ 509	69
<b>Figure IV.3:</b> Design du puits MDZ 663	71
<b>Figure IV.4:</b> La variation de la température, de la pression et de la consistance en fonction du temps pour le slurry conventionnel MDZ 509	78
<b>Figure IV.5:</b> La variation de la température, de la pression et de la consistance en fonction du temps pour le slurry Fulcrum MDZ 663	79
<b>Figure IV.6:</b> La variation de la température, de la résistance à la compression et temps de transit en fonction du temps pour le slurry conventionnel MDZ 509	80

<b>Figure IV.7:</b> la variation de la température, de la résistance à la compression et du temps de transit en fonction du temps pour le slurry Fulcrum MDZ 663	81
<b>Figure IV.8:</b> Les résultats du caliper pour les deux puits MDZ 509 et MDZ 663	82
<b>Figure IV.9:</b> Le stand off du tubage par rapport au centralisateurs en fonction de la profondeur, puits MDZ 509	83
<b>Figure IV.10:</b> Le stand off du tubage par rapport au centralisateurs en fonction de la profondeur, puits MDZ 663	84
<b>Figure IV.11:</b> La simulation des fluides dans l'espace annulaire du puits MDZ 509	85
<b>Figure IV.12:</b> La simulation des fluides dans l'espace annulaire du puits MDZ 663	86
<b>Figure IV.13:</b> Vitesse, densité et pression raccordées durant l'opération	89
<b>Figure IV.14:</b> Vitesse, densité et pression raccordées durant l'opération MDZ 663	91
<b>Figure IV.15:</b> La fenêtre du Techlog	93
<b>Figure IV.16:</b> Exemple d'un résultat de Tool Planner	94
<b>Figure IV.17:</b> L'image corrigée avec le WhatIf	96
<b>Figure IV.18:</b> Le log du MDZ 663; IBC	97
<b>Figure IV.19:</b> Log du MDZ 509, CBL-VDL	98
<b>Figure IV.20:</b> Simulation avec rotation et 41 centralisateurs, MDZ 663	100
<b>Figure IV.21:</b> Le Stand Off par rapport au 80centralisateurs, MDZ 663	100
<b>Figure IV.22:</b> Simulation sans et avec rotation et 80 centralisateurs, MDZ 663	101
<b>Figure IV.23:</b> Le Stand Off par rapport au 127centralisateurs, MDZ 663	101
<b>Figure IV.24:</b> Simulation sans et avec rotation et 127 centralisateurs, MDZ 663	102



## Liste des tableaux

<b>Tableau III.1</b> : Spécifications de l’outil USIT	57
<b>Tableau IV.1</b> : Information sur le puits MDZ 509	68
<b>Tableau IV.2</b> : Hardware du puits MDZ 509	69
<b>Tableau IV.3</b> : information sur le puit MDZ 663	70
<b>Tableau IV.4</b> : Hardware du puits MDZ 663	71
<b>Tableau IV.5</b> : Composition du Spacer 1.80 SG/MDZ 509	72
<b>Tableau IV.6</b> : Composition du CemPRIME Scrub 1.7 SG/MDZ 663	72
<b>Tableau IV.7</b> : Résultat du test de Rhéologie pour le Spacer du puits MDZ 509	73
<b>Tableau IV.8</b> : Résultat du test de Rhéologie pour le CemPRIME du puits MDZ 663	73
<b>Tableau IV.9</b> : Composition du Slurry conventionnel 1.9/MDZ 509	74
<b>Tableau IV.9</b> : Composition du Slurry Fulcrum 1.9/MDZ663	75
<b>Tableau IV.11</b> : Résultat du test de Rhéologie pour le Slurry conventionnel du puits MDZ	76
<b>Tableau IV.12</b> : Résultat du test de Rhéologie pour le Slurry Fulcrum du puits MDZ 663	76
<b>Tableau IV.13</b> : Les résultats du test Free Fluide pour le slurry conventionnel MDZ 509	77
<b>Tableau IV.14</b> : Les résultats du test Free Fluide pour le slurry Fulcrum MDZ 663	77
<b>Tableau IV.15</b> : Les résultats du test Fluide Loss pour le slurry conventionnel MDZ 509	77
<b>Tableau IV.16</b> : Les résultats du test Fluid Loss pour le slurry Fulcrum MDZ 663	77
<b>Tableau IV.17</b> : Les résultats du test Thickening Time pour le slurry conventionnel MDZ 509	78
<b>Tableau IV.18</b> : Les résultats du test Thickening Time pour le slurry Fulcrum MDZ 663	78
<b>Tableau IV.19</b> : Les résultats du test UCA pour le slurry conventionnel MDZ 509	80
<b>Tableau IV.20</b> : Les résultats du test UCA pour le slurry Fulcrum MDZ 663	80
<b>Tableau IV.21</b> : Nombre des centralisateurs utilisés dans le puits	83
<b>Tableau IV.22</b> : L'emplacement des centralisateurs dans le puits	83
<b>Tableau IV.23</b> : Nombre des centralisateurs utilisés dans le puits	84
<b>Tableau IV.24</b> : L'emplacement des centralisateurs dans le puits	84
<b>Tableau IV.25</b> : Planning de pompage exécuté	87

<b>Tableau IV.26:</b> Rhéologie des fluides du puits	88
<b>Tableau IV.27:</b> Design et programme de pompage du puits	88
<b>Tableau IV.28:</b> Rhéologie des fluides du puits	90
<b>Tableau IV.29:</b> Design et programme de pompage du puits	90
<b>Tableau IV.30:</b> le Zmud et UFAO théoriques des différents fluides	95

## Liste des abréviations

- PBR** : Polish Bore Receptacle
- DV** : Diverter Valve
- API** : institut américain de pétrole
- SO**: stand-off
- HP** : haute pression
- HT**: haute température
- BHST**: bottom hole statique temperature
- UCA**: ultrason Cement Analyzer
- CBL**: Cement Bond Log
- VDL**: variable density log
- TT**: transit time
- USIT** : L’outil d’imagerie ultrasonique
- IBC** : isolation Scanner
- TIE** : des échos de troisième interface
- LWD**: Logging while drilling
- MWD**: memory while drilling
- DLIS** : Digital Log Interchange Standard
- Zmud**: Zonal Isolation Mud
- UFAO**: Ultimate Flexural Attenuation Objective
- TOL**: Top of liner
- UCA**: Ultrasonic Cement Analyzer
- TT**: Thickening Time

## Notions et symboles

**cP:** Centi Poise

**YP:** La yield value

**PV :** Viscosité plastique

**$\mu$  :** Viscosité

**QR :** quantité d'eau recueillie

**t :** temps

**Re:** nombre de Reynolds (sans dimension)

**$\rho$ :** masse volumique du fluide (kg.m<sup>-3</sup>)

**v :** vitesse moyenne du fluide (m.s<sup>-1</sup>)

**D :** diamètre de la conduite (m)

**$\mu$  :** viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

**$\nu$  :** viscosité cinématique du fluide (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)

**dv:** différence de vitesse entre deux lames voisines. (m/s)

**dr:** la distance entre les deux lames. (m)

**Mc :** masse du ciment.

**Ve :** volume d'eau.

**$\Sigma$  Mad :** somme des masses des additifs.

**$\Sigma$  Vad :** somme des volumes des additifs.

**Ve :** Volume d'eau

**dc :** densité du ciment

**de :** densité de l'eau

**$\tau$ :** la contrainte de cisaillement

**$\gamma$ :** la vitesse de cisaillement

**n:** Indice d'écoulement des fluides

**K:** Consistance d'un fluide d'OSTWALD

**$\mu_p$ :** la viscosité plastique

**V:** vitesse de déplacement

**D:** diamètre

**P:** masse volumique

**$\mu$ :** viscosité dynamique

**Ph:** la pression hydrostatique

**R:** Rendement

## **Introduction Générale:**

## **Introduction Générale:**

Dans le monde actuel, le pétrole et le gaz naturel occupent une place essentielle parmi les sources d'énergie exploitées dans Notre dame l'Afrique .L'Algérie dispose de richesses naturelles considérables en réserves pétroliers et de gaz naturel ; où elle occupe des places importantes dans des classements mondiaux en matière de production et d'exportation de ces derniers.

Pour satisfaire les besoins de tout le monde en énergie, on prospecte, exploite actuellement des gisements situés à des profondeurs de plus en plus grandes, où les caractéristiques posent des problèmes techniques difficiles.

L'opération de forage rotary a un grand rôle à jouer Pour pouvoir arriver à ces grandes profondeurs, le puits est réalisé en étages, sous forme d'une structure télescopique renversée, lie le réservoir à la surface à l'aide des conduites bien cimentées ces conduit on l'appelle le tubage.

Le tubage est placé à l'intérieur du puits foré pour protéger et soutenir le puits. Le tubage tapisse le puits et protège ainsi les couches de sol et surtout les eaux souterraines d'être contaminées par la boue de forage et les fluides de fracturation. . Il stabilise également le puits de forage, de sorte que le puits doit être capable de résister à des charges particulièrement élevées.

Lors du forage l'opération de cimentation est effectuée, cette opération est déterminante du fait qu'elle garantit la fiabilité de la production. Elle est considérée comme l'étape primordiale qui a un impact direct sur la durée de vie des puits pétroliers, elle protège le tubage des différents effluents provenant des formations. Pour l'ingénierie du domaine pétrolier, cette opération est très critique où la qualité du résultat dépend de plusieurs facteurs, dont la qualité du laitier de ciment. Cependant, les caractéristiques de ce dernier dépendent des conditions thermodynamiques (pression, température) et géologiques du puits.

Un laitier de ciment se compose d'un ciment, eau et des additifs, Afin de réaliser une formulation de laitier de ciment convenable aux conditions de puits. Une série de tests est effectué au sein de laboratoire bien avant l'exécution de l'opération de ciment où toutes les conditions de mise en œuvre sont mises en considération.

Les additifs sont des produits chimiques inertes ou actifs, ajouté souvent à faible quantité à sec, pendant le mixage ou dans l'eau de gâchage, afin d'améliorer certaines propriétés.

## **Introduction Générale:**

L'évaluation de la qualité de cimentation est réalisée en utilisant des diagraphies. Le but des diagraphies est de détecter s'il y a des défauts. Elle présente dans la gaine de ciment et vérifie l'étanchéité entre les tubages et le trou foré.

Notre étude vise à fournir des informations précieuses et significatives afin de comparer les résultats fournis par les différents types de cimentation et spécifiquement le Tech fulcrum ce qui présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes conventionnelles et ceci sera expliqué en détail dans notre étude.



## **Chapitre I : Généralités sur le Liner**

**I. Introduction :**

En cours de l'opération de forage, La descente de tubage est une étape principal pour but de maintenir les fluides à l'intérieur du puits et maintenir les terrains forés stable pour continuer le forage en toute sécurité .Il permettent de circuler une venue sans risque de fracturer les terrains rétablir et maintenir des étanchéités entre couches. Il existe plusieurs types comme suite :

- Tube guide (conductor pipe)
- Colonne de surface
- Colonne intermédiaire
- Colonne de production
- Et le Liner, c'est une colonne perdue ancré dans la dernière colonne et cimenté sur toute sa hauteur pour le but de réduire le cout et le nombre de casing et la capacité de levage Durant la descente. Il peut être utilisé comme un liner de forage, de production, stub liner , scab liner ou bien comme tie-back liner et il comporte de nombreux composants de base. Tout cela sera discuté en détail dans notre étude.

**I.1 Définition :**

Un liner est une colonne perdue qui ne remonte pas jusqu'à la tête de puits, mais sur une hauteur limitée, à l'intérieur du tubage précédent. Il est cimenté avec un recouvrement dans le dernier tubage (overlap), qui s'étend depuis la cote de pose jusqu'à une certaine distance à l'intérieur de la colonne précédente. Ceci est nécessaire pour bien sceller la colonne perdue dans la colonne précédente et avoir une bonne étanchéité entre les deux. Cette étanchéité est très importante pour prévenir, durant la production, toute fuite d'effluent derrière la colonne perdue. Quelquefois, cette étanchéité est renforcée par l'utilisation d'une garniture supplémentaire (packer) tout en haut de la colonne perdue. [1]

**I.2 Différents types de liner :**

Le liner peut servir à recouvrir une partie du découvert, tel une colonne normale pour faciliter la poursuite du forage (liner de forage), ou à couvrir le réservoir et à le mettre en production (liner de production). Étant donné qu'il peut servir à protéger une partie endommagée, d'un liner de tubage. Il est possible de cimenter ou d'isoler ce liner en haut et en bas à l'aide de packers. Il est même possible d'utiliser un premier liner et de lui ajouter un second par le biais d'un tie-back.

Les différents types de liner sont :

**I.2.1 Liner de forage :**

Appelé aussi liner intermédiaire, ce liner est une portion de tubage qui s'ancre dans le tubage précédent, déjà cimenté, il est utilisé pour isoler des zones à problèmes au-dessous de la colonne technique, comme :

- Les zones à pertes ;
- Les zones à pression anormalement élevées.

Il peut être inscrit dans le programme prévisionnel comme une colonne intermédiaire. [1]

**I.2.2 Liner de production :**

Cette colonne de tubage est employée lors de la dernière étape (phase de production), elle est fixée soit au liner de forage, soit à la colonne technique. Il sera ensuite cimenté et perforé ou laissé en open hole (comme dans le cas d'un liner crépiné). [2]

**I.2.3 Le Stub Liner :**

Le stub liner est une colonne de tubage de même diamètre que le liner, raccordé à ce dernier par une garniture d'étanchéité d'une manière à obtenir une colonne continue, depuis le fond jusqu'à la surface pour les raisons suivantes :

- La colonne de tubage au-dessus du liner s'affaiblit ou endommagée (par corrosion, etc.) ;
- Mauvaise étanchéité au top du liner ;
- Nécessité de grande résistance due par exemple aux pressions anormalement élevées. [2]

**I.2.4 Le Scab Liner :**

Il est utilisé pour remédier à une partie détériorée d'un tubage, Ce liner peut être cimenté ou isolé en haut et en bas par des packers. Il est utilisé dans les mêmes conditions que le stub liner. Le scab et le stub liner peuvent être posés sur le liner existant grâce à leur propre poids ou ancrés dans un tubage précédent. [2]

**I.2.5 Le Tie-back liner :**

Un tie-back liner est une section de tubage qui s'étend depuis le top d'un liner déjà existant jusqu'à la surface. Il peut être cimenté ou non. [2]

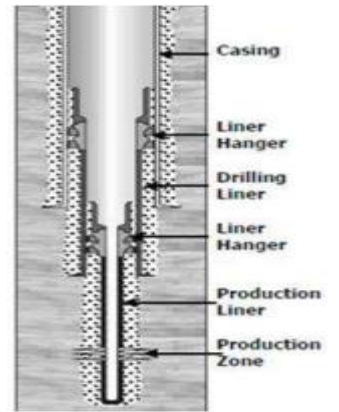
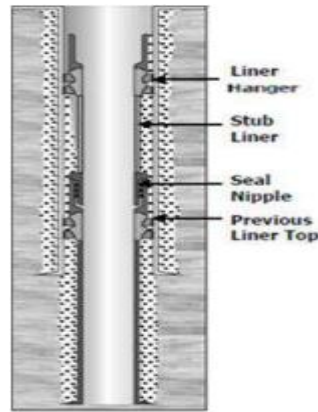
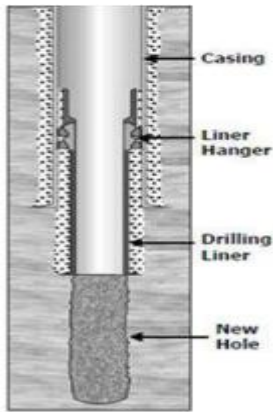


Figure I.1 : Liner de forage.

Figure I.2 : Stub liner.

Figure I.3 : Liner de production.

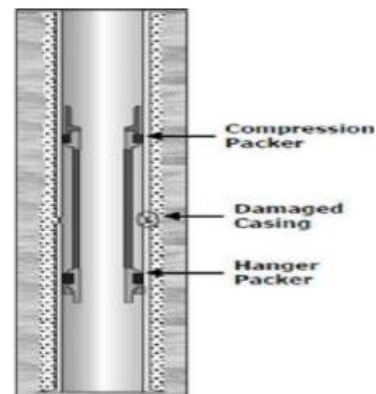
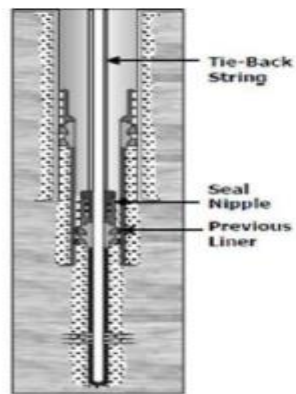


Figure I.4 : Tie-back liner.

Figure I.5 : Scab liner.

I.3 Les équipements constitutifs d'un liner conventionnel:

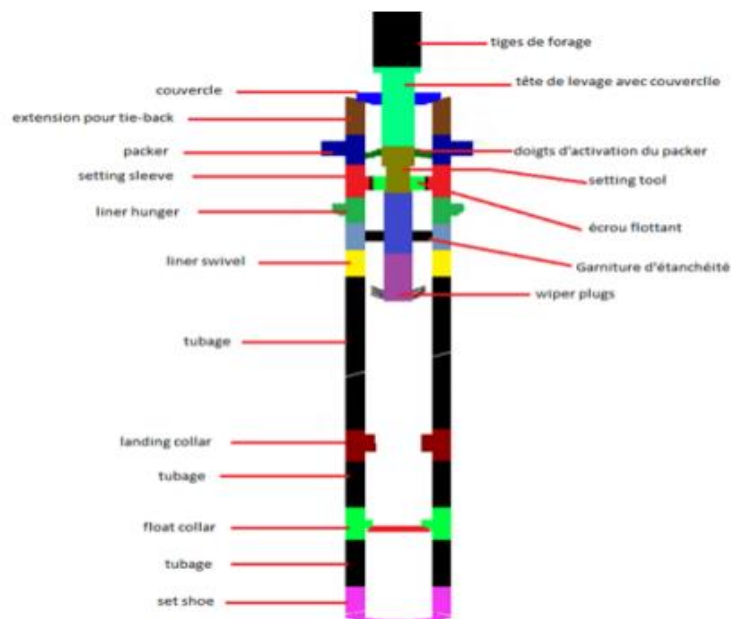


Figure I.6 : Composition conventionnel d'un liner. [3]

**I.4 Les éléments de pose et de manipulation :****I.4.1 La garniture de pose (setting string) :**

La garniture de forage utilisée pour la descente du liner est généralement constituée de tiges, avec des tiges lourdes utilisées dans des puits déviants et des coulisses nécessaires, calibrées avant l'opération.

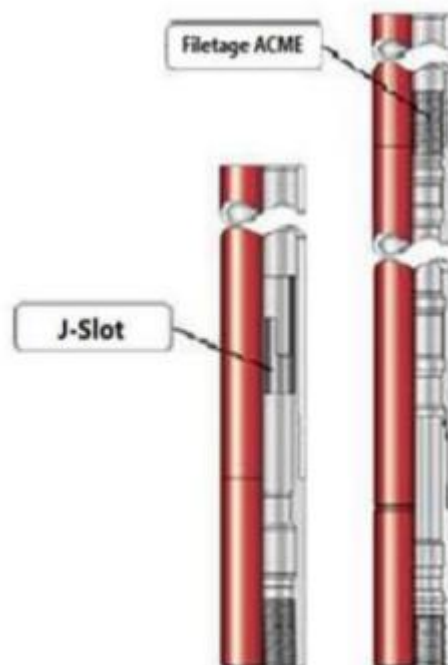
**I.4.2 Le manchon de pose (Setting sleeve or setting collar):**

Le manchon de pose vissé à la tête du liner et connecté ce dernier aux tiges de forage. L'outil de pose soutenant le poids du liner et servant de point d'appui pour le gonflement de packer.

On a deux types du manchon de pose :

- **Manchon de pose mécanique :**

La connexion entre ce manchon et l'outil de pose est assurée par un filetage carré de type ACME femelle généralement à gauche, de 4 à 6 filets par pouce, ou par un système comportant une rainure en J, de type «J-slot». [4]



**Figure I.7 :** Manchon de pose mécanique. [4]

- **Manchon de pose hydraulique :**

La connexion comprenant une collerette dans l'outil de pose, qui entre dans une gorge du manchon de pose. Cette collerette se libère de la gorge par l'augmentation de la pression, ce qui libère l'outil de pose. [4]

**I.4.3 L'outil de pose (setting tool):**

Celui-ci permet de relier le manchon de pose (setting sleeve) au train de tiges de forage afin de descendre la colonne perdue. Il joue également les rôles suivants:

- Assurez-vous de supporter le poids du liner lors de la descente.
- Assurer l'étanchéité entre le liner et les tiges:  
Il est indispensable d'avoir cette fonction afin de contraindre la boue ou le ciment à pénétrer dans le liner et à sortir par le sabot vers l'espace annulaire du liner/trou, et à l'empêcher de passer entre le liner et le système de mise en place. Il est également indispensable pour faciliter l'activation des différents outils utilisés pour un liner hydraulique.
- Prendre en charge, à son extrémité, le(s) bouchon(s) de cimentation du liner (wiper plug).
- Avant la cimentation du liner, le setting Tool est dévissé, dégagé pour vérifier son dévissage, puis reposé sans être vissé sur le setting sleeve d'environ 10 tonnes afin de garantir l'étanchéité pendant la cimentation. Après la cimentation du liner, il a été remonté.

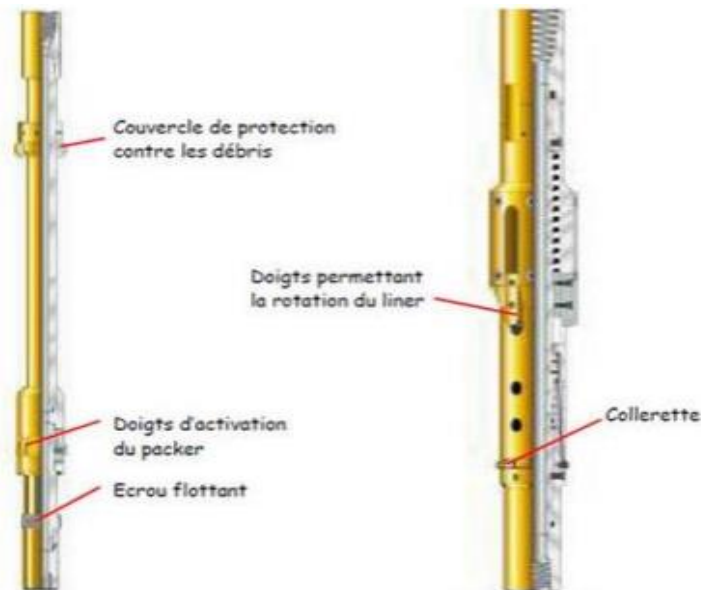
Il existe deux types d'outil de pose :

**I.4.3.1 L'outil de pose mécanique :**

Le setting Tool mécanique est équipé d'un écrou flottant à filetage ACME mâle, généralement situé à gauche (il peut également être à droite, en fonction du type), avec une capacité de 4 à 6 filets par pouce, se dévissant en 8 à 15 tours à droite. Cet écrou se visse sur le filetage de même type du manchon de pose.

**I.4.3.2 L'outil de pose hydraulique :**

L'outil hydraulique de pose est équipé d'une collerette qui s'insère dans une gorge du manchon de pose et qui se déplace hydrauliquement.[4]



**Figure I.8 :** L'outil de pose mécanique et hydraulique.[4]

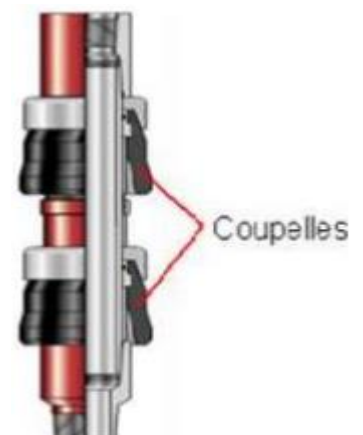
**I.5 Système d'étanchéité :**

Le mécanisme d'étanchéité (pack-off de ciment) peut être :

- Un tube avec des coupelles (setting cups ou swab cups) orientées vers le bas, fixé au bout de l'outil de pose, afin de faciliter le passage du haut vers le bas et de l'empêcher dans le sens inverse. La profondeur restreint l'utilisation de ce système car les coupelles sont soumises à des contraintes de pression et de température.
- Il s'agit d'une tige lisse (stinger) qui s'insère dans un presse-étoupe (pack-off bushing) situé sous le manchon de pose. Grâce à ce système, il est possible de maintenir l'étanchéité entre les tiges et le liner même après son relâchement.[4]



**Figure I.9 :** Le mécanisme d'étanchéité.



**Figure I.10 :** swab cups.

**I.6 Mécanisme de suspension (Liner hanger) :**

Ce système installé au sommet de la colonne perdue garantit la suspension à l'intérieur du tubage passé. Et dont l'objectif est de supporter le poids de cette colonne. Les coins sont maintenus en position rétractée pendant la descente, et l'ancrage du hanger se fait en les faisant glisser sur une portée conique, qui les pousse vers l'extérieur et les applique contre les parois du tubage précédent. Selon les fabricants, cet ancrage peut être soit mécanique, soit hydraulique comme suivant :

**I.6.1 Liner hanger mécanique :**

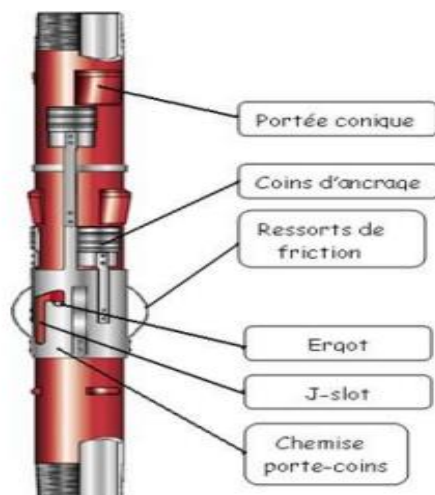
Il s'agit d'un support qui se fixe en rotation et en translation. Il est équipé d'une cage porte-coins où une rainure en forme de J-slot est usinée et équipée de ressorts de friction qui reposent sur le tubage. Il y a un ergot dans le corps qui se déplace dans cette rainure.

Il est utilisé si le liner pesant plus de 10 tonnes et dans le cas des Puits verticaux ou faiblement déviés (15 à 20°), dont les frottements et les couples ne sont pas importants.[1]

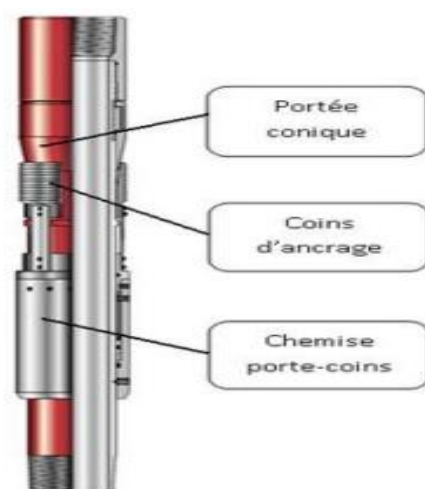
**I.6.2 Liner hanger hydraulique :**

Le fonctionnement de ce genre de suspension repose sur l'augmentation de la pression à l'intérieur du liner, sans que la garniture ne soit mouvementée. Celui-ci est constitué d'une chemise porte-coins qui s'applique sur le tubage.

Il est utilisé dans les puits déviés, présentant des frottements importants , en forage en mer et pour ancrer un liner dans un autre.[1]



**Figure I.11 :** Liner hanger mécanique.



**Figure I.12 :** liner hanger hydraulique.



**I.7 Le liner top packer :**

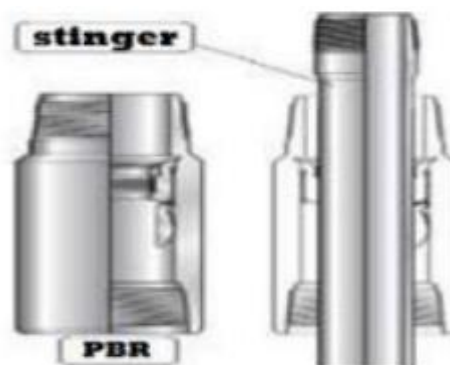
Le liner top packer peut être intégré ou non au setting sleeve. Celui-ci est employé pour renforcer l'étanchéité derrière le liner, au-dessus du ciment, afin d'éviter l'application de surpressions lors de la circulation inverse après la cimentation, ce qui peut entraîner des pertes de circulation, et empêche ensuite l'écoulement de l'effluent du réservoir vers le haut. Son usage demeure facultatif.



**Figure I.13:** liner top packer.

**I.8 Polish Bore Receptacle (PBR):**

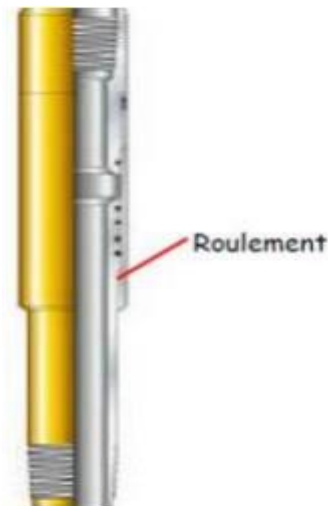
D'une longueur pouvant atteindre 6 mètres, elle est fixée directement au setting sleeve et reçoit le tie-back d'une colonne de tubage supplémentaire. Cette extension est lisse à l'intérieur et sa tête est biseautée pour faciliter le passage des outils. Une fois que le liner a été cimenté, on procède au nettoyage de cette extension en utilisant une fraise spéciale ou un jet sub. L'ensemble PBR et le tie-back constituent un joint coulissant extrêmement étanche et solide, offrant ainsi un raccordement très facile au liner. Il est possible de fabriquer le setting sleeve et l'extension PBR en une seule pièce.



**Figure I.14:** Le PBR.

**I.9 Le joint rotatif (liner Swivel) :**

Ce mécanisme n'est employé que dans le cas d'un hangar mécanique, il est fixé sous celui-ci. Le dispositif de suspension permet la rotation du train de tiges et de la suspension lors de l'ancrage des coins, même si la partie inférieure de la colonne est bloquée par la formation. Il est nécessaire de le placer dans l'espace annulaire du tubage/colonne perdue et au-dessus du sabot du tubage précédent afin de garantir une bonne cimentation.[4]



**Figure I.15 :** Liner swivel.

**I.10 Habillage du liner :**

Un liner, tout comme une colonne ordinaire, peut inclure des centreurs et des gratteurs de parois. Des centreurs rigides à lames spiralées sont utilisés pour les puits très déviés et horizontaux, avec l'avantage de conserver un espace adéquat dans l'annulaire entre le liner et la partie basse du trou, ce qui permettra le déplacement de la boue par le laitier de ciment.[4]



**Figure I.16:** Centreur rigide avec stop collar.

**I.11 Les avantages du liner:**

Les principaux bénéfices d'un liner incluent :

- Le prix est diminué en raison de la diminution du nombre de casings.
- Pendant la descente du liner, la capacité de levage est diminuée.
- L'option d'utiliser une garniture de forage mixte (5'' en haut et 3''1/2 en bas, par exemple), ce qui diminue la capacité de levage.
- La capacité de la tête de puits diminue,
- Le temps nécessaire pour préparer la colonne avant sa descente est diminué.
- Le liner est plus flexible qu'une colonne complète,
- On évite les pertes de circulation en réduisant les pertes de charges annulaires au niveau des tiges.
- Si les équipements de complétion ne passent pas à travers le liner, il est possible de compléter dans le tubage précédent.[4]

**I.12 Les inconvénients du liner :**

Les principaux désavantages comprennent :

- Il est plus compliqué de suspendre le liner dans le tubage que de suspendre une colonne complète dans la tête du puits,
- Il y a peu de colonnes exposées à l'effluent et si elles s'affaiblissent, il est nécessaire de compléter le liner par une colonne complète, ce qui implique la reprise du puits.
- La durée de descente est extrêmement importante lorsqu'il s'agit d'un liner équipé d'équipements d'activation hydraulique.[4]

## **Chapitre II : Généralité sur la cimentation**

**II. Introduction :**

Grâce à l'opération de forage, il est possible de relier la couche de pétrole ou de gaz à la surface afin de permettre l'exploitation de ces sources. Cependant, en raison des contraintes de terrain, les puits doivent être forés par sections successives. Toutes les étapes sont effectuées en suivant deux opérations :

- une opération de forage,
- une opération de cuvelage et de cimentation afin de couvrir et d'isoler les formations.

**II.1 Définition de la cimentation :**

Les puits pétroliers sont cimentés en continu en mixant du ciment, de l'eau et des produits chimiques à l'aide d'appareils spécifiques. Ensuite, le mélange est pompé dans l'intervalle formé par le tubage et les parois internes du puits.[6]

**II.2 Principe de cimentation :**

La mise en ciment d'une colonne de tubage consiste à injecter le laitier de ciment dans l'espace annulaire entre l'extérieur du tubage en place et la paroi du trou foré, soit directement à l'intérieur du tubage, soit à travers les tiges de forage, afin de le faire ensuite. Parcourir cet annulaire jusqu'à une hauteur préétablie.[7]

**II.3 Les objectifs de la cimentation :**

- Éviter le dévissage des tuyaux lors du forage.
- Déplacer les fluides utilisés en surface.
- Réduire la contamination des nappes phréatiques.
- Éliminer les différentes couches productrices qui peuvent contenir des fluides variés à des pressions différentes.
- Fermer les couches sous une pression élevée afin de prévenir les éruptions.
- Garder les colonnes en sécurité contre les substances chimiques et la corrosion par électrochimie.
- Prévenir la rupture du trou,[5].
- Fixer les équipements de sécurité en tête de puits sur les colonnes de tubage,
- L'étanchéité de l'espace annulaire et sa fermeture pour la mise en production,
- Prévention des éventuelles pollutions par la surface de la tête de forage.[7]

**II.5 Différentes types de cimentation :**

Différents types de ciment sont utilisés dans les sondages :

**II.5.1 Cimentation des cuvelages ou des casings :**

- Une couche de production doit être séparée des couches adjacentes.
- Évite l'éboulement de trou.
- Enlever les couches de production épuisées.
- Séparer une couche des zones environnantes afin de restreindre la quantité d'eau ou de gaz qui accompagnent la production d'huile. [4]

**II.5.2 La pose de bouchon de ciment :**

- De fermer un puits que l'on abandonne.
- De colmater les pertes de circulation.
- Bloquer un niveau aquifère soit au cours de forage soit lors de la complétion.
- Servir de point d'appui à la déviation du forage (side track). [4]

**II.5.3 Squeeze (injection de ciment sous pression) :**

- Injection de ciment complémentaire à travers les orifices des perforations dans les tubages pour consolider ou réparer la cimentation primaire de ces tubages.
- D'obturer une couche productrice épuisée.
- D'isoler une couche des zones adjacentes dans le but de limiter la proportion d'eau ou gaz accompagnant la production d'huile. [4]

**II.5.4 Cimentation ordinaire :**

- Elle a pour but l'ancrage de la colonne de sol (parois de puits).
- Prévoir le dévissage des tubes pendant le forage de la phase suivante.
- Maintenir le terrain de la surface. [4]

**II.5.5 Cimentation a deux étages :**

Il s'agit d'une méthode de cimentation à deux niveaux qui présente les bénéfices suivants :

- Réduction du risque de fracture de la formation.
- Réduction de la pression finale de refoulement.

- Il existe un risque de contamination du laitier.
- Il est possible de cimenter deux zones différentes, éloignées l'une de l'autre, grâce à la valeur de DV (Diverter Valve). Cette cimentation peut être réalisée à deux étages. [4]

**II.6 Les Equipements de Cimentation :****II.6.1 La tête de cimentation :**

En général, ces têtes sont fabriquées pour accueillir deux bouchons. Différentes options de pression sont offertes en fonction des capacités du casing. Les systèmes de capture des bouchons sont composés soit d'une tirette de capture qui est déplacée vers l'extérieur afin de permettre la libération du le bouchon, soit par une demi-bague qui est manœuvrée depuis l'extérieur. En réel, on trouve un témoin sur ces têtes qui permet de détecter le point de départ du bouchon.[4]



**Figure II.1:** La tête de cimentation.

**II.6.2 Les unités de cimentation :**

Les installations de cimentation permettent de réaliser différentes opérations en même temps, comme :

- Le mélange du ciment et des additifs pour obtenir un laitier qui correspond aux caractéristiques souhaitées pour chaque type spécifique d'opération.
- Le processus de pompage du laitier a une grande souplesse en ce qui concerne la vitesse et la pression de pompage.

Deux pompes Triplex à grand débit et haute pression sont utilisées dans ces unités de pompage, qui peuvent être montées soit sur camion, soit sur skid.

On enregistrera le test de pression des pompes, des vannes et des lignes de cimentation jusqu'au plancher sur un graphe. La machine sera en excellent état (avec des pièces de rechange) et adaptée à l'opération prévue. [4]



**Figure II.2 :** Unité de cimentation a double pompe triplex. [4]

### **II.6.3 Les bouchons de cimentation :**

- **Bouchon inférieur :**

Le bouchon inférieur, également connu sous le nom de bouchon de plomb, est le premier bouchon à être pompé dans le boîtier ou la doublure. Il est doté d'un noyau en caoutchouc solide et d'un corps creux en aluminium ou en plastique qui peut être percé facilement. Le bouchon inférieur sert à nettoyer le tubage de la boue et à empêcher la boue de ciment de se mélanger à la boue. Lorsque le bouchon inférieur atteint le collier d'atterrissage, un diaphragme ou un siège à bille est rompu par la pression, ce qui permet à la boue de ciment de s'écouler à travers et hors du bouchon. [8]

- **Bouchon supérieur :**

Le bouchon supérieur, également connu sous le nom de bouchon de queue, est le deuxième bouchon à être pompé dans le boîtier ou la doublure. Il est doté d'un noyau en caoutchouc solide et d'un corps solide en aluminium ou en plastique qui peut être percé facilement. Le bouchon supérieur sert à séparer la boue de ciment du fluide de déplacement, généralement de l'eau, et à fournir une contre-pression pour que le ciment durcisse. Lorsque le bouchon supérieur atteint le collier d'atterrissage, il arrête l'écoulement du fluide de déplacement et indique la fin du travail de ciment. [8]



- **Bouchon d'essuie-glace :**

Le bouchon d'essuie-glace, également connu sous le nom de bouchon d'espacement, est un bouchon optionnel qui peut être utilisé entre le bouchon inférieur et la boue de ciment, ou entre la boue de ciment et le bouchon supérieur. Il a un noyau creux en caoutchouc et un corps creux en aluminium ou en plastique qui peut être percé facilement. Le bouchon d'essuie-glace sert à améliorer l'efficacité du déplacement et à réduire le risque de contamination en essuyant le boîtier de tout liquide résiduel. Le bouchon d'essuie-glace peut également être utilisé pour injecter des additifs ou des entretoises dans l'anneau pour une meilleure performance du ciment. [8]

Pour utiliser efficacement les bouchons de cimentation, vous devez tenir compte de plusieurs facteurs, tels que la géométrie du puits de forage, la taille et le poids du tubage, le volume et la densité du ciment, le débit et la pression de la pompe, ainsi que les propriétés et la compatibilité du fluide. Vous devez également surveiller les paramètres de cimentation, tels que la position du bouchon, la pression et la température, ainsi que l'efficacité du déplacement, et effectuer les ajustements nécessaires. [8]



**Figure II.3 :** Les bouchons de cimentation.

#### **II.6.4 Bacs de recirculation et système d'ajout d'additifs liquides:**

On effectuera les tests de fonctionnement à l'eau. La préférence est actuellement redonnée aux additifs solides, moins coûteux et de durée de conservation plus longue. Le système d'ajout d'additifs liquides évite toutefois d'avoir à libérer un, voire deux bacs de leur fluide de forage pour préparer l'eau de gâchage. Les bacs de recirculation, d'aussi faible capacité soient-ils, assurent une meilleure homogénéité du laitier. [9]

**II.6.5 Entonnoir et duses de gâchage :**

Le test de fonctionnement est effectué à haute et à basse pression. On s'assurera que des duses de différents diamètres sont disponibles. Si nécessaire, on préparera quelques mètres cubes de laitier pour faire le choix des duses. [9]

**II.6.6 Compresseurs, silos et silo intermédiaire :**

On vérifiera que le silo intermédiaire n'est pas bouché par du ciment ; les lignes seront soufflées pour évacuer d'anciens dépôts éventuels de ciment, de baryte ou de bentonite. L'ensemble sera mis en pression jusqu'à atteindre la pression de service afin de détecter des fuites éventuelles et l'efficacité du compresseur ; le test terminé, on purgera la pression. L'air toujours plus ou moins humide provoquant le mottage et le vieillissement du ciment, on se limitera aux transferts indispensables. [9]

**II.7 Programme de cimentation :**

Le programme de cimentation est responsable de l'évaluation de la hauteur du ciment dans l'annulaire, du volume de ciment à pomper et des caractéristiques du laitier, ce qui est influencé par :

- La température de fond sous circulation, lors de la mise en place du laitier, qui influe sur le temps de prise d'où le temps de pompabilité ;
- La pression des formations traversées qui impose la densité du laitier ;
- La présence de divers agents susceptible de dégrader le ciment (eaux corrosives, haute température de fond) ;
- Le profil de puits qui impose les caractéristiques rhéologiques du laitier.

Le bon choix du laitier et du régime d'écoulement lors du pompage, conduit à une bon cimentation, d'où une longue vie du casing et par conséquence du puits. [9]

**II.8 Les étapes de l'opération :**

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

- Visser la tête de cimentation avec ses 2 bouchons.
- Circulation pendant 1 ou 2 cycles pour remonter tous les cuttings en suspension, nettoyer le puits, homogénéiser la boue ...
- Injection d'un bouchon laveur. Ce bouchon laveur de 1 à 3 m<sup>3</sup> est un produit chimique liquide permettant de laver les parois du puits pendant la remontée dans l'annulaire et de séparer le laitier de la boue.
- Lancer le bouchon de cimentation inférieur
- Pomper le volume de laitier. Lorsque le bouchon inférieur arrive sur l'anneau de retenue, on doit remarquer une légère augmentation suivie d'une chute de pression. Cela indique que le laitier a transpercé la membrane du bouchon.
- Lancer le bouchon de cimentation supérieur
- Chasser avec de la boue. Lorsque le bouchon supérieur arrive sur l'anneau de retenue, on enregistre une augmentation de pression (ou à-coup de pression ou Bump Plug) qui indique le contact des 2 bouchons.
- Enfin, l'arrêt de pompages. [9]

**II.9 Ciment et laitier :****II.9.1 Définition :**

Il s'agit d'une suspension aqueuse de fines particules solides. Les laitiers de ciment sont composés principalement de ciment et d'eau aux quels sont ajoutés un ou plusieurs additifs ayant chacun un rôle déterminé mais dont certains contrecarrent l'action des autres, créant ainsi des problèmes de comptabilité des additifs. Les laitiers sont testés en laboratoire dans des conditions qui simulent les conditions de mise en œuvre et d'environnement après mise en place. [7]

**II.9.2 Choix du laitier :**

Comme mentionné précédemment, l'API a développé une classification des ciments en se basant sur la profondeur à atteindre, la température du fond de puits et essentiellement leur résistance aux sulfates. Cette décision est influencée par :

- La température statique du fond du puits ainsi que la pression.
- La densité des laitiers est fonction de la pression hydrostatique des formations traversées.
- Le temps de Pompabilité.
- La résistance à la compression.
- Les caractéristiques rhéologiques du laitier à employer.
- La résistance du laitier aux différentes attaques; tels que:
  - ❖ Les eaux minéralisées (agressives).
  - ❖ Les températures élevées.
  - ❖ La problématique des gaz jaillissant de la formation jusqu'au jour. [10]

**II.9.3 Les types de laitier de ciment :****II.9.3.1 Les laitiers ordinaires :**

Les caractéristiques des laitiers de base utilisés pour la cimentation comprennent leur composition chimique et leur granulométrie. Lorsqu'ils sont mélangés avec de l'eau de gâchage, on obtient généralement des laitiers avec une densité comprise entre 1.78 et 1.98. Ils ont également reçu le nom de laitiers ordinaires en raison de la grande stabilité du ciment pétrolier à ces densités. [10]

**II.9.3.2 Les laitiers allégés :**

Parfois, les densités des laitiers classiques 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 distingue deux types de bouchons de ciment : les bouchons de ciment pour absorber les pertes et les bouchons de ciment pour protéger les zones fragiles. [10]

Nous pouvons classer les ciments allégés en 4 grandes catégories :

- les gels ciments (ou à la bentonite), de densités minimales de 1.4
- les laitiers ultrafins, de densités minimales de 1.3
- les laitiers à la mousse, une densité minimum de 1 à 1.1 en surface, mais qui varie en fonction de la profondeur
- les laitiers allégés aux billes de verre, de densités minimales de 1.2 [10]

**II.9.3.3 Les laitiers denses ou alourdis :**

Une densité d'un laitier dit ordinaire varie de 1,78 à 1,98. Il est possible de repousser cette limite jusqu'à 2.15, et afin d'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. [10]

**II.9.3.4 Les laitiers pour température élevée :**

On peut utiliser du ciment Portland jusqu'à une température d'environ 80°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. On ajoutera des additifs spéciaux afin d'obtenir le compromis désiré.

Les ciments haute température normalisés par l'API sont :

- Classe D : température de 77 à 100°C (température statique)
- Classe E : température de 110 à 143°C
- Classe F : température de 110 à 160°C. [10]

**II.9.3.5 Les laitiers pour régions froides :**

Au-dessous de 10°C, la température de forage à cimenter diminue, ce qui entraîne des résultats insatisfaisants pour les ciments classiques. Cependant, si la température reste supérieure au point de congélation de la phase aqueuse, on observe une diminution de prise de plus en plus marquée avec une croissance très lente de la résistance à la compression. En diminuant la température, la phase aqueuse s'évapore, le ciment ne s'hydrate plus et la prise ne se produit pas. Il y a deux solutions possibles : soit augmenter la température pour accélérer la prise, soit utilisé des systèmes de ciment qui permettent une prise à froid. [10]

On distingue les ciments fondus et les ciments au gypse :

- **Les ciments fondus :** les ciments fondus ou ciments alumineux sont obtenus par fusion à 1600°C d'un mélange de bauxite et de calcaire ou de chaux.
- **Ciment au gypse :** l'ingrédient de base est un ciment pétrolier non retardé, le classe G est souvent utilisé, mélangé avec une forte proportion de plâtre spécialement étudié pour cet usage. [10]

**II.9.3.6 Les Laitiers thixotropes :**

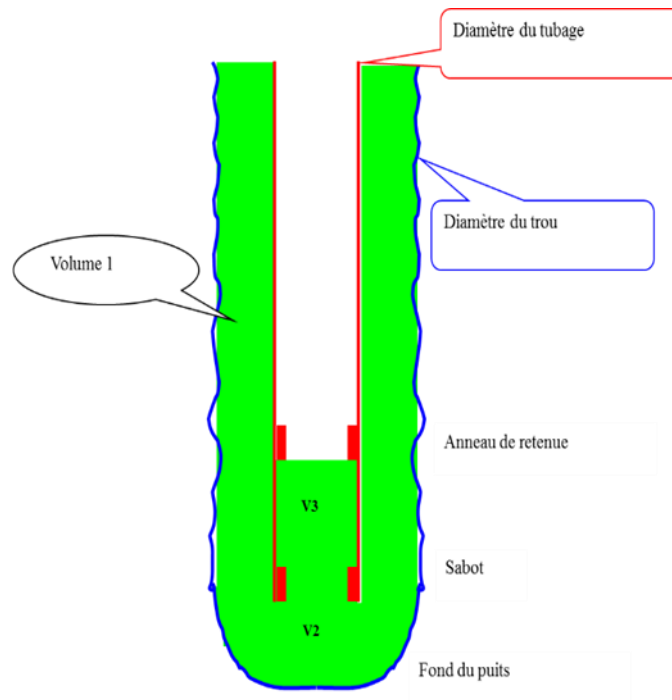
Les ciments thixotropes sont des laitiers de ciment qui possède des propriétés rhéologiques particulières et auxquelles sont associées des propriétés mécaniques intéressantes.

Ces ciments sont hautement thixotropes c'est-à-dire qu'un gel se forme rapidement en l'absence d'agitation ou d'écoulement, ce gel étant toutefois détruit si l'agitation est reprise. Ces ciments sont expansifs, ce qui assure une meilleure liaison entre le tubage et formations consolidées, la résistance mécanique de ces ciments est convenable bien qu'elle se développe plus lentement que pour un laitier classique.

**II.9.4 Volume de laitier :**

Afin de calculer une cimentation, il est nécessaire d'avoir les données suivantes :

- Diamètres du puits et du tubage.
- Profondeur du puits et hauteur à cimenter.
- Type de boue.
- Température de fond. [9]



**Figure II.4 :** Schéma représente les différents volumes à cimenté. [9]

### Exemple d'une colonne de surface

#### Volume 1

C'est le volume de l'espace annulaire Trou-Tubage entre le sabot et la surface

#### Volume 2

C'est le volume du puits entre le fond et le sabot. (En général : 1 à 2 m)

#### Volume 3

C'est le volume intérieur du tubage entre le sabot et l'anneau.

#### Volume du laitier

$$V = V1 + V2 + V3$$

#### Remarque

Le diamètre du trou est généralement plus grand que le diamètre du trépan à cause des cavages notamment dans les terrains salifères. Les volumes V1 et V2 doivent être majorés par un coefficient de majoration. [9]

**II.9.5 Classification des ciments pétroliers :**

Différentes catégories de ciment sont établies selon des normes établies par l'institut américain de pétrole API. Ces catégories sont déterminées en fonction de la profondeur et de la température de fond du puits. Ce classement permet de résoudre presque tous les problèmes liés à la cimentation comme suite :

- Classe A : utilisé de la surface jusqu'à 6000 pieds (1829 m), lorsque aucune caractéristique particulière n'est demandée. Type ordinaire.
- Classe B : utilisé de la surface jusqu'à 6000 pieds (1829 m), lorsque les conditions nécessitent une résistance modérée ou élevée aux sulfates.
- Classe C : utilisé de la surface jusqu'à 6000 pieds (1829 m), lorsque les conditions nécessitent une haute résistance initiale. Disponible en type ordinaire et en type à résistance modérée ou élevée aux sulfates.
- Classe D : utilisé de 6000 à 10000 pieds (1829 à 3048 m) en conditions de température et pression modérément élevées. Disponible dans les deux types, résistance modérée et élevée aux sulfates.
- Classe E : utilisé de 10000 à 14000 pieds (3048 à 4268 m), dans des conditions de température et pression élevées. Disponible dans les deux types, résistance modérée et élevée aux sulfates.
- Classe F : utilisé de 10000 à 16000 pieds (3048 à 4877 m), dans des conditions de température et pression très élevées. Disponible dans les deux types, résistance modérée et élevée aux sulfates.
- Classe G : utilisé comme ciment de base pour cimenter de la surface jusqu'à 8000 pieds tel que ou, avec des accélérateurs ou retardateurs de prise afin de couvrir une large gamme de profondeurs et de températures. Disponible dans les deux types, résistance modérée et élevée aux sulfates.
- Classe H : utilisé dans les mêmes conditions que le ciment classe G, mais prévu pour des densités de laitier supérieures. Disponible en type, moyenne résistance aux sulfates.
- Classe J : utilisé de 12000 à 16000 pieds (3660 à 4880 m) pour des températures et pressions extrêmement élevées. Existe seulement en qualité à haute résistance aux sulfates. [10]



**II.9.6 L'eau de gâchage :**

Lors de la préparation du laitier, l'eau joue un rôle essentiel en tant que diluant. Elle peut être de nature douce, saumure saturée ou semi-saturée. L'eau douce convient à tous les additifs et possède de bonnes caractéristiques mécaniques, mais elle ne permet pas une adhérence efficace du laitier aux formations salifères, ce qui nécessite l'utilisation d'une saumure saturée. Cependant, les inconvénients de l'eau douce incluent une incompatibilité avec un grand nombre d'additifs, un filtrat pratiquement incontrôlable, une diminution des caractéristiques mécaniques et un effet retardateur important à basse température. Il est choisi d'utiliser une eau de gâchage semi-saturée en tant que compromis. En général, l'eau utilisée pour le gâchage est celle provenant du chantier. Un échantillon doit être prélevé par le prestataire du service de cimentation afin d'être analysé en laboratoire. [9]

**II.9.7 Additifs pour ciments :**

Il est fréquent d'utiliser plusieurs additifs afin d'ajuster les caractéristiques du ciment en fonction des différentes conditions d'utilisation.

On peut classer ces additifs comme suit :

**1. Accélérateurs :** Grâce à ces produits, la prise de ciment à basse température est accélérée ou compensée par d'autres additifs, ce qui permet de réduire le temps d'attente avant la reprise des opérations de forage.

On les utilise dans les cas suivants :

- Cimentation de casing de surface et bouchons à faible profondeur
- Bouchons de ciments pour colmatage de zone à pertes
- Cimentation avec additifs à effet retardateur tel que les réducteurs de filtrat

On cite : chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ), silicate de sodium, chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ). [9]

**2. Retardateurs :** Ils retardent la prise d'un ciment et augmentent également le temps de pompabilité dont on pourra disposer lors de sa mise en place. Dans le cas où une température élevée dans le fond du puits ou un effet accélérateur causé par un autre additif pourrait réduire dangereusement le temps disponible pour sa mise en place. [9]

**3. Les dispersants :** Ces produits dispersants sont employés afin de résoudre le problème d'eau libre causé par la précipitation des particules solides dans le laitier de ciment. Ils

permettent de maintenir toutes les particules en suspension pendant la prise du laitier. Les polymères et les lignosulphanates de calcium sont différents. [9]

**4. Agent de contrôle de filtration :** les cas les plus classiques d'emploi de réducteurs de filtrat sont :

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

Ils évitent la perte d'eau de laitier par filtration dans les formations perméables, ce qui risque de déclencher, soit une prise intempestive, soit une absence de prise due à l'absence d'eau nécessaire à l'hydrolyse et à la cristallisation des composants de ciment. [9]

**5. Allégeant :** Ces matières inertes légères sont combinées avec le ciment, ce qui a pour effet d'une part de diminuer la densité du laitier et d'autre part de réduire les coûts. En revanche, la majorité des Allégeant ont un impact sur la durée de prise et la résistance à la compression du ciment, ce qui entraîne souvent la nécessité de les compenser par des additifs adaptés.

Les principaux allègent utilisés sont :

- L'eau qui est le principal produit utilisé
- Les produits solides à faible densité à titre d'exemple les billes de verre creuses de densité de 0,3 et 0,7, la chaux
- L'inclusion d'agents moussants au laitier comme de l'azote ou de l'air par l'intermédiaire d'un compresseur ou d'une unité d'azote. [9]

**6. Les Alourdissant :** Ils sont utilisés pour accroître la densité du laitier. Ils demeurent inertes et sont combinés avec du ciment sec. Les Alourdissant les plus couramment utilisés sont :

La Baryte ou sulfate de baryum  $\text{BaSO}_4$  ( $d=4,2$ ), l'Hématite ou minerai de fer ( $d=4,9$  à  $5,3$ ), l'Ilménite ou l'oxyde de fer ( $d=4,7$ ), la Galène et l'arséniure de fer ( $d > 7$ ).

Pour être incorporé au ciment, tout produit alourdissant doit présenter les caractéristiques suivantes :

- exiger le moins d'eau de mouillage possible,
- ne pas réduire la résistance du ciment,

- ne pas influencer sur le temps de pompabilité,
- avoir une granulométrie uniforme et comparable à celle du ciment,
- provoquer un accroissement minimum du volume du laitier,
- être chimiquement inerte. [9]

**7. Additifs spéciaux et spécifiques :**

- **Les fluidifiants** : sont utilisés pour compenser une viscosité élevée ou une tendance à gélifier de certains laitiers, ce qui facilite l'établissement de régimes d'écoulement tourbillon lorsqu'ils sont nécessaires. [9]
- **Les anti-moussants** : qui empêchent la formation excessive de mousse lors du mélange de certains ciments, ce qui pourrait perturber le bon fonctionnement des pompes. [9]
- **Les agents gélifiants** : qui altèrent les propriétés thixotropiques de certains produits 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. [9]
- **La silice** : employée afin de préserver le ciment des températures élevées (plus de 110 °C en état statique). Elle est utilisée à une proportion de 30 à 40 %. Il est essentiel de la mélanger à sec avec du ciment. [9]
- **Les additifs utilisés pour cimenter les zones à gaz** : sont des substances qui empêchent le gaz de pénétrer dans le ciment lors de sa prise. Il s'agit, par exemple, le gas-check d'Haliburton ou le gas-block de Dowell. [9]

**II.9.8 Le fluide intermédiaire (washes et spacer) :**

Le fluide le mieux déplacé par le ciment est l'eau. L'utilisation d'un spacer est obligatoire chaque fois que le laitier peut être contaminé par la boue.

Les différents spacers:

- les bouchons laveurs.
- les bouchons déplaceurs. [11]

**II.9.8.1 Le bouchon laveur :**

Le bouchon laveur sera :

- de l'eau + surfactants pour une boue à l'eau
- de l'huile de base suivie d'eau + surfactant pour une boue à l'huile.

Du fait de sa faible rhéologie il sera en régime turbulent à faible débit et créera une dilution de la boue. On vérifiera systématiquement la perte d'hydrostatique engendrée par ce bouchon.

Le volume du bouchon laveur : 50 à 100 m d'espace annulaire. [11]

### **II.9.8.2 Le bouchon déplaceurs :**

- ❖ Spacer doit être compatible avec boue et laitier.
  - Des tests de compatibilité doivent être faits pour vérifier si la rhéologie des mélanges est acceptable.
- ❖ Le fluide de base du spacer sera le même que celui du laitier de ciment.
  - la salinité du spacer doit être identique qualitativement et quantitativement à celle du laitier
- ❖ La rhéologie intermédiaire entre celle de la boue et du laitier.

Le volume du bouchon déplaceur :

- 150 m d'espace annulaire pour 500 m de hauteur de ciment.
- + 20 m par 100 m. [11]

### **II.9.9 Réalisation d'un laitier du ciment en laboratoire :**

#### **II.9.9.1 Mesure de la densité des produits de départ :**

Lorsque chaque produit est arrivé au laboratoire, il est essentiel de vérifier sa densité. Cette mesure est effectuée à l'aide d'un pycnomètre à hélium [Figure II.5], qui permet de déterminer de manière précise le volume d'un échantillon solide de masse connue, ce qui permet d'obtenir sa masse volumique réelle. La mesure repose sur l'injection d'un gaz à une pression spécifique dans une enceinte de référence, puis la détente de ce gaz dans l'enceinte de mesure contenant l'échantillon, en mesurant la nouvelle pression. [10]



**Figure II.5 :** Pycnomètre à hélium. [10]

### II.9.9.2 La pesé :

On pèse la quantité de ciment et les additifs solides à l'aide d'une balance électronique, et on mesure le volume des additifs liquide à l'aide des seringues.



**Figure II.6 :** Exemple de pesé. [10]

### II.9.9.3 Le mixage :

Il est essentiel que le mélange de l'eau de gâchage et du ciment respecte les normes API. La méthode consiste à ajouter la quantité d'eau douce requise dans le mixeur [Figure II.7], puis à ajouter les additifs solides, puis à ajouter les additifs liquides, tout en maintenant une vitesse de mixage de 4000tr/min. Une fois que l'eau de gâchage est prête, on ajoute la quantité de ciment et on augmente la vitesse de mixage à 12000tr/min, et cela pendant 15 secondes. [10]



Figure II.7 : Mixeur API. [10]

**II.10 Paramètres affectant la cimentation :**

**II.10.1 stand-off :**

Le terme "stand-off" (SO) décrit la mesure dans laquelle le pipe est centré. La distance de sécurité est de 100 % lorsque le tubage est parfaitement centré. L'absence de distance de sécurité de 0 % indique que le tubage s'approche du puits de forage. Peu importe le type de centralisateur utilisé, il est essentiel de garantir une distance de sécurité positive, de préférence supérieure à 67 %, sur toute la chaîne de tubage.

Le stand-off du tubage est influencé par les éléments suivants :

- La trajectoire du puits et la taille du trou.
- Le diamètre extérieur et le poids de tubage.
- Caractéristiques du centralisateur.
- Localisation et densité des boues et des coulis de ciment (vieillessement). [4]

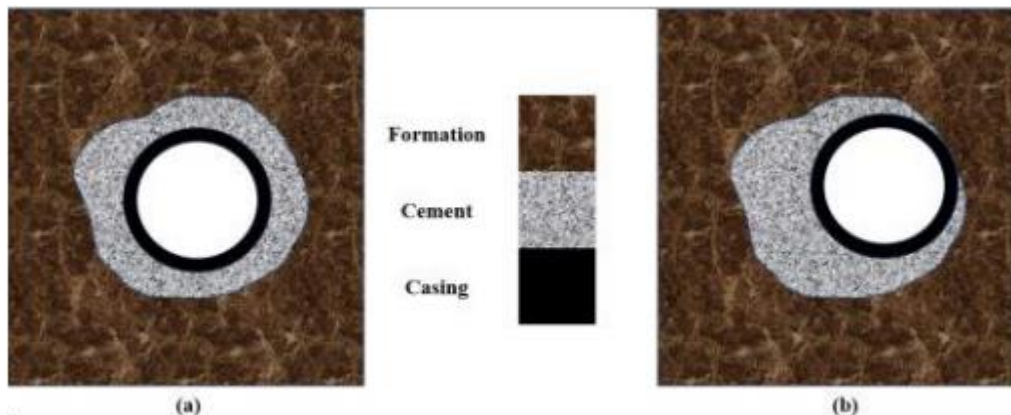
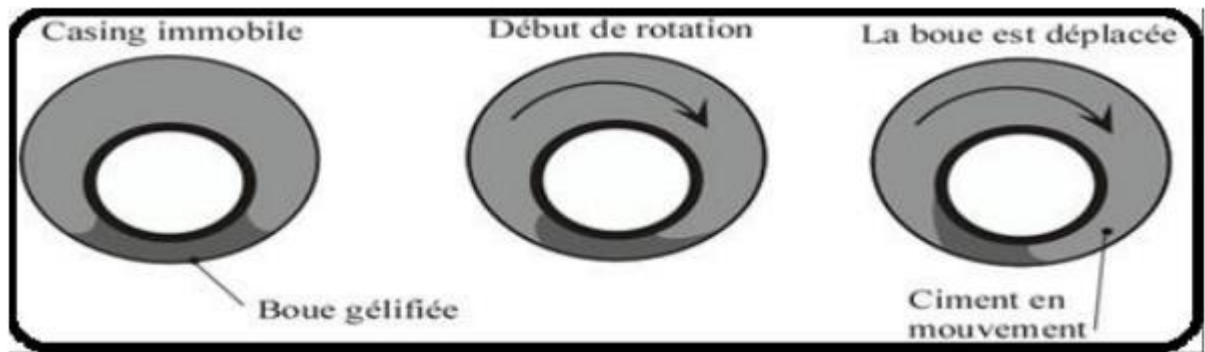


Figure II.8: le stand-off. [4]

### II.10.2 Effet de rotation de colonne de tubage :

La rotation du train de tiges facilite le nettoyage des déblais des trous de forage déviés. On peut également s'attendre à un effet positif similaire sur la circulation et le déplacement de la boue. En effet, cette pratique fait partie des "bonnes pratiques de cimentation". Les deux méthodes de base pour déplacer les tubes sont la rotation et le mouvement alternatif le long de leurs axes. [4]



**Figure II.9:** Effet rotation de la colonne. [4]

### II.10.3 L'effet de canal :

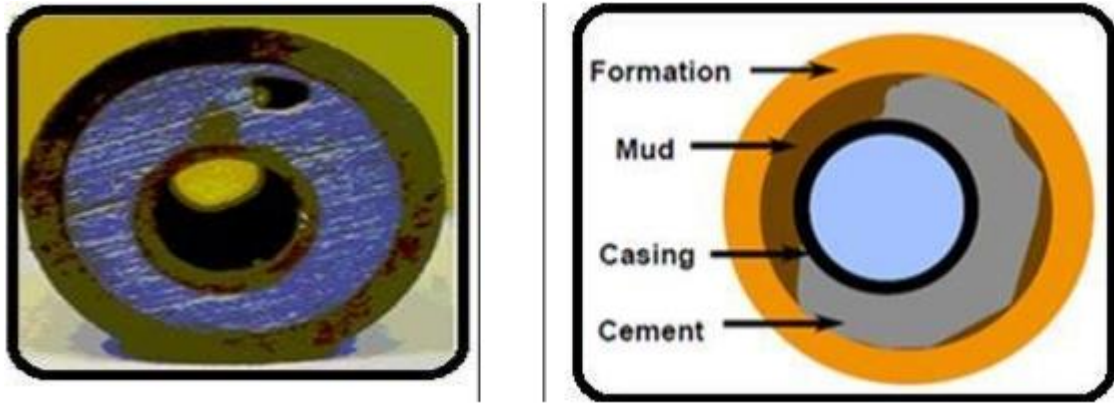
Le piégeage de boue ou de gaz au centre de la gaine de ciment est défini comme une anomalie qui impacte la qualité de la cimentation.

L'effet de canal peut résulter de :

- Un placement incorrect du ciment.
- Un niveau d'injection de ciment excessif ou insuffisant.
- Une faible pression d'injection de ciment.

Afin d'éviter ce phénomène, il est nécessaire de :

- Garantir une bonne centralisation de la garniture.
- Employer des prés filtres et des spacers.
- Si cela est possible, il est recommandé de faire tourner la colonne de tubage pendant la cimentation. [4]



**Figure II.10:** Canal (causé par la migration du gaz). **Figure II.11:** Canal (cause par la boue ).

## II.11 Caractéristiques et propriétés d'un laitier de ciment :

### II.11.1 Densité de ciment :

Ce paramètre a un impact significatif sur :

- La pression hydrostatique pendant la cimentation.
- La durée de pompage.
- La résistance à la compression du ciment durci.
- La perméabilité du ciment. [4]

La densité du ciment varie entre 3,15 et 3,22 selon le lot et le type. Le calcul de la densité de laitier est effectué à l'aide de densités de ciment, d'eau de gâchage et de divers additifs comme suivants :

$$DL = \frac{Mc + Ve * de + \Sigma Mad}{\frac{Mc}{dc} + Ve + \Sigma Vad}$$

- **Mc** : masse du ciment.
- **Ve** : volume d'eau.
- **$\Sigma Mad$**  : somme des masses des additifs.
- **$\Sigma Vad$**  : somme des volumes des additifs.
- **Ve** : Volume (L).
- **dc** : densité du ciment.
- **de** : densité de l'eau. [4]



**II.11.2 Le rendement :**

Il s'agit de volume de laitier produite par tonne de ciment. Il ne peut pas être mesuré, mais peut être calculé selon l'expression suivante :

$$R = \frac{Mc + Ve + \Sigma Vad}{Mc} * 1000. [4]$$

**II.11.3 Le filtrat :**

La suspension de solides dans l'eau, appelée laitier de ciment, a un impact sur les propriétés mécaniques du ciment durci. Lorsqu'il est confronté à une structure perméable et soumis à une pression, il va donc perdre une partie de son eau .La filtration va entraîner un phénomène déshydratation prématurée du laitier peut entraîner une perte de poids et une prise dans des conditions défavorables.

Il est possible de mesurer la filtration du laitier de ciment, de la même manière que celle de la boue, en utilisant un filtre-presse API à température ambiante et sous une pression de sept (7) bars, ou en utilisant un filtre-presse H.P.-H.T. pour simuler les conditions de fond. [4]

**II.11.4 L'eau libre :**

Une quantité d'eau située au-dessus du laitier après une période de repos, qui peut créer un anneau d'eau au sommet de la gaine de ciment, et est élué par une disparité de densité entre les différents produits constitutifs du laitier. [4]

**II.11.5 La durée de pompage :**

Il s'agit de la durée nécessaire pour que le laitier, maintenu en agitation sous pression et température, atteigne une consistance de 100 Poises. Dans la réalité, il correspond au laps de temps pendant lequel le laitier peut être pompé, dans des conditions de température et de pression normalisées, en fonction du type de cimentation prévu. Étant donné que plusieurs facteurs influencent la prise du ciment, tels que l'agitation, la température, la pression et la température qu'il subira lors de son refoulement du puits .On effectue ces tests en utilisant un outil appelé consistomètre (appareil standardisé par l'API). [4]

**II.11.6 Résistance à la compression :**

Les contraintes (mécanique, thermique, vibrations) doivent être soumises par le ciment tout au long de la durée de vie du puits.

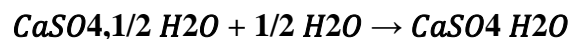
On peut mesurer la résistance mécanique du ciment à l'écrasement sous une pression maximale de 207 bar pendant une période variable (8 heures, 24 heures, 7 jours, 6 mois...) en utilisant une presse sur des cubes de 5 cm de côté.

Le ciment laitier est conservé pendant le temps souhaité à une pression et à une température spécifique, mais la mesure est effectuée à une pression atmosphérique et à une température ambiante. [4]

**II.11.7 La perméabilité :**

Il s'agit de la capacité d'un ciment durci à perméabiliser (plus ou moins rapidement) les fluides.

Les formulations et les conditions de conservation influencent la perméabilité d'un ciment. De quelques centièmes de milli darcy à quelques milli darcy, elle peut varier comme suivant :



**Hemihydrate (Plâtre)**

**(Gypse)**

La résistance à la compression d'un ciment durci est liée à sa perméabilité. [4]

**II.12 Choix des fluides et des écoulements :****II.12.1 Généralités sur la rhéologie des fluides :**

Le mot « rhéologie » (du grec :  $\rho\acute{\epsilon}\iota\nu$ , s'écouler) a été proposé par Eugene Cook Bingham, en 1928, pour désigner « la science qui étudie les déformations et l'écoulement de la matière ». Plus exactement, l'objet de la rhéologie est l'étude du comportement mécanique, c'est-à-dire des relations entre les déformations et les contraintes de la matière. Ensuite, s'appuyant sur la connaissance de ce comportement, on calculera, grâce à la mécanique des milieux continus, la répartition non uniforme des contraintes et des déformations dans un corps sous l'effet des forces extérieures. Dans les conditions de pression et de température données, les fluides sont caractérisés par:

- Leur comportement en régime transitoire représenté par le temps.
- Leur comportement rhéologique caractérisé par la courbe d'écoulement expérimentale (Rhéogramme).
- Leur comportement au repos représenté par la structure développée.[10]

**Taux de cisaillement( $\gamma$ ):** La vitesse de cisaillement caractérise la variation de la vitesse entre les couches limites et est égale au quotient de la vitesse  $v$  et de l'épaisseur  $z$  de l'échantillon.[12]

$$\gamma = dv / dr .$$

**dv:** différence de vitesse entre deux lames voisines. (m/s)

**dr:** la distance entre les deux lames. (m)

**Viscosité ( $\mu$ ) :** La viscosité peut être définie comme étant la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. La viscosité dynamique représente la contrainte de cisaillement nécessaire pour produire un gradient de vitesse d'écoulement d'une unité dans la matière. Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue.[12]

**Viscosité plastique(PV) exprimée en (cP):** est une propriété des fluides non newtoniens, c'est à dire des fluides dont la viscosité ne reste pas constante quelle que soit la force appliquée à ceux-ci, elle est calculée par le viscosimètre FANN par la formule suivante :

$$PV = L600 - L300$$

**Viscosité apparente ( $\mu$ ) exprimée en (cP):** est une mesure de la résistance d'un fluide à l'écoulement sous l'effet d'une contrainte appliquée, elle est calculée par la formule suivante :

$$\mu = L600 / 2 \text{ (cP)}.$$

**La yield value (YP):** définie comme la limite élastique à laquelle un matériau perdra son élasticité et se déformera de façon permanente, exprimée en (lb/100 ft<sup>2</sup>)

**Le gel:** c'est l'aptitude du liquide à geler au repos, exprimée en (lb/100 pi) [12]

**II.12.2 Les type d'écoulements :**

La connaissance du régime d'écoulement d'un fluide est un point clé en génie des procédés, car il a une influence sur la plupart des phénomènes, en particulier les transferts de chaleur, de matière, les pertes de charges etc...[13]

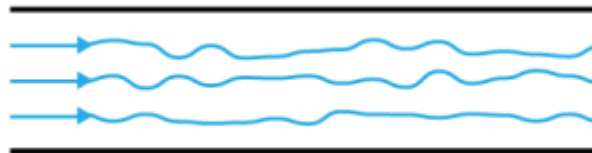
Trois grands régimes d'écoulement ont été définis par Reynolds (1883) :

**L'écoulement laminaire** : écoulement rectiligne, le fluide s'écoule en filets parallèles à l'axe de la conduite, sans mélange.[13]



**Figure II.12** : L'écoulement laminaire.

**L'écoulement intermédiaire** : l'écoulement est plus ou moins rectiligne, avec un peu de mélange (petits tourbillons). [13]



**Figure II.13** : L'écoulement intermédiaire.

**L'écoulement turbulent** : l'écoulement se fait avec de grands tourbillons, avec un mélange important. [13]



**Figure II.14** : L'écoulement turbulent.

Le régime d'écoulement dépend du débit de fluide, du diamètre de la conduite et des propriétés du fluide. Il est déterminé grâce au nombre de Reynolds, défini comme suit dans le cas d'un écoulement dans une conduite cylindrique :

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{v * D}{\nu}$$

**Re** : nombre de Reynolds (sans dimension)

**ρ** : masse volumique du fluide (kg.m-3)

**v** : vitesse moyenne du fluide (m.s-1)

**D** : diamètre de la conduite (m)

**μ** : viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

**ν** : viscosité cinématique du fluide (m2.s-1)

Pour  $Re < 2000$ , l'écoulement est laminaire.

Pour  $2000 < Re < 10000$ , l'écoulement est intermédiaire.

Pour  $Re > 10000$ , l'écoulement est turbulent. [13]

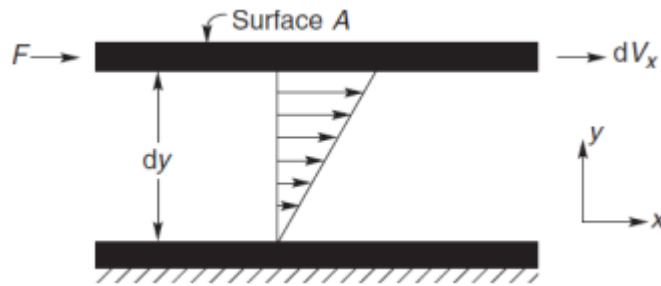
### II.13 Classification du comportement des fluides :

On peut classer les fluides de deux façons différentes ; en fonction de leur réponse à l'application d'une pression extérieure, ou selon les effets produits sous l'action d'une contrainte de cisaillement. Le premier type fluide Newtonien et la deuxième type fluide non-Newtonien.

#### II.13.1 fluide Newtonien :

Considérons une couche mince d'un fluide contenu entre deux plans parallèles séparée par une distance " dy ". Maintenant, si dans des conditions stationnaires, le fluide est soumis à un cisaillement par l'application d'une force F, ceci sera équilibré par une force de frottement interne égale et opposée dans le fluide. Pour un fluide Newtonien incompressible dans un régime laminaire, la contrainte de cisaillement résultante est égale au produit du taux de cisaillement et de la viscosité du fluide. Dans ce cas simple, le taux de cisaillement peut être exprimé sous forme de gradient de vitesse dans la direction perpendiculaire à celle de la force de cisaillement, c'est-à-dire: [14]

$$\frac{F}{A} = \tau_{yx} = \mu \frac{dV_x}{dy} = \mu \dot{\gamma}_{yx}$$

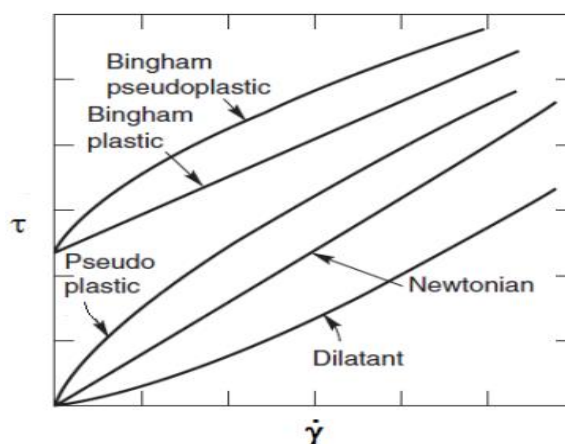


**Figure II.15 :** Représentation schématique d'un écoulement unidirectionnel cisailé. [14]

### II.13.2 Fluides non-Newtoniens :

C'est un fluide dont la courbe d'écoulement (contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement) est non linéaire, autrement dit lorsque la viscosité apparente (la contrainte de cisaillement divisée par le taux de cisaillement) n'est pas constante à une température et à une pression données, mais dépend des conditions de l'écoulement telles que la géométrie, le taux de cisaillement, etc. De tels matériaux peuvent être regroupés en trois catégories générales:

- des fluides pour lesquels le taux de cisaillement en un point quelconque n'est déterminé que par la valeur de la contrainte de cisaillement à ce point à cet instant. Ces fluides sont connus sous le nom de fluides au comportement «indépendant du temps»,
- des fluides plus complexes pour lesquels la relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement dépend, en plus, de la durée de cisaillement; on les appelle fluide au comportement «dépendant du temps»,
- des substances présentant des caractéristiques intermédiaires entre un solide élastique idéal et celui d'un liquide visqueux Newtonien, ceux-ci sont classés comme «fluides viscoélastiques». [14]



**Figure II.16 :** Types des comportements non-Newtoniens indépendants du temps. [14]

**II.14 Tests en laboratoire :**

On effectue six tests primaires de ciment en laboratoire :

- mesure de densité.
- mesure de rhéologie.
- test de fluidité libre.
- test de perte de fluide.
- test de temps de pompabilité.
- test de résistance à la compression.

**II.14.1 Mesure de densité :**

Le densimètre [Figure II.17] permet de mesurer la densité du laitier en remplissant le godet de laitier de ciment, puis en mettant le couvercle et en rinçant à l'eau l'excès de laitier qui sort par le trou central. L'eau est utilisée pour le nettoyage et le séchage, puis le levier est placé sur le couteau. On déplace le curseur jusqu'à ce que le bras soit horizontal, ce qui est contrôlé avec le niveau à bulle incorporé dans le bras. La densité est visible directement sur le bras. [10]



**Figure II.17 :** Le densimètre. [10]

**II.14.2 Mesure de rhéologie :**

Le rhéomètre (viscosimètre) est l'instrument employé pour mesurer les paramètres rhéologiques [Figure II.18]. La force de cisaillement peut être mesurée en fonction de la vitesse du scintillomètre. Ce dispositif permet d'identifier les propriétés rhéologiques du laitier de ciment, telles que :

- Viscosité plastique.
- Yield value.
- Les différents gels, 10 seconds et 10 minutes.

Il s'agit d'un cylindre coaxial dont le rotor est alimenté par un moteur électrique. La résistance de scintillement du laitier contenu dans un godet, dans lequel les cylindres coaxiaux sont immergés, est mesurée. La résistance de cisaillement aux différentes vitesses de rotation du rotor est visible directement sur un cadran gradué.

Une fois mis en marche, le moteur démarre à une vitesse de 600 tr/min. La première lecture est effectuée après 60 secondes, suivie des lectures suivantes aux intervalles de 20 secondes.

Selon la lecture du viscosimètre, nous observerons les valeurs suivantes : R300, R 200, R100, R 6, R 3), un gel de 10 secondes et un gel de 10 minutes. Ensuite, il faut calculer les divers paramètres rhéologiques en utilisant les formules ci-après :

- **Viscosité plastique  $V_p$**  : est la résistance à l'écoulement du fluide ; selon le modèle plastique de BANGHAM ; la  $V_p$  est la pente de la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement. La  $V_p$  est calculé à partir de cette formule :

$$V_p = (\text{lecture } 300\text{tr/min} - \text{lecture } 100\text{tr/min}) * 1,5 \text{ (Centi Poise)}.$$

- **Yield value** : Permet de déterminer le point d'écoulement de ciment C'est-à-dire sa résistance à l'écoulement.

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

- **Le gel** : C'est l'augmentation apparente de la viscosité lorsque le laitier est au repos on considérait le gel initial (ou gel après 10 seconde de repos) et le gel après 10 minutes. [10]



**Figure II.18:** Rhéomètre FANN. [10]



**II.14.3 Test de fluidité libre :**

La mesure est effectuée dans un échantillon de 250 ml de laitier [Figure II.19], après une période de repos de 2 heures. On peut donner le résultat en CC ou en pourcentage (1 CC équivaut à 0,4 %).

Le phénomène de sédimentation de suspension de particules de ciment dans l'eau sera caractérisé par cette mesure. Contrairement aux idées reçues, l'eau libre et le filtrat sont deux mesures totalement distinctes. Un même laitier peut présenter un filtrat réduit et un eau libre importante, et vice versa. [10]



**Figure II.19 :** Test d'eau libre. [10]

**II.14.4 Test de perte de fluide :**

Le filtre presse [Figure II.20] est l'outil qui nous permet de déterminer le filtrat d'un laitier de ciment, Le laitier de ciment est placé contre un filtre, le volume d'eau contenu dans le laitier est forcé au même temps que les additifs solubles à travers ce filtre, Le volume d'eau recueillie à travers le filtre est appelé filtrat, on appelle cake de filtration, le dépôt sur le filtre des particules de ciment déshydraté.

La déshydratation du laitier de ciment se produit fréquemment avant le délai normalisé de 30 minutes, ce qui permet d'exprimer le résultat en valeur extrapolée à 30 minutes selon la formule approchée suivante : [10]

- $V_f = QR * 2$  Si t =30 mins avec : QR : quantité d'eau recueillie
- $V_f = (QR \sqrt{t}) * 2$  Si t > 30 mins t : temps



Figure II.20 : Le filtre presse. [10]

#### II.14.5 Test de temps:

La prise de ciment étant influencée par l'agitation, la température, et la pression, on doit, durant le test, maintenir le laitier en agitation et simuler la montée en pression et en température qu'il subira lors de son refoulement dans le puits, Ce test est effectué à l'aide d'un consistomètre pressurisé HP/HT [Figure II.21] : [10]



Figure II.21 : consistomètre pressurisé HP/HT. [10]

#### II.14.6 Test de résistance à la compression :

La résistance mécanique d'un ciment à la compression est la seule caractéristique qui détermine sa qualité. Il doit avoir une résistance pour maintenir et soutenir le tubage, supporter les fissures, la perforation et la fracture, ce qui dépend de facteurs tels que la température et la pression. La mesure de la résistance mécanique se fait par deux méthodes :

**1. L'écrasement des cubes par presse hydraulique :**

Un moule rempli du laitier de ciment sera introduit dans un Curing chamber à la température statique (BHST) durant 24 heures, Après le mûrissage au bain marie, les éprouvettes (cube de ciment) sont passées à la presse hydraulique [Figure II.22] pour subir une pression jusqu'à éclatement du cube de ciment. Elle s'exprime en PSI ou par fois avec Kg/cm<sup>2</sup>. [10]



**Figure II.22:** La presse hydraulique. [10]

**2. Analyseur de ciment par ultrason Cement Analyzer (UCA) :**

En mesurant la variation de la vitesse d'un signal acoustique, l'analyseur de ciment par ultrasons [Figure II.23] fournit une méthode continue non destructive pour déterminer la résistance à la compression en fonction du temps. [10]



**Figure II.23:** ultrason Cement Analyzer. [10]

### **Chapitre III: Contrôle de la qualité de la cimentation**

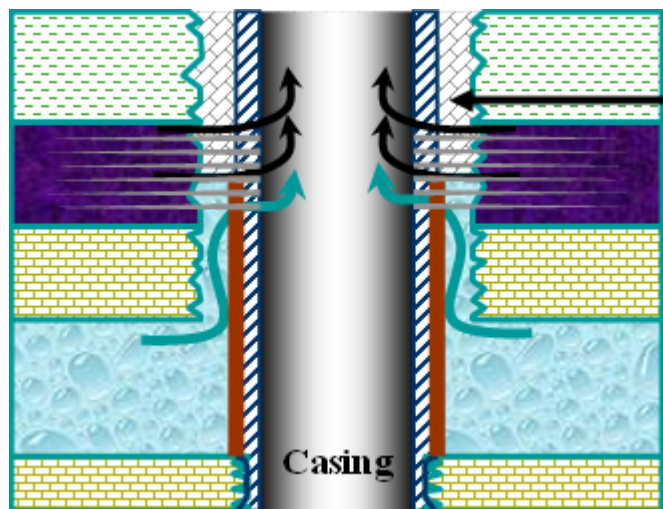
### III. Introduction :

Contrôler le ciment dans un puits pétrolier est essentiel pour assurer l'intégrité structurelle et la sécurité de l'opération. Cela implique une gestion précise du processus de cimentation, depuis la préparation des mélanges jusqu'à leur placement et leur durcissement. Ce chapitre explorera les principales étapes et techniques utilisées pour contrôler efficacement le ciment dans un puits pétrolier, garantissant ainsi le succès de l'opération.

#### III.1 L'objectif d'évaluation du ciment :

On évalue le ciment pour obtenir une bonne cimentation et éviter les problèmes suivant :

- Mélange de l'effluent produit avec des fluides indésirables.
- Migration des fluides en surface à travers les zones mal cimentées.
- La corrosion du tubage.
- La déformation du tubage (casing collapse).
- Cross flow. [4]



**Figure III.1:** Conséquences d'une mauvaise cimentation.

#### III.2 Les défauts de la cimentation qui peuvent perturber l'étanchéité:

- micro ou macro-annulaire ciment-cuvelage (sec ou humide).
- micro ou macro-annulaire ciment-formation (sec ou humide).
- canal de boue au niveau du cuvelage.
- canal de boue au niveau de la formation.

- percolation de gaz dans la gaine de ciment
- canal de gaz dans la gaine de ciment.

L'objectif des diagraphies est de repérer l'existence d'un de ces défauts dans la gaine de ciment. [9]

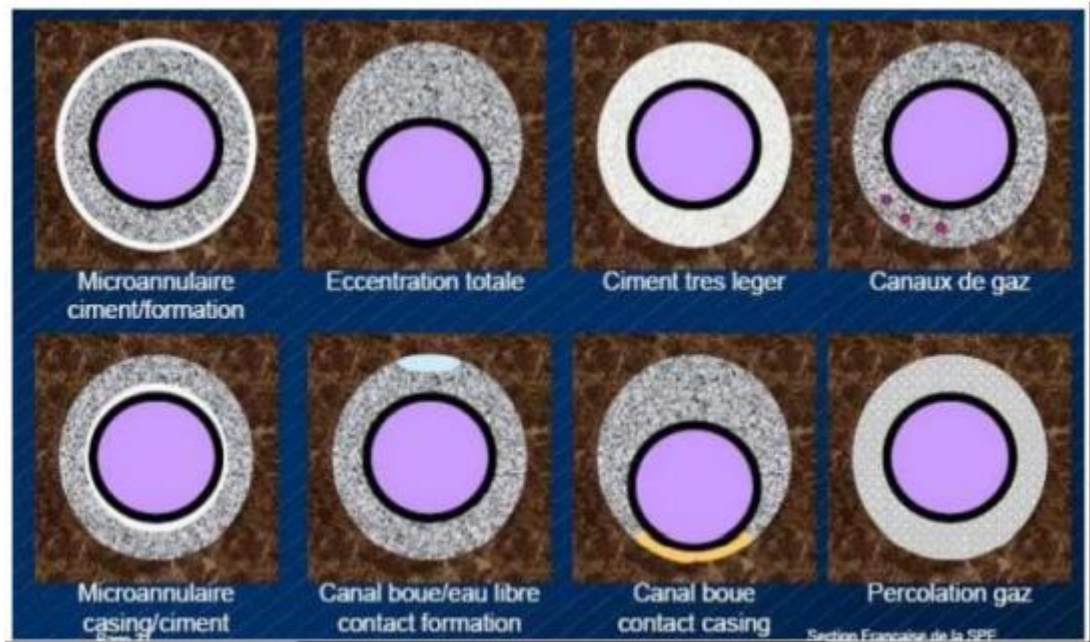


Figure III.2 : Les défauts de la cimentation qui peuvent perturber l'étanchéité. [9]

### III.3 Les causes des défauts de la cimentation :

On peut le citer comme suivant :

- mauvais déplacement de la boue,
- formulation "spacer" non adaptée,
- formulation "laitier" non conforme aux exigences du puits,
- fissures de l'annulaire cimenté sous l'effet des chocs thermiques, hydrauliques et du vieillissement,
- évolution de la perméabilité pendant le vieillissement. [9]

### III.4 Contrôle de la qualité de la cimentation :

Après l'opération de cimentation, vous devez évaluer la qualité et l'intégrité de la gaine de ciment à l'aide de diverses méthodes, telles que des tests de pression, des diagraphies de température, des diagraphies acoustiques et des diagraphies à ultrasons.

### III.4.1 Les diagraphies de température :

Une étude de la température peut être réalisée pour déterminer la présence de ciment et le sommet du ciment autour du tubage. Cette étude est généralement réalisée dans les 24 heures suivant le travail de cimentation. [15]

La température du puits de forage est augmentée par les réactions exothermiques d'hydratation du ciment, ce qui provoque une déviation du gradient de température normal. Le relevé de température typique réalisé après une opération de cimentation primaire est illustré dans la Figure III.3. La quantité de ciment et d'additifs dans un laitier est également directement liée à la chaleur produite lors de l'hydratation du ciment.

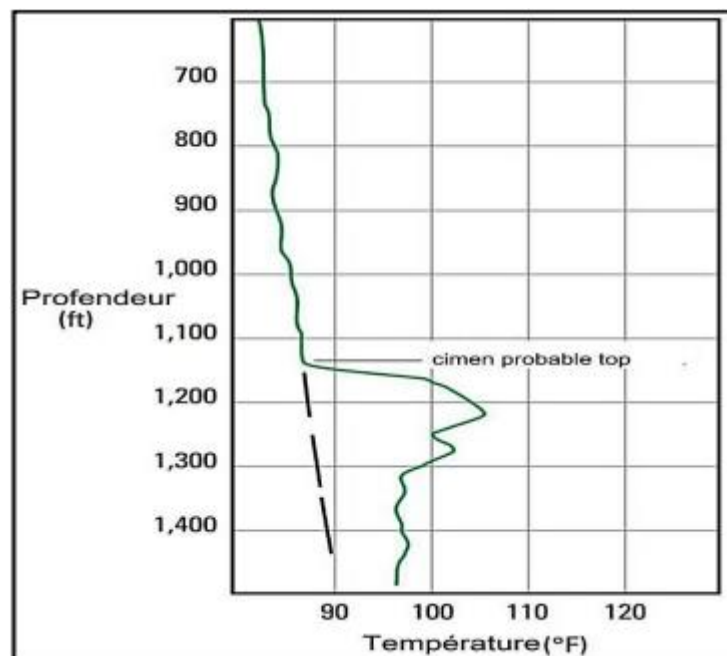


Figure III.3 : Relevé typique de la température. [15]

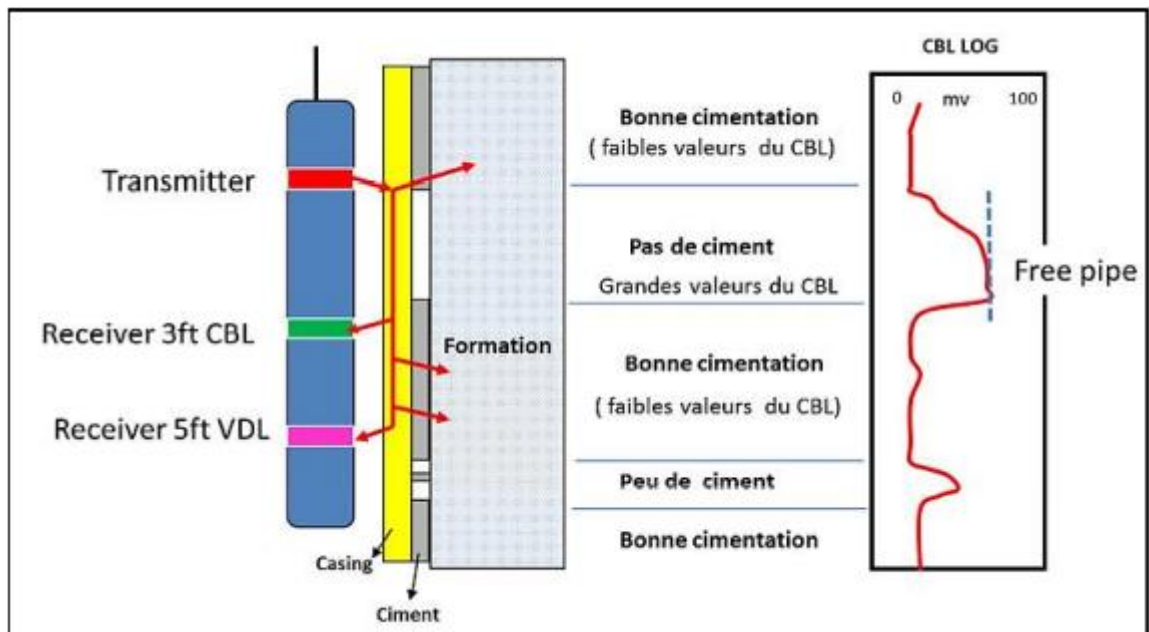
### III.4.2 Les diagraphies acoustique (CBL-VDL) :

Les outils soniques CBL et VDL enregistrent l'amplitude d'une onde sonore dans le tubage, avec un taux d'atténuation qui varie en fonction de la compression du ciment et du pourcentage de circonférence cimentée. Elle est utilisée pour évaluer la qualité de la cimentation d'un tube.

### III.4.2.1 Principe du CBL (Cement Bond Log) :

Un émetteur produit régulièrement un train d'onde de fréquence comprise entre 15 et 30 KHz, en fonction des dispositifs utilisés. Si ces différents milieux sont acoustiquement couplés, cette onde traverse la boue, le tubage, le ciment et la formation, puis est détectée par un récepteur situé sur le corps de l'outil (généralement à 3 pieds de l'émetteur).

Grâce à cette diaggraphie, il est possible d'analyser et de mesurer la qualité de la cimentation en utilisant la mesure d'adhérence. [15]



**Figure III.4 :** Principe du CBL. [15]

Les Chemins acoustiques possibles sont :

1. Dans le corps de l'outil : Pas vu, à cause de la conception de l'outil.
2. Dans la boue : Vu mais arrive très tard.
3. Dans le casing : Vu et mesuré.
4. Dans la gaine de ciment : Pas vu.
5. Dans la formation : Vu dans le cas de bon ciment. [4]



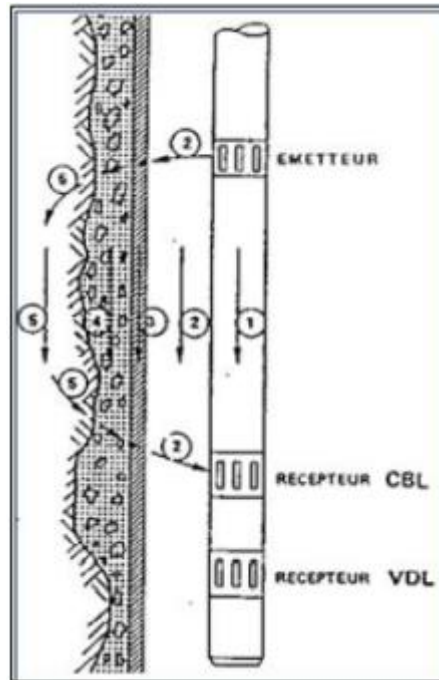


Figure III.5 : Les Chemins acoustiques possibles. [4]

- Exemple :

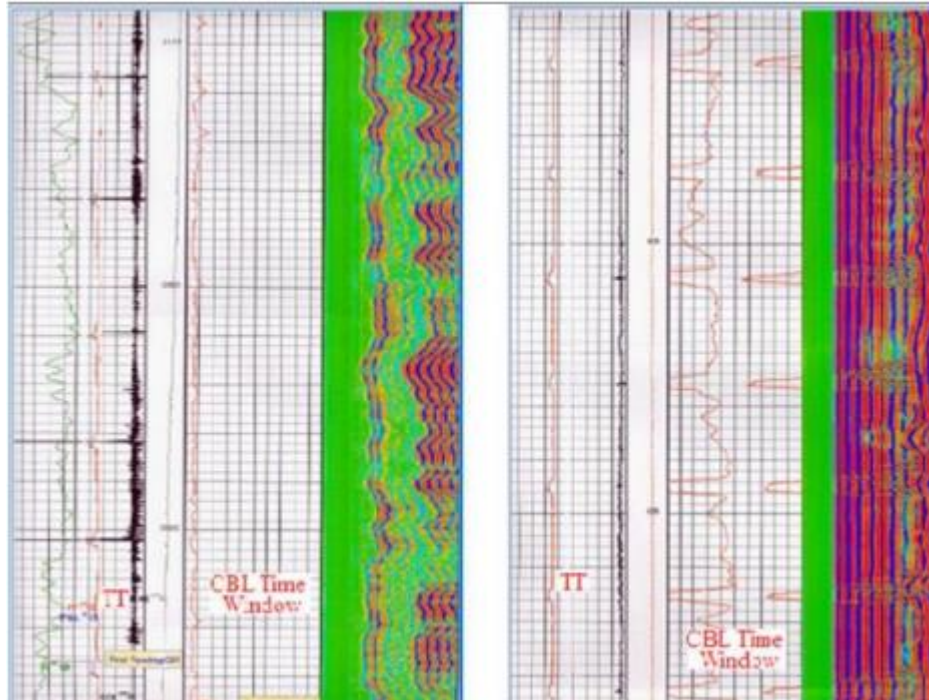


Figure III.6: Exemple d'un bon CBL et d'un mauvais CBL. [4]

### III.4.2.2 Interprétation du CBL:

- Dans le cas d'un tubage "libre" (non cimenté) toute l'énergie acoustique circule le long de l'acier : il y a très peu d'atténuation de l'onde et de l'amplitude de la première arche du signal est importante.
- Dans le cas d'un tubage parfaitement cimenté, cette énergie se propagera à travers le ciment jusque dans la formation.
- Dans le cas d'un tubage mal cimenté, l'énergie se répartit entre le tubage et la formation. [16]

### III.4.2.3 Principe du VDL :

Plusieurs facteurs peuvent influencer la qualité de la cimentation, ce qui peut entraîner des erreurs. L'enregistrement de l'ensemble du train d'ondes sonores reçues par un récepteur, généralement situé à 5 pieds de l'émetteur, s'est avéré pratique.

Le VDL est enregistré en complément du CBL et permet de déterminer l'adhérence Ciment Formation.

La présentation de cet enregistrement est :

- Sous forme du train d'onde complet ou de sa partie positive uniquement ("Wave Forme", "Signature Curve") : la lecture est difficile.
- En densité variable (VDL), seules les arches positives étant reproduites en une échelle de gris d'autant plus foncés que l'amplitude est plus grande. [16]

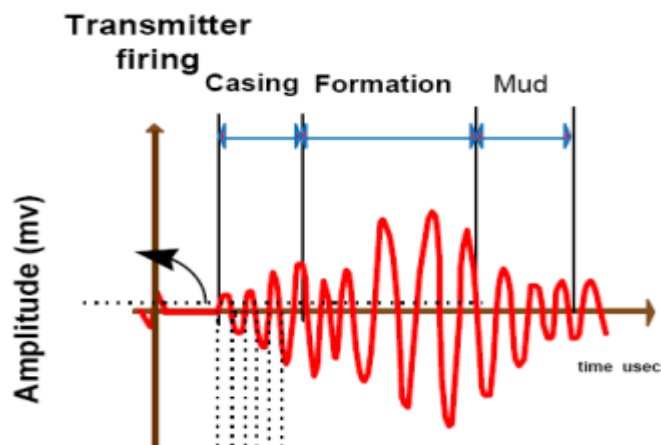


Figure III.7 : principe de VDL. [16]

**III.4.2.4 Interprétation du CBL-VDL :****Tubage libre (non cimenté) :**

- L'amplitude CBL est forte (correspondant à celle attendue en fonction du diamètre du tubage).
- T.T. approximativement égal à celui calculé à partir des données de la boue et du tubage.
- Ondes du tubage très nettes, rectilignes et bien parallèles sur le VDL.
- Joints de tubage net pour tous les logs. [16]

**Tubage bien cimenté :**

- L'amplitude du CBL est faible.
- Le T.T. est peu différent e celui mesuré dans le tubage libre.
- S'il y a saut de cycle, il est visible sur le T.T. et le CL indique une amplitude très faible (sauf dans le cas d'un enregistrement avec fenêtre mobile).
- Dans tous les cas, le VDL montre des ondes de tubage très faibles voire inexistantes et des ondes de formation très nettes dont les variations correspondent à celles vues sur le sonique enregistré en trou ouvert. [16]

**Renardage (tubage imparfaitement cimenté ou "channeling") :**

- L'amplitude du CBL est moyenne.
- Le VDL montre des ondes de tubage relativement bien visibles.
- Bonne liaison tubage-ciment, pas de liaison ciment-formation : Les ondes de tubage sont très atténuées (amplitude sur le CBL et glissement ou saut de cycle sur le T.T). Les ondes formations n'apparaissent pas et seules les ondes de boue arrivent après les ondes de tubage.
- Micro-annulaire (ou séparation tubage-ciment) : Le couplage acoustique se fait tout de même ; une partie de l'énergie passe par le tubage, le CBL n'est pas à son maximum. Comme une partie de l'énergie passe par la formation on remarque des ondes de formation sur le VDL. Seul un deuxième contrôle avec mise en pression du tubage permettra de voir si le couplage s'améliore. Réduction de l'amplitude CBL et nette atténuation des ondes de tubage sur le VDL, confirmant ainsi la présence d'un micro-annulaire.

- Formations rapides : Dans le cas de formations compactes ou à très faible porosité dont le  $\Delta T$  est inférieur au  $\Delta T$  de l'acier du tubage ( $57 \mu\text{s}/\text{pied}$ ), l'onde de formation arrive la première. Le CBL devient inutilisable. Sur le VDL, l'onde de tubage s'efface au profit de l'onde de formation plus rapide. [16]

**III.4.2.5 Facteurs pouvant influencer la mesure CBL-VDL:**

- D'après les recherches en laboratoire, il est démontré que l'atténuation ne dépend plus de l'épaisseur du ciment  $\frac{3}{4}$ ". Il serait pessimiste d'interpréter dans une zone où l'épaisseur de ciment est inférieure.
- Les variations de pression dans le tubage entre le moment de la cimentation et le log peuvent conduire à un retrait de tubage par rapport au ciment par diminution du diamètre et à la formation d'un micro-annulus. Ex. : réduction de la concentration de boue. Après avoir été cimenté,
- Il est essentiel que l'outil soit parfaitement centré, sinon l'amplitude du signal risque d'être considérablement réduite. Si le centrage est mauvais, on observe cette diminution du CBL et une légère baisse du T.T.

Les "ondes tubage" sont également réduites sur le VDL et ne sont plus rectilignes, l'axe de la sonde étant en permanence en rotation par rapport à l'axe du tubage. Ex. : Une excentration de 1 mm entraîne une diminution de l'amplitude de 5 %.

- Il est nécessaire que la sonde remonte à une vitesse de 600 m/h. En cas de frottement trop rapide des centreurs avec vibrations latérales, les ondes de casing seront ondulées (au lieu des « rails de chemin de fer »).
- Il est recommandé d'attendre entre 24 et 36 heures pour le séchage du ciment, en fonction du type de ciment et de la température de réchauffement du puits. La prise du ciment doit être complète sur toute la colonne et la résistance à la compression du ciment supérieure à 70 bar. Le CBL présentera des amplitudes élevées, ce qui conduira à une mauvaise adhérence entre le casing et le ciment. Sur le VDL, seules les ondes casing seront visibles, pas d'ondes formation.
- Densité du fluide dans le puits : une augmentation de densité de la boue se traduira par baisse du transit time (T.T.) et une baisse de l'amplitude qu'il ne faudra pas traduire en bonne cimentation.

- En général, les formations rapides (temps de transit similaire à celui de l'acier) sont des formations sans porosité (basalte, bancs compacts), à l'exception du gypse et du sel, qui sont plutôt lents. Il y aura également le calcaire (avec une porosité inférieure à 10 %), la dolomie (avec une porosité inférieure à 15 %) et des grès avec des porosités variées.
- Tubage excentré : dans la partie libre du tubage, il est possible de voir des ondes de formation si le tubage est en contact avec celle-ci.
- Joints de tubage : ils sont détectés sur les 3 enregistrements :
  - le Transit Time est allongé d'environ 8  $\mu$ s,
  - le CBL donne des valeurs plus faibles au niveau du tubage libre,
  - le VDL présente des figures caractéristiques de chevron.

La hauteur perturbée par le joint correspond à l'espacement émetteur-récepteur pour l'enregistrement considéré (généralement 3' pour le CBL, 5' pour le VDL). [16]

#### **III.4.2.6 Synthèse CBL-VDL**

- Le CBL indique la qualité de l'adhérence casing/casing.
- Le VDL juge de la qualité des adhérences casing/ciment, ciment/formation et le bon remplissage de l'espace annulaire. C'est le seul outil qui puisse analyser le contact ciment/formation.

Il est sensible :

- au micro-annulaire > à 10 microns,
- au centrage de l'outil,
- à la variation de la densité de la boue dans le puits,
- à la résistance à la compression du ciment,
- aux formations rapides
- à la gaine de ciment qui doit être >  $\frac{3}{4}$ "

Il n'est pas sensible :

- aux boues lourdes,
- à la calibration (il n'y en a pas). [16]

**III.4.3 Ultrasonic Tools (L’outil d’imagerie ultrasonique (USIT), IBC (Isolation Scanner)) :**

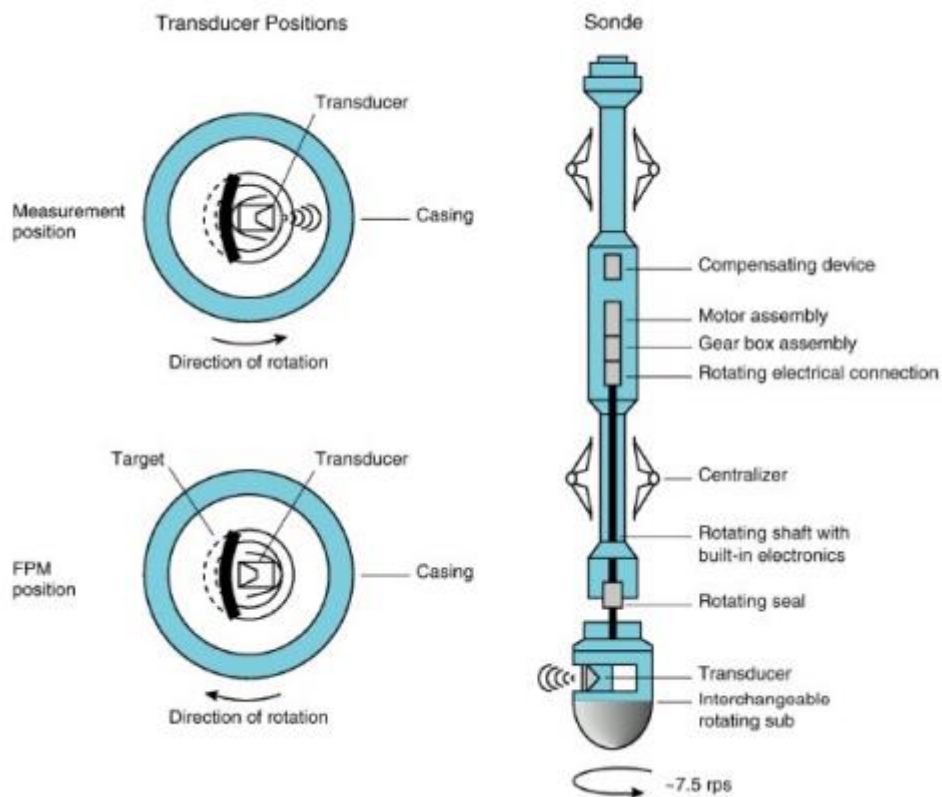
**III.4.3.1 L’outil d’imagerie ultrasonique (USIT) :**

L’outil d’imagerie ultrasonique est conçu pour donner une image de haute résolution de la paroi du casing et de la distribution du ciment.

L’USIT donne quatre mesures de base:

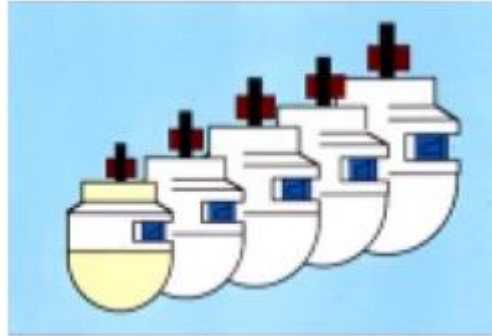
- L’impédance acoustique du ciment derrière le casing.
- L’épaisseur du casing.
- Le rayon interne du casing.
- L’estimation des conditions de la surface interne du casing.

Le transducteur rotatif de l’outil assure une couverture de 100% de la paroi du casing en faisant 7.5 rotations par seconde en émettant des pulsations ultrasoniques à raison de 18 pulsations par rotation. [16]



**Figure III.8 :** schéma explicatif sur l’outil USIT. [16]

On peut trouver des transducteurs de diverses dimensions. Le diamètre du casing influence la taille du transducteur, avec pour objectif de minimiser la distance entre la face du transducteur et la surface interne du casing. [16]



**Figure III.9 :** Des différentes tailles des transducteurs. [16]

**Tableau III.1 :** Spécifications de l’outil USIT. [16]

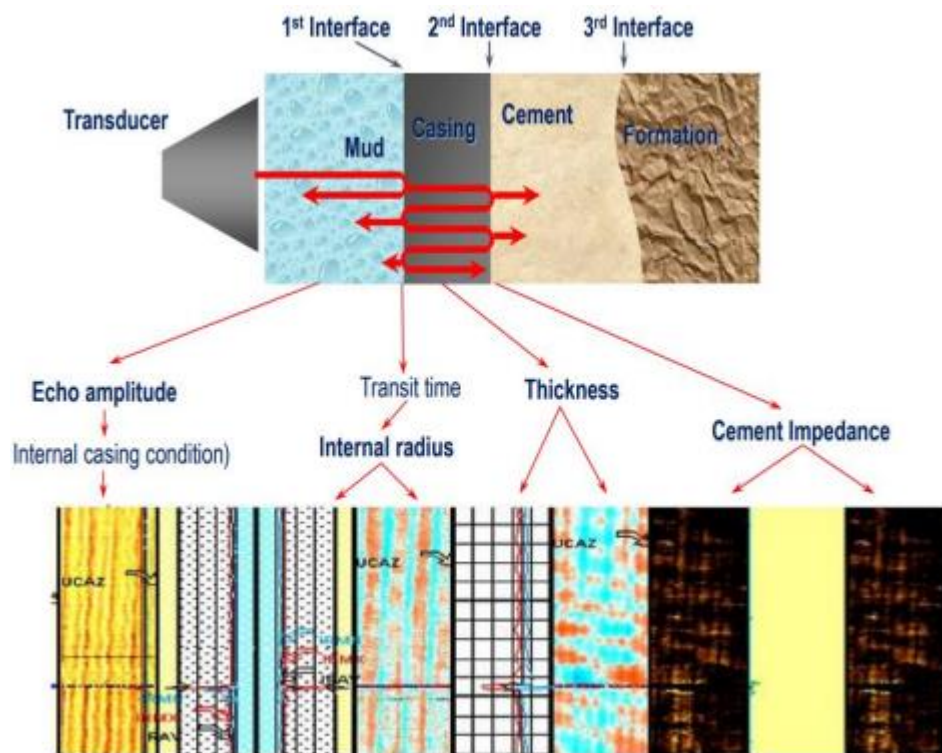
Caractéristiques		Corrosion	
Longueur	262.2 in (6671 mm)	Diamètre interne	De 4 a 14 in
Poids	377.6 in (171.6 kg)	Rayon	Résolution 0.002 in (0.05 mm)
Diamètre	3 3/8 in (85.7 mm)	Epaisseur	Résolution 0.002 in ( 0.05 mm )
Température	350°F (175°C)		
Pression	20 000 psi (1400 bars)		
Taille min du tubage	4 ½ in (114.3 mm)		
Taille max du tubage	13 3/8 in (339.7 mm)		
Déviat ion max du puits	Pas de limites		
Impédance acoustique	De 0 à 10 MRayl		

**III.4.3.2 Principe de mesure :**

Le transducteur émet des pulsations ultrasoniques de hautes fréquences de façon à faire résonner le tubage dans son épaisseur.

Les pulsations envoyées par l'outil traversent un certain nombre d'interfaces avec une partie du signal réfléchi à chaque interface (boue/intérieur du tubage - extérieur du tubage/ciment - ciment/formation).

L'appareil émet une pulsation ultrasonique de fréquence comprise entre 195 et 650 kHz, et se met en mode récepteur. [16]



**Figure III.10:** Le principe de l'Ultrasonique et ses mesures. [16]

Le signal réfléchi contient des informations relatives à la résonance du tubage. Cette résonance est contrôlée par l'épaisseur du tubage ainsi que l'impédance du ciment.

L'outil USI mesure la vitesse et l'impédance acoustiques du fluide dans le tubage. La vitesse du fluide est utilisée pour déterminer le rayon interne du casing.

L'impédance acoustique du fluide est un paramètre nécessaire pour l'algorithme du traitement de signal, celui-ci permet la détermination de l'impédance du ciment. [16]



III.4.3.3 Le modèle de l'onde plane :

Les petites pulsations ultrasoniques sont envoyées par le transducteur vers la face interne du casing.

On considère que les fronts d'ondes ultrasoniques sont plans et parallèles à l'interface entre la boue et l'acier, et il est possible de les calculer mathématiquement en utilisant le modèle de l'onde plane.

Nous décrivons ci-dessous la réponse impulsionnelle de la propagation de l'onde planeire :

- La majorité de l'énergie est dirigée vers l'interface entre la boue et l'acier et est représentée par un écho initial A. Cette énergie passe par le tubage et rebondit à l'intérieur du tubage, perdant à chaque fois une partie de son énergie à l'extérieur de la surface du tubage.
- Les nombreux échos sont symbolisés par une succession de pulsations négatives qui diminuent de manière exponentielle. Le double temps de passage à travers la paroi du tubage sépare les échos.
- Le premier écho est positif et environ 10 fois plus élevé que ces impulsions négatives, en raison de la forte différence d'impédance entre la boue et l'acier. [16]

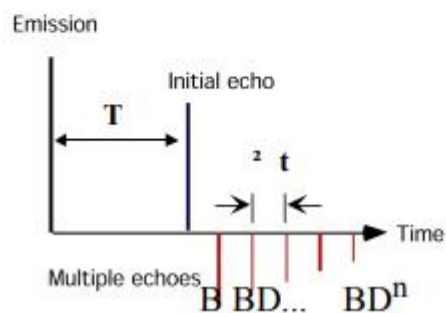
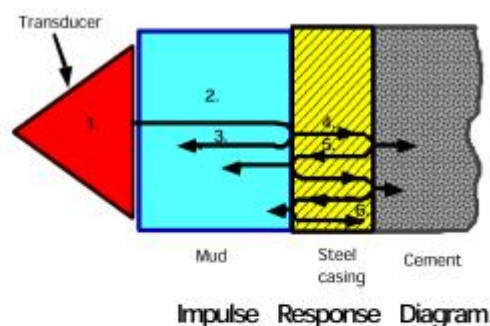


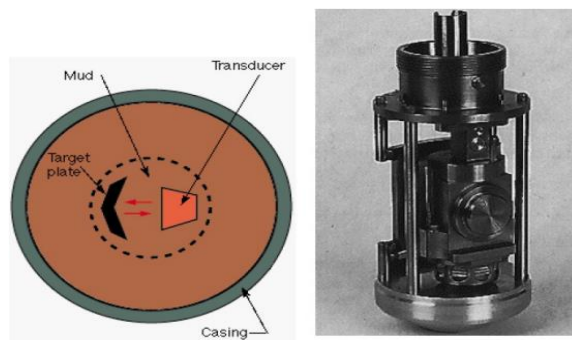
Figure III.11 : Le modèle de l'onde plane. [16]

### III.4.3.4 Les modes d'opération :

Le transducteur de l'USIT peut être utilisé de deux manières :

- **Le mode propriétés du fluide :**

En utilisant le mode "propriétés du fluide", le transducteur se trouve en face de la plaque métallique immergée dans le fluide, et les signaux enregistrés sont analysés afin de mesurer la vitesse et l'impédance du fluide dans la conduite. [16]

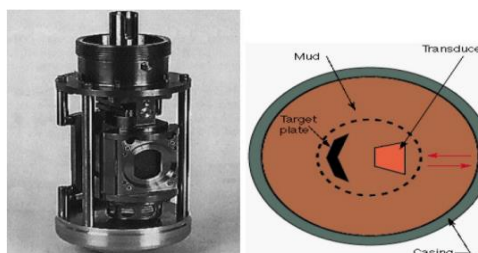


**Figure III.12** : principe de fonctionnement du transducteur dans les propriétés du fluide. [16]

On mesure les caractéristiques du fluide lors de la descente de l'outil dans le puits. Les algorithmes d'évaluation du ciment et du casing utilisent ces valeurs.[16]

- **Le mode de mesures :**

L'utilisation du mode de mesure où le transducteur est positionné face à la surface interne du casing permet d'enregistrer le temps de transit et la distorsion des échos. L'inversion de la direction de la rotation du transducteur permet la transition entre les deux modes de mesure. [16]



**Figure III.13** : principe de fonctionnement du transducteur dans le mode de mesures. [16]

**III.4.3.5 Les mesures de base :**

Les 4 mesures de base sont exposées sur le log comme suivant :

- **L'impédance acoustique** : illustrée par une image d'impédance et analysée afin de déterminer la qualité de la répartition du ciment autour du tubage.
- **L'épaisseur** : peut également être utilisée pour illustrer la perte de métal (métal loss) à l'extérieur du tubage en utilisant des images d'épaisseur.
- **Le temps de transit** : traduit en image de diamètre interne, peut présenter les images de perte de métal à l'intérieur du tubage.
- **L'amplitude de l'écho principal** : présentée en images d'amplitude donnant une très fine image des conditions à l'intérieur du tubage. [16]

En cas de dommage à l'intérieur du tubage, le signal sera dispersé, ce qui se traduira par une diminution de l'amplitude du signal, ce qui se manifestera par des traces sombres sur l'image des amplitudes. [16]

**III.4.3.6 Réponse aux matériaux dans l'espace annulaire :**

Chacun fluide a une impédance spécifique, on peut le citer comme suivant :

- Le gaz a une impédance acoustique inférieure à 0,1 MRayl. Il agit comme une barrière qui reflète totalement les ultrasons. [4]
- Les liquides ont des impédances comprises entre 1 et 3 MRayl. [4]
- Le ciment pur a une impédance d'environ 6 MRayl. Les ciments légers peuvent avoir une impédance aussi faible que 2,5 MRayl, dépassant la gamme liquide. Comme pour l'acoustique diagraphie, les ciments moussés ont une impédance particulièrement faible et posent des problèmes particuliers d'interprétation. [4]

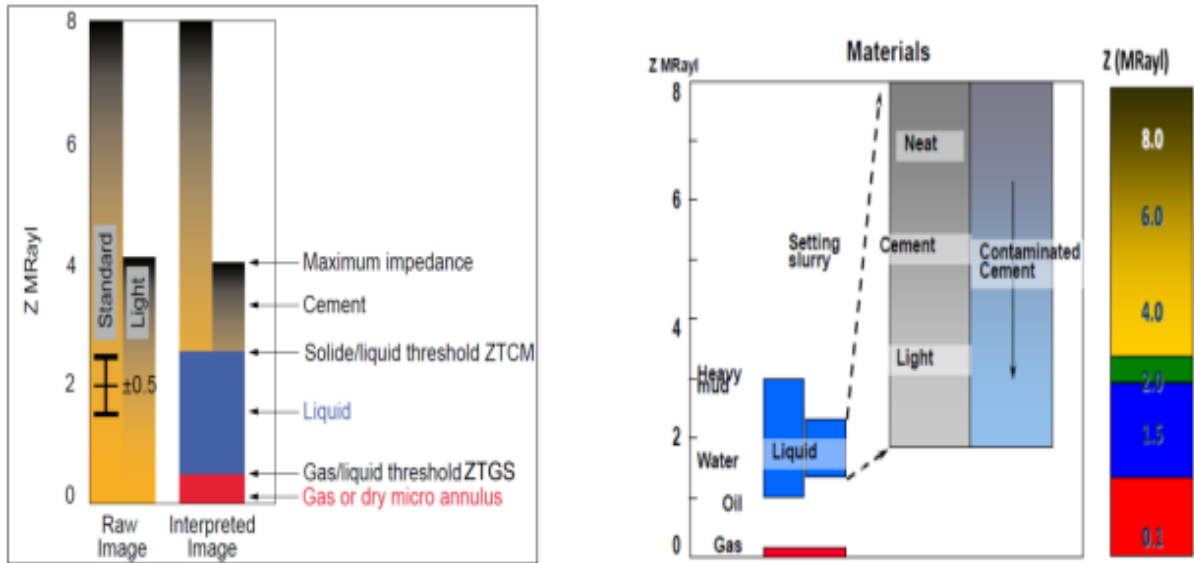


Figure III.14 : Impédance Acoustique des différents fluides. [4]

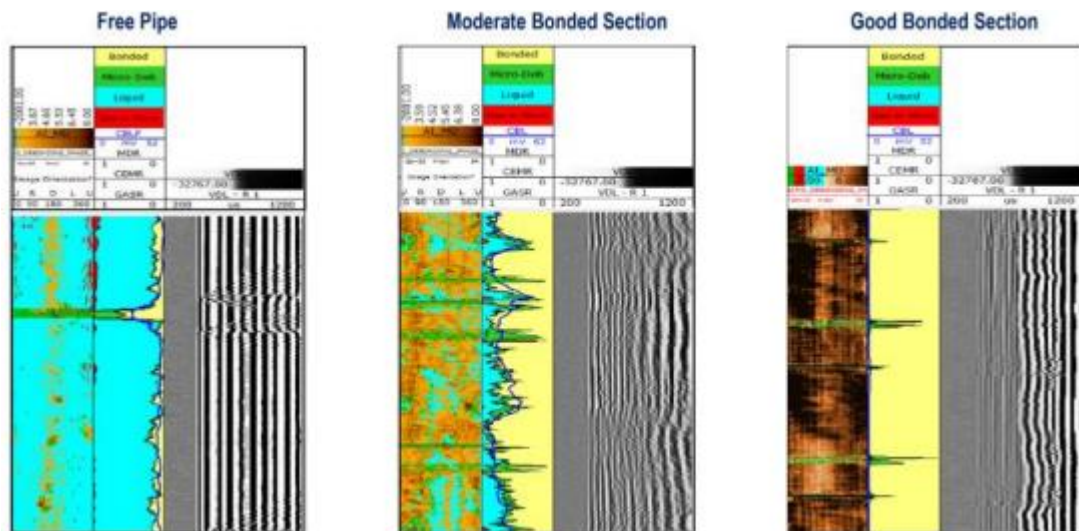


Figure III.15 : Exemples des résultats obtenus avec l'USIT. [4]

### III.4.3.7 Les avantages et les inconvénients d'USIT :

#### Les avantages :

- Evaluation de la corrosion et du ciment.
- Couverture azimutale pour l'identification des canaux.
- Moins affecté par Wet Microannulus.
- Non affecté par les formations rapides.

- Evaluation fiable dans les sections à double tubage. [4]

**Les inconvénients :**

- Affecté par l'état du tubage intérieur.
- Faible profondeur d'investigation.
- Les tubages épais réduisent la fréquence de fonctionnement du transducteur.
- Très dépendant de la mesure de Zmud.
- Ciments légers et contaminés. [4]

**III.4.3.8 IBC (Isolation Scanner) :**

La technique d'onde exurale du service Isolation Scanner induit une onde exurale dans le boîtier avec un émetteur et mesure les signaux résultants au niveau de deux récepteurs. L'atténuation calculée entre les deux récepteurs fournit une réponse indépendante qui est associée à la mesure d'écho d'impulsion et comparée à une base de données mesurée en laboratoire pour produire une image du matériau immédiatement derrière le casing. En mesurant radialement au-delà des limites de l'évaluation traditionnelle du ciment, le service Isolation Scanner con rms l'isolement zonal, identifie tous les canaux dans le ciment et garantit des décisions sûres de compression ou de non-compression. [17]

La mesure de l'onde exurale produit des informations entièrement nouvelles à partir des échos de troisième interface (TIE) entre l'annuler et le trou de forage ou le tubage externe - fournissant la position du tubage à l'intérieur du trou de forage ou du tubage externe et, si la taille du trou de forage est connue, la vitesse de fluide dans l'espace annuler peut être déterminé. Ces informations géométriques auparavant indisponibles pour l'environnement des trous tubés aident à évaluer les techniques de tubage et de cimentation, à choisir les points de coupe lors des travaux de récupération du tubage et à fournir un contexte pour d'autres services d'évaluation exécutés dans le tubage. [17]

Le taux de rayonnement énergétique dans l'annuler dépend des propriétés acoustiques de l'annuler. L'atténuation est estimée en capturant les signaux réfléchis par deux récepteurs du service Isolation Scanner, situés à une distance connue l'un de l'autre, et en calculant le decay rate du signal reçu. L'atténuation est exprimée en décibels par centimètre (dB/cm). [17]

Pour un liquide remplissant l'espace annulaire, l'atténuation est approximativement proportionnelle à l'impédance acoustique. Pour le ciment collé au tubage, l'atténuation présente un comportement plus complexe en fonction des vitesses de propagation des ondes de compression et de cisaillement dans le ciment. [17]



**Figure III.16 :** l'outil IBC. [17]

#### **III.4.3.9 Applications d'IBC :**

- Différencier les ciments légers hautes performances des liquides.
- Identifier le matériau de l'annuler comme solide, liquide ou gazeux.
- Accéder à l'isolement hydraulique.
- Identifier les canaux et les défauts dans le matériau isolant annulaire.
- Identifier l'usure induite par la corrosion ou le perçage.
- Déterminer le diamètre intérieur et l'épaisseur du tubage. [17]

#### **III.4.4 Le micro annulaire**

C'est un petit vide entre le casing et le ciment qui est généralement créé par le changement de pression avant que le ciment n'ait développé assez de résistance à la compression. [16]

- **Effet sur le CBL:**

Lorsque l'onde de compression passe dans le casing, elle perd de l'énergie avec les matériaux qui l'entourent. Le micro annulaire réduit le temps de transit, résultant en une valeur plus grande de l'amplitude CBL. [16]

- **L'effet sur l'USIT**

Le liquide étant incompressible, aux fréquences ultrasoniques, la transmission de l'énergie ultrasonique à travers un petit espace rempli de liquide est toujours possible. Si le micro annulaire est sec (rempli de gaz) il n'y a pas de milieu pour transmettre l'énergie à travers ce vide au ciment, donc l'écho du signal devient fonction du matériel présent dans le micro annulaire. [16]

- **La différence des coefficients de transmission de l'eau et du gaz**

L'impédance acoustique d'USIT est sensible au micro annulaire sec mais est moins affectée par un micro annulaire humide (rempli de liquide).

La combinaison USI-CBL est nécessaire pour distinguer un micro annulaire sec d'un micro annulaire humide. [16]

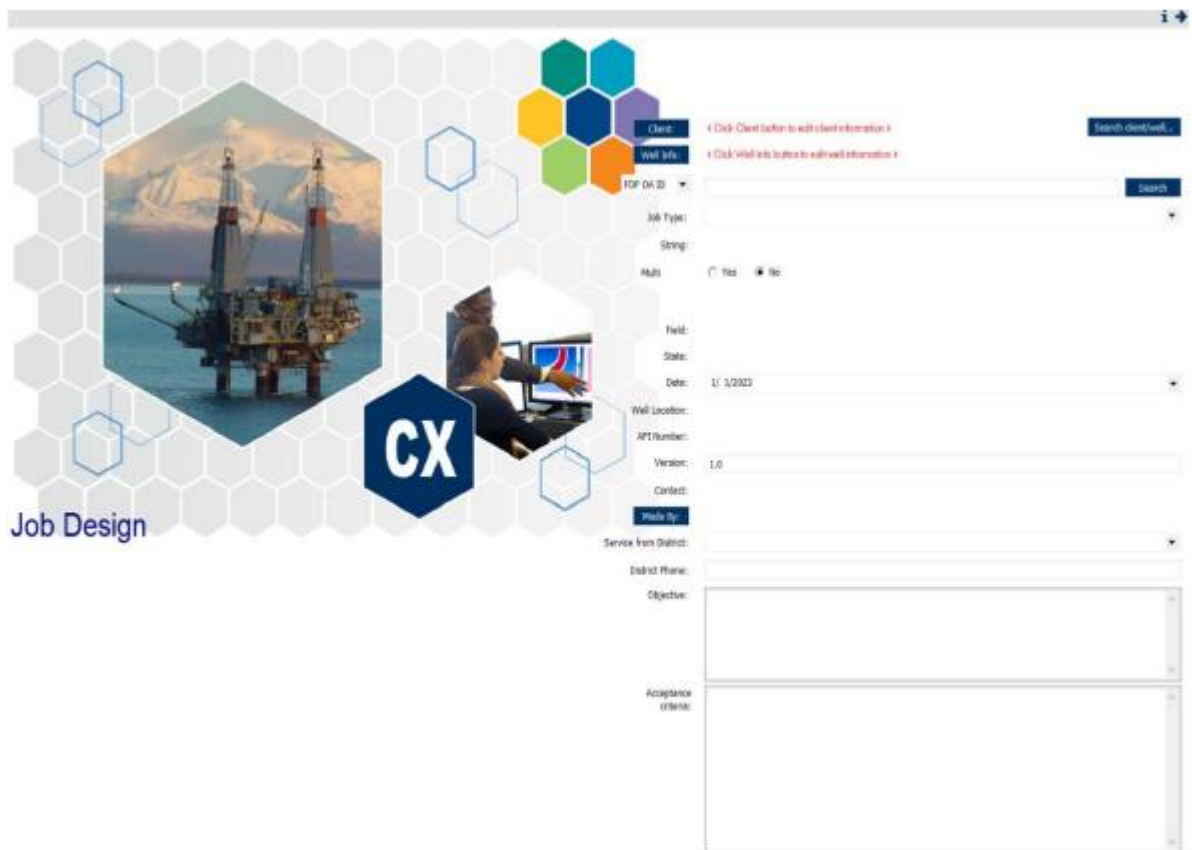
**Chapitre IV: Tentative d'amélioration des performances du Fulcrum utilisé pour  
les puits MDZ 509/MDZ 663**



**IV.1 CEMENTICS Job Design :**

Le logiciel CEMENTICS Job Design a été développé dans le but de simplifier la planification des opérations de cimentation primaire lors de la construction de puits. Il s'occupe des technologies contemporaines employées dans ce domaine et garantit le respect des normes de l'API et d'autres réglementations concernant la cimentation.

Le logiciel vise principalement à proposer aux utilisateurs un simulateur hydraulique intégré qui tient compte de la compressibilité du fluide de forage. La variation de densité et de rhéologie en fonction de la pression et de la température est parfaitement modérée par CEMENTICS Job Design.



**Figure IV.1 :** La fenêtre de CEMENTICS.

IV.2 Présentation des puits :

IV.2.1 Des informations générales sur le puits MDZ 509

Tableau IV.1: Information sur le puits MDZ 509.

<b>Numéro du puits</b>	MDZ 509
<b>Rig</b>	ENF 28
<b>Size du trou</b>	6.379 in (caliper)
<b>Profondeur du puits</b>	3950.0 m
<b>Déviation max</b>	90 deg
<b>Excès planifié d'annulaire</b>	30.0 % sur Caliper
<b>Top du ciment (design)</b>	3328.0 m
<b>Type du job</b>	Liner single dart
<b>Size du tubage</b>	4 ½
<b>Profondeur du tubage</b>	3949.0 m
<b>Size du tubage précédent</b>	9 5/8
<b>Profondeur du tubage précédent</b>	3319.0 m
<b>BHST/BHCT</b>	123.3 °C / 110.0 °C

IV.2.1.1 Schéma du puits MDZ 509 :

Tableau IV.2: Hardware du puits MDZ 509.

Tubulars and Casing Hardware									
	MD m	OD in	Joint m	Weight lb/ft	ID in	Grade	Collapse psi	Burst psi	Thread
Prev Casing	3319.0	9 5/8	12.2	47.0	8.681	P-110	5300	9440	
Prev Liner	3430.0	7	12.2	32.0	6.094	M-65	7360	7360	
Drill Pipe	2487.3	5 1/2	9.5	21.9	4.778	G105	10740	12060	
	3378.0	3 1/2	9.5	13.3	2.764	G105	19760	19320	
Liner	3949.0	4 1/2	10.0	13.5	3 23/25	P-110	10690	12410	
Liner Hanger	3383.4	5 1/2	12.2	32.0	3 23/25		9110	12750	
	3385.4	5.845	12.2	32.0	3 23/25		9110	12750	
Landing Collar	3917.9	Serial number :							

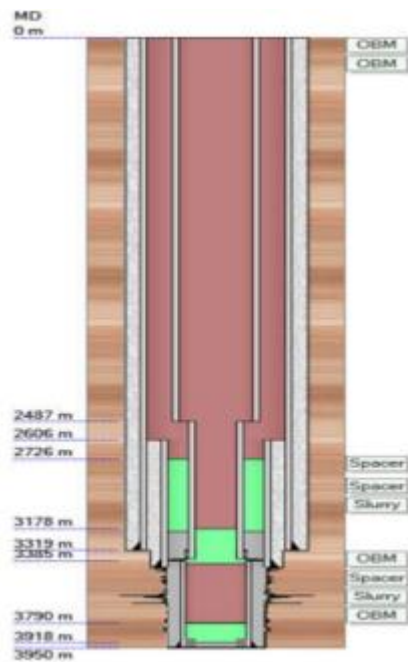


Figure IV.2: Design du puits MDZ 509.

## IV.2.2 Des informations générales sur le puits MDZ 663 :

Tableau IV.3: information sur le puit MDZ 663.

<b>Numéro du puits</b>	MDZ 663
<b>Rig</b>	ENF 60
<b>Size du trou</b>	8.5 in (caliper)
<b>Profondeur du puits</b>	4000 m
<b>Déviation max</b>	87.66 deg
<b>Excès planifié d'annulaire</b>	10.0 % sur Caliper
<b>Top du ciment (design)</b>	2613.0 m
<b>Type du job</b>	Liner single dart
<b>Size du tubage</b>	4 ½
<b>Profondeur du tubage</b>	3999.0 m
<b>Size du tubage précédent</b>	7 in; 29 ppf
<b>Profondeur du tubage précédent</b>	3154 m
<b>BHST/BHCT</b>	128 °C / 119.0 °C

IV.2.2.1 Schéma du MDZ 663 :

Tableau IV.4: Hardware du puits MDZ 663.

Tubulars and Casing Hardware									
	MD m	OD in	Weight lb/ft	Grade	ID in	Thread	Collapse psi	Burst psi	Joint m
Prev Casing	3154.00	7	29.0	P-110	6.184		8530	11220	12.19
	2048.00	9 5/8	47.0	N-80	8.681		4750	6870	12.19
	1958.00	13 3/8	68.0	N-80	12.415		2260	5020	12.19
	376.00	18 5/8	87.5	K-55	17.755		630	2250	12.19
Drill Pipe	2663.18	3 1/2	15.5	G105	2.747		23480	23570	9.15
Liner	3999.00	4 1/2	13.5	P-110	3 23/25		10690	12410	9.15
Liner Hanger	2666.68	5.81	0.0		5 1/4		5530	10580	12.19
	2667.68	5.928	0.0		4.307		13310	15130	12.19
	2669.58	5.961	0.0		4.307		10730	11170	12.19
	2669.88	5 1/2	0.0		4.307		10730	11170	12.19
Float Collar	3969.76								

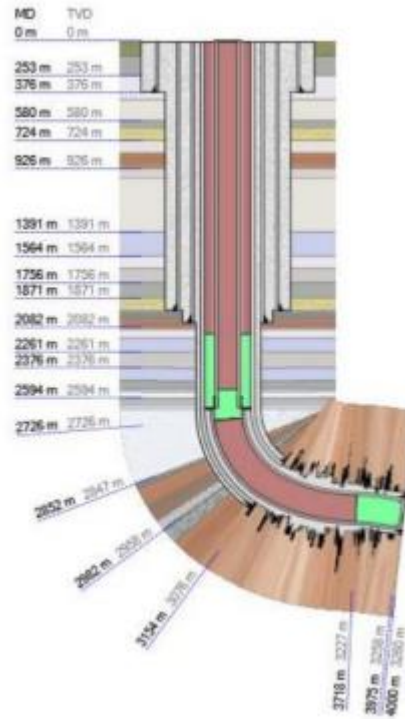


Figure IV.3: Design du puits MDZ 663.

**Chapitre IV:**

**IV.3 Comparaison de la composition et les propriétés du Spacers :**

**IV.3.1 la composition :**

La composition des deux Spacers MDZ 509/1.8 SG et MDZ 663/ 1.7 SG, développés par **ELAB Software**, est présentée dans les deux tableaux suivants :

**Tableau IV.5 : Composition du Spacer 1.80 SG/MDZ 509.**

Spacer Density	: 1.80 SG	Mix Fluid	: 720.237 L/m <sup>3</sup>
Solid Vol. Fraction	: 29.11 %	Spacer Type	: Spacer
		Mix Water	: 682.613 L/m <sup>3</sup>
Code	Concentration	Component	Lot Number
D031_3.8	1,063.100 WBVOspacer	Weighting Agent	Rig
D206	1.000 L/m <sup>3</sup> BVOSpacer	Anti Foam	U500124161
D182	7.000 kg/m <sup>3</sup> WBVOspacer	Viscosifier	20222022
D020	30.000 kg/m <sup>3</sup> WBVOspacer	Extender	Rig
U066	15.000 L/m <sup>3</sup> BVOSpacer	Mutual Solvent	21JT0104A1
F110	15.000 L/m <sup>3</sup> BVOSpacer	Wetting Agent	KK0D198A1
Fresh Water	682.613 L/m <sup>3</sup>	Base Fluid	Rig

**Tableau IV.6 : Composition du CemPRIME Scrub 1.7 SG/MDZ 663.**

Spacer Density	: 1.70 SG	Mix Fluid	: 875.08 L/m <sup>3</sup>
Solid Vol. Fraction	: 33.75 %	Spacer Type	: CemPRIME Scrub 1.70SG
		Mix Water	: 578.91 L/m <sup>3</sup>
Code	Concentration	Component	Lot Number
Barite	474.70 WBVOspacer	Weighting Agent	EMEC
D206	1.00 L/m <sup>3</sup> BVOSpacer	Anti Foam	10mn 2Q00016058
D182	6.00 kg/m <sup>3</sup> WBVOBF	Viscosifier	30mn 20181509
Bentonite	30.00 kg/m <sup>3</sup> WBVOBF	Extender	30mn EMEC
Calcium Carbonate	550.00 kg/m <sup>3</sup> WBVOspacer	Miscellaneous	30mn EMEC
U066	40.00 L/m <sup>3</sup> BVOSpacer	Mutual Solvent	20mn 2306
F110	40.00 L/m <sup>3</sup> BVOSpacer	Wetting Agent	20mn KK7F0104A1
B485	2.85 kg/m <sup>3</sup> WBVOspacer	Fiber	30mn 15071
Fresh Water	578.91 L/m <sup>3</sup>	Base Fluid	Rig

On observe dans le tableau IV.6 que les additifs sont différents de ceux présents dans le tableau IV.5. On retrouve deux additifs :

- Le Fiber est employé pour nettoyer efficacement le puits (dans le tubage et l'annulaire) par action mécanique appelée "Scratch".
- Le Calcium Carbonate (Miscellaneous) est utilisé pour préserver la zone souhaitée de la contamination et empêcher les autres fluides de la formation de s'échapper en créant un filtre autour de la zone.

Donc, le premier spacer réalise un nettoyage chimique du puits, tandis que le second spacer propose deux techniques de nettoyage, chimique et mécanique.

**IV.3.2 les propriétés :**

**IV.3.2.1 Test de Rhéologie des deux Spacers :**

Les spacers MDZ 509/1.8SG et MDZ 663/1.7SG subissent des tests de rhéologie dans deux conditions Différés : la surface à 27°C et le fond à 88°C. L'objectif de ces tests était de surveiller les changements de comportement rhéologique en fonction de la température dans ces deux conditions.

**Tableau IV.7:** Résultat du test de Rhéologie pour le Spacer du puits MDZ 509.

S/N: -				S/N: -			
Surface (Configuration: R1B1 F1.0)				Downhole (Configuration: R1B1 F1.0)			
Temperature	27 °C			Temperature	88 °C		
(rpm)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)	(rpm)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)
300	66	66	66	300	60	60	60
200	53	51	52	200	51	50	51
100	40	39	40	100	35	34	35
60	33	31	32	60	31	30	31
30	24	23	24	30	21	20	21
6	13	13	13	6	11	11	11
3	11	11	11	3	10	9	10
10 sec Gel				10 sec Gel	10 deg - 10.64 lbf/100ft²		
10 min Gel				10 min Gel	11 deg - 11.71 lbf/100ft²		
Rheo. computed	PV: 52.84 cP, Ty: 16.23 lbf/100ft²			Rheo. computed	PV: 49.86 cP, Ty: 14.09 lbf/100ft²		

**Tableau IV.8:** Résultat du test de Rhéologie pour le CemPRIME du puits MDZ 663.

Surface (Configuration: R1B1 F1.0)				Downhole (Configuration: R1B1 F1.0)			
Temperature	27 °C			Temperature	88 °C		
(rpm)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)	(rpm)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)
300	93	93	93	300	78	78	78
200	72	72	72	200	62	61	62
100	49	49	49	100	43	41	42
60	38	38	38	60	36	34	35
30	29	29	29	30	27	25	26
6	20	20	20	6	16	15	16
3	18	18	18	3	15	14	15
10 sec Gel	19			10 sec Gel	15		
10 min Gel	22			10 min Gel	19		
Rheo. computed	PV: 74.71 cP, Ty: 20.63 lbf/100ft²			Rheo. computed	PV: 62.83 cP, Ty: 17.95 lbf/100ft²		

Des changements importants ont été observés dans les propriétés rhéologiques des spacers, notamment la yield point (Ty) et la viscosité plastique (Pv), en fonction de la température.

- **Ty:** afin de préserver l'interface des fluides sans risque de contamination.
- **Pv:** garantir la suspension des déblais et garantir un bon nettoyage des parois du puits.

**Chapitre IV:**

Il convient de souligner que ces différences ont été plus marquées dans la condition du fond à 88°C, ce qui correspond à des températures élevées rencontrées lors des forages en profondeur.

Pour s'assurer de la fiabilité de ces résultats pour assurer leur fonction, il faut tenir compte du paramètre suivant :

**Hierarchie de la rhéologie :**

Il est essentiel de respecter une hiérarchie de rhéologie, avec une différence minimale de 20% entre la rhéologie de Spacer et celle de la boue. (spacer +20% au minimum par rapport au boue) Sachant que :

- Ty de boue = 5lbf/ 100ft<sup>2</sup> (spacer conventionnel).
- Ty de boue= 10lbf/ 100ft<sup>2</sup> (CemPRIME).

Les résultats des tests de rhéologie effectués sur les deux spacers et les boues montrent que la hiérarchie de la rhéologie a été atteinte.

**IV.4 Comparaison du les compositions et les propriétés du Slurries :**

**IV.4.1 Les compositions :**

La composition des deux slurry avec une densité de 1,9 SG est illustrée dans ces deux tableaux suivant:

**Tableau IV.9 : Composition du Slurry conventionnel 1.9/MDZ 509.**

Slurry Density	: 1.90 SG	Cement Sack	: 42.64 kg	Mix Fluid	: 567.85 L/tonne SackOfCement
Solid Vol.	: 44.22 %			Mix Water	: 461.21 L/tonne SackOfCement
Fraction					
Slurry Type	: IsoBLOK	Blend Density	: 3.20 SG	Yield	: 1,012.43 L/tonne SackOfCement

Code	Concentration	Component	Lot Number
D907	-	Blend	BN # 479
D206	1.00 L/tonne VBWOC	Anti Foam	U500124161
D167A	0.15 % BWOC	Fluid loss	PPRG1078-144
D121	0.10 % BWOC	Retarder	07N-28
D065A	0.40 % BWOC	Dispersant	1072020 (0.25)/03162021(0.15)
D600G	100.00 L/tonne VBWOC	Gas Control Agent	SP22G01P
D198	0.48 % BWOC	Retarder	G061621-11
D066	35.00 % BWOC	Silica	In Blend
Fresh Water	461.21 L/tonne SackOfCement	Base Fluid	Rig water



Tableau IV.9 : Composition du Slurry Fulcrum 1.9/MDZ663.

Slurry Density	: 1.90 SG	Blend Sack	: 45.36 kg	Mix Fluid	: 313.58 L/tonne SackOfBlend
Solid Vol. Fraction	: 56.97 %			Mix Water	: 150.49 L/tonne SackOfBlend
Slurry Type	: Single System	Blend Density	: 2.60 kg/L	Yield	: 728.75 L/tonne SackOfBlend

Code	Concentration	Component	Lot Number
G		Blend	BN : 80-X2
D206	3.00 L/tonne VBWOB	Anti Foam	2Q00016058
D168	10.00 L/tonne VBWOB	Fluid loss	ESD0032858
D121	0.15 % BWOB	Retarder	06E-29
D080A	18.00 L/tonne VBWOB	Dispersant	BI30191378
D600G	120.00 L/tonne VBWOB	Gas Control Agent	LG19E28R1P
D110	11.00 L/tonne VBWOB	Retarder	TU4D0260A1
D176	4.00 % BWOB	Expanding Agent	Blend
Fresh Water	150.49 L/tonne SackOfBlend	Base Fluid	Rig
Slurry Code: D2002 FlexSTONE HT, 106.2138% BWOB			

Tout d'abord, il est intéressant de noter que le Blend (partie sèche) diffère pour les deux slurry. Pour le slurry conventionnel, on utilise du Silica comme additif sèche au ciment. Cela permet de réduire les fissures thermiques causées par la chaleur en raison de l'hydratation du ciment, d'améliorer sa résistance face aux eaux sulfatées et acides, et d'augmenter sa résistance.

En revanche, dans le deuxième mélange, nous avons employé d'autres additifs secs tels que l'agent d'expansion, le Flexstone et le Fulcrum.

- **FlexSTONE:** pour plus de résistance au contrainte et aussi l'isolation à long terme
- **Expanding agent:** pour améliorer l'adhérence ciment/tubage.
- **Fulcrum:** pour Transformer les canaux de boue restants en barrière: augmentation de la rhéologie de la boue de canal et accroître l'efficacité grâce à l'intégration de techniques de nettoyage du puits avec une meilleure isolation zonale.

En conclure que, les performances de Fulcrum Blend seront améliorées pendant l'opération de cimentation, contrairement à celles du procédé conventionnel.

Chapitre IV:

IV.4.2 Les propriétés:

IV.4.2.1 Test de Rhéologie des deux Slurries :

Tableau IV.11: Résultat du test de Rhéologie pour le Slurry conventionnel du puits MDZ 509.

Surface (Configuration: R1B1 F1.0)				Downhole (Configuration: R1B1 F1.0)			
Temperature		30 °C		Temperature		88 °C	
(rpm)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)	(rpm)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)
300	111	111	111	300	103	103	103
200	83	81	82	200	80	78	79
100	50	51	51	100	57	55	56
60	36	35	36	60	40	38	39
30	24	23	24	30	25	24	25
6	16	15	16	6	17	15	16
3	12	12	12	3	13	13	13
10 sec Gel				10 sec Gel	15 deg - 15.97 lbf/100ft <sup>2</sup>		
10 min Gel				10 min Gel	28 deg - 29.8 lbf/100ft <sup>2</sup>		
Rheo. computed	PV: 99.18 cP, Ty: 14.03 lbf/100ft <sup>2</sup>			Rheo. computed	PV: 90.12 cP, Ty: 17.12 lbf/100ft <sup>2</sup>		

Tableau IV.12: Résultat du test de Rhéologie pour le Slurry Fulcrum du puits MDZ 663.

Surface (Configuration: R1B1 F1.0)				Downhole (Configuration: R1B1 F1.0)			
Temperature		27 °C		Temperature		88 °C	
(rpm)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)	(rpm)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)
300	175	175	175	300	150	150	150
200	129	128	129	200	112	111	112
100	84	83	84	100	71	72	72
60	62	61	62	60	51	50	51
30	44	43	44	30	32	30	31
6	25	23	24	6	19	18	19
3	21	20	21	3	15	14	15
10 sec Gel	22 deg - 26.06 lbf/100ft <sup>2</sup>			10 sec Gel	17 deg - 20.14 lbf/100ft <sup>2</sup>		
10 min Gel	32 deg - 37.91 lbf/100ft <sup>2</sup>			10 min Gel	27 deg - 31.98 lbf/100ft <sup>2</sup>		
Rheo. computed	PV: 339.74 cP, Ty: 26.74 lbf/100ft <sup>2</sup>			Rheo. computed	PV: 301.84 cP, Ty: 19.41 lbf/100ft <sup>2</sup>		

Les analyses de rhéologie évoquées ci-dessus ont été effectuées dans les conditions de surface et de fond pour étudier le développement et les modifications du comportement rhéologique des slurries employées. Ces tests visaient principalement à observer les changements des caractéristiques rhéologiques, telles que la Yield Point (Ty) et la viscosité plastique (Pv), dans les slurries conventionnelles et le Fulcrum.

Des changements significatifs ont été constatés dans les propriétés Ty et Pv de la rhéologie des slurries conventionnelles et Fulcrum lors de ces tests. Ces différences témoignent des compositions et des formulations variées des slurries et de leur capacité à s'adapter aux conditions spécifiques rencontrées dans le puits. Une fois que l'interface entre la boue et le spacer est suffisante, il faut également assurer cette interface entre le slurry et le spacer dans le puits en respectant le même principe de **hiérarchie de rhéologie**. Étant donné que:

**Chapitre IV:**

- Ty de spacer = 14.09lb/ 100ft<sup>2</sup> (slurry conventionnel).
- Ty de CemPRIME= 17.95lb/ 100ft<sup>2</sup> (Fulcrum).

La hiérarchie de la rhéologie est atteinte, selon les résultats des tests de rhéologie des deux slurries et des spacers.

**IV.4.2.2 Test Fluidité libre (Free fluid) des Slurries:**

**Tableau IV.13:** Les résultats du test Free Fluid pour le slurry conventionnel MDZ 509.

(0%) 0/100 ml dans 2 h	
A 27°C et 45° inclinaison	
Conditionné à 109°C et 5066 psi pour 30 min après avoir atteint la température	
Sédimentation: aucune	Méthode de test: API

**Tableau IV.14:** Les résultats du test Free Fluid pour le slurry Fulcrum MDZ 663.

(0%) 0/100 ml dans 2h	
A 27°C et 45° inclinaison	
Conditionné à 115°C et 6592 psi pour 30 min après avoir atteint la température	
Sédimentation: aucune	Méthode de test: API

Après avoir examiné les deux tableaux de test du fluide libre en conditions statiques (surface et fond), avec une inclinaison de 45°, des résultats encourageants ont été constatés. Aucune sédimentation n'a été observée dans les deux cas et aucune séparation de l'eau avec le slurry n'a été observée. Ces constatations témoignent d'une stabilité et d'une compatibilité entre les éléments constitutifs du fluide.

**IV.4.2.3 Test de Perte de fluide (Fluid Loss) des Slurries :**

**Tableau IV.15:** Les résultats du test Fluid Loss pour le slurry conventionnel MDZ 509.

API/Calcul Fluid Loss 41.00 ml/ 1h
20.50 ml dans 30 min à 88°C

**Tableau IV.16:** Les résultats du test Fluid Loss pour le slurry Fulcrum MDZ 663.

API/Calcul Fluid Loss 24.00 ml/ 1h
12.00 ml dans 30 min à 88°C

Les tableaux ci-dessus montrent une certaine dissociation de l'eau dans des conditions dynamiques pendant 30 minutes à 88°C de température. Toutefois, il convient de noter que la

séparation de l'eau est moins marquée dans le Fulcrum avec une quantité de 12.00 ml par rapport au slurry traditionnel avec une quantité de 20.50 ml.

Ainsi, le Fulcrum présente un design plus avancé que celui le conventionnel.

IV.4.2.4 Test de temps d'épaississement (Thickening Time, TT) des Slurries :

Tableau IV.17: Les résultats du test Thickening Time pour le slurry conventionnel MDZ 509.

Go/NoGo	100 minutes ON	45 minutes OFF
Consistency	Time	Temp
40 Bc	07:09 hr:mn	109 °C
80 Bc	07:13 hr:mn	109 °C
100 Bc	07:16 hr:mn	109 °C

Time (hr:mn)	Temperature (°C)	Heating Rate (°C/min)	Pressure (psi)	Pressure Rate (psi/min)
Condition 1				
00:00	33	1.67	80	123.34
00:45	109	0.00	5,551	0.00

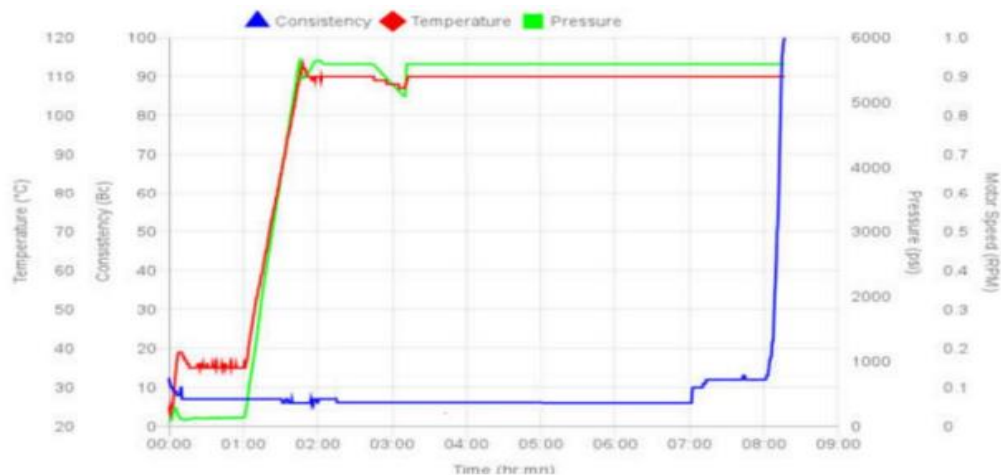


Figure IV.4: La variation de la température, de la pression et de la consistance en fonction du temps pour le slurry conventionnel MDZ 509.

Tableau IV.18: Les résultats du test Thickening Time pour le slurry Fulcrum MDZ 663.

TT Req: 07:15 - 07:45		
Batchmix Time:	02:00 [hr:mn]	40.00 °C
Consistency	Time	Temp
40 Bc	07:13 hr:mn	119.00 °C
80 Bc	07:23 hr:mn	119.00 °C
100 Bc	07:26 hr:mn	119.00 °C
GO-NO-GO Test	ON : 01:15 hr:mn	OFF : 45 Mn

Time (hr:mn)	Temperature (°C)	Heating Rate (°C/min)	Pressure (psi)	Pressure Rate (kPa/min)
Thickening Time				
00:00	40.00	2.63	100.00	1,523.74
00:30	119.00	0.00	6,630.00	0.00



**Figure IV.5:** La variation de la température, de la pression et de la consistance en fonction du temps pour le slurry Fulcrum MDZ 663.

Les graphiques indiquent que la durée du mélange en batch pour le Fulcrum est de 2 heures et celle du mélange conventionnel est de 1 heure, avec une température de surface maintenue à 40 °C. La prolongation du temps de mélange assure une homogénéité optimale du fluide et facilite la préparation appropriée du Fulcrum.

Le test Go/No-Go qui consiste en des cycles de 1h15min pour le fulcrum et 1h40min pour le conventionnel des fonctionnements suivis de 45 min d'arrêt temporaire. Les pics dans les graphes sont clairement représentés par ces moments d'arrêt, ce qui indique des pauses temporaires. Il est possible que ces pauses soient requises en fonction des conditions opérationnelles spécifiques.

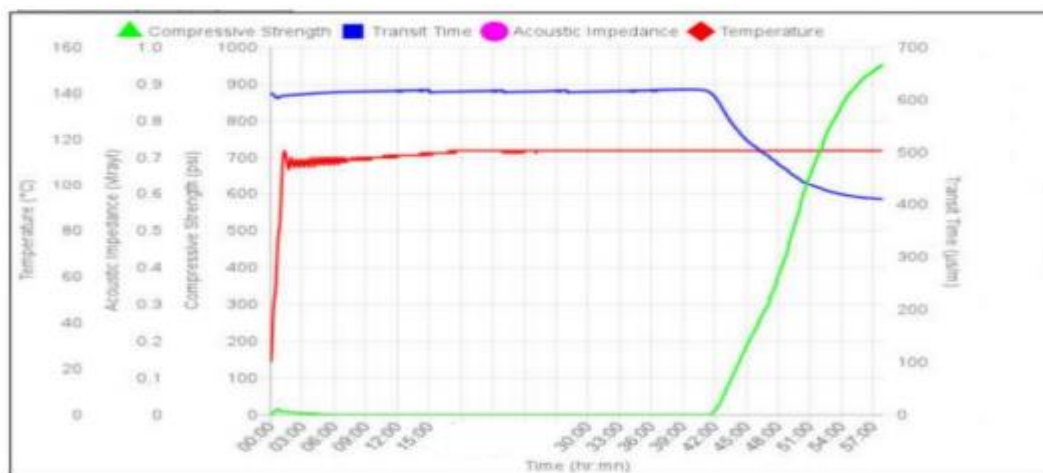
**Chapitre IV:**

Dès que la pression et la température augmentent jusqu'aux conditions du fond, les profils de consistance du temps d'épaississement commencent généralement par une période de consistance plate et faible qui dure plus de 7 heures (TT). Par la suite, avec l'apparition de la gélification des slurries, la consistance augmente avec une pente de plus en plus marquée jusqu'à atteindre 80 Bc, où elle devient impénétrable.

**IV.4.2.5 Test de UCA (Ultrasonic Cement Analyzer) des Slurries :**

**Tableau IV.19:** Les résultats du test UCA pour le slurry conventionnel MDZ 509.

Time	CS	Temp
42:49 hr:mn	50 psi	115 °C
49:24 hr:mn	500 psi	115 °C
24:00 hr:mn	0 psi	115 °C
57:40 hr:mn	946 psi	115 °C

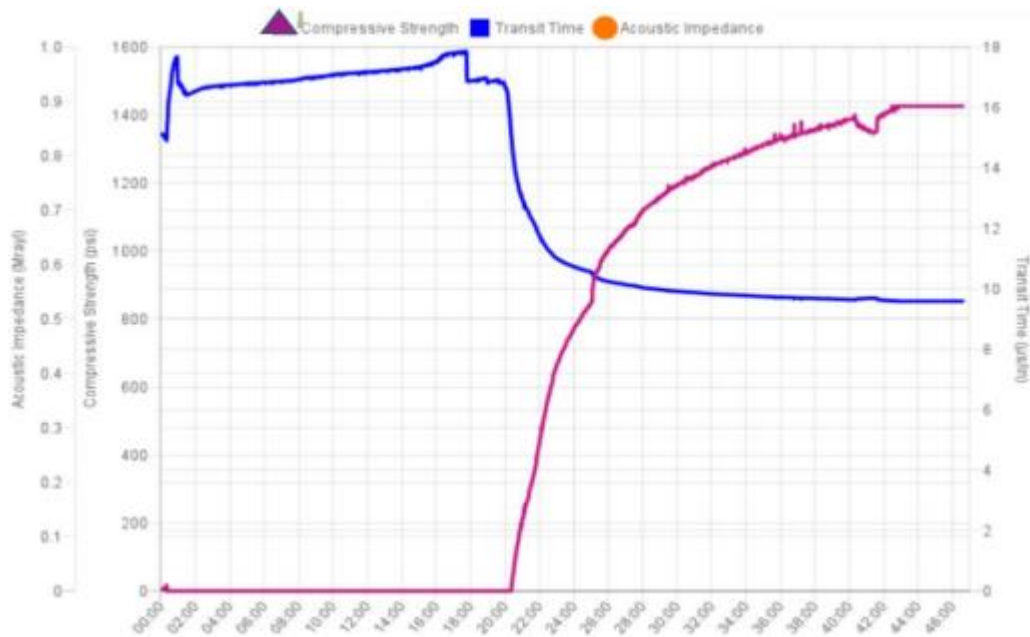


**Figure IV.6:** La variation de la température, de la résistance à la compression et temps de transit en fonction du temps pour le slurry conventionnel MDZ 509.

**Tableau IV.20:** Les résultats du test UCA pour le slurry Fulcrum MDZ 663.

Time	CS	Acoustic Impedance	Temp
20:28 hr:mn	50 psi	Mrayls	125 °C
22:14 hr:mn	500 psi	Mrayls	125 °C
24:00 hr:mn	770 psi	Mrayls	125 °C
46:00 hr:mn	1426 psi	Mrayls	125 °C

Time (hr:mn)	Temperature (°C)	Heating Rate (val)	Pressure (val)	Pressure Rate (val)
UCA / SGSA at TD				
00:00	115	0.01	8,150	0.00
24:00	124	0.00	N/A	0.00
24:00	N/A	0.00	8,160	0.00



**Figure IV.7:** la variation de la température, de la résistance à la compression et du temps de transit en fonction du temps pour le slurry Fulcrum MDZ 663.

D'après les deux graphes, il est possible de constater que les deux slurries commencent à développer leur résistance à la compression (CS) après des périodes différentes : 42h49min pour le conventionnel et 20h28min pour le Fulcrum. Au début de la solidification, le temps de transit passe d'une valeur maximale à une valeur minimale, avec 390µs/m pour le conventionnel et 370µs/m pour le Fulcrum, tandis que la résistance à la compression augmente progressivement, passant d'une valeur minimale à 946 psi en 57 heures pour le conventionnel et à 1426 psi en 46 heures pour le Fulcrum.

Le temps de transit nous permet d'avoir une idée de la nature du slurry et de son évolution. Le temps de transit du conventionnel est plus long que celui du Fulcrum dans notre situation. Toutefois, le Fulcrum présente une résistance à la compression supérieure à celle du modèle conventionnel, ce qui suggère que cette technologie est performante en offrant une résistance à la compression adéquate, même avec un temps de transit élevé. Cela peut être expliqué par la souplesse du Fulcrum.

Chapitre IV:

IV.5 Etats des puits :

IV.5.1 Washouts :

MDZ 509

MDZ 663

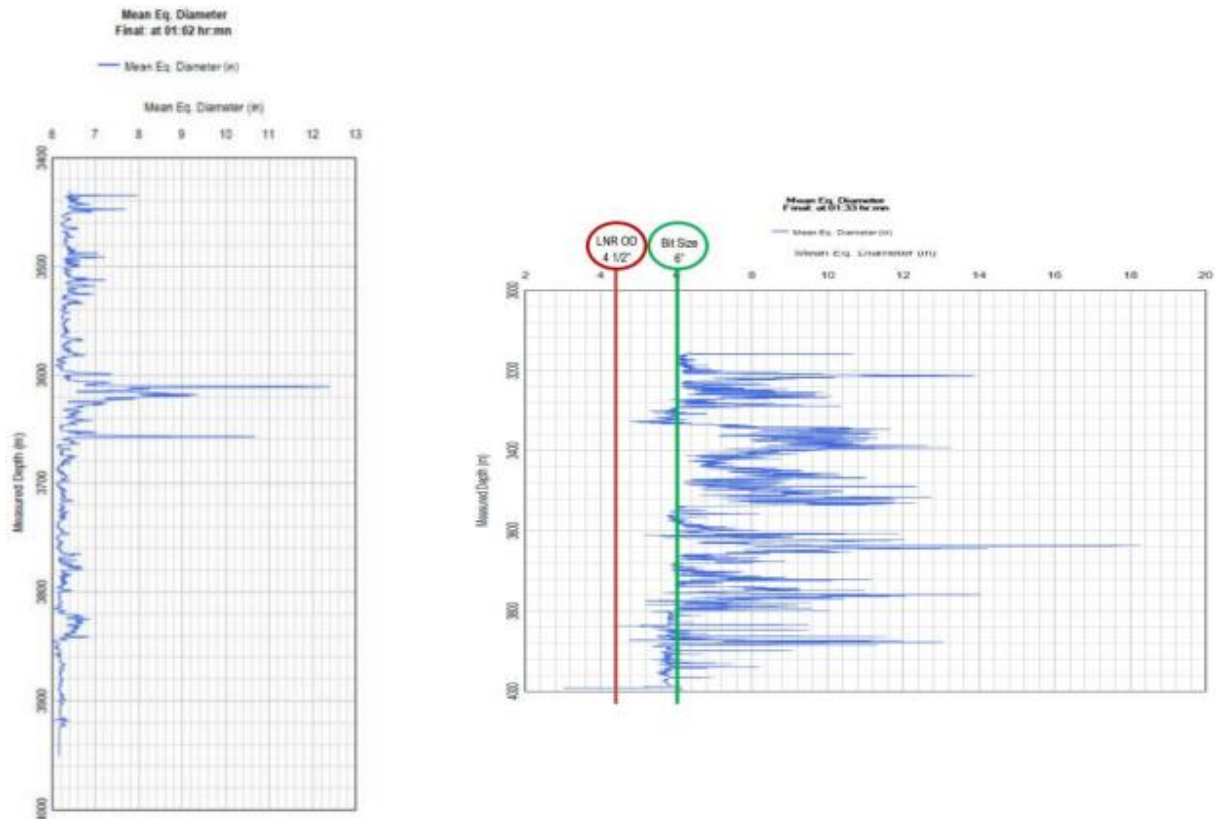


Figure IV.8: Les résultats du caliper pour les deux puits MDZ 509 et MDZ 663.

Il convient de souligner que les données du caliper, comme illustrées dans l'image ci-dessus, révèlent des limitations significatives et des érosions sévères dans le Fulcrum, tandis que celles du conventionnel sont faibles. Cela pourrait engendrer divers problèmes lors de l'insertion du casing (RIH), avant et pendant le placement du ciment, comme un liner coincé à la profondeur mesurée lors de l'insertion, des restrictions autour du tubage qui pourraient entraîner un colmatage/obstruction du trou avant ou pendant le processus de cimentation, ce qui entraînerait une augmentation de la pression, une fracturation de la formation ou l'impossibilité de terminer le déplacement et le ciment restant dans le conduit. Les washouts observés dans le Fulcrum sont plus importants, atteignant un diamètre de trou allant jusqu'à 18 in que dans le conventionnel 12 in et ça va créer un défi durant l'exécution de l'opération.



**Chapitre IV:**

**IV.5.2 Centralisation :**

Il est crucial d'utiliser des centralisateurs afin d'assurer une bonne centralisation du liner dans le puits et une distribution optimale du slurry autour de celui-ci.

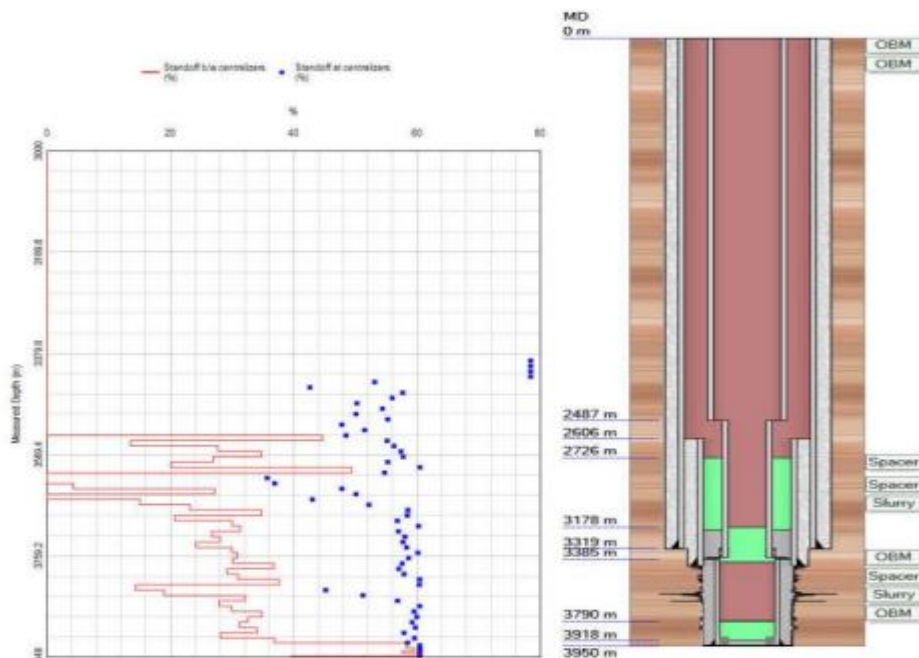
**Puits MDZ 509 :**

**Tableau IV.21:** Nombre des centralisateurs utilisés dans le puits.

Centralizers								
Alias	Manufacturer	Commercial Name	Type	Config	Csg OD in	Min OD in	Max OD in	Count
ENEROIL RIGID S-36	ENEROIL	Slip-on, Rigid	rigid		4 1/2	5.750	5.750	59

**Tableau IV.22:** L'emplacement des centralisateurs dans le puits.

Pattern Placement					
MD m	# Jnts	Centralizer Alias	Pattern	Min STO %	At Depth m
3917.9	53.25	ENEROIL RIGID S-36	1/1	0.00	3385.4
3949.0	3.11	ENEROIL RIGID S-36	2/1	33.75	3949.0



**Figure IV.9:** Le stand off du tubage par rapport au centralisateurs en fonction de la profondeur, puits MDZ 509.

Chapitre IV:

Puits MDZ 663 :

Tableau IV.23: Nombre des centralisateurs utilisés dans le puits.

Centralizer Properties								
Alias	Vendor	Commercial Name	Type	Config.	Casing OD in	Min OD in	Max OD in	Count
SpiraGlider SC-4 1/2-4-Spiral575	Hannover	SpiraGlider SC	Rigid	Spiral	4 1/2	5.5000	5.500	41

Tableau IV.24: L'emplacement des centralisateurs dans le puits.

Placement Pattern					
MD m	# Jnts	Centralizer Alias	Pattern	Min STO %	At Depth m
2688.10	1.99	-	0	3.0126	2688.00
3969.76	140.07	SpiraGlider SC-4 1/2-4-Spiral600	1/4	0.0000	2689.00
3999.00	3.20	SpiraGlider SC-4 1/2-4-Spiral600	2/1	0.0000	3970.65

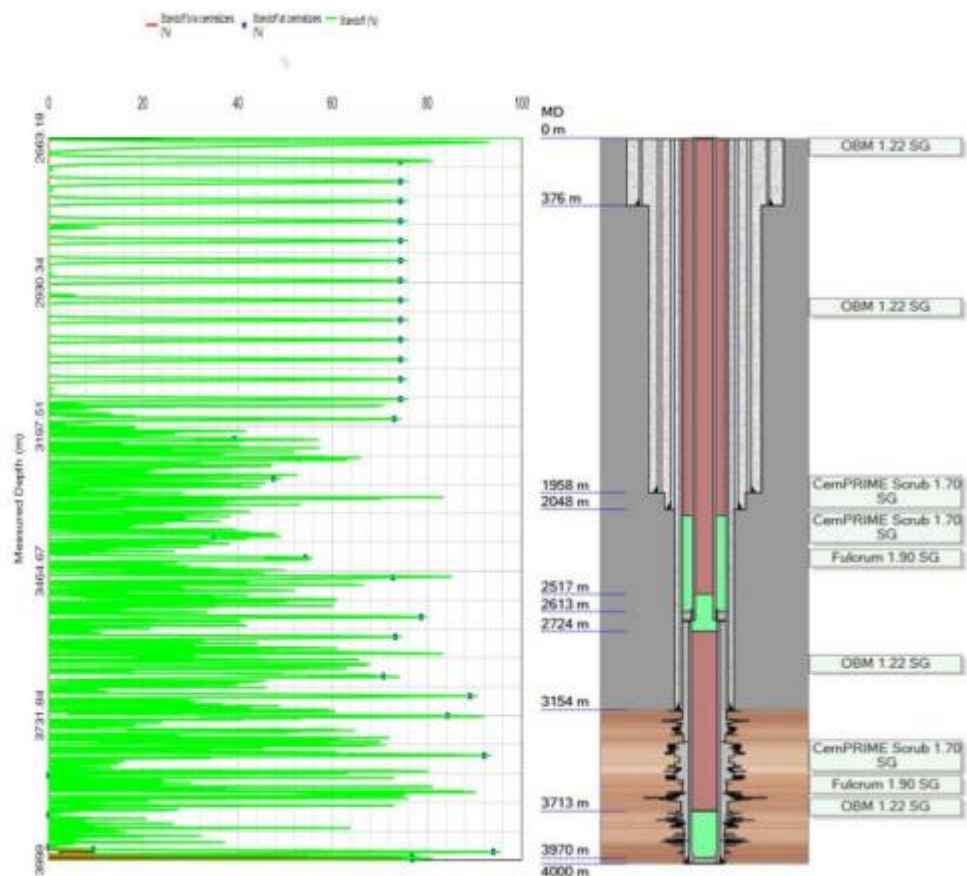


Figure IV.10: Le stand off du tubage par rapport au centralisateurs en fonction de la profondeur, puits MDZ 663.

Chapitre IV:

Dans notre situation, nous employons 59 centralisateurs pour le slurry conventionnel, tandis que pour le Fulcrum, nous employons 41 centralisateurs.

Il convient de souligner que l'emploi des centralisateurs ne débute qu'à la suite de la déviation du puits. Néanmoins, même avec ces mesures, nous constatons des résultats de simulation médiocres en raison des effets des faisceaux et du nombre de centralisateurs dans le puits MDZ 663. L'importance de maximiser la centralisation et la distribution du slurry est mise en évidence par ces résultats afin d'améliorer les performances globales du processus.

L'intégrité du puits est influencée par le nombre de centralisateurs et la forme des parois du puits, ce qui explique la différence entre la centralisation du MDZ 509 et celle du MDZ 663.

IV.5.3 Enlèvement de boue et de couverture de ciment :

Puits MDZ 509 :

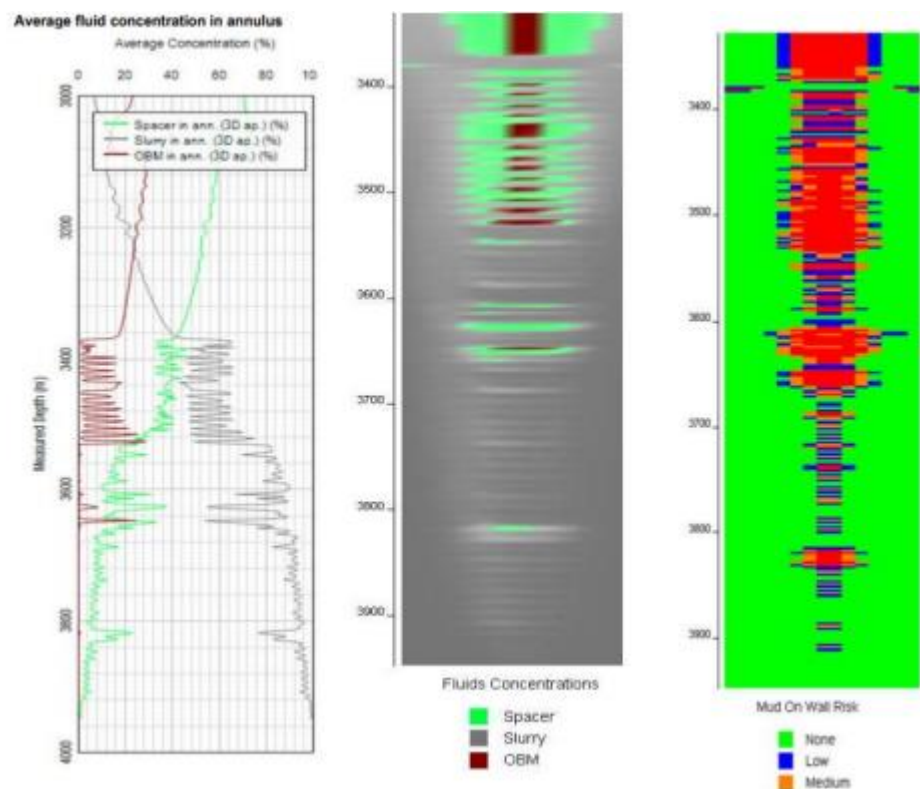
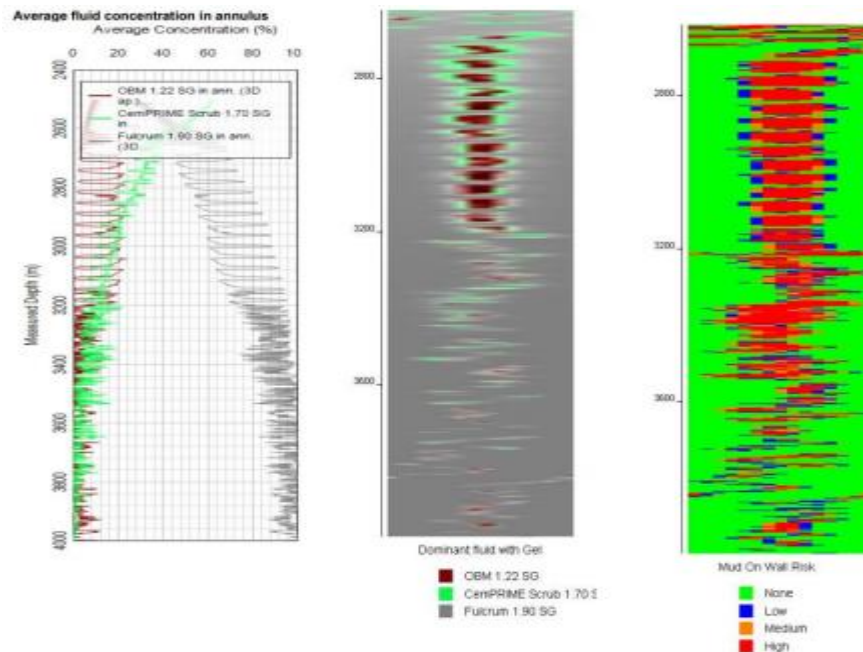


Figure IV.11: La simulation des fluides dans l'espace annulaire du puits MDZ 509.

Chapitre IV:

Puits MDZ 663 :



**Figure IV.12:** La simulation des fluides dans l'espace annulaire du puits MDZ 663.

On effectue des simulations afin d'obtenir une idée de la cimentation et de l'emplacement des divers fluides utilisés dans l'opération dans chaque puits.

Selon les résultats de la simulation, il est observé une forte présence de boue et de spacer dans les deux puits, en raison de divers paramètres tels que la rhéologie des fluides, la vitesse de déplacement, la forme du puits, la centralisation des procédures de travail et les comportements associés.

**Les causes :**

- Les faibles débits de pompage ne permettent pas d'éliminer les boues de manière optimale, ce qui augmente le risque de présence de boues sur les parois des deux puits.
- La séparation des fluides lors du déplacement est assurée par le paramètre de la rhéologie Ty, ce qui évite le phénomène de fingering, où une contamination est détectée avec un pourcentage de 30% lors des tests d'UCA pour le conventionnel, contrairement au Fulcrum.
- Une centralisation acceptable et des washouts moins élevés dans le MDZ 509 que le MDZ 663.

Il convient de noter que la zone contaminée correspond à la zone où le liner entre en contact avec la formation, ce qui crée un espace restreint qui empêche une centralisation adéquate. Cela conduit à une inefficacité dans le nettoyage des résidus de boues et du spacer. En outre, il convient de souligner que le slurry aura tendance à occuper un espace plus large que l'espace étroit, ce qui entraîne une diminution de la qualité de la cimenté.

**IV.6 Exécution de l'opération**

**IV.6.1 Conception et objectif de travail :**

- Pomper le ciment jusqu'à 3328,0m pour MDZ 509, à 2613.18m pour MDZ 663 (50 m au-dessus du TOL « Top of liner »).
- Assurer une bonne isolation zonale et une intégrité de puits adéquate pour les opérations à venir de fracturation multi zone.

**IV.6.2 Défis :**

- Adhérence au tubage et à la formation.
- Nettoyage du trou pour la section horizontale.
- Forme/ Conditionnement du puits (importantes érosions - augmentation pendant les opérations pré-cimentation).
- Élimination efficace des boues, en particulier autour des intervalles d'érosion.

**IV.6.3 Planning de pompage exécuté :**

**Tableau IV.25 :** Planning de pompage exécuté.

<b>Les étapes</b>	<b>MDZ 509</b>	<b>MDZ 663</b>
Test de pression pour la line	5000 psi	5000 psi
Circulation avant l'opération	-	-
Mise en place du liner Hanger	-	-
Préparation du spacer et Slurry	-	-
Pompage du spacer	6.15m <sup>3</sup>	7m <sup>3</sup>

Pompage du slurry	8.86m <sup>3</sup>	20.81m <sup>3</sup>
Lâcher Dart	-	-
Pompage du spacer	1m <sup>3</sup>	2m <sup>3</sup>
Déplacement avec la boue	2.7m <sup>3</sup>	7.7m <sup>3</sup>
Pompage du spacer	1.03m <sup>3</sup>	1m <sup>3</sup>
Déplacement avec la boue	32.41m <sup>3</sup>	9.68m <sup>3</sup>
Test de pression pour le Liner	3700 psi	3700 psi
Purger/ vérification du retour	-	-

**IV.6.4 Acquisition du temps réel :**

**Puits MDZ 509 :**

**Table IV.26:** Rhéologie des fluides du puits.

	Densité d (SG)	Yield Point Ty (lbf/100ft2)	Viscosité Plastique Pv (cp)
<b>Boue</b>	0.98	5	5
<b>Spacer</b>	1.8	14.09	49.86
<b>Slurry</b>	1.9	17.12	90.12

**Table IV.27:** Design et programme de pompage du puits.

	Volume m <sup>3</sup>	Vitesse l/min
<b>Pomper Spacer</b>	6.15	604.2
<b>Pomper slurry</b>	8.16	640.7
<b>Lâcher Dart</b>	-	-

Pomper Spacer	1.00	542.7
Déplacer avec la boue	2.70	604.2
Pomper Spacer	1.03	318
Déplacer avec la boue	32.41	763.2

IV.6.4.1 L'enregistrement des différents paramètres du puits MDZ 509 :

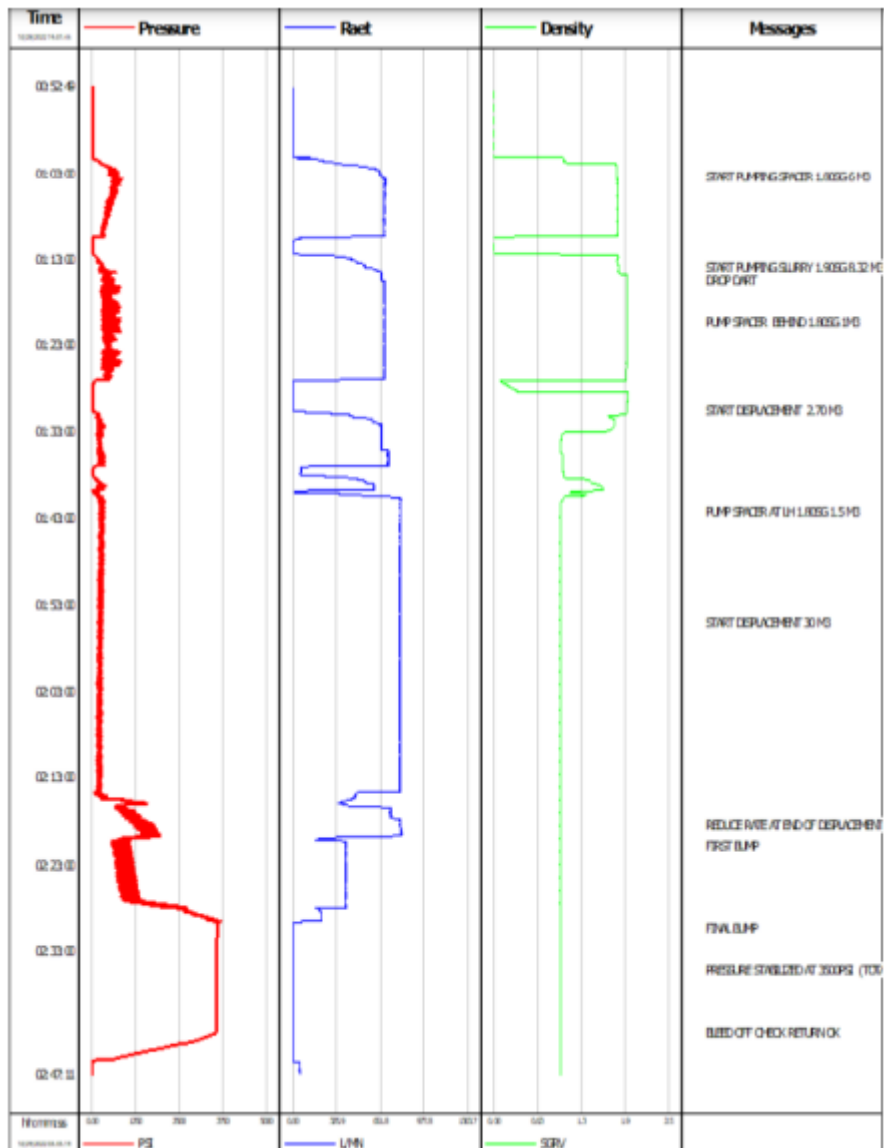


Figure IV.13: Vitesse, densité et pression raccordées durant l'opération.

**Puits MDZ 663 :**

**Tableau IV.28:** Rhéologie des fluides du puits.

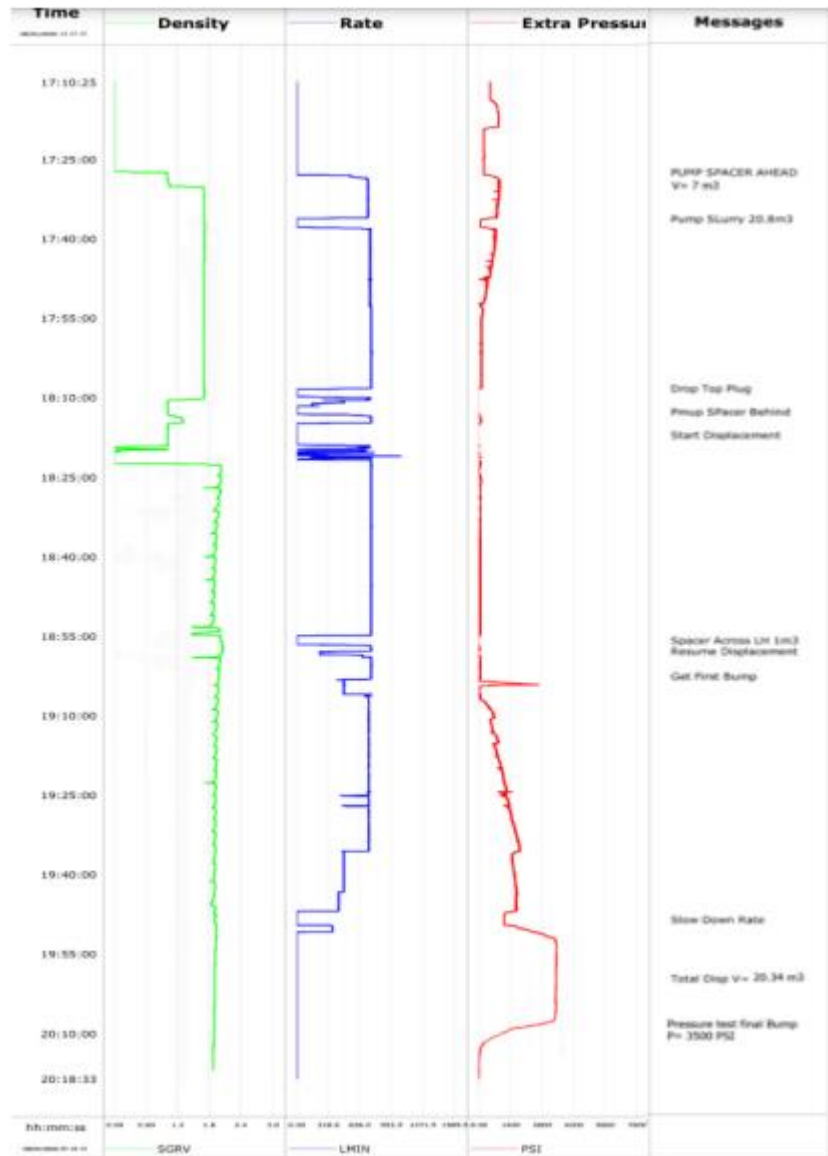
	Densité d (SG)	Yield Point Ty (lbf/100ft2)	Viscosité Plastique Pv (cp)
<b>Boue</b>	1.22	10	14
<b>Spacer</b>	1.7	17.95	62.83
<b>Slurry</b>	1.9	19.41	301.84

**Tableau IV.29:** Design et programme de pompage du puits.

	Volume m <sup>3</sup>	Vitesse l/min
<b>Pomper Spacer</b>	7.00	700
<b>Pomper slurry</b>	20.81	700
<b>Drop Dart</b>	-	-
<b>Pomper Spacer</b>	2.00	700
<b>Déplacer avec la boue</b>	7.70	700
<b>Pomper Spacer</b>	1.00	500
<b>Déplacer avec la boue</b>	9.68	500-200

**IV.6.4.2 L'enregistrement des différents paramètres du puits MDZ 663 :**





**Figure IV.14:** Vitesse, densité et pression raccordées durant l'opération MDZ 663.

D'après les graphes et les tableaux précédents, il est clair que divers fluides ont été employés avec des densités, des rhéologies et des vitesses de pompage différentes afin d'assurer un déplacement efficace sans risque de contamination ou de fracturation de la formation. Trois variables sont prises en compte :

- **Hierarchie de la rhéologie :** est nécessaire, avec une différence minimale de 20% entre la rhéologie du mélange de Slurry (ciment) et celle de Spacer, et une différence minimale de 20% entre la rhéologie de Spacer et celle de la boue.
- **Hierarchie de la densité :** De la même manière, on maintient une hiérarchie de densité, avec une différence minimale de 10% entre la densité du mélange de Slurry

## **Chapitre IV:**

(ciment) et celle de Spacer, ainsi qu'une différence de 10% entre la densité de Spacer et celle de la boue.

- **Pression de frottement :** Pour le déplacement des fluides, il est essentiel de prendre en considération les contraintes de densité équivalente et d'excentration du tubage, qui engendrent un espace restreint le long des parois. La pression de frottement et les pertes de charge sont causées par cette configuration. Ainsi, il est nécessaire d'adapter les vitesses de pompage en fonction des caractéristiques des fluides utilisés et de l'état du puits pour garantir des conditions optimales.

Pour récapituler, l'emploi de fluides ayant des densités, des rhéologies et des vitesses de pompage variées garantit un déplacement approprié sans risque de contamination ou de fracturation de la zone. On respecte les hiérarchies de la rhéologie et de la densité afin d'assurer un équilibre optimal. En outre, afin de respecter les contraintes liées à la densité équivalente et à l'excentration du tubage, il est nécessaire d'ajuster les vitesses de pompage de manière adéquate afin de réduire la pression de frottement et les pertes de charge dans le puits.

### **IV.7 Analyse et interprétation des logs :**

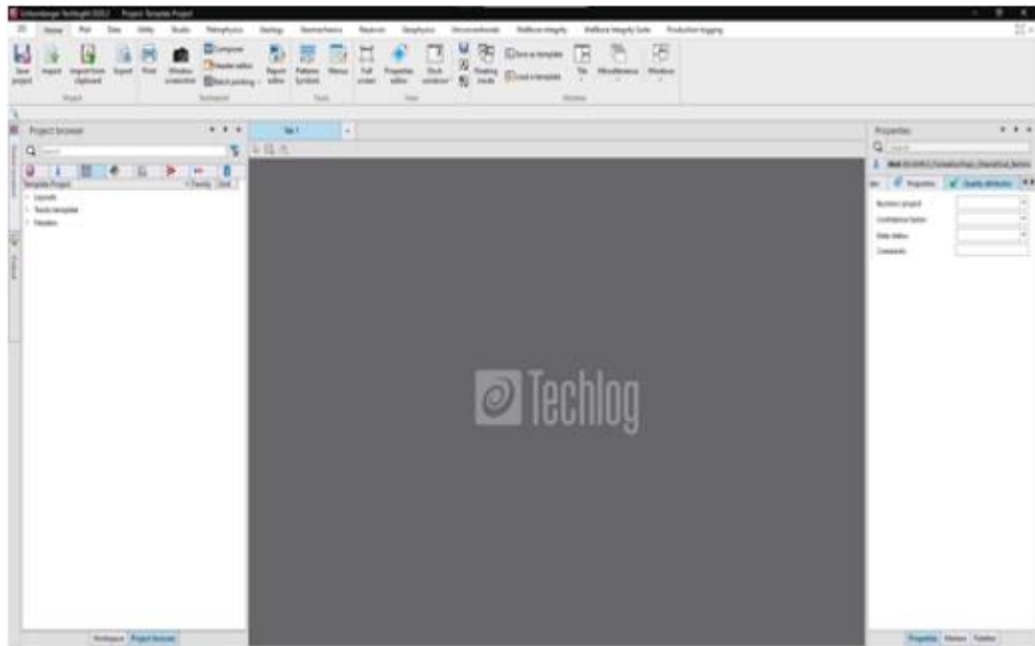
Le contrôle du ciment dans les puits pétroliers est essentielle dans le secteur du pétrole et du gaz. Effectivement, la qualité du ciment est essentielle pour assurer l'intégrité structurelle et l'étanchéité des puits, ce qui garantit leur durabilité opérationnelle.

Dans notre étude particulière, notre attention est portée sur la partie du liner 4 1/2 " qui est une zone critique qui requiert une évaluation précise et fiable du ciment.

#### **IV.7.1 Softwares :**

##### **IV.7.1.1 Techlog :**

Techlog est une application logicielle pour les puits de forage qui combine des informations provenant de diverses sources afin de donner une vision globale et exhaustive de l'état du puits. Il supporte différents types de données, tels que les données de diaggraphie filaire, de diaggraphie en cours de forage (LWD), de diaggraphie en mémoire de fond (MWD), de carottes et de production. Grâce à sa polyvalence, Techlog offre aux utilisateurs la possibilité de réaliser une variété d'analyses, allant de l'analyse basique des diaggraphies à des évaluations pétro physiques avancées et des évaluations de l'intégrité du puits.



**Figure IV.15:** La fenêtre du Techlog.

#### IV.7.1.2 Tool planner :

Le Tool Planner est le logiciel de SLB qui permet de planifier et de concevoir des données d'opérations dans divers domaines tels que l'évaluation des puits, l'achèvement et les opérations d'intervention. Les ingénieurs ont la possibilité de choisir les données, les outils et l'équipement adéquats en fonction des paramètres du puits, des contraintes opérationnelles et des objectifs du projet. Quelques caractéristiques remarquables de Tool Planner comprennent:

**-Base de données des outils:** Tool Planner propose une large gamme d'outils et d'équipements pétroliers, offrant aux ingénieurs la possibilité de sélectionner les options les plus appropriées à leurs projets.

**-Analyse de compatibilité :** Le logiciel garantit la compatibilité entre les outils sélectionnés, évitant ainsi les conflits lors des opérations d'achèvement ou d'intervention des puits.

**-Évaluation des performances :** Tool Planner facilite l'analyse des performances des outils dans différentes conditions et scénarios de puits, aidant les ingénieurs à optimiser leurs conceptions.

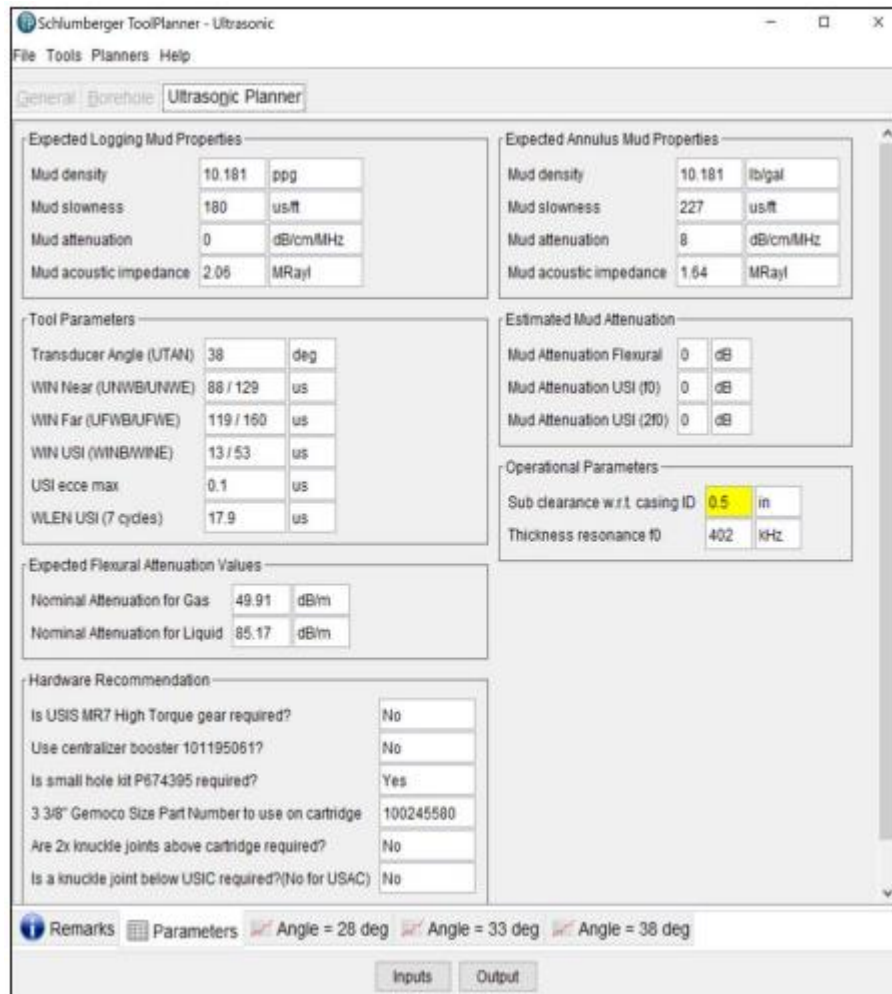


Figure IV.16: Exemple d'un résultat de Tool Planner.

#### IV.7.1.3 whatif:

La fonctionnalité "What-if" est un outil astucieux de contrôle qualité qui permet de prendre des décisions rapides concernant le choix des paramètres de traitement. Il est spécifiquement développé pour être utilisé sur des canaux de données DLIS (Digital Log Interchange Standard) complets ou filtrés/arrays qui ne contiennent que le log composite généré sur le terrain par USIT ou IBC.

Le "What-if" est un prototype conçu pour tester la faisabilité de transférer certains des outils de prise de décision rapide (en partie ou en totalité) vers d'autres plateformes telles que MaxWell ou Techlog.

**Chapitre IV:**

**IV.7.2 Interprétation :**

L'objectif de cette étude de cas est d'évaluer la qualité de la cimentation d'un liner 4 1/2'' pour garantir une isolation adéquate. Cette évaluation a été réalisée en utilisant des outils soniques et ultrasoniques pour deux puits distincts, à savoir MDZ 509 et MDZ 663, conventionnels et Fulcrum.

**IV.7.2.1 Puits MDZ 663:**

L'évaluation se déroule en deux étapes : une première étape superficielle, puis une seconde étape plus approfondie dans la phase désirée.

**Passé en surface**

Dans l'objectif d'obtenir les valeurs de Zmud (Zonal Isolation Mud) et UFAO (Ultimate Flexural Attenuation Objective) pour la passe principale.

Cette étape nécessite l'utilisation du logiciel Tool Planner pour obtenir les valeurs théoriques de Zmud et UFAO. Les informations concernant le tubage et les divers fluides présents sont disponibles pour nous de la section 7''. Les résultats obtenus se présentent ainsi :

**Tableau IV.30:** le Zmud et UFAO théoriques des différents fluides.

4 1/2" Liner	Type (Fluid - Brine/WBM/OBM/etc, Cement - Class G/ LiteCRETE/etc)	Density (sg)	Acoustic Impedance (Mrayls)	Flexural Attenuation (dB/m)	Expected TOP	Comments
Well fluid	Brine	1,22	2,06	100		FA (gas)=50 dB/m. Fluid slowness expected ~227 us/ft. UTAN=38 deg
Cement	Fulcrum	1,9	4,82		TOL	15.05m3
Spacer / Washer	CemPRIME Scrub	1,7	2,55	114	TOL	10m3
Annulus fluid	OBM	1,22	1,64	70		set ZTCM= 3.05 Mrayls for USIT presentations

Une fois que l'enregistrement Dlis de cet intervalle a été obtenu, il est essentiel de chercher les valeurs corrigées de Zmud (Zonal Isolation Mud) et UFAO (Ultimate Flexural Attenuation Objective) qui représentent une image du tuyau libre. Il est procédé à l'aide du logiciel WhatIf, après avoir effectué le picking Ancher des points sur la carte du liquide le long de la ligne. Ensuite, ces valeurs rectifiées sont employées dans la passe principale : Zmud s'élève à 2.25Mrayl ; UFAO est de 10.

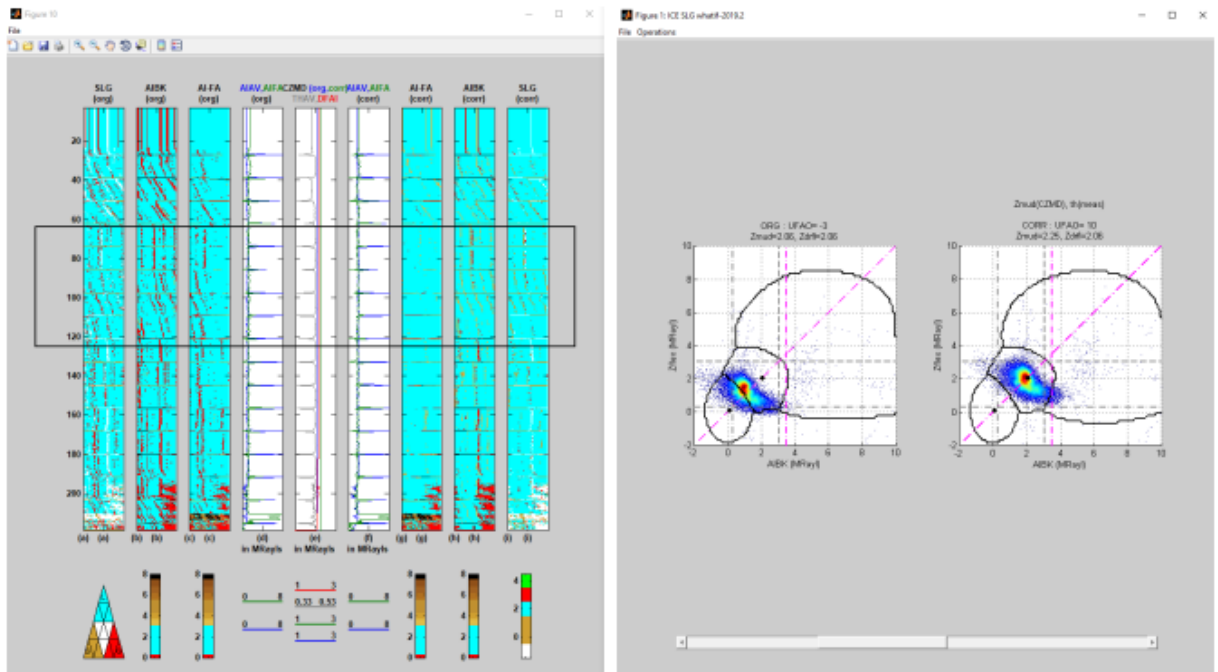


Figure IV.17: L'image corrigée avec le WhatIf.

**Passé principale :**

Cette passe est effectuée dans le but d'évaluer la qualité de la cimentation dans la section du liner 4½.

**Interprétation des logs Isolation Scanner pour la qualité du ciment du MDZ 663 :**

- Le liner a été exécuté de 2703 m à 3976 m et cimenté avec Fulcrum de 1,9 g/c.
- Le sommet du ciment prévu était au sommet du liner.

Pour évaluer la qualité du ciment et l'isolation hydraulique dans cette section, un scanner d'isolation a été effectué en utilisant les CBL-VDL sur l'intervalle [2703m3970 m]. Lors du logging, le puits était rempli de saumure à 1,22 g/c.

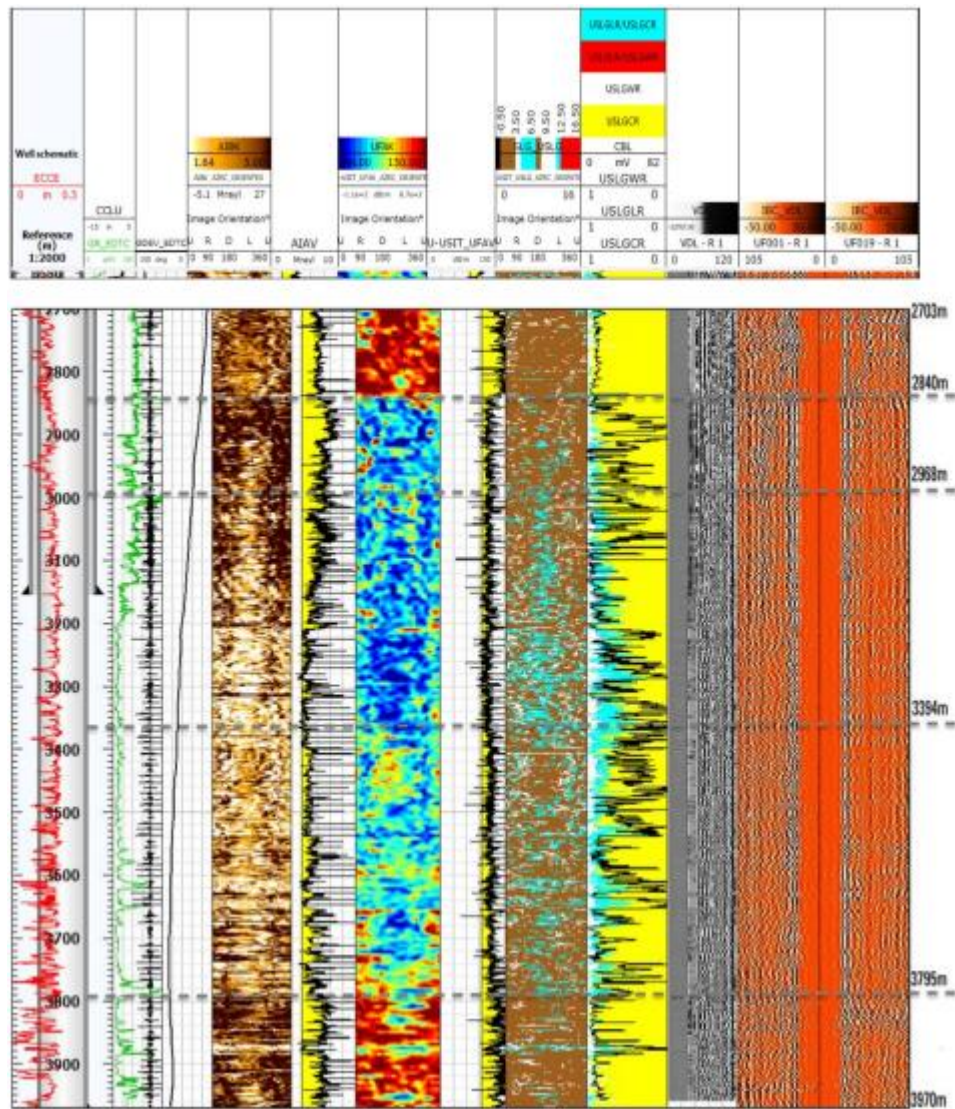


Figure IV.18: Le log du MDZ 663; IBC.

On a obtenu une qualité des données satisfaisante. On peut résumer l'interprétation du journal de la manière suivante :

- **Sur l'intervalle [2703m-2840m]:** la carte SLG montre la présence azimuthale de ciment, le sommet du ciment est au sommet du liner.
- **Sur l'intervalle [2840m-2968m]:** la carte SLG montre la présence de ciment avec des poches liquides isolées.
- **Sur l'intervalle [2968m-3394m]:** la carte SLG montre la présence de canalisations liquides discontinues.
- **Sur l'intervalle [3394m-3795m]:** la carte SLG montre la présence de ciment avec poches liquides à plusieurs profondeurs.

Chapitre IV:

- Sur l'intervalle [3795m-3970m]: la carte SLG montre la présence azimuthale de ciment avec des poches de liquide isolées.

IV.7.2.2 Puits MDZ 509 :

- Le liner a été exécuté de 3320 m à 3930 m et cimenté avec du ciment conventionnel de 1,9 g/c.
- Le sommet du ciment prévu était au sommet du liner.

Pour évaluer la qualité du ciment et l'isolation hydraulique dans cette section, une surveillance CBL-VDL a été réalisée sur l'intervalle [3320m-3930 m]. Lors du logging, le puits était rempli avec une OBM 0.91 g/c.

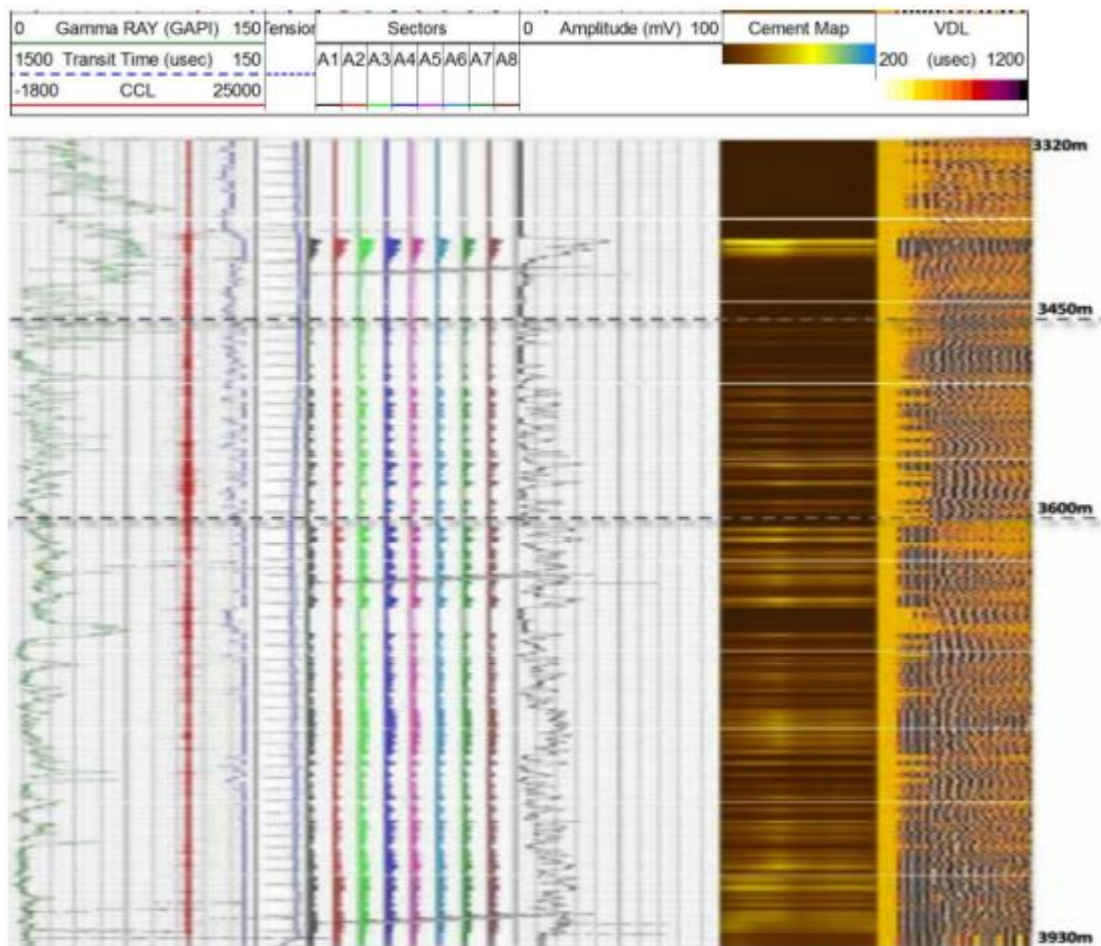


Figure IV.19: Log du MDZ 509, CBL-VDL.



On peut résumer l'interprétation du log de la manière suivante :

- **Sur l'intervalle [3320m-3450m]** : la carte de ciment indique qu'il y a une bonne cimentation avec une possibilité de présence d'une poche de liquide localisée.
- **Sur l'intervalle [3450m-3600m]** : La carte de ciment indique la présence de ciment avec des zones de liquide à différentes profondeurs.
- **Sur l'intervalle [3600m-3930m]** : la carte de ciment indique qu'il y a une cimentation de qualité moyenne dans la section inférieure.

Une fois les deux logs précédents analysés, il est évident qu'il existe une disparité de qualité de cimentation entre le puits MDZ 509 et le puits MDZ 663. La qualité de la cimentation est plutôt bonne dans ce dernier, tandis que dans le puits MDZ 509, elle est moins satisfaisante. On peut expliquer cette disparité en raison de la présence de liquide dans les cartes SLG et de ciment, où il était au moins marqué. On peut expliquer cette présence de liquide par le processus de cimentation employé dans le puits MDZ 509, où la boue et le spacer ont contaminé le ciment.

Il est important de souligner que la comparaison directe des quantités entre les deux puits est difficile en raison de l'emploi de deux types d'outils différents. Une carte SLG précise et détaillée est fournie par l'IBC, tandis que la carte de ciment mentionne la présence de liquides associés au ciment (contamination) sans préciser la nature du fluide détecté. En se basant sur ces résultats, il est possible de conclure que la mesure du CBL VDL est restreinte par rapport à celle de l'IBC, ce qui témoigne d'une disparité dans les mesures obtenues.

#### **IV.8 Simulation avec des scénarios proposés :**

Bien que la nouvelle technologie Fulcrum soit efficace, certains problèmes ont été rencontrés lors de sa mise en place, et nous nous efforçons de les résoudre. Les difficultés repérées sont liées à la centralisation et à la rotation pendant l'opération. Nous avons réalisé des simulations dans trois scénarios différents afin de déterminer des solutions appropriées.

##### **IV.8.1 Simulation avec rotation de liner :**

- **Le premier scénario** : On a observé une amélioration de la distribution du ciment en supposant une rotation du liner avec le même nombre d'utilisations de centralisateurs. Notre simulation a confirmé cette observation.

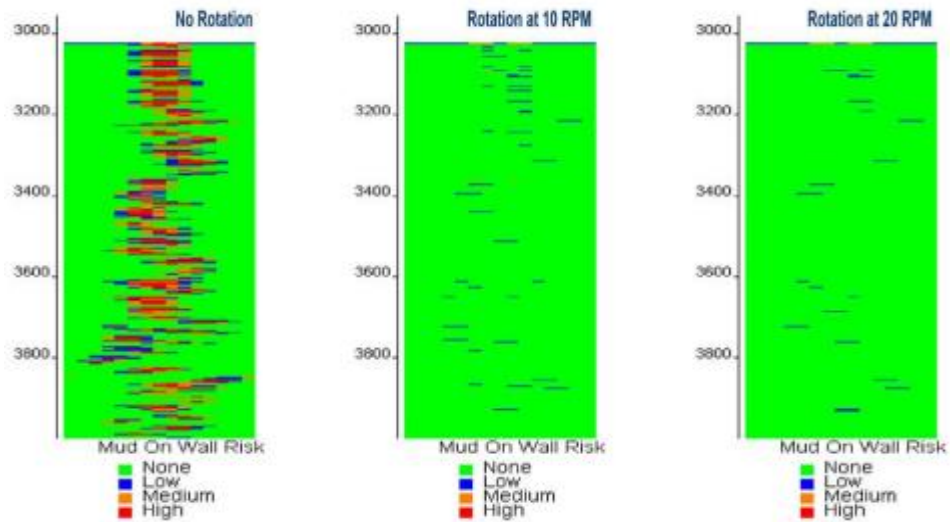


Figure IV.20: Simulation avec rotation et 41 centralisateurs, MDZ 663.

IV.8.2 Simulation avec rotation et optimisation des nombres des centralisateurs :

- **Le deuxième scenario** : Soit 80 centralisateurs utilisés avec une rotation de liner. Les résultats de CEMENTICS révèlent une distribution optimale du ciment autour du liner, que ce soit avec une vitesse de rotation de 10 RPM ou 20 RPM. En outre, on a constaté une amélioration de la centralisation par rapport aux premiers résultats.

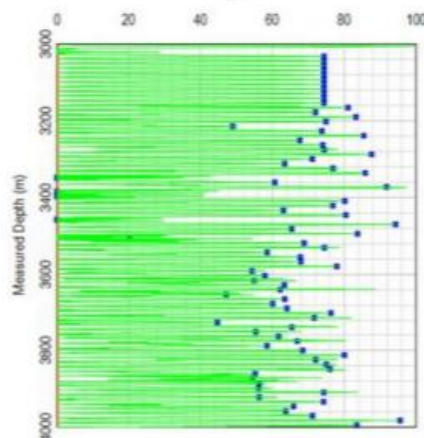


Figure IV.21: Le Stand Off par rapport au 80centralisateurs, MDZ 663.

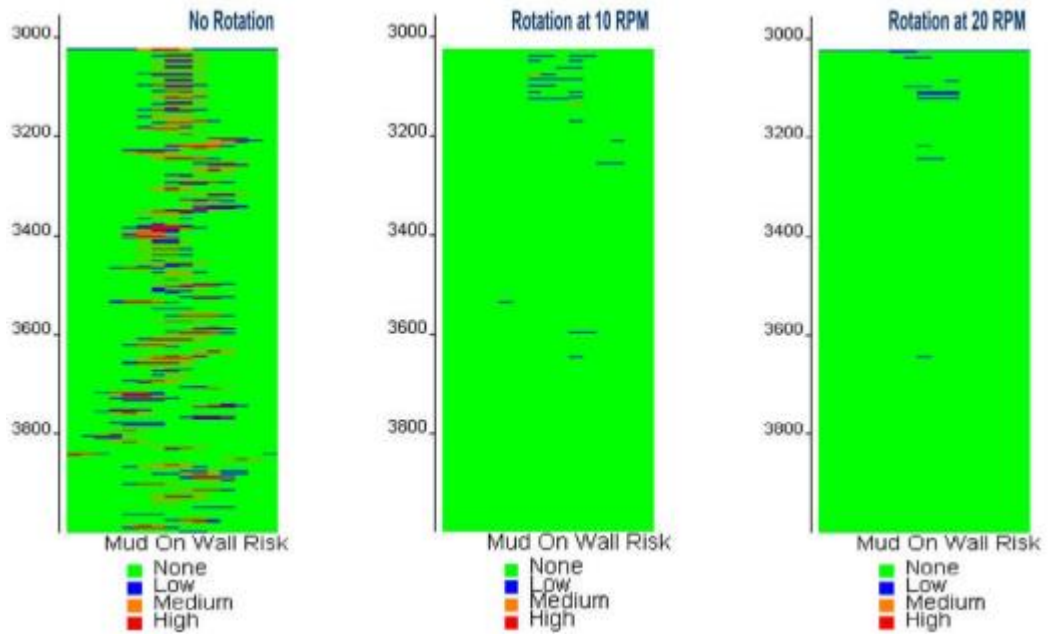


Figure IV.22: Simulation sans et avec rotation et 80 centralisateurs, MDZ 663.

- **Troisième situation possible :** En supposant que 127 centralisateurs sont utilisés, ce qui est considéré comme un nombre optimal, avec une rotation de liner, les résultats obtenus sont les suivants : On a observé une nette amélioration de la répartition du ciment lors des rotations de 10 RPM et 20 RPM. Et Une remarque positive a été faite concernant le stand-off pendant la simulation.

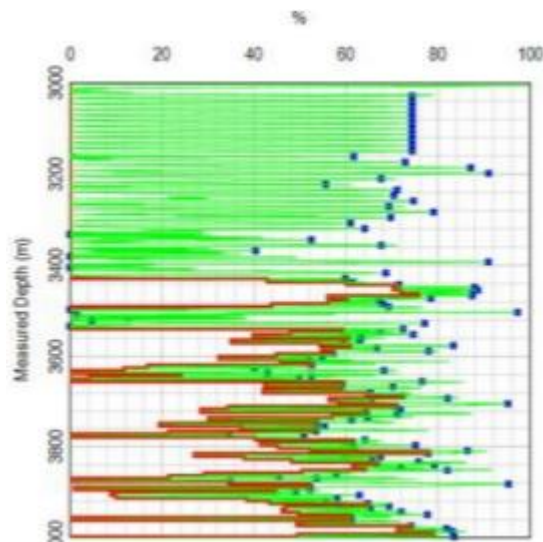


Figure IV.23: Le Stand Off par rapport au 127centralisateurs, MDZ 663.

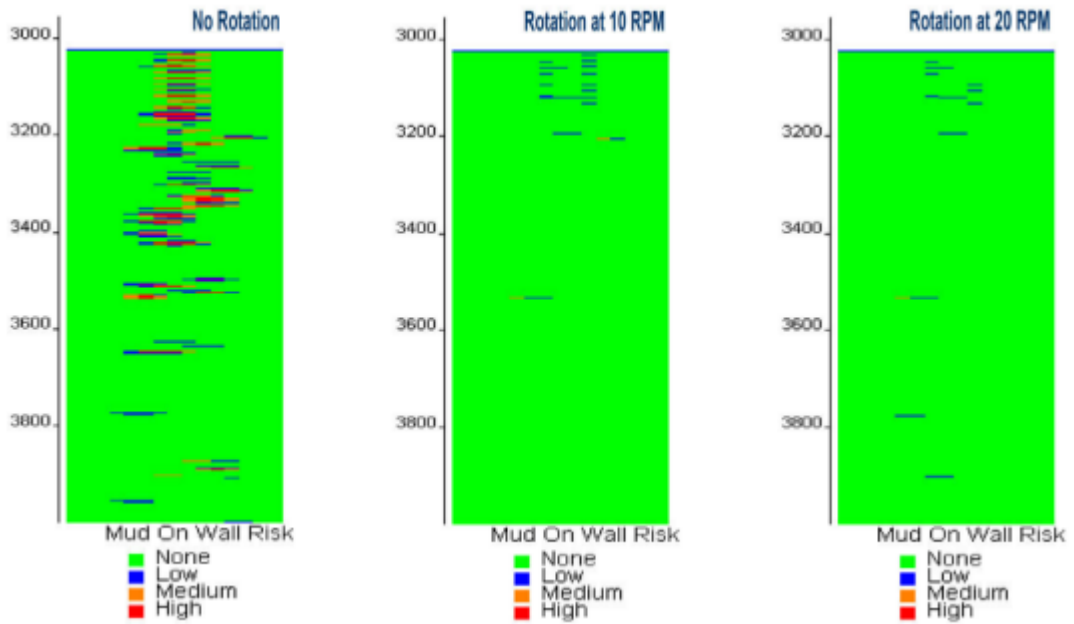


Figure IV.24: Simulation sans et avec rotation et 127 centralisateurs, MDZ 663.

- **Remarque :**

On sait que le nombre de centralisateurs a un impact sur le couple (Torque) et le déplacement (Drag). Ainsi, les coefficients de frottement simulés doivent être pris en considération lors de la modélisation.

## **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale :

Notre travail consiste au suivi détaillé de l'opération de cimentation d'une manière générale puis on a fait tous les étapes nécessaires pour une bonne cimentation.

Un liner est une colonne perdue qui ne remonte pas jusqu'à la tête de puits, mais sur une hauteur limitée, à l'intérieur du tubage précédent, avec une étanchéité renforcée par l'utilisation d'une garniture supplémentaire (Packer) tout en haut de la colonne perdue. Pour le but de coût réduit le cout, dû aux nombres réduits des casings, réduit la capacité de la tête de puits et la capacité de levage durant la descente du liner, et évitées Les pertes de circulation par le fait que les pertes de charges annulaires sont réduites au niveau des tige.

Le choix de la cimentation du liner dans un puits horizontal est une tâche délicate qui dépend de nombreux paramètres complexes. La cimentation d'une colonne perdue est une opération critique dont la réussite est conditionnée par plusieurs critères importants, tels que :

- La rotation du liner pour une distribution homogène du ciment dans les puits horizontaux,
- Le choix de centralisateurs pour assurer un bon écartement entre le liner et les parois du puits,
- Les caractéristiques des fluides utilisés tels que le laitier, le spacer, et la boue.

Puis, on procède à l'opération de diaggraphie :

- CBL : Cement Bound Log.
- VDL : Variable Density Log Qui nous donne une idée sur la qualité de ciment qui devrait avoir des propriétés mécanique (résistance) et hydraulique (perméabilité, porosité) voisines au meilleur que celles de la formation.
- USIT et IBC.

En se basant sur l'analyse détaillée de les avantages offerts par la technologie Fulcrum par rapport au ciment conventionnel.

L'objectif principal de cette nouvelle technologie est d'assurer une isolation et une cimentation adéquates, qui sont des éléments essentiels pour préparer une future opération de fracturation en vue de la production d'hydrocarbures. Cette technologie vise à résoudre les problèmes liés à la mauvaise isolation et à la cimentation dans les puits horizontaux, afin de maximiser l'efficacité et le rendement des opérations de fracturation.

## **Bibliographie :**

- [1] Le liner Fait par : A. Slimani, DIVISION FORAGE DEPARTEMENT FORMATION  
Décembre 2002.
- [2] Descente et cimentation du liner 4''1/2 dans le champ Hassi Messaoud, TEBIB Mahdi,  
2017.
- [3] EVALUATION ET RESOLUTION DU PROBLEME DE MAL CIMENTATION  
DELINER 7'' REGION GASSI TOUIL « PUIITS BDSN1 », FERRAH ABDENACER, 2014.
- [4] Analyse et optimisation des performances de la technologie Fulcrum pour la cimentation  
des puits horizontaux. Comparaison avec la méthode conventionnelle, GHAOUI Amani,  
2023.
- [5] Etude d'amélioration de l'homogénéité du champ thermique dans un séchoir solaire en  
utilisant la méthode des plans d'expériences, mecheri ayoub, 2019.
- [6] L'EFFET NEGATIF DE LA MOUSSE SUR LA CIMENTATION DES COLONNES  
DE TUBAGE (PUIITS PETROLIER MDZ-731), nassim chibani, 2019.
- [7] document de fluide et cimentation, 3eme licence forage, Pr bouhadda.
- [8] article sur linkdin sur les bouchons de cimentation.
- [9] réalisation de l'opération de cimentation et vérification de leur qualité par la méthode cbl-  
vdl, Nadjib DANOUNE, 2016.
- [10] Procédure de contrôle de qualité du ciment pétrolier et de l'efficacité des additifs du  
ciment en deux systèmes de laitiers doux et salé , Nassima HAMICHI, Malha HARRAT,  
2017.
- [11] la cimentation en pratique, Jean Philippe Kunetz, Well Services TOTAL Global Account  
Manager, jan 2002.
- [12] Chapitre I, introduction sur la reologie, 2018.
- [13] article scientifique sur Régimes d'écoulement université de Lille.
- [14] Chapitre 3, Rhéologie des bios fluides, 2014

## **Bibliographie :**

[15] L'effet de la température géothermique sur les propriétés du ciment dans les puits pétroliers, Bahi Nacereddine+ Chaia Abdeldjabar+ Didi Abdelbasset, 2023.

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

[17] IBC scanner, 23-RPIN-1835548 PS Copyright © 2023 SLB. All rights reserved.