

N° d'ordre : / Faculté / UMBB / 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par :

BELHAFEF Ahmed Zakarya

DEBABI Anis Fares

Filière : Hydrocarbures

Option : Forage des puits

Thème

Modélisation du phénomène du microannulus dans un puits
pétrolier, proposition de solutions et remèdes.
Application sur le puits HMZA-1

Devant le jury :

CHIEB Bachir	DGA	ENTP	Président
MELLAK Abderrahmane	Proffeseur	UMBB	Encadreur
AISSANI Rabah	Cadre	Sonatrach	Examineur
BOUMAZA Nadia	MA(A)	UMBB	Examinatrice

Année universitaire 2016 / 2017

REMERCIEMENTS

*Avant toute chose nous remercions **Allah**, notre créateur et bienfaiteur pour tout le courage, la patience et surtout la volonté qu'il nous a donné pour achever ce travail.*

Nous adressons des remerciements bien spéciaux à notre encadreur :

Le Professeur MELLAK Abderrahmane

qui nous a guidé et orientés non pas seulement pour ce travail mais aussi durant tout notre cursus universitaire.

Nous tenons à remercier aussi nos familles qui nous ont soutenus par tous les moyens possibles et sans qui nous ne serions pas ici aujourd'hui.

*Nous tenons aussi à remercier tout le personnel de l'appareil **Great Wall 133** pour leur aide, compréhension et leur état d'esprit.*

*Spécialement : **Amine, Jamel, Tbib, Nouri, Roufa, Imade, Kamel**, sans oublié notre cher ami et frère **Oussama Ghelis**.*

*Nous remercions aussi profondément tous nos enseignants de l'université de **Boumerdes** qui nous ont beaucoup appris que ce soit dans le domaine scientifique ou du savoir vivre.*

Nous n'oublierons certainement pas de remercier nos chers camarades et collègues qui ont fait partie de notre vie universitaire et avec lesquels nous avons partagé beaucoup de bons souvenirs.

Nous finirons par exprimer notre gratitude aux membres du jury qui nous ont honorés par leur présence afin de juger notre travail.

DEDICACES

Je dédie ce mémoire

A mon super héros “papa”, **A** la lumière de ma vie “maman”, **A** mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu’ils m’ont inculqué en leur souhaitant une longue vie.

A mes frères pour leur présence et leurs encouragements durant tout mon chemin et je leurs souhaite beaucoup de réussite. (Meriem, Khaled, Adem).

A mes proches qui ont cru en moi et dit : continue Zaki ! ; un jour tu vas réaliser tes rêves. (Taha, Zied, Anis, Sid Alli, Oussama, Abdou, Sara, Abdelatif, Amel, Isma).

Au foreur JR à qui je souhaite beaucoup de réussite, t’as un grand potentiel amigo. (Nassim).

A la personne la plus parfaite à mes yeux, mon binôme, il n’était pas facile d’arriver à ce point, merci d’avoir écrit un bon chapitre dans ma vie, nous sommes imbattables frère. (DEBABI Anis Fares)

A toute ma famille ainsi qu’à mes amis.

Belhaffef Ahmed Zakarya

DEDICACES

C'est avec le cœur plein de joie et de fierté que je dédie ce travail :

✧ Ma très chère et défunte mère qui a été depuis toujours mon générateur de force et ma source de motivation

✧ Mon Chér Padré Qui me soutient et me booste à chaque instant de ma vie.

✧ Mes frères : Reda, Rafik, Bilel ; sur lesquels j'ai toujours pu compter et qui ne m'ont jamais délaissé.

✧ Mes Sœurs : Amel, Chahra et Wafa qui ont sensiblement amélioré ma vie depuis leurs arrivées.

✧ Mista, Noughi, Ezzahi, Oufella, S3ide, Yacine,abdou et Touta ; les frères que la vie ma donnée, que Dieu vous préserve.

✧ Zied Tounsi, Anis Annabi, Sid Ali, Hamza, Foued Nadhir, Wail, Charif, Fodhil, , Madjid, Degouah, Anes, Taha, La chine, Samir, Amel, Isma, Hadjer, Amine, Zaki, Tchini, Hichem ainsi qu'à tous les membres de la SEG, sans oublier les délégués et spécialement le délégué Saber.

✧ Tchpoukh, Meriem, Ibtissem, Ryma et toute la famille Debabi, Belhaffef, Ahmed Ali et Hacid.

✧ Toutes les personnes qui mon aidés de près ou de loin pour ce travail et toute personne qui a partagée ne serait-ce qu'une seconde de ma vie.

Comme le meilleur est toujours gardé pour la fin, un immense remerciement et une grande gratitude envers mon ami, mon frère, mon autre moi, la personne sans qui rien de cela n'aurait été possible, la personne avec laquelle partager 5 ans de ma vie aura été un honneur, une personne pas comme les autres avec ses principes et ses idées, un big MERCI à Mr. **Belhaffef Ahmed Zakarya**

DEBABI Anis Fares.

Sommaire

Nomenclature

Introduction

Chapitre I: Généralités sur la région de Rhourd el Baguel..... 1

A.	Situation géographique et contexte	<u>1</u>
1.	Les limites géographiques	<u>1</u>
2.	Contexte géologique	<u>2</u>
B.	Historique d'exploitation de la région Rhourd El Baguel	<u>2</u>
C.	Cadre géologique	<u>8</u>
1.	Aspect structural	<u>8</u>
2.	Aspect géophysique.....	<u>8</u>
3.	Stratigraphie de la région	<u>8</u>
4.	Piège.....	<u>15</u>
5.	Evolution structural	<u>16</u>
6.	Les réservoirs	<u>16</u>
D.	Aspect pétrolier	<u>17</u>

Chapitre II: Introduction au Phénomène du Microannulus..... 18

A.	L'importance de la cimentation.....	<u>18</u>
1.	Assurer l'intégrité mécanique du puits durant le forage	<u>18</u>
2.	Isolation et protection des réservoirs	<u>18</u>
3.	Optimisation de la production.....	<u>19</u>
4.	Prévention contre le flux des fluides de formation vers la surface.....	<u>19</u>

5.	Protéger le tubage contre les pressions de formation	<u>21</u>
B.	Théorie de migration du gaz à travers le ciment.....	<u>22</u>
1.	Théorie de Migration de gaz	<u>22</u>
2.	Précautions.....	<u>24</u>
C.	Théorie du comportement du ciment.....	<u>24</u>
1.	Notions sur les propriétés du ciment.....	<u>24</u>
2.	Les facteurs influents sur le ciment et la cimentation	<u>26</u>
3.	Etat des contraintes agissantes sur le ciment	<u>32</u>
D.	Modélisation du comportement du ciment.....	<u>34</u>
E.	Méthodes de contrôle de la cimentation	<u>38</u>
1.	Principes des méthodes.....	<u>39</u>
F.	Les différents cas de mauvaise cimentation.....	<u>44</u>
1.	Effet channelling	<u>44</u>
2.	Le phénomène du Microannulus.....	<u>45</u>
a.	Définition	<u>45</u>
b.	Pourquoi le Microannulus est-il si important	<u>46</u>
c.	Causes du phénomène	<u>48</u>
d.	Comportement mécanique et modèle mathématique	<u>51</u>
e.	Tests et analyse de détection du phénomène	<u>56</u>
f.	La taille du Microannulus.....	<u>61</u>
g.	Conséquences et risques du phénomène	<u>64</u>

CHAPITRE III : Présentation du puits HMZA-1 66

	Introduction	<u>66</u>
A.	Information sur le puits HMZA-1	<u>67</u>
B.	Accès au puits.....	<u>68</u>

C.	Prévisions du puits	<u>69</u>
D.	Plan de forage.....	<u>70</u>
E.	Détails du temps de forage	<u>71</u>
F.	Programme des outils de forage	<u>72</u>
G.	Programme de tubage.....	<u>73</u>
H.	Programme de cimentation	<u>74</u>
I.	Programme de boue	<u>75</u>

Chapitre IV : Etudes de cas sur le puits HMZA-1..... 76

A.	Description géologique.....	<u>76</u>
B.	Matériel utilisé	<u>77</u>
1.	La boue :	<u>77</u>
2.	Le tubage :	<u>81</u>
3.	Les centreurs	<u>84</u>
C.	Probabilité de formation de Microannulus	<u>85</u>
a.	Analyse des données	<u>85</u>
b.	Conclusion	<u>85</u>
D.	Résultats du caliper.....	<u>86</u>
E.	Test FIT.....	<u>87</u>
F.	Choix et composition du ciment.....	<u>88</u>
1.	Facteurs influents le choix du ciment	<u>88</u>
a.	La pression de fracturation	<u>88</u>
b.	La pression de pore.....	<u>88</u>
c.	Présence de zones à pressions anormales	<u>89</u>
d.	Température au fond du puits	<u>89</u>
e.	Caractéristiques et propriétés chimiques des formations traversées.....	<u>89</u>

2.	Propriétés du laitier de ciment utilisé.....	<u>91</u>
a.	Composition du laitier de ciment choisis	<u>91</u>
b.	Caractéristiques rhéologiques	<u>93</u>
c.	Evolution des contraintes de cisaillement.....	<u>94</u>
d.	Disposition des fluides à l'intérieur du puits.....	<u>95</u>
7.	Calculs de cimentation	<u>96</u>
a.	Le ciment classe G.....	<u>96</u>
b.	Calcul des volumes de cimentation	<u>96</u>
c.	Calcul des volumes aux à-coups de pression	<u>100</u>
d.	Calcul du débit	<u>101</u>
e.	Calcul des pressions	<u>103</u>
8.	Logging et vérification du Microannulus	<u>107</u>
1.	Présentation du Logging :	<u>107</u>
2.	Analyse généralisée.....	<u>107</u>
3.	Analyses et interprétations détaillée	<u>107</u>
a.	HORIZON B	<u>108</u>
b.	Le Lias Salifère S1+S2.....	<u>109</u>
4.	Résultat.....	<u>110</u>
5.	Calcul de la taille du Microannulus.....	<u>110</u>

Chapitre V : Suggestions et solutions du problème 114

A.	La technologie NHPS	<u>114</u>
1.	Présentation de la technologie NHPS	<u>114</u>
2.	Application du NHPS en Algérie	<u>116</u>
3.	Limites de la technologie NHPS.....	<u>120</u>
B.	Expandable and Flexible Cement (EFC)	<u>121</u>

1.	Etude et proposition du système correctif	<u>121</u>
a.	Elasticité.....	<u>121</u>
b.	Contrôle de la corrosion	<u>121</u>
c.	Expansion dans son état solide.....	<u>122</u>
d.	Résistant à la compression	<u>122</u>
e.	Réactif aux additifs.....	<u>122</u>
2.	Les caractéristiques du ciment solution	<u>122</u>
a.	Les propriétés mécaniques du EFC	<u>123</u>
b.	Propriétés rhéologiques	<u>124</u>
c.	Les propriétés chimiques	<u>124</u>
d.	La concentration en solide	<u>124</u>
3.	Solutions proposées	<u>125</u>
a.	Un modèle de solide multi dimensionnel	<u>125</u>
b.	Ajout de Polymères synthétiques à base de fibre de verre.....	<u>126</u>
c.	Injection de gaz	<u>128</u>

Conclusion

Liste de figures

Liste des tables

Bibliographie

Annexes

Liste des figures

Figure 1: Photo satellite du positionnement de la région de Rhourd el Bague	1
Figure 2:Représentation d'une Coupe géologique entre les forages HMZA-1; MDRS-1;RSH-1 Bis [1]	15
Figure 3:Carte en Isopaque des Quartzites de Hamra (IC=10m) [1]	17
Figure 4: Représentation des différentes structures des couches productrice	19
Figure 5: illustration d'une conséquence d'éruption de fluide en surface suite à une mauvaise cimentation	20
Figure 6: pourcentage du nombre de puits enregistrant une pression en annulaire avec le temps	21
Figure 8: intrusion de gaz à travers les fissures de la matrice après prise [18]	23
Figure 7: intrusion de gaz dans le cas où la pression hydrostatique du ciment est insuffisante [18]	23
Figure 9: Schématisation de l'application de la loi de Darcy pour un liquide en écoulement linéaire	27
Figure 10: Schématisation d'un milieu poreux [29]	28
Figure 11: diagramme représentant la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de déformation pour les modèles En Puissance et de Bingham	29
Figure 12: Représentation d'une structure microscopique d'u laitier de ciment	30
Figure 13:Illustration de différents cas de déplacement du ciment	31
Figure 14: Les états par lesquelles passe le ciment	32
Figure 15: Disposition des contraintes sur un matériau solide	33
Figure 16: disposition des contraintes sur la gaine de ciment	33
Figure 17:variation de la contrainte en fonction de la déformation dans les domaines plastique et élastique	35
Figure 18:représentation de la relation entre les différentes déformations	35
Figure 19:système de contraintes agissant sur la matrice de ciment	36
Figure 20: schéma descriptif d'une sonde et dispositif de mesure CBL/VDL.[11]	39

Figure 21: Chemin acoustique possible des ondes envoyées [11]	41
Figure 22: Enregistrement type d'un CBL[11].....	41
Figure 23:Enregistrement type d'un VDL. [11].....	42
Figure 24: Types de Chanelling existants.....	44
Figure 25: Représentation du Inner et Outer Microannulus. [12]	45
Figure 26: variation des tensions radiales effective autour du puits[11]	54
Figure 27 tensions radiales dans un puits avant et après le rétrécissement du ciment: [11]	55
Figure 28:illustration d'un enregistrement CBL-VDL d'une zone A cimentée [32].....	57
Figure 29: enregistrement CBL-VDL sous pression de la zone A [32].....	59
Figure 30:Autre exemple de CBL-VDL dans une même zone avec et sans pression [32].....	60
Figure 31: Localisation et fiche technique du puits HMZA-1	66
Figure 32: plan d'accès au puits HMZA-1 depuis Hassi Messaoud [1]	68
Figure 33: Programme de forage	69
Figure 34: prévision de l'avancement du forage (Days vs Depht)	70
Figure 35:illustration de possibilité de collapse	83
Figure 36: Illustration de possibilité d'éclatement	83
Figure 37: exemple d'une partie du caliper ou il y'a divergence Source : (résultats du caliper réalisé sur chantier).....	86
Figure 38:Evolution du gradient de fracturation et de pore en fonction de la profondeur [3].....	88
Figure 39:Evolution des contraintes de cisaillement pour le fluide forage, le spacer et le laitier de ciment [3].....	94
Figure 40:Concentration moyenne des différents fluides dans le puits [3].....	95
Figure 41: Schéma représentant la position du ciment dans le puits pour la phase 12"1/4	96
Figure 42: évolution des pressions au niveau du sabot [3]	103
Figure 43: enregistrement CBL-VDL de la zone LD3 [5]	108
Figure 44:enregistrement CBL- VDL du Lias Salifère S1+S2 [5]	109

Figure 45 : Représentation des différentes réponses du NHPS et du classe G au teste de destruction [7].....	116
Figure 46: Différentes valeurs du gradient d'isolation pour des puits cimenté avec le classe G et le NHPS [7]	118
Figure 47 comparaison entre un enregistrement CBL-VDL dans un même puits à 13 jours d'Interval [7].....	119
Figure 48: Représentation de l'expansion du ciment NHPS avec le temps [7]	120
Figure 49: représentation du solide tridimensionnel	126
Figure 50: Illustration de la disposition des particules solides et des bulles de gaz [18].....	128

Liste des tables

Table 1: Informations sur le puits FES-1	3
Table 2: Informations sur le puits MDRS-1	4
Table 3: Informations sur le puits AKRS-1	5
Table 4: Informations sur le puits RSH-2	6
Table 5: Informations sur le puits SMDR-1	7
Table 6: <i>Pressions annulaire détectée sur des puits en production en 2004 sur le champ de Hassi Messaoud</i>	47
Table 7: Récapitulatif des informations du puits HMZA-1	67
Table 8: Détails du temps de forage du puits HMZA-1	71
Table 9: Programme des outils de forage proposés pour les puits HMZA-1	72
Table 5: Programme de tubage du puits HMZA-1	73
Table 11: Programme de cimentation du puits HMZA-1	74
Table 12: Programme de boue pour le puits Hmza-1	75
Table 13: composition de la boue utilisée pour le puits HMZA-1	79
Table 14: caractéristiques de la boue utilisée	81
Table 15: Détails des deux tronçons de tubage utilisés	82
Table 16: résultats du viscosimètre FANN	93
Table 17: Statistique de quelques puits à Hassi Guettar [7]	116

NOMENCLATURE

C— facteur de cohésion du ciment, Mpa;

dn—taille du microannulus, μm ;

E1, E2, E3— module de Young du tubage, ciment et la formation, GPa ;

f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7, f8— des variables indéterminés

K— constante liée à la formation ;

P1—contrainte radiale a l'interface entre le tubage et le ciment, Mpa ;

P2—contrainte radiale a l'interface entre le ciment et la formation, Mpa ;

P1m—contrainte radiale a l'interface tubage/ciment à la fin du chargement des contraintes, Mpa ;

P2m—contrainte radiale a l'interface ciment/formation à la fin du chargement du contrainte, Mpa ;

P1n—contrainte radiale a l'interface tubage/ciment après le chargement des contraintes, Mpa ;

P2n—contrainte radiale a l'interface ciment/formation après le chargement du contrainte, Mpa ;

Pi—pression a l'intérieur du tubage, MPa ;

Po—contrainte de la formation, MPa ;

Pp—contrainte radiale à la limite élastique/plastique du ciment, MPa ;

r—rayon, mm ;

r1—rayon intérieur de la matrice ciment, mm ;

r2— rayon extérieur de la matrice ciment, mm ;

ri— rayon intérieur du tubage, mm ;

ro— rayon du puits, mm ;

rp—rayon de la limite élastique/plastique du ciment, mm ;

u—déplacement radial, μm ;

uceo—déplacement radiale de la paroi extérieur de la zone élastique du ciment, μm ;

uceom—déplacement radiale de la paroi extérieur de la zone élastique du ciment durant le chargement, μm ;

u_{fi} —déplacement de la proie du puits, μm ;

u_{fin} —déplacement de la proie du puits après le chargement, μm ;

u_{ci} —déplacement radiale de la paroi intérieur de la matrice de ciment, μm ;

u_{cin} —déplacement radiale de la paroi intérieur de la matrice de ciment après le chargement, μm ;

u_{cir} —la variation du déplacement radiale de la paroi intérieur de la matrice de ciment après le chargement, μm ;

u_{ce} —déplacement radiale de la paroi extérieur de la matrice de ciment après le chargement, μm ;

u_{cp} —déplacement radiale de la zone plastique du ciment, μm ;

u_{so} —déplacement radiale de la paroi extérieur du tubage, μm ;

u_{son} — déplacement radiale de la paroi extérieur du tubage après le chargement, μm ;

σ_r ou S_r — contrainte radiale, MPa ;

σ_θ ou S_θ — contrainte tangentielle, MPa ;

σ_z ou S_z — contrainte axiale, MPa ;

ϵ_r ou ϵ_r — déformation radiale ;

ϵ_θ ou ϵ_θ —déformation tangentielle ;

ν_1, ν_2, ν_3 —coefficient de poisson du tubage, ciment et formation ;

φ — angle de friction interne de ciment, rad.

OBP— pression d'over balance (Psi)

L_c — longueur de la colonne du ciment

D_{eff} — diamètre effectif (in) ;

D_c — diamètre extérieur du casing (in)

D_{OH} — diamètre du puits(in)

M — masse (kg)

V — volume(l)

d_L — densité de laitier ;

Nomenclature

R — rendement de laitier ; (l/t)

Q — débit ; (l/s)

k — perméabilité ; (darcy)

μ — viscosité ; (poise)

Φ — porosité ;

ρ — masse volumique ; (kg/l)

Z — distance entre émetteur et récepteur (pieds)

$A_{\min}$ — amplitude minimum exprimée en millivolts

$A_{\max i}$ — amplitude maximum exprimée en millivolts

β — coefficient d'expansion thermique ($6,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$ pour l'acier)

ΔT — augmentation de température en $^\circ\text{F}$

σ'_r — est la tension radiale effective (Mpa)

σ'_θ — est la tension de circonférence effective (Mpa)

$\tau_{r\theta}$ — est la contrainte de cisaillement tangentielle (Mpa)

R — est le rayon du puits (m)

θ — l'azimut mesuré depuis la direction de S'_H (deg)

ΔP — différence de pression entre le fluide dans le puits et la formation (Mpa)

S'_H — tension horizontale maximale (Mpa)

S'_h — tension horizontal minimale (Mpa)

V_f : volume de boue après l'alourdissement (m^3)

V_b : volume de boue avant l'alourdissement (m^3)

V_{al} : volume d'alourdissant (m^3)

d_f : densité finale

d_b : densité initiale

d_{al} : densité d'alourdissant

h : hauteur du spacer (m)

H : hauteur du ciment (m)

Nomenclature

Lc1 : longueur du casing 95/8 47# (m)

Lc2 : longueur du casing 95/8 53# (m)

Ecc : capacité de l'espace annulaire entre casing 13^{3/8}" et casing 9^{5/8}" (l/m)

Eoc : capacité de l'espace annulaire entre casing 9^{5/8}" et open Hole (l/m)

Ec1 : capacité du casing 95/8 47# (l/m)

Ec2 : capacité du casing 95/8 53# (l/m)

Vcc : volume de l'espace annulaire entre casing 13^{3/8}" et casing 9^{5/8}" (l)

Voc : volume de l'espace annulaire entre casing 9^{5/8}" et open hole (l)

Vst : volume de l'espace en open hole sous le sabot (l)

Vc : volume à l'intérieur du casing 9^{5/8}" entre float collar et sabot (l)

V_T : volume total du laitier nécessaire pour cette phase (l)

Vsp : volume du spacer (l)

Vd : volume de déplacement nécessaire pour mettre en place tout le volume de ciment (l)

Va1 : volume de boue à injecter pour le premier à-coup (l)

Zs1 : profondeur d'encrage du sabot du casing 13^{3/8}" (m)

Zs2 : profondeur d'encrage du sabot du casing 9^{5/8}" (m)

Zf : profondeur du float collar (m)

vc : vitesse critique dans l'espace annulaire entre casing et open hole (m/s)

ea : épaisseur de l'espace annulaire entre le casing et l'open hole (m)

Qr : débit réel (l/min)

Pct : perte de charge (bar)

BHP : pression du fond (bar)

dc: Déformation du ciment

Introduction

Depuis la découverte du pétrole et des hydrocarbures, l'attention des états et des nations s'y est focalisée. Cette ressource énergétique, gaz ou huile, constitue désormais la source d'intérêt des plus grandes puissances mondiales et cause périodiquement de grands conflits internationaux.

Le domaine pétrolier a, depuis, connu d'innombrables avancées technologiques. Malgré ces dernières, il reste passionnant et soumis continuellement à de nouveaux défis.

L'opération de forage, nécessaire pour relier les hydrocarbures à la surface, est bien l'étape la plus importante et la plus délicate depuis les opérations de prospections à la mise en productions des puits d'hydrocarbures.

La connaissance des conditions géologiques et la maîtrise acquise avec l'expérience nous aide à élaborer un programme de forage adéquat, basé sur plusieurs phases. Chaque une d'elles avec ses spécificités est suivie de la mise en place d'un ensemble de tubages et de l'opération de cimentation ; celle-ci est exécutée afin de maintenir en place les tubes descendus, les parois du puits et surtout d'assurer une isolation et une barrière dans le but d'empêcher les potentiels fluides de formation de pénétrer dans le puits et d'arriver jusqu'en surface.

Avec la demande d'hydrocarbures en constante augmentation, les multinationales commencent à exploiter des zones nouvelles avec de nouvelles caractéristiques comme les conditions de pressions et de températures anormales.

Ces nouvelles conditions peuvent compromettre le déroulement des forages, la phase de production, l'état des puits et donc poser de sérieux problèmes quant à la durée de vie de ces derniers.

L'une des principales problématiques soulevées dans ce contexte est notamment la détection des pressions issues de la migration de fluides du fond vers la surface au niveau des espaces annulaires de puits initialement sans pressions.

La cimentation et l'isolation défectueuse sont les premières causes de cette migration et donc des pressions détectées.

Tous les types de mauvaise cimentation peuvent être détectés directement après l'opération, sauf le phénomène de Microannulus qui tarde à apparaître et qui est causé par différents phénomènes que nous allons tenter d'aborder dans notre approche.

Après avoir déterminé ces phénomènes causant le Microannulus et avoir détaillé sa théorie, nous consacrerons notre étude à analyser les différents DATA du puit HMZA-1 en notre possession afin de prévoir le comportement du ciment dans la phase 12^{1/4} qui contient des formations assez délicates telle que l'HORIZON B et les formations salifères

Cette analyse nous mènera à détecter les causes réelles de ce phénomène.

Aussi nous nous efforcerons de proposer des suggestions théoriques pour une nouvelle structuration du ciment pouvant être considérées, dans le futur, comme de réelles solutions afin de prévenir la formation des Microannulus dans les puits d'hydrocarbures.

Chapitre I: Généralités sur la région de Rhourd el Baguel

A. Situation géographique et contexte ^{[1][2]}

1. Les limites géographiques

Rhourd el Baguel est une dune (class T - hypsographiques) se trouvant dans la Wilaya de Ouargla, ayant une altitude de 154m par rapport au niveau de la mer

Les coordonnées géographiques sont :

- en System DMS (Degrés, minute, secondes) : 31°37'0" N et 6°3'0" E
- en degrés décimaux : 31.6167 et 6.05
- La position UTM est KA20

Le fuseau horaire pour Rhourd el Baguel est UTC/GMT+1
En 2017



Figure 1: Photo satellite du positionnement de la région de Rhourd el Bague

(Source : Google Maps)

2. Contexte géologique

L'intérêt pétrolier de cette région est intimement lié, à sa position dans un environnement pétrolier très favorable et prometteur ; où les réservoirs Cambro-ordovicien (Ri+Ra, Quartzites de Hamra) constituent des objectifs majeurs.

Comme l'atteste les découvertes d'huile obtenues au niveau des gisements de Mesdar, El Baguel & El Assel.

B. Historique d'exploitation de la région Rhourd El Baguel [1]

Cette région reste inexploitée et en phase d'exploration, bien que le premier puits ait été foré en 1968, il aura fallu attendre jusqu'en 2003 pour voir une nouvelle fois la zone considérée comme une zone d'intérêt.

Mais malgré cette reconsidération les activités dans ce périmètre sont peu fréquentes, au point ou au jour d'aujourd'hui nous n'avons enregistré que cinq forages au total, auxquels nous ajoutons le puits HMAZAOUI-1

Puits n°01 :

Nom du puits		FES-1
Sigle		HASSI D ZABAT
Localisation		427/439
Blocs		Exploration
Catégorie		X : 06°44'00" E Y : 31°01'6.00"N
Coordonnées Géographiques		Ordovicien Quartzites de Hamra et Cambrien Ri+Ra, Trias
Objectifs		05/02/1968 – 01/06/1968
Date de réalisation		3412.5 m
Profondeur finale		FES-1
Résultats des Tests		
Formation	Intervalle testé (m)	Résultat
Quartzites de Hamra 'DST1' (BF)	3142m–3162m	7 m3 d’huile en C.I
Cambrien Ri 'DST2' (BF)	3395m 3412m	5.7 m3 d’Eau salée faible traces d’huile.
Trias – top QH 'DST3' (BF)	3039m–3089m	Pas de débit (échantillon d’Huile)

Table 1: Informations sur le puits FES-1 [1]

Commentaires :

Le puits FES-1 ; est le premier puits foré dans la zone avec pour objectifs le test des Quartzites de Hamra (QH), le Cambrien Ri et le Trias, les résultats obtenus ont été décevants sauf pour QH.

Puits n°02 :

Nom du puits	MESDAR SUD-1	
Sigle	MDRS-1	
Périmètre	HASSI D ZABAT	
Blocs	427/439	
Catégorie	Exploration	
Coordonnées Géographiques	X : 06°45'30"E Y : 31°08'22.1"N	
Objectifs	Cambrien Ri+Ra	
Date de réalisation	24/04/1968 – 29/08/1968	
Profondeur finale	3587 m	
Résultats des Tests		
Formation	Intervalle testé (m)	Résultat
Cambrien Ri `DST1´ (BF)	3441m-3458 m	Huile dans les tiges
Cambrien Ri `DST2´(Perfos)	3428m-3496 m	3.84 m3/h d’huile
Cambrien Ra/R2 DST3´ (BF)	3499m–3542m	8.7m3/h d’huile
Cambrien Ra/R2 DST4´ (BF)	3543m –3577m	Huile + Eau salée

Table 2: Informations sur le puits MDRS-1 [1]

Commentaires :

Le puits MDRS-1 a été foré dans la région de HASSI ZABAT avec pour objectif d'atteindre le cambrien et ces deux réservoirs Ri et Ra.

Le test du Ri a donné des résultats plutôt positifs (environ 4 m³ par heure), tandis que les tests effectués pour le Ra et le R2 ont permis de confirmer la présence d'huile avec presque 9m³ mais aussi une présence d'eau de formation

Puits n° 03 :

Nom du puits	AKBAR SUD-1	
Sigle	AKRS-1	
Localisation	HASSI D ZABAT	
Blocs	427/439	
Catégorie	Exploration	
Coordonnées Géographiques	X : 06° 58' 36.839"E Y : 31° 13' 15.387"N	
Objectifs	Cambrien Ri + Ra	
Date de réalisation	11/02/2003– 31/05/2003	
Profondeur finale	3804 m	
Résultats des Tests		
Formation	Intervalle testé (m)	Résultat
Cambrien Ri 'DST1' (Perfos)	3452 - 3418 m	Productif d'Huile volume estimé 12m³.

Table 3: Informations sur le puits AKRS-1 [1]

Commentaires :

Le puits AKRS-1 foré en 2003 ; après reconsidération de la zone ; avait toujours eu pour objectif le cambrien Ra et Ri, mais plus précisément la confirmation de présence d'hydrocarbures dans ce dernier.

Effectivement après avoir effectué les tests sur le réservoir, les résultats du premier forage (MDRS-1) ont été confirmés

Puits n°04 :

Nom du puits	RHOURE SAYAH -2	
Sigle	RSH-2	
Localisation	EL ASSEL	
Blocs	236 b	
Catégorie	Exploration	
Coordonnées Géographiques	X : 07°03'08.036"E Y : 31°02'21.988"N	
Objectifs	Cambro-Ordovicien Ri+Ra, G.O, Quartzites de Hamra	
Date de réalisation	14/03/2010 – 14/12/2010	
Profondeur finale	4401 m	
Résultats des Tests		
Formation	Intervalle testé (m)	Résultat
Cambrien Ri 'DST1' (Perfos)	4280 – 4330 m	Opération annulée
DM-Quartzites de Hamra 'DST2' (BF)	3760 – 4000 m	2.37 m3/h d'huile + 2541.6 m3/h de Gaz
Grès d'Ourgla Quartzites de Hamra 'DST3'	3926 – 3989 m	Opération annulée
Grès d'Ourgla Quartzites de Hamra 'DST3 Bis' (Perfos)	3926 – 3989 m	1.79 m3/h d'huile + 1466.6 m3/h de Gaz

Table 4: Informations sur le puits RSH-2 [1]

Commentaires :

Toujours en exploration le puits RSH-2 qui avait pour objectifs le Cambro-Ordovicien (Ri, Ra, GO, Quartzites de Hamra) a abouti à des résultats plus diversifiés que ceux obtenus lors des forages de MDRS-1 et AKRS-1, spécialement pour les réservoirs "Quartzites de Hamra et le Grès de Ourgla"

Puits n°05 :

Nom du puits	SUD MESDAR-1	
Sigle	SMDR-1	
Localisation	Hassi Toumiet	
Blocs	427a, 439a, 424a, 426a et 236c	
Catégorie	Exploration	
Coordonnées Géographiques	X : 06°46'19.21871"E Y : 31°04'23.51832"N	
Objectifs	Cambrien Ri+Ra/R2	
Date de réalisation	03/07/2015 – 03/09/2015	
Profondeur finale	3735m	
Résultats des Tests		
Formation	Intervalle testé (m)	Résultat
Cambrien Ri 'DST1' (BF)	3450m-3550m	Eau Salée Saturée en C.I (S=327g/l ; D=1.23sg)

Table 5: Informations sur le puits SMDR-1 [1]

Commentaires :

Le puits SMDR-1 foré en 2005 et ayant pour objectifs le Cambrien Ri, Ra, R2, avait pour principal but la confirmation, mais aussi la délimitation des différents réservoirs, notamment le Ri. Le test effectué sur une très grande épaisseur (environs 100m), résultat enregistré un flux d'eau salée saturée.

C. Cadre géologique [1]

1. Aspect structural

La structure qui fera l'objet du forage HMZA-1 est située à l'Est du champ de Mesdar, sur un compartiment individualisé de celui foré par le puits SMDR-1 (à 13 Km), Elle est représentée par un anticlinal d'orientation NE-SW et délimité par deux failles.

2. Aspect géophysique

L'interprétation sismique des 3D acquises dans la région d'étude ; à savoir 3D AKRS (EXP, 2012), la 3D RSH (Gazprom) et 3D MDR (PED, 2006), montre que la structure de Hamzaoui se trouve dans un contexte structuralement compliqué par des réseaux de failles définissant un ensemble de structures indépendantes ou rarement associées.

3. Stratigraphie de la région

Dans ce qui suit nous allons détailler les différentes formations qu'il est prévu de traverser par notre forage, et les problèmes potentiels que nous pourrions rencontrer

a. *1^{ère} Phase (de la surface à 413m)*

i. Objectif de la phase

L'objectif de cette phase est de forer les formations avec un seul outil 26" jusqu'à une profondeur de 413m (40m dans le Sénonien Anhydritique) ou nous poserons le tubage 18^{5/8"}.

La pose et la cimentation du tubage nous permettront non seulement de protéger les formations fragiles mais aussi de mettre en place une solide assise pour le forage de la phase suivante qui est la plus longue de tout le forage.

ii. Problèmes potentiels

- Perte de circulation : une attention particulière devra être portée à la densité de la boue de forage afin d'éviter les pertes (impérativement garder $d_b < 1.07$).
- Bourrage de l'outil : nous devrions non seulement nous assurer que l'outil ait un jet centré, mais aussi ajouter des détergents à la boue de forage pour aider à prévenir le bourrage

iii. Stratigraphie :

Cénozoïque

Mio-pliocène : (Surface - 195 m)

Sable blanc à jaunâtre, translucide, fin à moyen, parfois grossier, subarrondi à subanguleux, avec fines passées de Calcaire blanc, cryptocristallin, crayeux, tendre et d'Argile gris- verdâtre, brun-rouge, tendre à pâteuse. Présence de Grès beige, fin, carbonaté, friable.

Argile beige, parfois gris-vert, brun-rouge, jaunâtre, pâteuse, carbonatée, intercalée de Sable blanc à jaunâtre, translucide.

Mésozoïque

Crétacé (195- 1653 m)

Sénonien Carbonaté :(195- 373 m)

Alternance de calcaire dolomitique, à dolomie calcaire, avec des passées de marne et d'argile, carbonaté. Présence de calcaire blanc et d'anhydrite blanche avec traces de gypse vers la base.

b. 2^{ème} Phase (413m à 2278m)

i. Objectifs :

L'objectif sera de forer la phase avec un outil 16" et de poser le tubage 13^{3/8}", afin d'isoler les formations aquifères comme l'ALBIAN, mais aussi de protéger les formations à basse pression avant d'entamer la phase suivante qui est connu pour être une zone généralement à pression anormalement élevé.

ii. Problèmes potentiels

- Rétrécissement du puits et coincement : les paramètres de forage doivent être maintenus autant que possible constant surtout en face des formations a risque de coincement.
- Pertes au niveau de l'APTIAN : En plus des bouchons LCM et du matériel de cimentation qui doivent toujours être prêts au cas où la perte survient, s'assurer que l'espace annulaire n'est pas chargé de cuttings et circuler 20m avant d'atteindre le TOP de l'APTIAN.
- Collage des tiges : toujours vérifier la Jar avant de la faire descendre, et ne pas oublier le matériel de fishing spécial BHA 16" qui doit être sur le RIG.

iii. Stratigraphie :**Sénonien Anhydritique :(373- 558 m)**

NB. Les 40 premiers mètres de cette formation sont compris dans la première phase

Anhydrite blanche à passées d'argile et de dolomie argileuse au sommet, passant à des dolomies argileuses, rares passées d'argile et d'anhydrite.

Sénonien Salifère :(558- 669 m)

Sel blanc massif, translucide intercalé de marne dolomitique, d'argile et d'anhydrite.

Turonien :(669- 777 m)

Calcaire blanc localement crayeux, parfois argileux avec de fines passées d'argile gris – vert, légèrement carbonaté.

Cénomaniens :(777- 1004 m)

Alternance de calcaire tendre, dolomitique par endroits, d'argile grise, tendre et d'anhydrite légèrement carbonatée, localement dure.

Albien :(1004- 1128 m)

Grès fins à moyens argileux à intercalation d'argile plastique et de sable grossier à la base.

Aptien :(1128- 1153 m)

Calcaire dolomitique blanc, moyennement dur passant parfois à dolomie beige, microcristalline, dure.

Barrémien :(1153- 1398 m)

Grès blanc, translucide, grossier. Intercalation d'argile brunâtre tendre à pâteuse et de calcaire gris – blanc.

Néocomien :(1398- 1653 m)

Argile gris-vert à verdâtre, localement brun-rouge, carbonatée, silteuse, tendre à indurée, avec passées de Grès blanc à gris clair, parfois gris vert, fin à moyen, silico-argileux, friable et de Dolomie beige, microcristalline, dure. Traces de Lignite.

Jurassique (1653m à 3250m)**Malm :(1653- 1853 m)**

Alternance de grès gris – blanc fin à moyen siliceux à carbonaté, d'argile brune, tendre à pâteuse, silteuse ; Passées de dolomie beige, de calcaire gris – beige et d'anhydrite.

Dogger Argileux: (1853- 2063 m)

Alternance d'argile versicolore, silteuse de grés gris – blanc fin à moyen, siliceux à silico – carbonaté, glauconieux, de dolomie grise dure et de marne grise.

Dogger Lagunaire : (2063- 2253 m)

Anhydrite blanche dure avec des passées de dolomie, d'argile grise carbonatée et de marne.

c. 3^{ème} Phase (2278m à 3326m)**i. Objectifs :**

L'objectif de cette phase est :

- forer avec un outil 12^{1/4}”

- poser le tubage 9^{5/8}” afin d'isoler les passages d'évaporites et les formations à pression anormalement élevées, spécialement l'HORIZON B qui est considéré comme une formation aquifère à très haute pression et dont nous devons à tout prix éviter qu'il débite.

ii. Problèmes potentiels

- Venue d'eau à grand débit au niveau de l'HORIZON B en plus du caractère plastique des sels qui auront tendance à vouloir s'introduire dans le puits : nous devons garder un œil sur la densité de la boue qui doit impérativement être supérieure à 2.10.

iii. Stratigraphie**Lias Anhydritique LD1 : (2253- 2287 m)**

NB : les 25 premiers mètres sont compris dans la phase précédente

Alternance d'Anhydrite pulvérulente et microcristalline et de rares passées de calcaire dolomitique moyennement dur à tendre.

Lias Anhydritique LS1 : (2287- 2414 m)

Sel blanc à roux à intercalations d'argiles bariolées parfois salifère, d'anhydrite et de dolomie.

Lias Salifère LD2 : (2414 - 2489 m)

Alternances d'anhydrite massive et de Sel translucide et jaunâtre, intercalé d'anhydrite blanche, d'argiles brunes –rouge de marne et de dolomie.

Lias Salifère LS2 : (2489 - 2569 m)

Sel massif blanc à roux localement argileux, argiles rouge-brique plastique, salifère.

Horizon B « LD3 » : (2569- 2599 m)

Calcaire gris à gris-blanc, tendre à moyennement dur, avec fines passées d'Argile grise et brune, tendre à indurée, dolomitique et un niveau d'Anhydrite blanche.

Lias S1+S2 : (2599 - 2940 m)

Anhydrite blanche, pulvérulente, intercalée d'Argile grise, tendre, et de

Dolomie gris-beige, microcristalline, dure.

Sel massif blanc à rosâtre, translucide, avec passées d'Anhydrite blanche, pulvérulente parfois microcristalline, dure et d'Argile grise à brun-rouge, dolomitique, tendre à indurée.

Lias S3 : (2940- 3250 m)

Sel massif blanc à jaunâtre, translucide, avec fines passées d'Argile grise, brun-rouge, tendre à indurée.

Lias Argileux: (3250- 3323 m)

Argile brune à brun-rouge et grise à gris-vert, tendre à plastique, salifère, avec passées de Sel massif, blanc à jaunâtre, translucide, légèrement salifère.

d. 4^{ème} Phase (3326m à 3602m)**i. Objectifs**

Le forage de cette phase (8^{1/2"}) va permettre de faire un carottage au niveau du TAGI tandis que la pose du tubage 7" a pour but principal de protéger les réservoirs du trias afin d'accéder ensuite ; lors de la phase suivante ; aux formations réservoirs ciblées par le forage.

ii. Problèmes potentiels

- La cote de pose du tubage qui doit être au top du réservoir (GRES DE OURGLA) et très critique, car un forage au-delà du TRIAS argileux gréseux inférieur (3602m) peut provoquer un kick pendant le forage : Nous devons nous assurer de l'utilisation du trip tank pendant les manœuvres et constamment vérifier le volume du puits. Aussi il est nécessaire de préparer le matériel de surface pour la détection et l'évacuation de gaz

iii. Stratigraphie**Trias Argileux : (3323- 3408m)**

Argile gris-vert à verte et brune à brun-rouge, silteuse, localement Anhydritique, tendre à indurée avec fines passées de grès blanc très fin à fin, silico-argileux moyennement consolidée à friable

Trias (T.A.G.S) :(3408- 3487m)

Alternances d'argile brun-rouge, silteuse a fortement silteuse, tendre à indurée, de roches éruptives gris-sombre, gris-brun et gris-verdâtre altérées, compactes, dures avec fines passées de grès blanc, très fin à fin, silico-argileux à siliceux, compact, dur. Présence de veinules de calcite blanche, cristalline.

Trias Carbonaté :(3487- 3545m)

Argile brun-rouge et gris-verdâtre, fortement silteuse, localement dolomitique, tendre à indurée, avec passées de grès blanc, très fin à fin, siliceux, et brun-rouge, argileux, moyennement dur à friable. Au sommet niveaux de calcaire dolomitique blanc, microcristallin, compact, dur, par endroits dolomie calcaire beige microcristalline, dure.

Trias (T.A.G.I) :(3545- 3602m)

Roches éruptives brunâtres et gris-verdâtre, localement altérées, avec passées d'Argile brun-rouge, tendre à indurée, silteuse. Traces de calcite, à l'Est du côté du gisement d'el Assel le T.A.G.I une tendance plus Gréseuse avec des intercalations d'Argiles riche en Kaolinite et de Grés.

e. 5^{ème} Phase (3602m à 4000m)**i. Objectifs**

Le principal objectif est de poser et de cimenter le liner 4^{1/2} afin de couvrir les zones réservoir et de pouvoir les évaluées. Sans oublier des carottages aux niveaux des Quartzites de Hamra et du Cambrien Ri

ii. Problèmes potentiels

- La pression exercée par la boue peut ne pas suffire pour contrebalancer la pression du réservoir il faut préparer les équipements de détection et de séparation de gaz, et s'assurer de la bonne utilisation du trip tank lors des manœuvres
- Collage et coincement des pipes ou des outils de Logging spécialement en face des formations traversées. Il faut vérifier que la garniture est libre tous les 3 mètres forés en face des QH, et jeter un œil sur la taille et forme des cuttings au niveau des tamis.

iii. Stratigraphie

Paléozoïque

Ordovicien (3602- 3788 m)

Grès d'Ourgla :(3602- 3612 m)

Grès avec litage entrecroisées blanc, gris blanc à beige, avec des grains moyens à fins ; les grains sont arrondis à anguleux, avec un ciment silico-argileux, avec des intercalations d'argiles, silteuse, micacé, on note toutefois la présence de pyrite & de quelques Tigillites à la base.

Quartzites de Hamra :(3612- 3677m)

Grès gris-blanc, fin à moyen, siliceux à silico-quartzitique, passant à quartzite dur, avec fines passées d'Argile gris-verdâtre, silteuse, indurée.

Grès d'El Atchane :(3677- 3714 m)

Grès gris-blanc, fin à moyen, silico-argileux, moyennement dur, avec passées d'Argile noire, tendre, silteuse.

Argiles d'El Gassi :(3714- 3788 m)

Argile grise, gris-foncé, silteuse, finement micacée, indurée et feuilletée avec rares fines passées de Siltstone gris-clair à gris-verdâtre, compact, dur. Traces de grès blanc, très fin, siliceux, moyennement consolidé.

Cambrien: (3788- 4000 m)

Zone des Alternances :(3788- 3826 m)

Grès blanc, fin à moyen, parfois grossier, sub-anguleux à sub-arrondi, bien classé, siliceux à silico-quartzitique, compact, dur et rares films d'argile gris-noir à noire silteuse, micacée et indurée.

Cambrien Ri :(3826- 3880 m)

Grès blanc, fin à moyen, parfois grossier, sub-anguleux à sub-arrondi, bien classé, siliceux à silico-quartzitique, compact, dur et rares films d'argile gris-noir à noire silteuse, micacée et indurée.

Cambrian Ra :(3880- 4000 m) « TD Final »

Grès blanc, fin à moyen et grossier, anisométrique, sub-arrondi à arrondi, silico-quartzitique à quartzitique, compact, dur.

4. Piège

Le forage Hamzaoui- 1, est implanté sur la structure fermée contre faille, délimité par un réseau de failles NE-SW (**Figure 2**).

Cette structure est définie comme un piège de type structural. Elle présente une structuration similaire à celles des gisements connu dans le périmètre Hassi Toumiet à savoir ; une structuration hercynienne avec une composante mésozoïque (Autrichienne) de moindre importance.

Le top du réservoir Quartzites de Hamra à HMZA -1, se situerait à -3427 m, soit 306 m plus haut qu'au niveau du puits voisin RSH-2 (-3733m).

Par rapport aux puits SMDR-1 & AKRS-1, la discordance hercynienne sera respectivement plus basse de 215 m et 331 m.

La figure suivante représente une coupe géologique qui illustre le piégeage et les différents positionnements des réservoirs entre les puits.

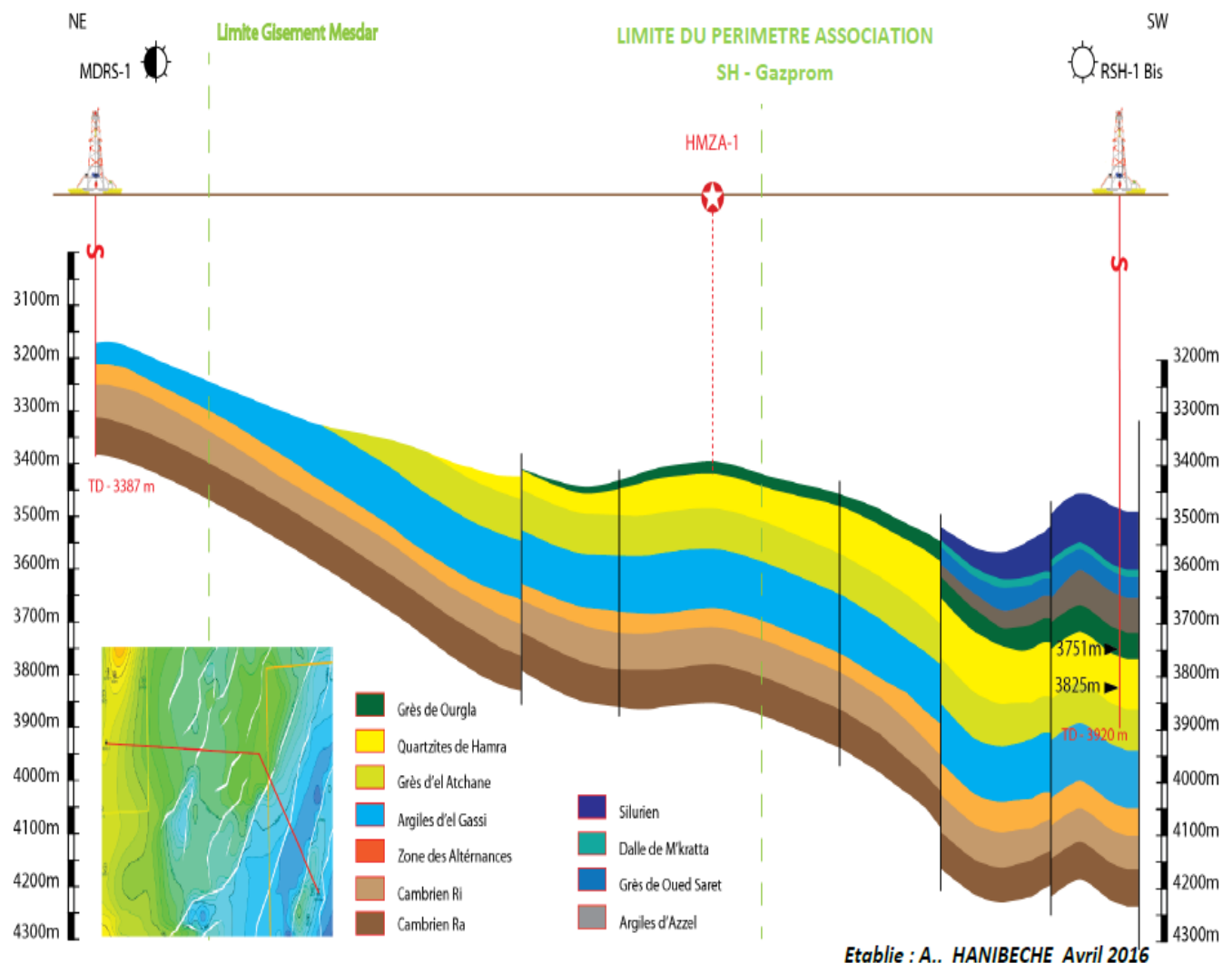


Figure 2:Representation d'une Coupe géologique entre les forages HMZA-1; MDRS-1;RSH-1 Bis [1]

5. Evolution structural

La structure est déterminée comme étant un pli de compression lié à deux failles inverses, qui se croise avec une faille normal déjà préexistante.

Cette structure a été formée durant trois stades de déformation :

- Extension Triasique à Liasique entraînant des déformations et failles normales, ayant des effets significatives
- Un écoulement jurassique moyen du sel Liasique, entraînant des structures à faibles amplitudes dans cet compartiment
- Une compression Autrichienne (Créaticienne) résultant en une déformation de propagation des failles et du pli dans le sous-sol.

6. Les réservoirs

Le réservoir Quartzites de Hamra constitue l'objectif principal du forage HMZA-1.

Ce dernier est situé dans une zone où l'épaisseur des quartzites de Hamra sera d'environ 65 m. **(Figure 3).**

Lithologie du réservoir Quartzites de Hamra

Ce sont des grès quartzitiques à quartzites, blanches à beige clair, d'origine marin côtier (dépôt de shore face). Ils sont généralement massifs, compacts et durs, admettant de fines passées d'argile noire silteuse et micacée. Présence de Tigillites et de skolithos et de fissures sub-verticales à sub - horizontales semi ouvertes à fermées.

La figure ci-dessous montre l'épaisseur totale du réservoir (Quartzites de Hamra) qui est d'environ 65 m, pour une épaisseur utile de 25 m en moyenne.

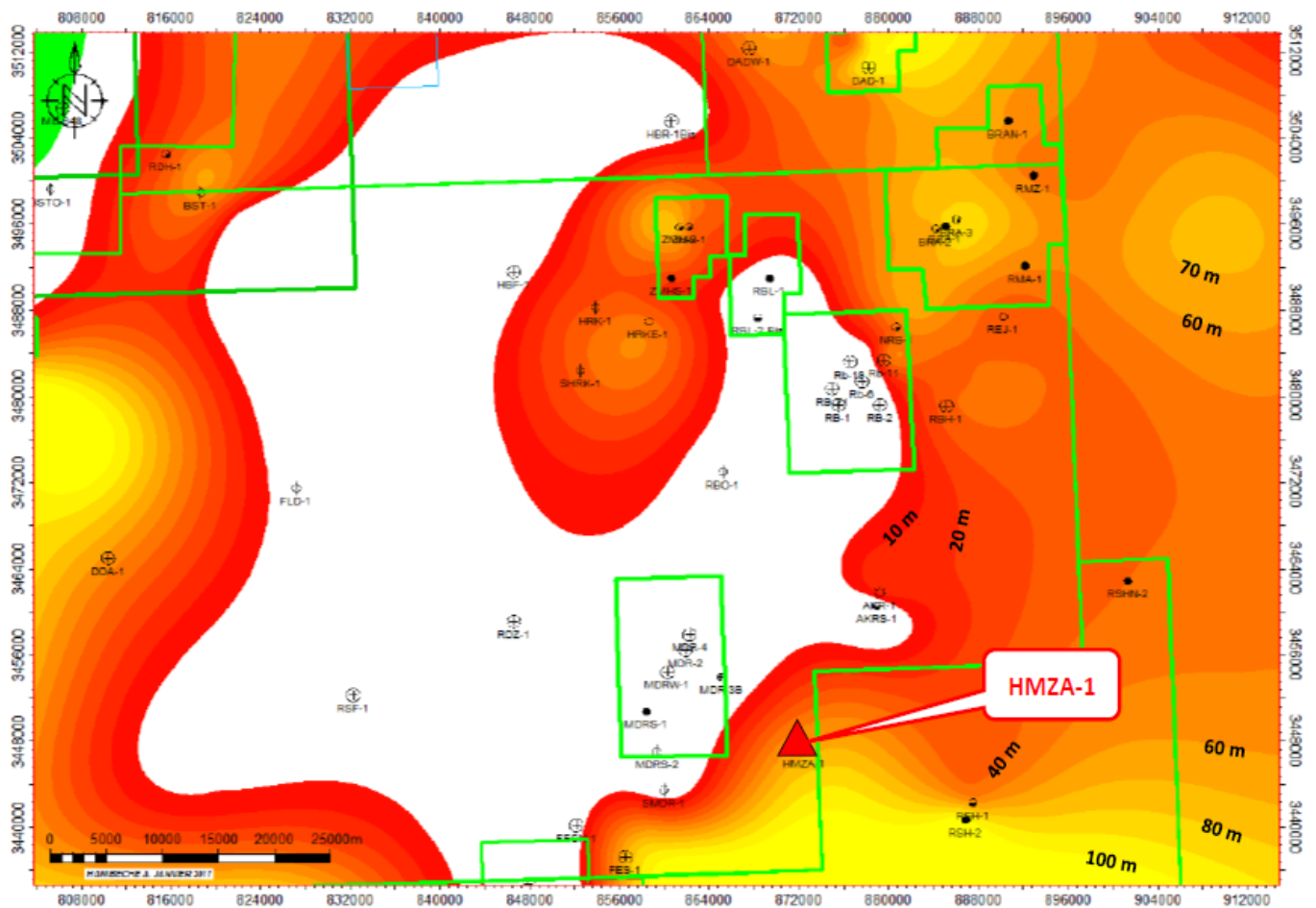


Figure 3: Carte en Isopaque des Quartzites de Hamra (IC=10m) [1]

D. Aspect pétrolier

Le réservoir Ordovicien (Quartzites de Hamra) est productif d'huile dans le gisement d'el Assel, avec des débits d'huile variables.

Ils présentent généralement une fissuration horizontale et sub-verticale, une porosité matricielle moyenne de l'ordre de 5 à 7% et une saturation moyenne en eau de 20-35%.

Chapitre II: Introduction au Phénomène du Microannulus

Introduction

Chaque section d'un puits d'hydrocarbures est tubée puis cimentée avant d'aller plus profondément dans notre opération de forage, si les tests de cimentation de la phase ne sont pas satisfaisants, une réparation s'impose afin de poursuivre les phases suivantes dans de bonnes conditions de sécurité. Le casing ou tubage mis en place offre une protection contre l'éclatement et l'écrasement tandis que la masse de ciment introduite dans le puits permet de l'isoler des fluides et pressions des formations. La qualité du ciment nécessaire pour l'isolation varie et dépend des pressions des formations et la qualité de cimentation requise. Cette dernière est jugée, selon la faculté du ciment pompé à éliminer la formation de canaux de fluide de forage ou de gaz à travers le ciment et sa capacité aussi à adhérer au casing et aux formations.

A. L'importance de la cimentation

La cimentation est une opération très importante durant la vie d'un puits, depuis sa construction à son exploitation, c'est la seule méthode qui permet de protéger le puits et continuer le forage en toute sécurité. L'importance de la cimentation ne se limite pas seulement à cela, mais elle assure aussi bien d'autres fonctions comme :

1. Assurer l'intégrité mécanique du puits durant le forage

Lors du forage, parmi les problèmes les plus importants que nous rencontrons, nous avons les pertes totales qui se manifestent lors de la fracturation des formations fragiles, c'est pour ça qu'il est nécessaire d'isoler ces formations fragiles.

L'isolation se fait à l'aide de la fixation du tubage par le ciment pour assurer l'intégrité mécanique des formations et mettre en place un support structural dans le puits.

2. Isolation et protection des réservoirs

Lors du passage ; à travers plusieurs couches réservoirs productrices durant le forage ; chaque une contient des fluides avec des caractéristiques spécifiques. D'un côté la filtration de la partie liquide de la boue dans ces couches peut les endommager ; et d'un autre côté il existe le risque de mélange des fluides de différentes caractéristiques.

La cimentation nous aidera à faire une sélection du fluide produit et ainsi nous éviter une production mixte indésirable.

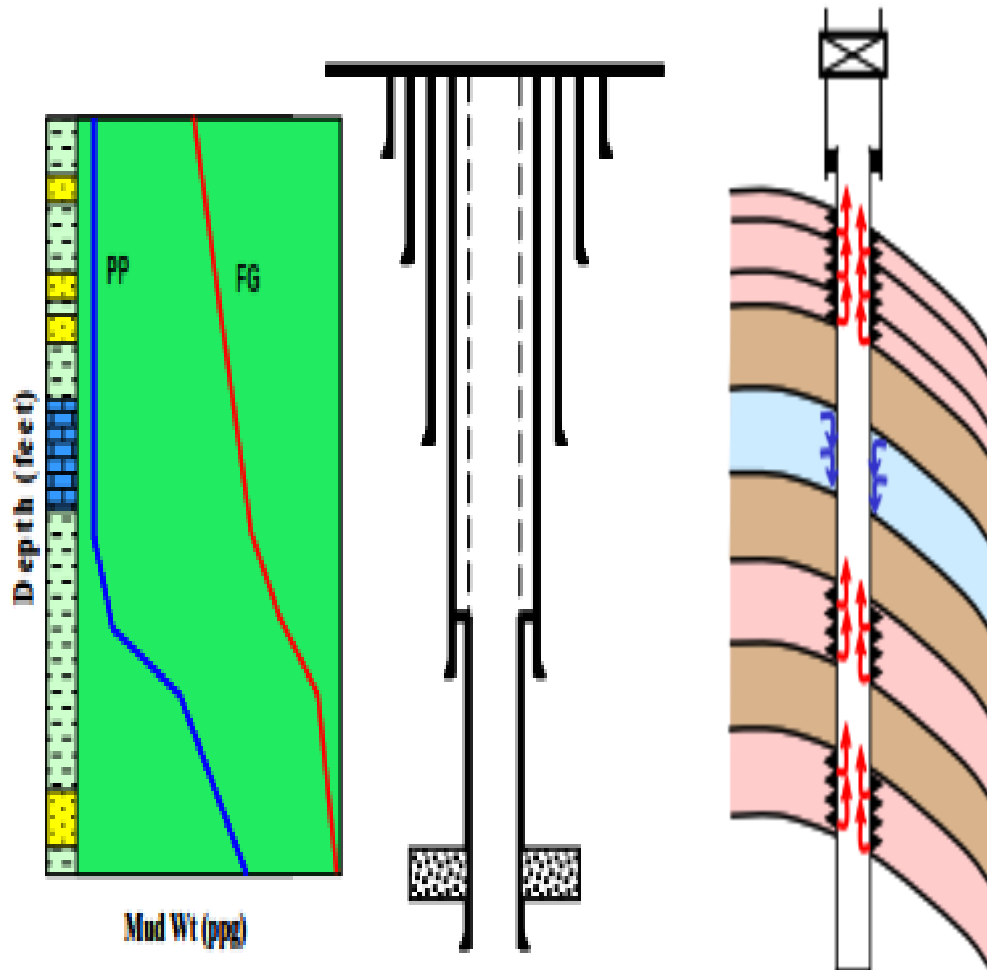


Figure 4: Représentation des différentes structures des couches productrice [22]

3. Optimisation de la production

Lors de la production ; la présence de sable et de sel dans le réservoir forme une entrave qui diminue "le débit de production" ; c'est pour cela, avant l'opération de production, la cimentation du liner nous permettra l'optimisation et la stimulation du traitement de l'huile produite.

4. Prévention contre le flux des fluides de formation vers la surface

MMS a identifié l'existence de 19 incidents de flux de fluide de formation vers la surface entre 2000 et 2002 à cause de la mauvaise intégrité de ciment dans le puits, la non-étanchéité des couches-ciment ou ciment tubage ou l'intrusion de la boue du forage dans le ciment engendre une perméabilité dans le ciment, cette dernière permet au fluide de formation à se débiter vers la surface, une bonne cimentation nous assure le contrôle de fluide en place.

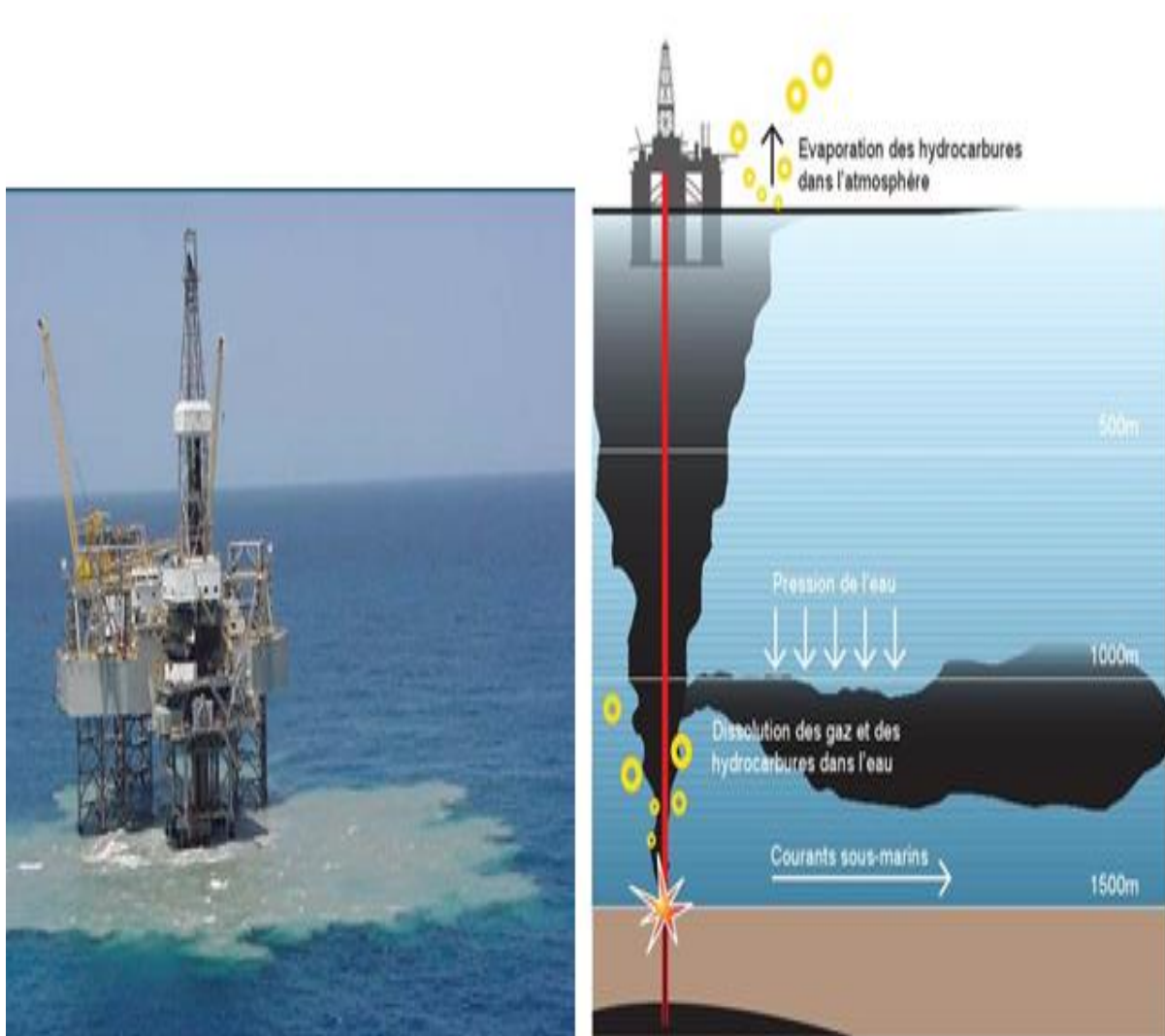


Figure 5 illustration d'une conséquence d'éruption de fluide en surface suite à une mauvaise cimentation [22]

5. Protéger le tubage contre les pressions de formation

De 20 jusqu'au 30 % des puits pétroliers sont estimés comme ayant des problèmes de pression annulaire, les collapses appliquées par la formation peuvent causer l'écrasement du tubage qui à son tour peut causer le coincement de la garniture descendue afin de forer la section suivante, une bonne cimentation protège le tubage des pressions des fluides de formation

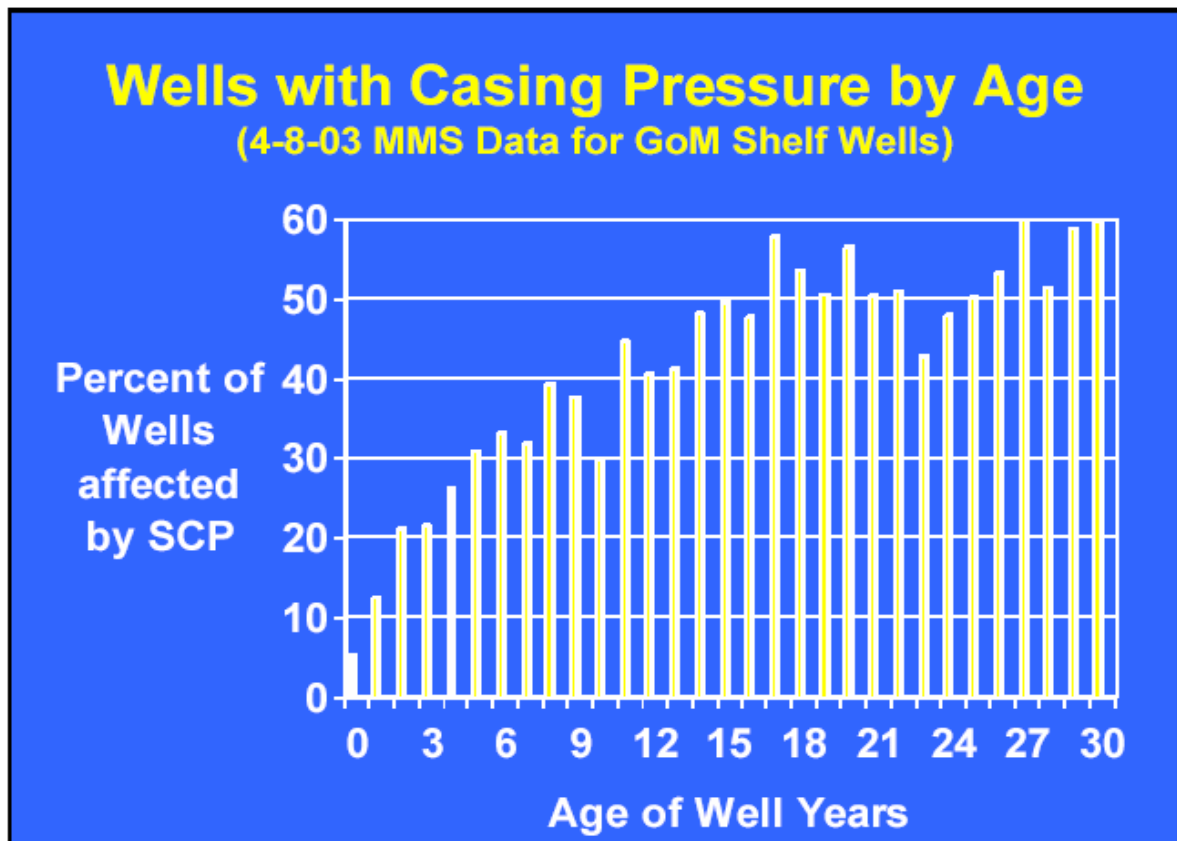


Figure 6: Pourcentage du nombre de puits enregistrant une pression en annulaire avec le temps [22]

B. Théorie de migration du gaz à travers le ciment

Le terme migration de gaz est très souvent cité sans pour autant connaître la vraie nature de ce mécanisme. Durant toute la vie du puits ; depuis sa construction à son abandon et même après ; la possibilité de migration de gaz reste présente. De ce fait plusieurs chercheurs ont essayé de comprendre et d'expliquer le mécanisme chacun de son point de vue.

1. Théorie de Migration de gaz

La migration du gaz est l'un des problèmes majeurs liés à la cimentation qui est principalement en relation avec la phase transitoire entre l'état liquide du ciment et son état solide.

Pendant la mise en place du ciment et tout au long de son état liquide, la pression hydrostatique de celui-ci est l'unique barrière empêchant le gaz de se trouver dans les formations et de s'introduire dans la colonne de ciment. Tant que cette pression reste supérieure à la pression des formations contenant le gaz, ce dernier restera emprisonné.

La faculté du ciment liquide à transmettre sa pression hydrostatique est en grande partie en fonction de sa capacité à se gélifier, c'est-à-dire plus cette capacité est faible plus la tendance à transmettre la pression hydrostatique est grande.

Pendant la prise du ciment, son état change depuis un état totalement liquide qui transmet parfaitement sa pression hydrostatique en un état gélifié avec une structure cohésive et avec de plus en plus de mal à transmettre la pression hydrostatique.

La pression hydrostatique du fluide primaire reste emprisonnée à l'intérieur des pores de la matrice qui est en train de durcir avec la prise de ciment, donc cette pression reste en fonction du volume d'eau contenue dans la matrice, c'est-à-dire que la variation de la pression du ciment sera proportionnelle à celle du volume d'eau emprisonné dans les pores

La variation du volume d'eau dans la matrice peut être expliquée par deux phénomènes :

-la prise de ciment

-la filtration d'eau dans les formations

En appliquant la formule empirique suivante, un petit calcul peut nous donner l'effet du gel sur la capacité du ciment à transmettre la pression hydrostatique.

$$\text{Pouvoir gélifiant transmettant l'état d'overbalance} = \frac{300 * (\text{OBP})}{(\text{Lc} // \text{Deff})}$$

Avec :

OBP = pression d'over balance (Psi)

Lc = longueur de la colonne du ciment

D_{eff} = diamètre effectif (in) ; et $D_{eff} = D_c - D_{OH}$

D_c = diamètre extérieur du casing (in)

D_{OH} = diamètre du puits(in)

Le gaz se trouvant dans les formations a tendance à y resté emprisonné tant que la pression hydrostatique transmise par le ciment est supérieure à celle des formations ; au cas contraire, il aura tendance à s'introduire dans le puits plus précisément dans l'espace annulaire entre formations et casing en empruntant des canaux perméables soit à travers le ciment ; liquide ou dans son état solide (par l'intermédiaire de fractures ou de micro fractures dans la matrice), où bien à travers le cake laissé par la boue de forage déplacée qui va constituer un excellent canal d'acheminement du gaz vers la surface.

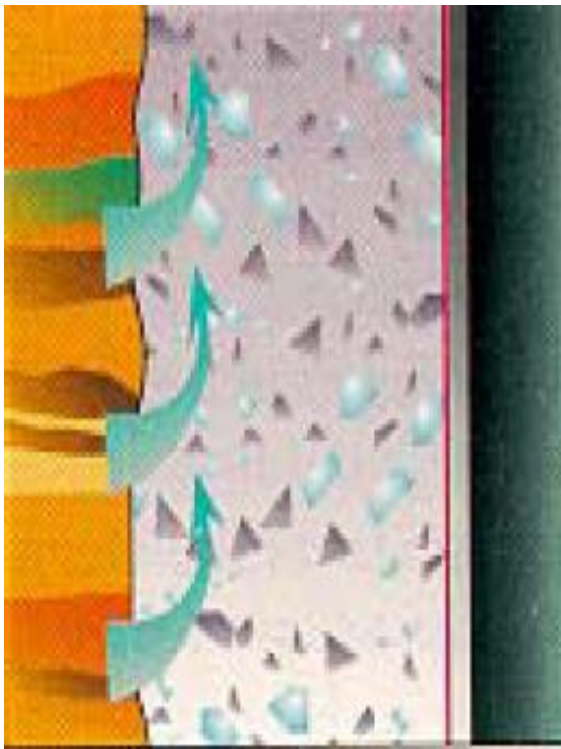


Figure 7: Intrusion de gaz dans le cas où la pression hydrostatique du ciment est insuffisante [18]



Figure 8: Intrusion de gaz à travers les fissures de la matrice après prise [18]

2. Précautions

- Selon les normes API une perte de liquide (fluid-loss) inférieure à 50ml/30mn est nécessaire pour un bon contrôle de la migration du gaz.
- Il faut aussi tenir compte du temps nécessaire au développement des contraintes de cisaillement suffisantes
- Bien étudier le déplacement du ciment et de la boue précédemment présente dans le puits.
- Déterminer le ratio du pouvoir gélifiant du ciment

La migration du gaz aura certainement des effets néfastes sur la qualité du ciment, donc elle entraînera des cas de différents degrés de gravité de mauvaise cimentation, ce qui affectera certainement la qualité et la durée de vie du puits foré.

C. Théorie du comportement du ciment

L'étude du comportement du ciment durant la cimentation consiste à observer les différents phénomènes physico-chimiques et microscopiques qui agissent sur les particules du ciment pendant les trois états majeurs qui les subit durant sa transformation dans le puits : son mouillage, sa prise et son durcissement

Certaines définitions sont à prendre en compte afin de mieux assimiler l'étude du comportement du ciment durant son évolution dans un puits pétrolier.

1. Notions sur les propriétés du ciment

La résistance statique du gel : c'est la rigidité de la matrice pour résister aux forces appliquées sur le ciment en son état gélifié.

La résistance critique du gel : c'est la résistance maximale du gel à partir de laquelle on commence à avoir une réduction dans le volume de la colonne hydrostatique du gel.

La résistance à la compression : c'est la résistance mécanique maximale à l'écrasement du ciment conservé en température donnée et sous une compression maximale de 207 bar, pendant une durée variable (8 heures, 24 heures, 7 jours, 6 mois).

Temps zéro du gel : c'est le temps nécessaire pour que le gel atteigne sa résistance critique.

Temps de transition : c'est le temps nécessaire pour que la résistance du ciment atteigne 500 lb/ft² à mesurer à partir du temps zéro du gel.

Temps de prise de ciment : c'est le temps nécessaire pour que le ciment durcisse complètement (la résistance atteint 500lb/ft²), la mesure du temps de prise s'effectue à l'aide de l'aiguille de Vika

Temps de pompabilité : C'est le temps consommé par le laitier, maintenu en agitation sous conditions de pression et de température, pour atteindre une consistance de 100 Uc*. Pratiquement, il correspond à la durée pendant laquelle le laitier reste pompable. à mesurer à partir du début de mixage. Dans certain cas on le prend comme 40% de temps de prise

Uc* : unité de consistance correspondante approximativement a une viscosité de 1 poise

La mesure du temps de pompabilité s'effectue à l'aide du consistomètre.

L'eau libre : C'est le volume d'eau surnageant au-dessus du laitier après un certain temps de repos. La mesure se fait dans une éprouvette de 250 ml de laitier, après 2 heures de repos. Le résultat est exprimé soit en cc, soit en pourcentage (1 cc correspondant à 0,4 %).

Pour bien expliquer la notion du laitier de ciment il faut savoir que le laitier de ciment est une suspension aqueuse de particules fines solides avec certains paramètres et caractéristiques, donc pour faciliter le travail il faut définir quelques paramètres du laitier de ciment.

La densité :

La densité du laitier peut être calculée très simplement à partir de la densité de poudre de ciment, de celle de l'eau de gâchage, et de celles des différents additifs entrant dans la composition du laitier, la mesure de densité ayant une grande importance, car c'est elle qui permet de connaître le rapport E/C qui a une grande importance pour surveiller l'influence de température et de pression sur le ciment à cause de l'effet de bullage.

$$d_L = \frac{M_c + V_e \cdot d_e + \sum M_{ad}}{\frac{M_c}{d_c} + V_e + \sum V_{ad}}$$

M : masse (kg)

e : eau

V : volume(l)

ad : aditifs

c : ciment

d : densité

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

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

Le rendement :

C'est le volume de laitier obtenu par tonne de ciment, il se calcule simplement par la formule

$$R = 1000 \times \frac{\frac{M_c}{d_c} + V_e + \sum V_{ad}}{M_c} \quad \text{Exprimé en l/t}$$

NB : tous produits, autres que le ciment, est considéré comme un additif même s'il apparaît en grande quantité (farine de silice, allégeant, ...)

Le filtrat :

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

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

$$F_{30} = F_t \sqrt{\frac{30}{t}}$$

Avec :

F_{30} : filtrat 30 min

F_t : filtrat obtenu au temps t

t : temps de l'essai

2. Les facteurs influents sur le ciment et la cimentation**a. La durabilité :**

La réussite de l'opération de la cimentation se base essentiellement sur la qualité de ciment et le premier paramètre qui explique la qualité c'est la durabilité de ciment

La durabilité de ciment est la capacité du ciment à ne pas déformer face à les contraintes agissant sur lui, elle est en fonction des autres paramètres qui sont la perméabilité du ciment et sa porosité

i. La perméabilité

La perméabilité intrinsèque ou absolue d'un matériau ou d'une matrice est l'aptitude de cette matrice à laisser circuler à travers ses pores un fluide dont elle est saturée. Elle peut être chiffrée grâce à la loi de Darcy, loi expérimentale.

Considérons un échantillon de longueur dx et de section A , saturé d'un liquide de viscosité dynamique μ , traversé horizontalement par un débit Q (mesuré dans les conditions de la tranche dx) ; en régime permanent, la pression amont est P , la pression aval est $P-dP$. L'étanchéité est faite sur les faces latérales. S'il n'y a pas de réaction du fluide avec la roche, ce qui est le cas général, on a (figure 3) :

$$Q = A \cdot \frac{k}{\mu} \cdot \frac{dP}{dx}$$

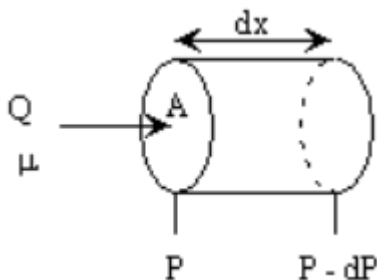


Figure 9: Schématisation de l'application de la loi de Darcy pour un liquide en écoulement linéaire [33]

Le coefficient k est dit coefficient de perméabilité. En première approximation, il est indépendant du fluide considéré. C'est la perméabilité absolue ou intrinsèque de l'échantillon dans la direction considérée.

Il existe une autre perméabilité qui tient en compte le types des fluides présentes dans la matrice, elle est appelée la perméabilité effective au fluide, Elles dépendent de la perméabilité spécifique au milieu et des proportions des fluides en présence

La formulation et les conditions de conservation du ciment durant son durcissement peuvent provoquer la formation des micro-canaux dans la matrice, ce qui procure à la matrice son aspect perméable

La perméabilité du ciment est très variable, elle peut aller de quelques centièmes de milli darcy à quelques milli darcy, cette perméabilité provoque le changement de la résistance à la compression de la matrice

Pour suivre les comportements du ciment dans le puits il faut suivre le déplacement du ciment à l'état viscoélastique par la boue de forage et la prise de ciment à l'état plastique ou solide

ii. La porosité

Considérons un échantillon de ciment dur. Son volume apparent, ou volume total V_T , est constitué d'un volume solide V_s et d'un volume de pores V_p . On appelle porosité ϕ :

$$\phi = \frac{V_{\text{pores}}}{V_{\text{Total}}} \quad \text{Exprimée en \% avec } V_{\text{total}} = V_{\text{solide}} + V_{\text{pore}}$$

Il existe deux types de porosité, une porosité qui explique que les pores sont connectés entre eux ; c'est la porosité utile ϕ_u , et une porosité résiduelle ϕ_r qui correspond aux pores non reliés entre eux.

On définit aussi la porosité totale ϕ_t , correspondant à tous les pores, reliés ou non entre eux

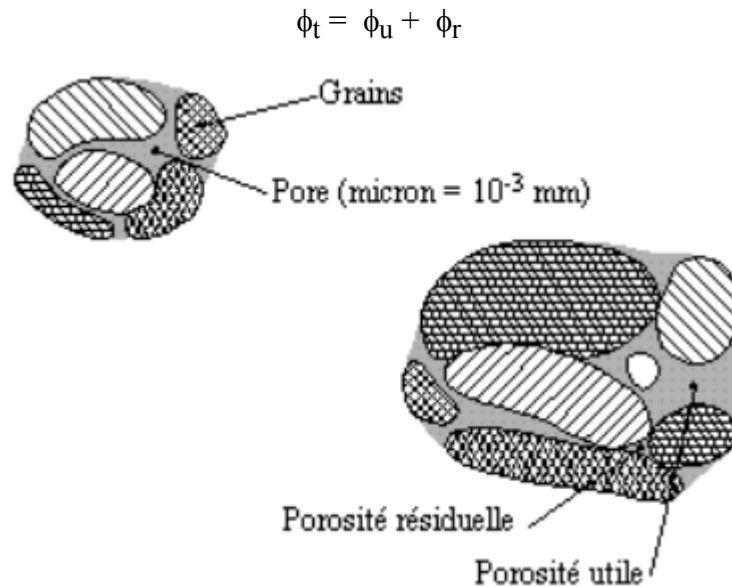


Figure 10: Schématisation d'un milieu poreux [33]

Ces pores contiennent généralement la boue de forage ou le gaz, ils sont formés à cause de l'intrusion de la boue et du gaz dans le laitier de ciment avant sa prise à cause du mauvais déplacement du laitier.

b. Le comportement du laitier de ciment durant son déplacement

Au cours du déplacement du laitier de ciment dans le puits, ce dernier n'atteint pas encore le temps de prise pour que le laitier de ciment devienne solide, donc le fluide a des caractéristiques rhéologiques qui décrivent son comportement, tout d'abord. Lorsqu'on parle de rhéologie d'un laitier de ciment, il faut toujours se rappeler que l'on a affaire à un ciment fortement chargé en solides. Par exemple, si on considère le cas classique d'un classé G, mixé à une densité de 1,90, on a en volume 42 % de solides.

Les modèles rhéologiques les plus utilisés pour un laitier de ciment sont le modèle de **BINGHAM** et le modèle **EN PUISSANCE**. En fait, le ciment pur ou avec des additifs viscosifiants se rapproche plus du modèle "en puissance". Mais avec des dispersants on se rapproche plus du modèle de Bingham.

Les dispersants sont des produits qui dispersent les grains de ciment en suspension dans l'eau, provoquant ainsi une fluidification du laitier de ciment. Leur mode d'action est voisin de celui des retardateurs, car ils enrobent les grains de ciment d'une fine pellicule chargée électriquement, ils sont utilisés pour réduire les pertes de charges quand ils sont pompés en régime turbulent, diminuer le rapport E/C ou encore accroître l'efficacité de certains réducteurs de filtrats.

Dans le modèle de Bingham, la rhéologie du ciment est représentée par le seuil de cisaillement τ_0 et par la viscosité V_p .

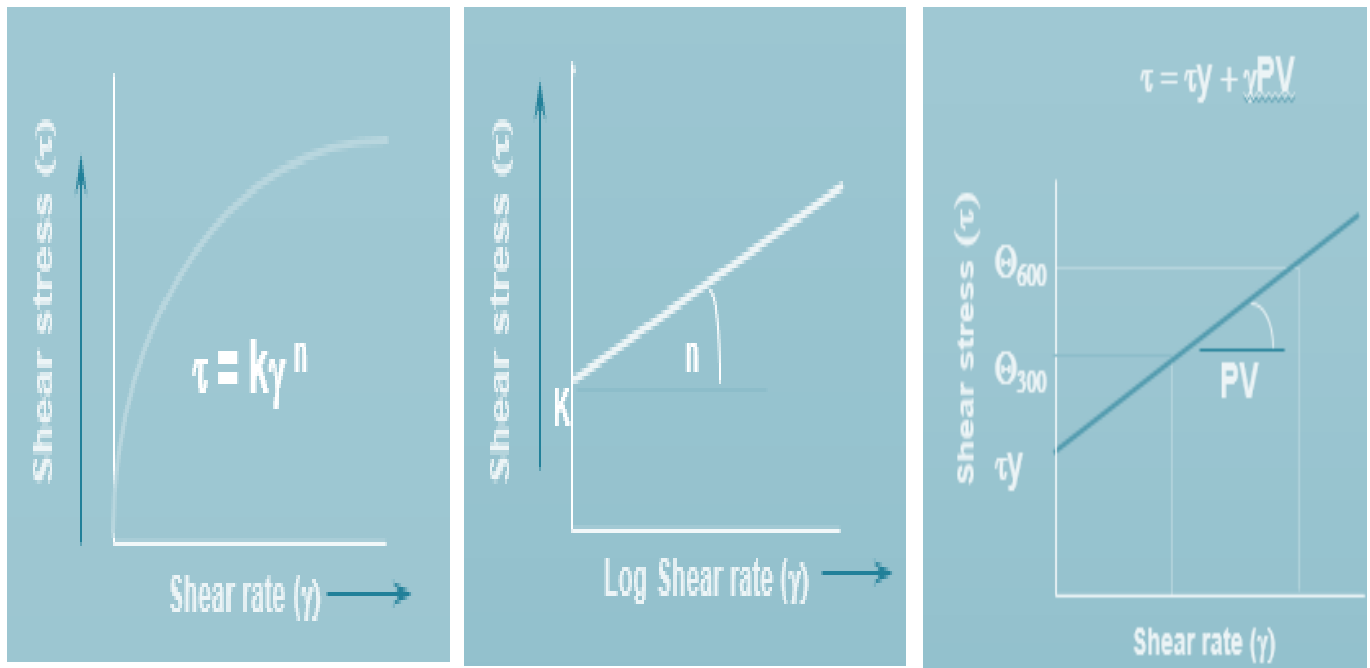


Figure 11: diagramme représentant la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de déformation pour les modèles En Puissance et de Bingham [6]

nous savons que le seuil de cisaillement τ_0 caractérise les liaisons inter-grains, il va donc être influencé par le nombre de particules par unité de volume. Le comportement rhéologique du laitier de ciment est celui d'une suspension aqueuse fortement chargée, sa structure à l'échelle microscopique peut être représentée par les schémas suivants :

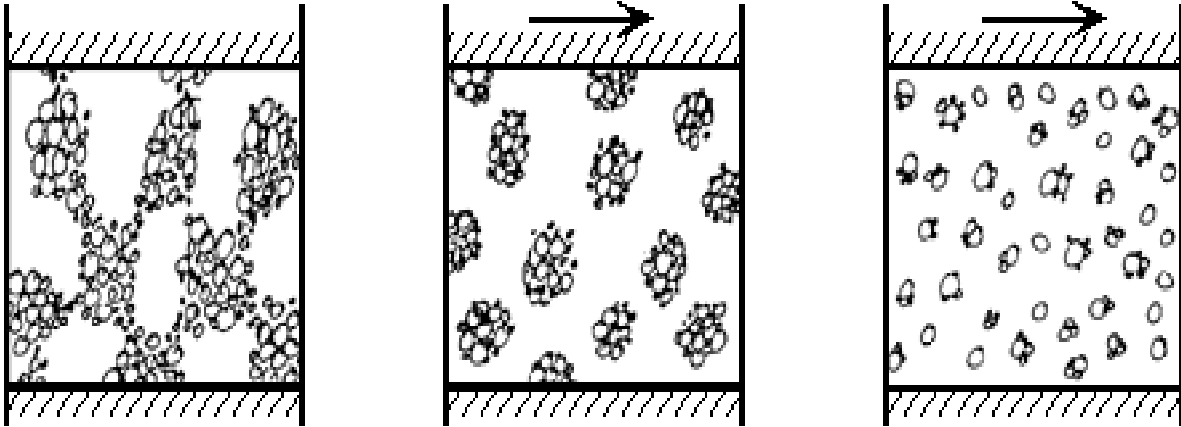


Figure 12: Représentation d'une structure microscopique d'un laitier de ciment [33]

Donc il est préférable que le laitier de ciment ait un comportement de fluide de Bingham pour faciliter le balayage avec des vitesses intermédiaires qui assurent une structure intermédiaire entre la 2ème et la 3ème structure, c'est pour ça il faut également préciser qu'habituellement lors des chasses de laitiers on se trouve à des vitesses Fann comprises entre 100 et 6 tr/min.

Pour bien expliquer le comportement du laitier de ciment il est obligatoire de citer les forces qui agissent sur le laitier durant son déplacement.

- Comme le fluide est à son état liquide, donc il existe une force de pression dynamique qui est due à la hiérarchie de la rhéologie du fluide d'un côté et au poids de la colonne du fluide d'un autre côté et qui augmente avec l'augmentation du débit d'injection de boue de chasse.
- La poussée d'Archimède aussi est une force appliquée sur le fluide de cimentation, elle est due au contact des deux fluides de densité différente.
- La troisième force appliquée est la force de résistance qui apparaît quand le laitier est dans l'espace annulaire, elle est due à la résistance du fluide au-dessus du laitier de ciment et elle dépend de ses caractéristiques rhéologiques et de la centralisation de tubage.

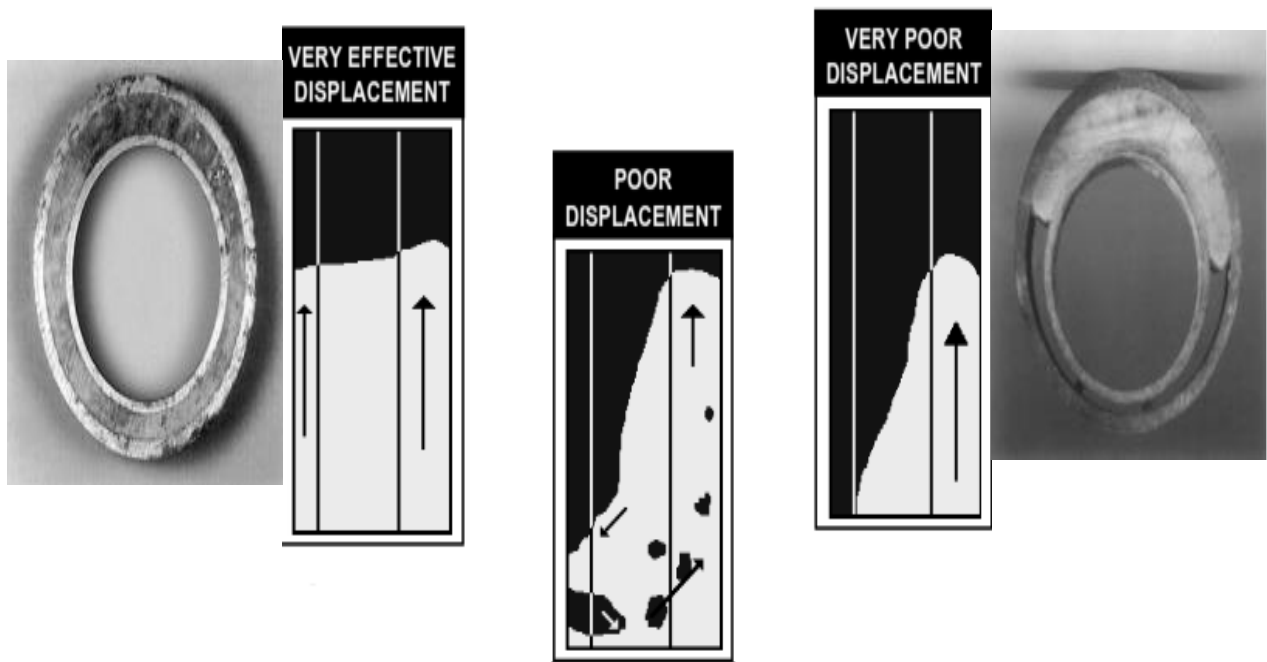


Figure 13: Illustration de différents cas de déplacement du ciment [22]

Donc pour avoir un meilleur déplacement du laitier de ciment dans l'espace annulaire il faut que la somme des forces motrices soit être supérieure à la somme des forces résistantes. Ou d'une autre façon il faut que :

$$\frac{\text{la force de pression} + \text{la poussée d'Archimède}}{\text{la force de résistance}} > 1$$

c. Le comportement du laitier de ciment durant sa prise

Durant sa prise, le laitier de ciment est sujet à différentes transformations pour qu'il soit un matériau solide, à son état initial, le laitier est totalement liquide avec des dispersions de grains de ciment dans le volume et une transmission hydrostatique inférieure à 100 lb/100 ft², à cause de sa thixotropie, le laitier commence à se gélifier donc, on aperçoit une diminution du volume à cause de la perte de fluide, à l'échelle microscopique les grains de ciment commencent à se rapprocher entre eux en créant une liaison entre les particules, le laitier se transforme en un gel statique d'une résistance variable avec le temps entre 100 lb/100 ft² et 500 lb/100 ft² donc il commence à avoir une certaine compressibilité, à 80% jusqu'à 90% de temps de prise, le laitier subit une déshydratation totale par l'extrusion de l'eau de gâchage. Donc le ciment se transforme en une matrice solide non déformable avec une augmentation rapide de sa résistance à la compression, le ciment contient encore certains volumes de pores, à 100% du

temps de prise le ciment devient totalement solide grâce au colmatage des pores sous l'effet des propriétés des additif, il devient alors plus résistant et non perméable.

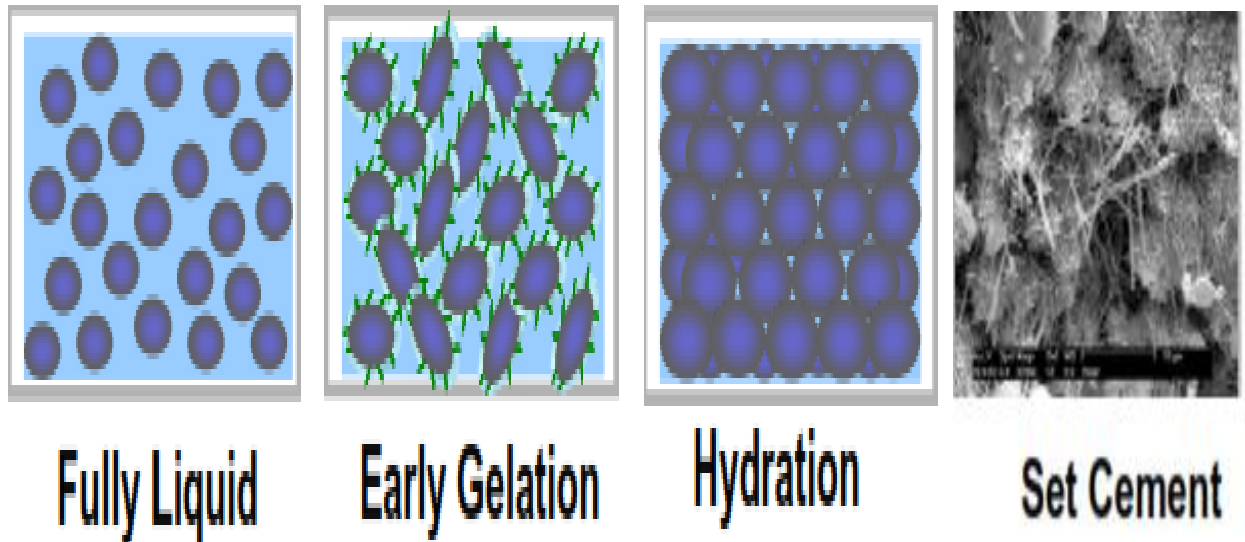


Figure 14: Les états par lesquelles passe le ciment [22]

3. Etat des contraintes agissantes sur le ciment [31]

Le ciment est soumis à des contraintes à toute profondeur, ces contraintes sont définies comme suit :

- **Une contrainte verticale principale σ_z** : elle est liée au poids des fluide sus-jacent, elle est obtenue par l'intégration de la densité des minéraux par la profondeur

$$\sigma_z = \sum_i \int_{z_i}^{z_{i+1}} \rho_i \cdot g \cdot dz$$

- **Deux contraintes horizontales principales σ_H et σ_h** : la première dite contrainte maximale et la seconde minimale

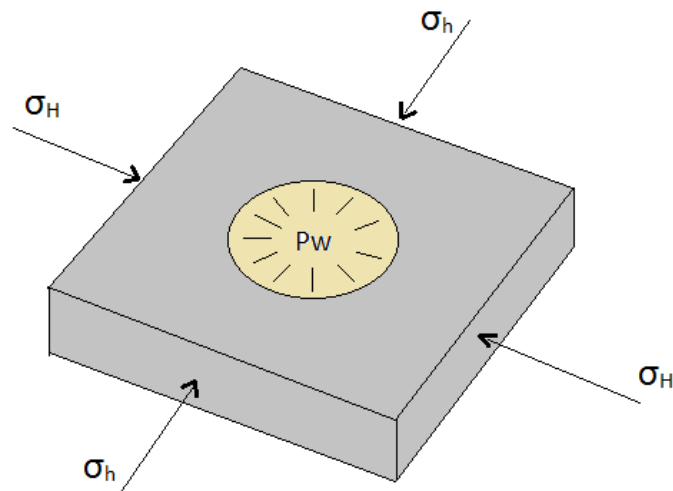


Figure 15: Disposition des contraintes sur un matériau solide

Dans le cas où on utilise les coordonnées cylindriques, les contraintes sont définies comme suit :

- **Une contrainte verticale principale σ_z** : elle est la même que celle du cas où les coordonnées cartésiennes.
- **Une contrainte radiale σ_r** : qui représente les pressions appliquées par le fluide de forage P_w
- **Une contrainte tangentielle σ_θ** : elle dépend de l'angle θ

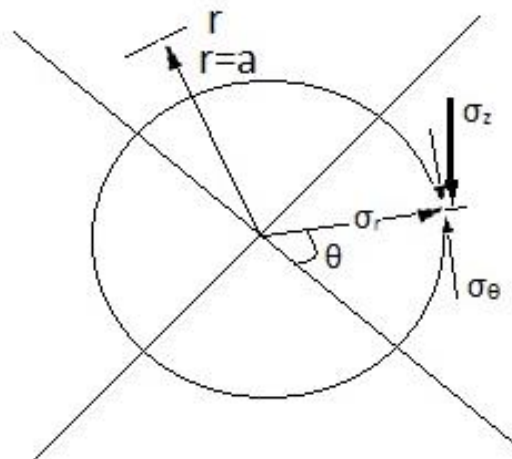


Figure 16: disposition des contraintes sur la gaine de ciment

Comme le ciment est un matériau solide donc il a une limite de rupture, pour étudier le modèle de rupture de ciment il faut utiliser le modèle de Mohr-Coulomb.

a. Modèle de Mohr-Coulomb

En 2 dimensions, les contraintes peuvent être estimées par le biais du cercle de Mohr, ceci est fait par la construction d'un cercle dont le diamètre est égal à la différence entre la contrainte maximale et minimale à la rupture, la ligne de rupture est décrite mathématiquement par la relation suivante :

$$\tau = \tau_0 + \sigma' \tan \varphi$$

Où φ est défini comme étant l'angle de friction interne de ciment.

Comme le ciment est un milieu où les ondes élastiques peuvent se propager, donc nous pouvons aussi y appliquer l'équation de Lamé.

b. Equation de Lamé

Connaissant le diamètre intérieur et l'épaisseur de la tuyauterie, le programme calcule la contrainte dans la tuyauterie pour une pression de fonctionnement donnée.

- Tube mince : $E = (P \cdot D) / 2t$
- Tube épais : $E = \frac{1}{2} D [(t+P) (t - P)]^{0.5}$

Avec :

E : Epaisseur du tube

P : Pression intérieure

T : Contrainte dans l'acier

D : diamètre intérieur du tube

D. Modélisation du comportement du ciment

Comme le tubage et la formation sont des matériaux élastiques, ils sont caractérisés par certains paramètres qui décrivent leurs comportements.

D'abord ils se distinguent par une certaine élasticité, donc lorsqu'ils sont soumis à des contraintes (σ) ils se déforment avec une déformation (ε), la Loi de **Hook** explique que la déformation dépend de la contrainte avec une constante qui est un paramètre qui décrit le comportement du tubage et de la formation c'est le module de Young E.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

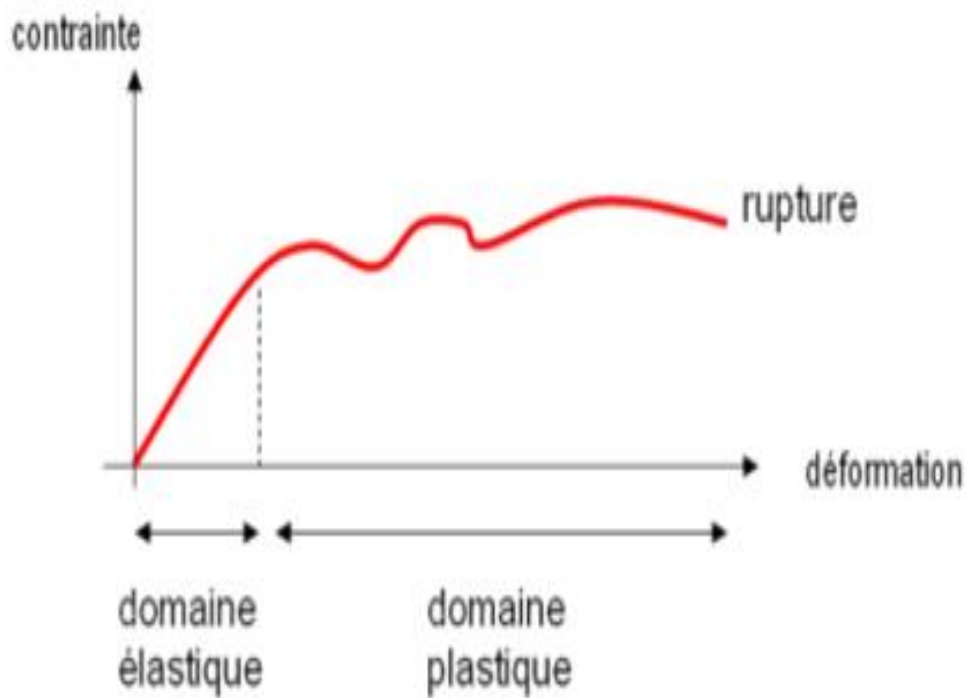


Figure 17: variation de la contrainte en fonction de la déformation dans les domaines plastique et élastique [33]

Il existe un autre paramètre qui décrit le comportement des matériaux élastiques lorsqu'ils sont soumis à des contraintes, c'est le coefficient de poisson ν , qui relie la déformation longitudinale ε avec la déformation transversale ε_t

$$\nu = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}$$

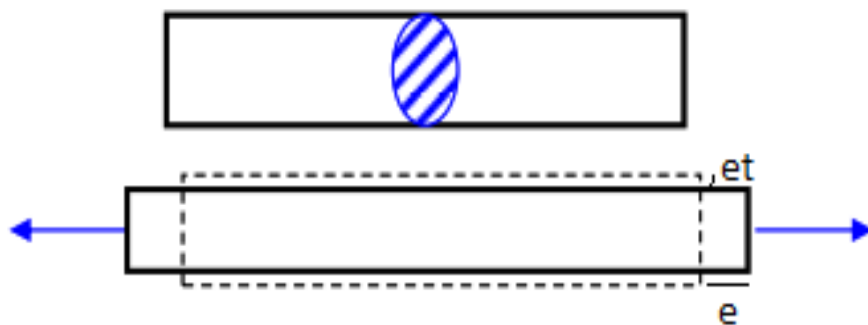


Figure 18: représentation de la relation entre les différentes déformations [33]

Par contre après sa prise ; le laitier de ciment devient un matériau élastoplastique, il contient différentes zones, une zone élastiques qui peut être décrite par les module de Young et coefficient de poisson, et une zone plastique, lorsque le tubage ou la formation exerce sur le ciment des forte contrainte, la déformation augmente jusqu'à atteindre la zone plastique ou le ciment ne reprend pas son état initial.

Pour bien expliquer ce comportement, nous allons illustrer ce phénomène avec un modèle mathématique, pour analyser les différentes contraintes et déformations appliqué sur le ciment.

Soit le système qui décrit le comportement de ciment dans la figure suivante

Avec, r_p : La position radiale du ciment entre la zone élastique et la zone plastique. Le ciment devient totalement plastique lorsqu'il est soumis à de fortes contraintes, dans ce cas $r_p = r_2$.

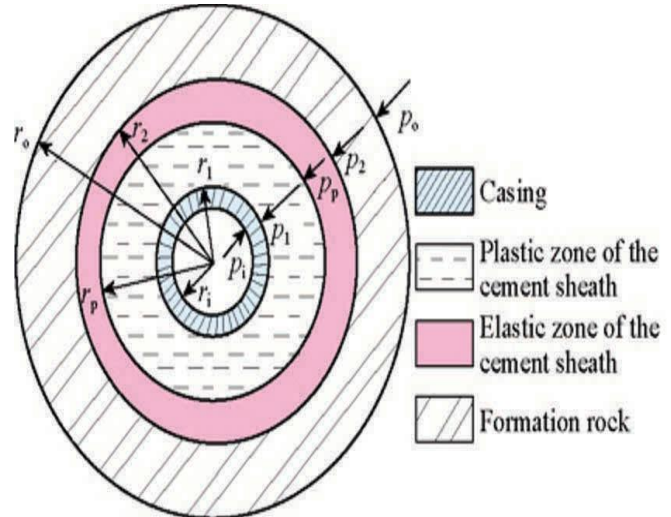


Figure 19: Système de contraintes agissant sur la matrice de ciment [29]

i. Le tubage

Comme le tubage est un matériau élastique quand il est soumis à des contraintes (p_i) due à la pression à l'intérieur de tubage et (p_1) due à la pression de la formation, la paroi extérieure du tubage se déplace avec un déplacement u_{so}

$$u_{so} = \frac{1 + \nu_1}{E_1} \frac{2(1 - \nu_1)r_i^2 r_1}{r_1^2 - r_i^2} p_i - \frac{1 + \nu_1}{E_1} \frac{r_i^2 r_1 + (1 - 2\nu_1)r_1^3}{r_1^2 - r_i^2} p_1 \quad (1)$$

Avec :

ν_1 : coefficient de poisson du tubage

E_1 : module de Young du tubage (psi)

ii. La zone plastique du ciment :

Le ciment dans sa zone plastique satisfait les conditions de critère de Mohr-Coulomb

$$\frac{1}{2} A(\sigma_\theta - \sigma_r) + \frac{1}{2} (\sigma_\theta + \sigma_r) \sin \varphi - C \cos \varphi = 0 \quad (2)$$

Avec :

A : paramètre qui distingue les contraintes principales maximale et minimale,

$$A = 1 \text{ si } \sigma_r < \sigma_\theta \text{ et } A = -1 \text{ si } \sigma_r \geq \sigma_\theta$$

σ_θ : contrainte circonférentielle (psi)

σ_r : contrainte radiale (psi)

φ : angle de friction interne de ciment (deg)

C : facteur de cohésion de ciment

Le ciment aussi satisfait l'équation d'équilibre des forces

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (3)$$

Aux conditions limites $\sigma_r = -p_1$ pour $r = r_1$, en combinant les équations (2) et (3)

$$\begin{cases} \sigma_r = C \cot \varphi \left[1 - \left(1 + \frac{p_1}{C \cot \varphi} \right) \left(\frac{r}{r_1} \right)^{B-1} \right] \\ \sigma_\theta = C \cot \varphi \left[1 - B \left(1 + \frac{p_1}{C \cot \varphi} \right) \left(\frac{r}{r_1} \right)^{B-1} \right] \end{cases} \quad (4)$$

Avec

$$B = \frac{A - \sin \varphi}{A + \sin \varphi}$$

Aux conditions limites $\sigma_r = -p_p$ pour $r = r_p$, l'équation (4) devient :

$$p_p = C \cot \varphi \left[\left(1 + \frac{p_1}{C \cot \varphi} \right) \left(\frac{r_p}{r_1} \right)^{B-1} - 1 \right] \quad (5)$$

En considérant que la déformation est plane et en négligeant la déformation axiale on aura :

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{E} (\sigma_\theta + \sigma_r) \quad (6)$$

Nous savons que la déformation est le déplacement sur la longueur donc :

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{du}{dr} \\ \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \end{cases} \quad (7)$$

En remplaçant (7) et (4) dans (6) en intégrant on aura le déplacement dans la zone plastique :

$$u_{cp} = \frac{(1 + v_2)(1 - 2v_2)C \cot \varphi}{E_2} \times \left[1 - \left(1 + \frac{p_1}{C \cot \varphi} \right) \left(\frac{r}{r_1} \right)^{B-1} \right] r + \frac{K}{r} \quad (8)$$

D'après cette formule le déplacement intérieur et extérieur de la zone plastique peut être calculé par les deux formules suivantes :

$$u_{cpi} = \frac{(1 + v_2)(1 - 2v_2)}{E_2} p_1 r_1 + \frac{k}{r} \quad (9)$$

$$u_{cpo} = \frac{(1 + v_2)(1 - 2v_2)C \cot \varphi}{E_2} \times \left[1 - \left(1 + \frac{p_1}{C \cot \varphi} \right) \left(\frac{r_p}{r_1} \right)^{B-1} \right] r_p + \frac{K}{r_p} \quad (10)$$

Avec :

v_2 : coefficient de poisson de la zone plastique du ciment

E_2 : module de Young de la zone plastique du ciment (psi)

K : constante liée à la formation

E. Méthodes de contrôle de la cimentation

Bien évidemment, il paraît évident qu'après avoir cimenté, la question que toute personne qui s'intéresse à obtenir un puits dans les meilleures conditions techniques et de sécurité, c'est comment peut-on tester l'intégrité et la qualité de notre ciment.

Pour cela nous devons suivre la méthode dites **The cement bonding evaluation**, selon la source de fréquence de la sonde, la méthode peut être divisée en deux autres méthodes, la sonique avec des fréquences de l'ordre de 20KHz et l'ultra-sonique avec des fréquences de l'ordre de 100KHz.

1. Principes des méthodes

a. La méthode sonique

La méthode sonique proposée en 1963 par PARDUE est une méthode qualitative ou semi-quantitative, les ondes sonique avec une fréquence d'environ 20KHz sont émises et leurs atténuation est ensuite mesurée tout au long du puits avec des récepteurs espacés, l'atténuation de ces ondes provient principalement des continuités ou discontinuité des milieux parcourus derrière le casing, l'atténuation est en générale grande lorsque l'adhérence du ciment est bonne tandis qu'elle est faible dans le cas contraire.

Les outils sur lesquelles se base cette méthode sont le **Cement Bond Logging (CBL)** qui prend en considération le facteur d'atténuation émanant des premier retours d'amplitudes seulement, et le **Variable Density Logging (VDL)** qui utilise l'amplitude de toute l'onde émise

Comme il est illustré dans la figure ci-dessous deux dispositifs de mesure sont mis en place dans la sonde CBL/VDL avec émetteur ou transmetteur et des récepteurs à différents espacement 3 feet pour enregistrer les ondes au niveau du casing et 5 feet pour l'enregistrement global des ondes.

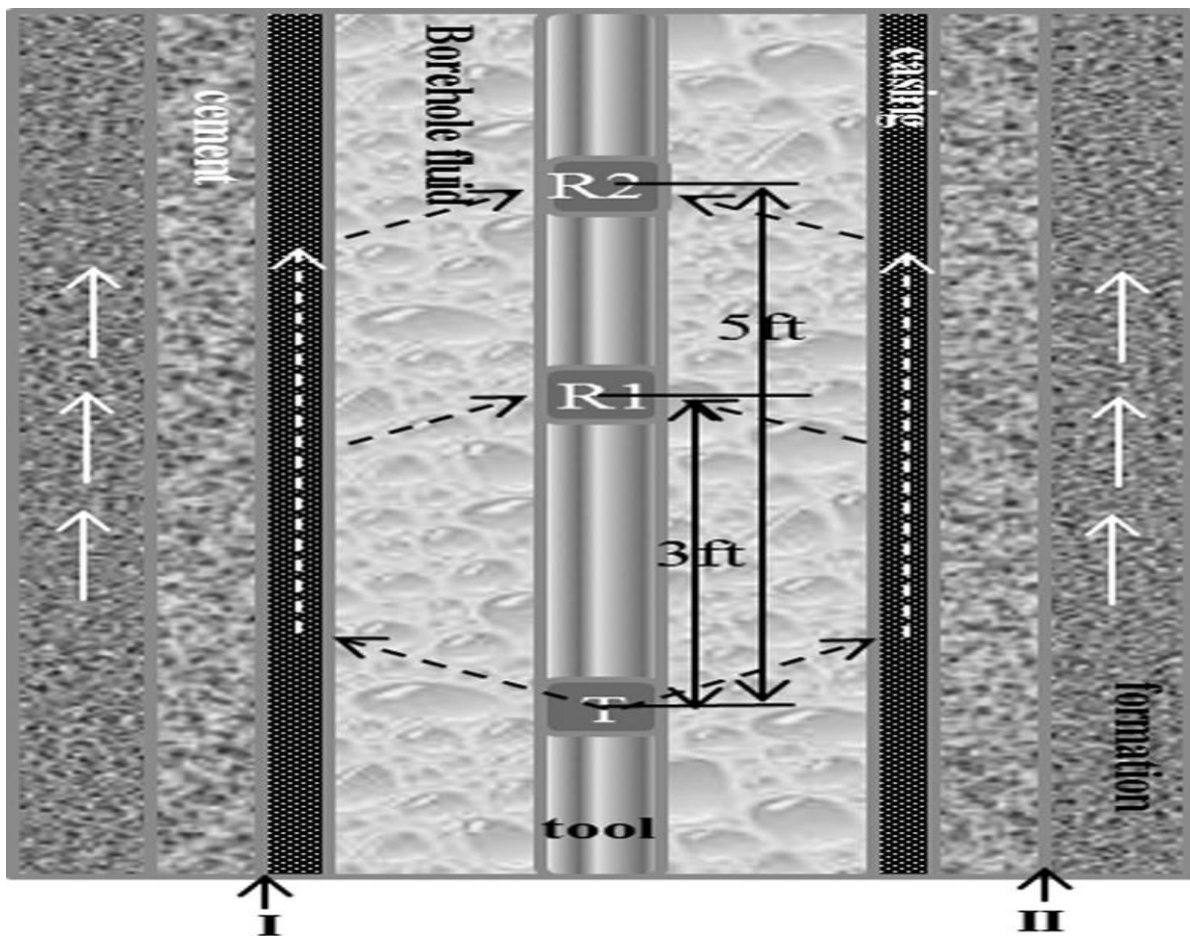


Figure 20: Schéma descriptif d'une sonde et dispositif de mesure CBL/VDL.[11]

Description du schéma :

La lettre T représente le transmetteur de l'onde acoustique tandis que R1 et R2 sont les récepteurs installés à 3 feet et 5 feet respectivement du transmetteur

Les milieux traversés par l'onde sont : la formation, le ciment, le casing le fluide de forage et l'outil lui-même.

Les indices I et II indiquent respectivement la zone d'adhérence ciment casing et ciment formation

Remarque :

La méthode sonique est de loin la plus utilisée mais elle présente quelques inconvénients et plusieurs paramètres peuvent influencer les résultats tel que :

- L'épaisseur du ciment : l'amplitude des ondes provenant du casing augmente quand l'épaisseur de la gaine du ciment derrière ce dernier est inférieure à 2cm peu importe la qualité de l'adhérence du ciment.) « Plusieurs travaux ont été fait dans ce sens par WALKER en 1968 ; JUTTEN et PARCEVAUX en 1987 »
- Les propriétés de la boue de forage : les bulles de gaz à l'intérieur du fluide de forage font chuter l'amplitude
- L'excentricité de la sonde : l'amplitude chute considérablement
- L'existence d'un micro espace annulaire : l'amplitude augmente

i. Cement Bond Logging (CBL)**• Principe du CBL**

Un train d'onde de fréquence variable entre 15 et 30 KHz selon les appareillages, est périodiquement généré par un émetteur.

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

Les vitesses des différentes ondes émises et créées lors des passages et des ondes successives d'un milieu à un autre sont fonction des caractéristiques physiques du milieu.

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

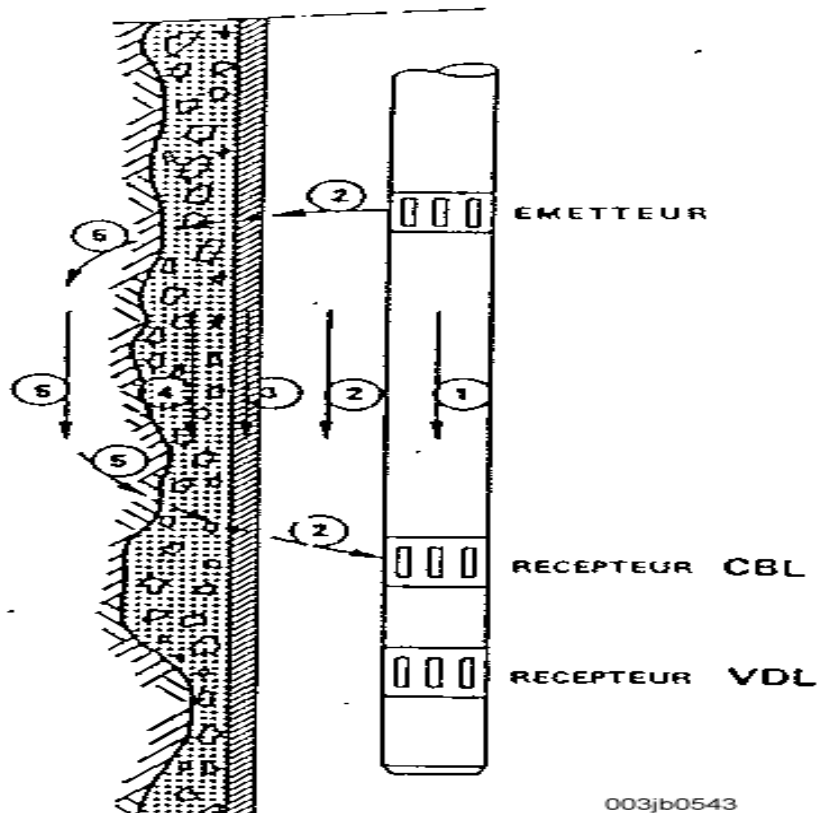


Figure 21: Chemin acoustique possible des ondes envoyées [11]

- Type d'enregistrement

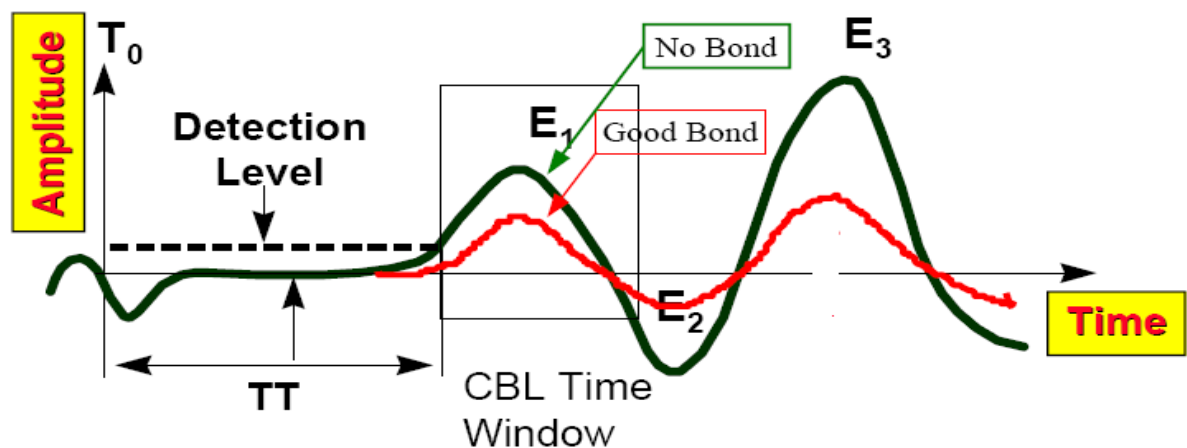


Figure 22: Enregistrement type d'un CBL[11]

La détection de la première arrivée se fait suivant le même principe que celui de la mesure du temps de propagation d'une onde acoustique dans une formation (outil sonique ou acoustique), par un seuil minimum d'énergie détectable (detection level ou le biais). L'amplitude de cette

première arrivée (généralement l'onde de tubage) est mesurée par positionnement d'une fenêtre.

-L'atténuation de l'amplitude dans une zone parfaitement cimentée est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Atténuation (db/pied)} = -\frac{20}{Z} \log_{10} \frac{A_{\max i}}{A_{\min i}}$$

Z : distance entre émetteur et récepteur (pieds)

$A_{\min i}$: amplitude minimum exprimée en millivolts

$A_{\max i}$: amplitude maximum exprimée en millivolts

-Dans le cas d'une zone mal cimenté, on introduit alors l'indice d'adhérence ou (BOND INDEX) BI qui représente la fraction de la circonférence du tubage en contact avec le ciment :

$$B.I. = \frac{\text{Atténuation dans la zone étudiée}}{\text{Atténuation dans une zone parfaitement cimentée}}$$

ii. Variable Density Logging

• Principe du VDL

En raison des différents phénomènes influent sur les résultats du CBL et en complément de ce dernier, le VDL enregistre l'ensemble du train d'ondes sonores reçues par un récepteur situé généralement à 5 pieds de l'émetteur et il permet de définir l'adhérence Ciment-Formation.

• Type d'enregistrement

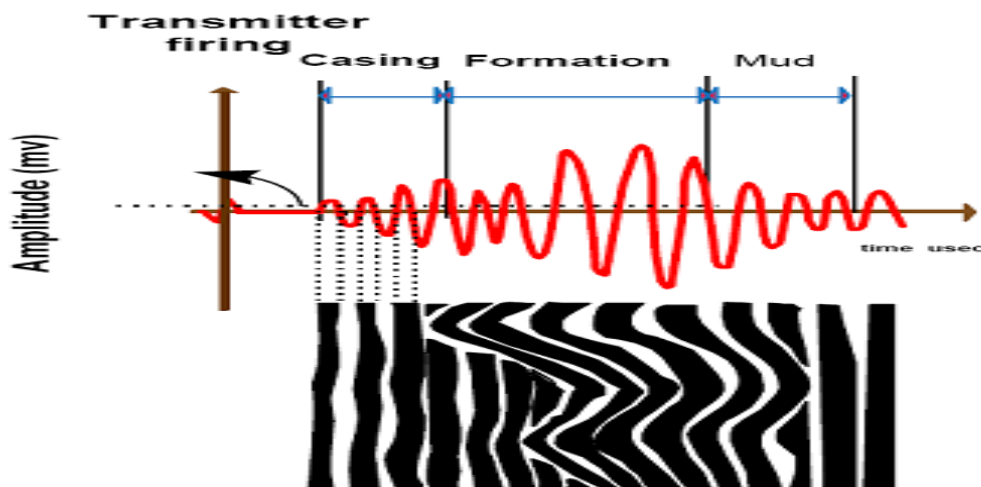


Figure 23: Enregistrement type d'un VDL. [11]

La représentation de cet enregistrement est sous forme de train d'onde complet ou nous n'utiliserons que sa partie positive qui sera reproduite en une échelle de gris d'autant plus foncés que l'amplitude est plus grande

b. La méthode ultrasonique

Cette méthode présentée par HAVIRA en 1979 a pu pallier le déficit de la méthode sonique dite traditionnelle

Dans cette méthode la continuité des milieux et leurs cisaillement sont insignifiant comparé à la méthode sonique qui veut dire par exemple que l'influence d'un micoannulaire est insignifiante comme la prouvé FROELICH en 1983 et la confirmé JUTTEN et HAYMAN en 1993.

Une pulsation ultrasonique est envoyée depuis la sonde avec une fréquence de 200KHz à 700KHz ce qui va provoquer la résonance du casing. Avec une grande résolution verticale et radiale, nous pouvons obtenir une image de la surface du casing grâce à des prises de mesure rotative.

Contrairement à la méthode sonique ou la détermination de l'adhérence est faite en mesurant l'amplitude, la méthode ultrasonique se base sur la variation de l'impédance et son contraste entre ciment et fluide qui doit être plus grande que 0,5 MRayl ($1 \text{ MRayl} = 1000 \text{ Kg/m}^2/\text{s}$).

Remarque :

La méthode ultrasonique bien qu'elle n'est pas les même contraintes que la sonique mais en même temps elle est considérablement limitée par une forte atténuation des ondes a grande fréquence lors de l'utilisation d'une boue de forage assez lourde

NB : l'impédance acoustique (Z) est définie comme étant le produit de la densité et de la vitesse acoustique. Dans le système métrique l'unité de mesure de l'impédance acoustique est le Mega Rayls.

F. Les différents cas de mauvaise cimentation

Nous avons abordé dans ce qui a précédé le comportement du ciment dans tous ces états et la théorie qui explique le comportement des fluides de formations, donc il paraît évident que différents phénomènes peuvent porter atteinte à la qualité de la cimentation, ce qui conduit à une multitude d'effets sur le ciment, et par la suite à l'apparition de différents cas et problèmes que nous allons aborder dans ce qui suit.

1. Effet channelling

Il existe plusieurs paramètres qui influent sur la cimentation et la rendent défectueuse, causant ainsi la perte de temps et d'argent, donc c'est important de distinguer ces paramètres et les types de cimentation défectueuse pour les éviter ou les minimiser.

Plusieurs études sont faites pour définir les types et les cas d'une mauvaise cimentation afin de comprendre et résoudre l'évaluation des modèles de ces cas et ces développements, parmi ces cas nous pouvons citer :

L'effet channelling :

Les approches que les scientifiques ont fait pour simuler le comportement du ciment après sa prise dans l'espace annulaire d'un puits pétrolier concluent que l'effet channelling est l'existence des canaux microscopiques qui aident à rendre le ciment perméable, cette perméabilité permet la propagation des hydrocarbures à la surface, et ce phénomène est très dangereux surtout dans le cas où l'hydrocarbure qui se propage est un gaz.

La principale raison qui aide à la création de ce phénomène est l'existence des films de boue dans le ciment lors de son déplacement à cause de la mauvaise centralisation du tubage ou le non-respect des paramètres de déplacement, il existe 3 types de l'effet channelling selon la forme et le type des canaux formés dans le ciment, on peut distinguer :

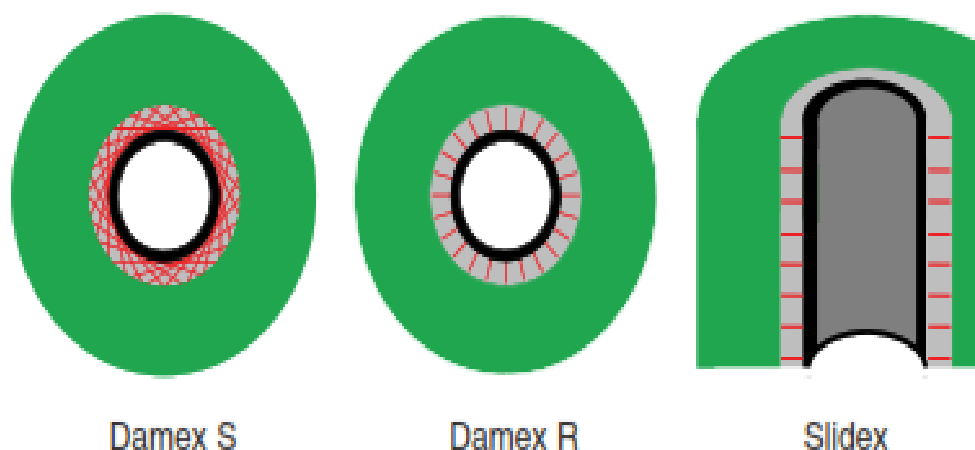


Figure 24: Types de Channeling existants [23]

- L'effet de channelling Slidex : il se caractérise par des canaux horizontaux dans le ciment
- L'effet de channelling Damex R : il se caractérise par des canaux verticaux dans le ciment
- L'effet de channeling Damex S : il se caractérise par des canaux de différentes directions dans le ciment

Il est à noter qu'une fois que le ciment ait durcis, il devient un solide totalement imperméable, dans ce cas la migration de gaz ne peut se faire qu'à travers des espaces ou des canaux dit inter faciaux entre le ciment et la formation, ou le ciment et le casing d'où l'introduction du **terme MICRO ANNULUS**

2. Le phénomène du Microannulus

Même dans le cas où le ciment ait été mis en place dans les meilleures conditions dans l'espace annulaire entre le casing et la formation et qu'il présente de bonnes caractéristiques hydrauliques au début, l'isolation de la zone peut être compromise dans le temps ; l'une des causes si ce n'est la plus importantes c'est ce que nous appelons le phénomène du Microannulus

a. Définition

Le phénomène appelé Microannulus est souvent expliqué par la variation du ciment lors de sa phase de durcissement et il se présente sous forme de micro espace annulaire créé suite au décollage du ciment une fois durcis des parois des formations (surtout dans le cas où le module de Young des formation est plus grand que celui du casing) et/ou de celles du casings auxquelles il est sensé adhéré (dans le cas où le module de Young de la formation est plus faible). Dans le premier cas il est appelé (Inner Microannulus), dans le second (Outer Microannulus).

Ce phénomène est généralement lié aux variations de températures et/ou pressions des formations spécialement si elles chutent après le durcissement du ciment.

Il faut aussi préciser que de grandes variations dans les densités des fluides de forages utilisés pendant le forage ainsi, les mouvements du casing et la présence du cake peuvent contribuer à la formation du Microannulus

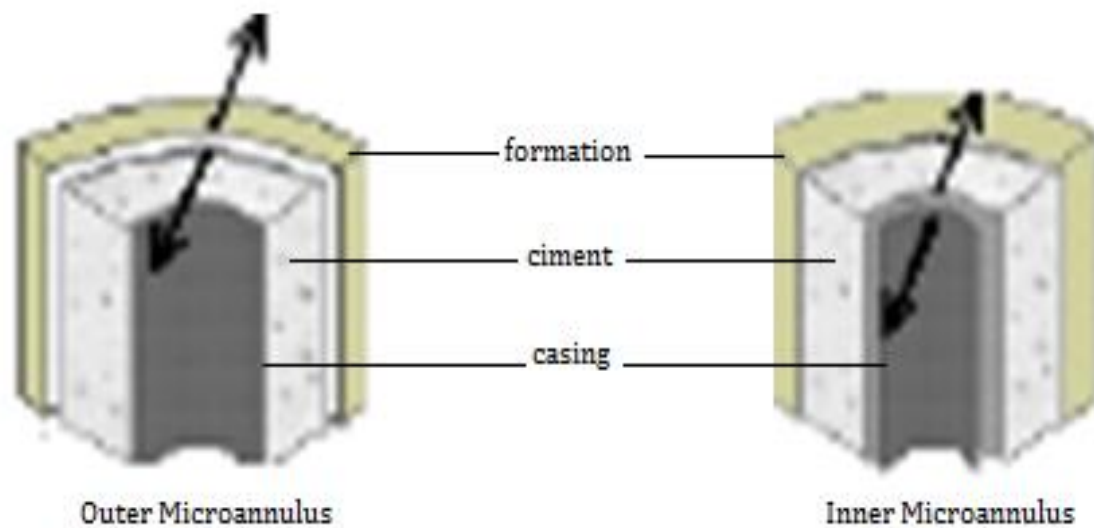


Figure 25: Représentation du Inner et Outer Microannulus. [12]

b. Pourquoi le Microannulus est-il si important

Dans beaucoup de cas nous avons remarqué que même si la cimentation primaire a été parfaitement réalisée en respectant les plans et consignes, et même avec la confirmation des analyses post cimentation que cette dernière est parfaite, le ciment peut céder après des jours, des mois ou des années de production sous l'effet des tensions et pressions auxquels il est soumis pendant toute cette période.

Selon une étude parue en 2007 en l'occasion de la **Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition** portant sur des puits dans le champ de Hassi Messaoud, des pressions annulaires entre le tubage 13^{3/8}" et le 9^{5/8}" ont été enregistrées, particulièrement concernant des puits cimentés quelques années auparavant.

Ce problème provient essentiellement d'une faible isolation des colonnes qui avec le temps a créé des chemins de communication entre les différentes formations. Dans le cas des pressions détectées dans l'espace annulaire 13^{3/8}" et 9^{5/8}" dans la région de Hassi Messaoud la pression est créée par la formation du LD3 qui a tendance à débiter dès qu'une occasion se présente et des pressions jusqu'à 200 bar peuvent être mesurées en tête de puits producteurs.

Sur 25 puits mis en production en 1999, 75% ont des problèmes de pression annulaire actuellement (en 2007) et sur 30 puits mis en production en 2000, 78% ont le même problème.

Tout cela montre clairement des déficiences dans les paramètres hydrauliques des ciments mis en place et une faible isolation de la zone qui avec le temps peut croître et conduire à des effets non désirables.

Le tableau ci dessous vient en guise de confirmation de l'étude :

Nom du puits	Pression annulaire enregistré (bar)
OMN-873	120
OMN-563	90
OMPZ-111	130
OMO-141	50
OMJZ-843	Pas de pression
OML-103	156
MDZ-509	130
MD-518	60
MD-524	80
MDZ-453	105
MDZ-532	105
MD-516	100
MDZ-472	50

Table 6 : Pressions annulaire détectée sur des puits en production en 2004 sur le champ de Hassi Messaoud. [7]

c. Causes du phénomène

Avec le temps, l'intégrité des parois cimentées du puits peut se détériorer. Des fissures et cracks peuvent se développer dans l'espace annulaire spécialement sur les interfaces les plus fragiles, à savoir l'interface Casing-ciment et Formations-ciment. Ces effets peuvent apparaître suite à différents paramètres comme la composition du ciment, l'influence de la température et pression, la compaction du ciment, l'état du matériel descendu dans le puits et bien d'autres éléments.

Nous allons dans ce qui suit aborder les points et causes les plus importantes causant la formation d'un Microannulus.

i. Mauvais contrôle de la filtration du ciment

Depuis de longues années la filtration du ciment fait l'objet d'un grand nombre de recherches, en 1973 par exemple CARTER et AL ont directement relié la filtration incontrôlée du ciment à sa déshydratation prématurée surtout en face des zones perméables. Ils ont conclu que dans le cas de la perte continue de filtrat la formation de micro annulaire est inévitable.

STONE et CHRRITIAN considèrent aussi la mauvaise filtration du ciment comme étant la principale cause de formation du Microannulus en raison de la compaction prématurée du ciment d'un côté et de l'incapacité de ce dernier à transmettre la pression hydraulique suffisante pour contrebalancer les pressions de formation et de ses fluides même pendant sa phase liquide. Ces études ont été confirmées aussi par COOK et CUNNINGHAM, GARCIA ET CLARK et par des études faites par le laboratoire de recherche d'HALLIBURTON qui les ont appliquées sur des puits potentiellement producteurs de gaz ou ils ont trouvés que quand les premiers instant de la prise du ciment à des pressions de gaz de formation, une partie de l'eau contenue dans le ciment va inévitablement s'en échapper créant ainsi des micro-capillaires. Ils ont de ce fait proposé d'ajouter systématiquement des additifs au laitier de ciments afin de réduire au maximum la cadence de filtration de l'eau le composant, en la gardant aux environs de 50l/30mn (filtrat API)

ii. Composition Chimique du ciment

Des interstices et micro capillaire peuvent aussi se former à cause de la composition et des interactions chimiques de molécules constitutives du ciment. Le ciment étant une mixture assez complexe de différents matériaux formés principalement des éléments suivants : Tricalcium Silicate-alite (C_3S ou Ca_3Si), Dicalcium silicate-belite (C_2S or Ca_2Si), Tricalcium d'Aluminate (C_3A or Ca_3Al), and tétra-calcium Aluminoferite (C_4AF or Ca_4AlFe) ainsi que le Gypse qui se trouve dans la majorité des ciments de puits d'hydrocarbures.

Tous ces composants vont affecter les propriétés physico-chimiques du ciment comme le début et la fin de prise, l'expansion et la contraction du ciment.

En plus de ces effets la une quelconque interactions avec les agents chimiques présents dans les formations peut conduire à une attaque chimique d'une eau de formation potentiellement

chargée en dioxyde de Carbone qui peut engendrer une déshydratation du ciment et de sa texture gélifiante, ce qui va avec le temps faire perdre la force et la robustesse de la prise du ciment, donc ce dernier va devenir plus perméable, nous aurons donc des zones de faiblesse à long terme.

iii. Maintien de la pression sur le casing après déplacement du ciment

Dans un premier cas, dès la fin de chasse nous devons procéder à un test du casing et de la float valve pour écarter l'hypothèse d'un possible retour du ciment sous l'effet de sa densité à l'intérieur du tubage, en exerçant une certaine pression à l'intérieur du casing à l'aide de l'unité de cimentation, cette pression est ensuite purgée.

Dans un second cas, il arrive parfois dans le cas de défaillance du matériel que le deuxième à-coup de pression indiquant la fin de chasse ne soit pas enregistré sur l'unité de cimentation, un volume de sécurité est alors injecté avant d'arrêter la cimentation en laissant le puits et casing sous pression pendant tout le temps de prise du ciment, la pression exercée est ensuite purger une fois le thickening time écoulé.

Dans les deux cas cités le fait d'exercer une pression à l'intérieur du casing, qui ayant des propriétés élastiques aura tendance à se gonfler puis revenir à son état initial une fois la pression purgée, par contre que le contraire se produira pour le ciment, il se comprimera sous l'effet de poussé du tubage mais ne pourra pas reprendre sa forme initiale en raison de ses limites élastiques qui sont quasi nulle dans le cas standard, donc on aura une formation d'un microannulaire intérieur.

NB : Une attention particulière devra être accordée au timing de réalisation des tests, car un mauvais choix comme par exemple réaliser les tests pendant que le ciment atteigne une grande capacité de gélification et qu'il possède une grande résistance à l'expansion du tubage, pendant ce temps le ciment sera apte à retenir de nouvelles formes sans pour autant pouvoir reprendre sa forme primaire, nous mènera à la création d'un Microannulus

iv. Effet de la température sur le ciment

Les fluides de déplacement qui sont généralement stockés en surface ont une température relativement basse comparés aux fluides présents au fond du puits. Le ciment aura une température assez basse en conditions de surface mais le temps qu'il passera à l'intérieur du puits depuis son injection à son arrivée au fond puis sa remontée dans l'espace annulaire lui procurera des températures très élevées. Donc à la fin de la cimentation le liquide de déplacement froid sera juste juxtaposé au ciment chaud pendant toute sa période de prise (WOC).

En fonction de la différence de température (ΔT) entre les formations adjacentes, le laitier de ciment et le fluide de déplacement, le diamètre du casing ou du liner en place subira une expansion ou une contraction qui après égalisation des températures reprendra son état initial et créera de ce fait un Microannulus entre tubage-ciment ou ciment-formation.

La déformation que subit le ciment ou le casing dans sous l'effet de la température est régit par les lois de Hook :

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_z)}{E} + \beta (\Delta T)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t - \mu(\sigma_z + \sigma_r)}{E} + \beta (\Delta T)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_t)}{E} + \beta (\Delta T)$$

Avec :

E : module de Young (30.10⁶psi pour l'acier)

μ : Coefficient de Poisson (0,3 pour l'acier)

β : coefficient d'expansion thermique (6,9.10⁻⁶ F⁻¹ pour l'acier)

ΔT : augmentation de température en F°

v. Effet de la pression de formation

Durant toutes les phases par lesquelles passe le ciment (liquide-gel-solide) il est constamment soumis à des contraintes et pressions, si ses caractéristiques mécaniques (module de Young- Coefficient de Poisson – résistance à la compressionetc.) ne sont pas bonnes alors des défaillances dans la matrice vont avoir lieux.

Par exemple, Il est plus facile pour le ciment de se retirer de l'interface casing-ciment si le module de Young de la formation est plus faible que celui du ciment lui-même. Et il se retirera de l'interface ciment-formation dans le cas contraire.

vi. Fluide de déplacement plus lourd que celui de l'annulaire

Quand la densité du fluide à l'intérieur du casing est plus grande que le fluide dans l'annulaire (boue, spacer ou ciment), le tubage aura tendance à se gonfler. Un Microannulus pourra se former si le liquide de déplacement lourd est remplacé par un autre plus léger (fluide de gonflage du packer, fluide de complétion ou même une boue plus légère).

vii. Manutention du casing

Les mouvements latéraux et verticaux exercés sur le casing afin d'installer les casings hangers et le Hanger slips peuvent facilement créer un Microannulus pendant et après le temps de prise du ciment (WOC). Les opérations cités requièrent de retirer les blocs obturateurs (BOP), donc

combiné à un Microannulus assez important peut facilement conduire à un (FAC) flux de formation sans avoir une barrière de sécurité pour prévenir une quelconque venue.

viii. Descente des tiges de forage pour le forage du sabot

Une descente rapide des tiges de forage (DP) peut créer une surpression (Surging) à l'intérieur du casing qui peut provoquer l'expansion du casing, donc la création d'un Microannulus

ix. Présence d'un cake de boue important

Avant chaque opération de cimentation, une circulation totale est faite afin d'homogénéiser la boue et de faire un nettoyage du puits (clean up). Le choix du débit lors de cette circulation doit être surveillé attentivement afin de faire en sorte de casser au maximum le cake mis en place durant toute la période de forage de la phase. Le cake, si présent rendra l'adhérence du ciment aux parois de la formation délicate, donc l'augmentation du risque de formation d'un Outer Microannulus sera conséquente.

d. Comportement mécanique et modèle mathématique

i. Comportement mécanique pendant les différentes étapes de forage

Les pressions et tensions changent autour du puits pendant le forage, complétion ou la production et peuvent affecter l'intégrité des parois.

Pendant le forage les tensions dans la roche vierge change à cause des nouvelles conditions (création d'un vide dans la roche), ces tensions doivent être contrebalancées par la pression exercée à l'aide du fluide de forage utilisé afin de prévenir tout mouvement des formations plastiques ou un éventuel kick. Comme la boue de forage agit toujours de façon perpendiculaire aux parois du puits, nous devons tenir compte des tensions radiales autour du puits pour avoir une boue de forage qui respecte l'aspect géo-mécanique de la zone, en considérant la capacité de filtration et propagation de pression. Ce travail reste délicat en raison de la marge d'erreur qui est petite car une faute peut conduire à créer de micro fissures au sein de la roche et accroître sa perméabilité qui est parfois indésirable

Pareillement, après le pompage du ciment lors de la cimentation primaire, la pression hydrostatique du fluide va générer de nouvelles tensions autour du puits en raison du changement de la densité et des propriétés de filtration entre la boue et le ciment. Dans les conditions statique avant la gélification, les forces radiales totales sont égales à la pression exercé par le ciment liquide (P_{cim}) qui est légèrement supérieur à la pression de pore (P_0) mais généralement inférieur à σ_{hmin} sur toute la surface de l'espace annulaire afin d'éviter une éventuelle fracturation de la formation et une perte de ciment.

NB : l'état réel des forces dans la roche reste difficile à déterminer en raison de la perméabilité effective de la roche qui est inconnue, mais aussi à cause des changements qu'a subit la formation

Une fois que le ciment devient dur, ce dernier devra être en contact physique avec les parois du puits, et les forces radiales totales doivent être égales à la pression hydrostatique si il n'y a pas eu de variation de volume après la gélification du ciment, c'est généralement le cas si la mise en place du ciment a été faite dans des conditions optimums, dans ce cas le contact de forces radiales entre la roche et le ciment sera en tout point supérieur à la pression à l'intérieur de la roche, donc la formation du Microannulus sera presque impossible.

En réalité cet état est la condition de la fracturation hydraulique; et cela si $P_0 > \sigma_r$ en raison de la compaction du ciment ou de la pression de formation, donc une fracture hydraulique peut être générée entre la roche et le ciment et un micro espace annulaire apparaît. Comme le ciment rétrécit en quelques sortes pendant la gélification et la prise, des mouvements de formation en direction du centre du puits peuvent survenir et nous pouvant les prévoir en se basant sur les propriétés mécaniques des formations comme le module de Young ou d'élasticité et le coefficient de Poisson. Si la formation est très dure, les tensions radiales peuvent avoir un effet négatif sur la stabilité des parois du puits, donc la réduction des tensions radiales des formations dépend clairement du degré de compaction du ciment et des propriétés mécaniques de la formation. Donc si la condition $P_0 > \sigma_r$ l'interface entre la roche et le ciment disparaîtra suite à la formation d'un micro espace annulaire.

L'épaisseur de ce Microannulus peut être estimée en utilisant des modèles de calculs axisymétrique des tensions en tenant compte des potentiels complications en cas d'excentricité du ciment (plus de tensions radiales dans les zones les plus épaisses), et cela si les prévisions de la compaction et des propriétés intrinsèques de la roches ont été bien étudiées.

Aussi le cake qui n'a pas été complètement retiré peut avoir le même rôle que la compaction du ciment. Il est évident qu'avant le placement du ciment donc pendant les opérations de forage et de nettoyage du puits et même dans le cas de l'utilisation d'agents anti-dispersants, de scratchers ; une couche de cake reste collée sur certain endroit des parois. Cette couche aura tendance à se compacter et rétrécir après contact et interaction avec le ciment formant ainsi une couche encore plus fine. Cette dernière n'a pas de force de compression, ce qui va conduire à une diminution ou pertes des contraintes radiales

ii. Modèle mathématique [11]

La mise en place d'un modèle mathématique, nous aide à mieux comprendre l'ampleur du problème afin d'élaborer des études d'ingénierie plus complète.

Des algorithmes et programmes ont été mis en place. Qu'ils soient faits à l'aide de MATLAB ou d'autre outils de programmations, tous ces programmes ont pour objectifs de calculer les tensions radiales effectives (σ'_r) autour des parois du puits, afin d'adapter les valeurs à celles du ciment après sa prise et compression

Parmi ces modèles-là, les formules de Kirsch sont les plus souvent utilisées pour cette modélisation, en considérant un milieu isotrope, homogène, élastique et isotherme Kirsch a donné les équations représentatives suivantes

$$\sigma'_r = \frac{1}{2}(S'_H + S'_h)\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(S'_H - S'_h)\left(1 - 4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos(2\theta) + \Delta P \frac{R^2}{r^2}$$

$$\sigma'_\theta = \frac{1}{2}(S'_H + S'_h)\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(S'_H - S'_h)\left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos(2\theta) - \Delta P \frac{R^2}{r^2}$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}(S'_H + S'_h)\left(1 + 2\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4}\right)\sin(2\theta)$$

Avec :

- σ'_r : est la tension radiale effective
- σ'_θ : est la tension de circonférence effective
- $\tau_{r\theta}$: est la contrainte de cisaillement tangentielle
- R : est le rayon du puits
- r : la distance depuis le centre du puits
- θ : l'azimut mesuré depuis la direction de S'_H
- ΔP : différence de pression entre le fluide dans le puits et la formation
- S'_H : tension horizontale maximale
- S'_h : tension horizontal minimale

Afin de mieux comprendre le phénomène et la variation des tensions radiales dans le puits, nous prenons l'exemple suivant en l'appliquant sur un programme en 2D basé sur les formules de Kirsch:

$$-S'_H = 90 \text{ MPA}$$

$$-S'_h = 51.5 \text{ MPA}$$

$$-E = 10 \text{ GPA}$$

$$-P_p = 31.5 \text{ MPA}$$

$$-\Delta P = 0 \text{ MPA}$$

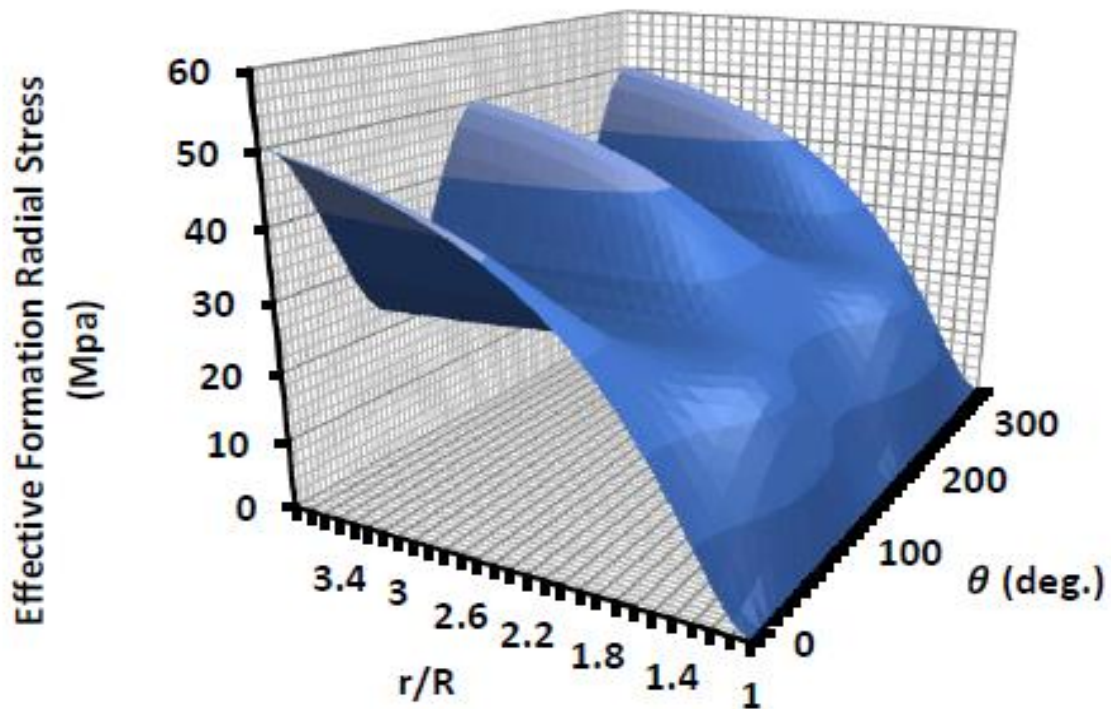


Figure 26: Variation des tensions radiales effective autour du puits [11]

Interprétation :

Nous remarquons d'après les enregistrements que plusieurs paramètres entrent en considération quant aux variations des tensions radiales et leurs influences est assez complexe à déterminer, par exemple nous remarquons que peu importe les variations de θ , les tensions radiales sont quasiment nulles si les mesures sont faites au niveau des parois du puits (comme cela a été expliqué dans la partie précédente), par contre plus on s'éloigne des parois plus elles augmentent et leurs variations deviennent plus ou moins difficile à prévoir vu l'influence de l'azimut et de plusieurs autres paramètres (module de Young, coefficient de Poisson...etc.)

Nous proposons aussi ce deuxième exemple où nous ne tenons pas compte des effets de l'azimut :

Pour cette application, les paramètres pris sont :

- $P_p = 31.5 \text{ MPa}$
- $E = 10 \text{ GPa}$
- $\nu = 0.25$
- $R = 0.2413 \text{ m (9.5 in)}$
- casing OD = 0.2032 m (8 in) a
- le ciment est place dans un puits ouvert avec une prévision de compaction de 0.5%

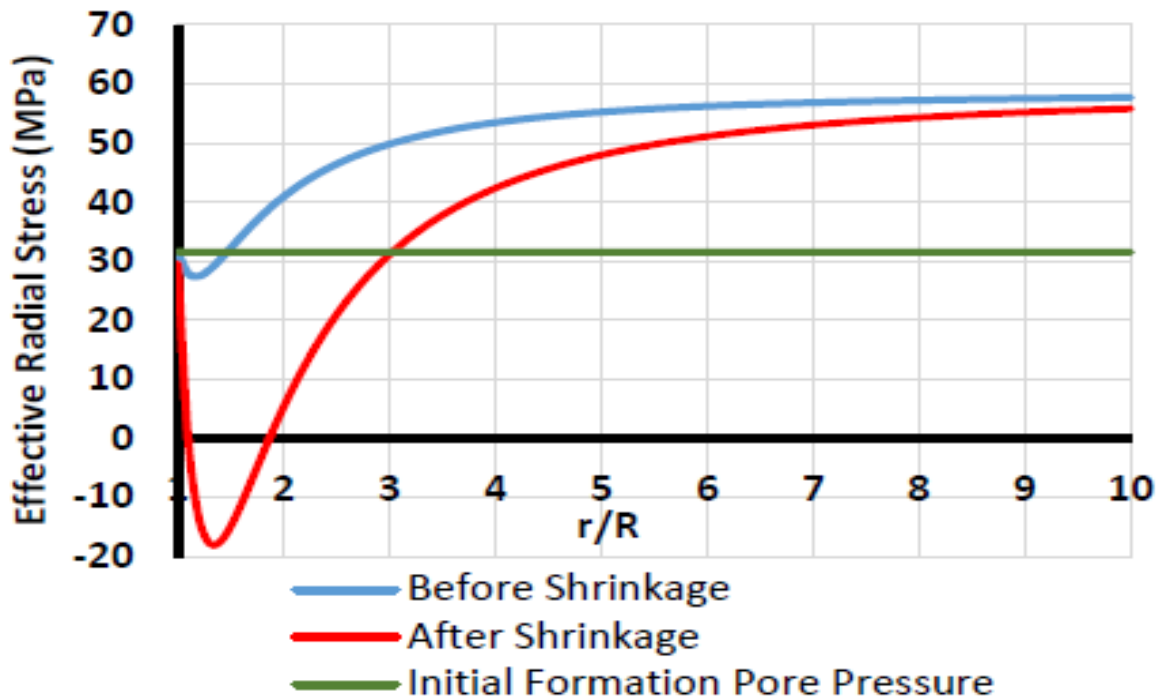


Figure 27 Tensions radiales dans un puits avant et après le rétrécissement du ciment: [11]

Interprétation :

Nous remarquons sur cet enregistrement qui montre les variations des tensions radiales avant et après la compaction, que même pour une compaction réduite à des valeurs très faibles 0.5% la chute des valeurs au niveau des parois du puits après compaction est très importante où elle peut même atteindre des valeurs négatives, alors que les variations sont relativement moins importantes dès que nous nous éloignons des parois où elles deviennent quasiment nulles lorsque les mesures sont faites à une certaine distance des parois du puits.

Résultats :

Suite à la prise du ciment et donc sa compaction, les interactions au niveau des parois du puits changent à cause du mouvement radial de l'interface du ciment jusqu'à la stabilisation de σ_r à travers cette interface, donc l'estimation des tensions radiales ne peut être établie sans l'utilisation des différentes valeurs de compaction du ciment et les propriétés mécaniques des formations. Le mouvement radial de l'interface peut être calculé numériquement en considérant un modèle homogène et élastique en 2D mais seulement en déterminant les modules de Young et le coefficient de Poisson de la formation.

Il est à noter aussi que des valeurs négatives des tensions radiales sont synonymes de formation de Microannulus

e. Tests et analyse de détection du phénomène

i. Effets du micro annulus sur les enregistrements de test

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

Effet sur le USI

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 matériau présent dans le micro annulaire. et de la différence des coefficients de transmission de l'eau et du gaz

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

ii. Interprétation du CBL-VDL lors du phénomène du Microannulus

Tubage bien cimenté (absence d'un micro annulus)

- 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.

Tubage mal cimenté (présence d'un micro annulus)

- L'amplitude du CBL est relativement importante
- Le VDL montre des ondes de tubage relativement bien visibles.
- Dans le cas de formation d'un Outer Microannulus

-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.

- Dans le cas de formation d'un Inner Microannulus

-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.

Exemple d'un enregistrement CBL-VDL avec possible présence d'un micro annulus :

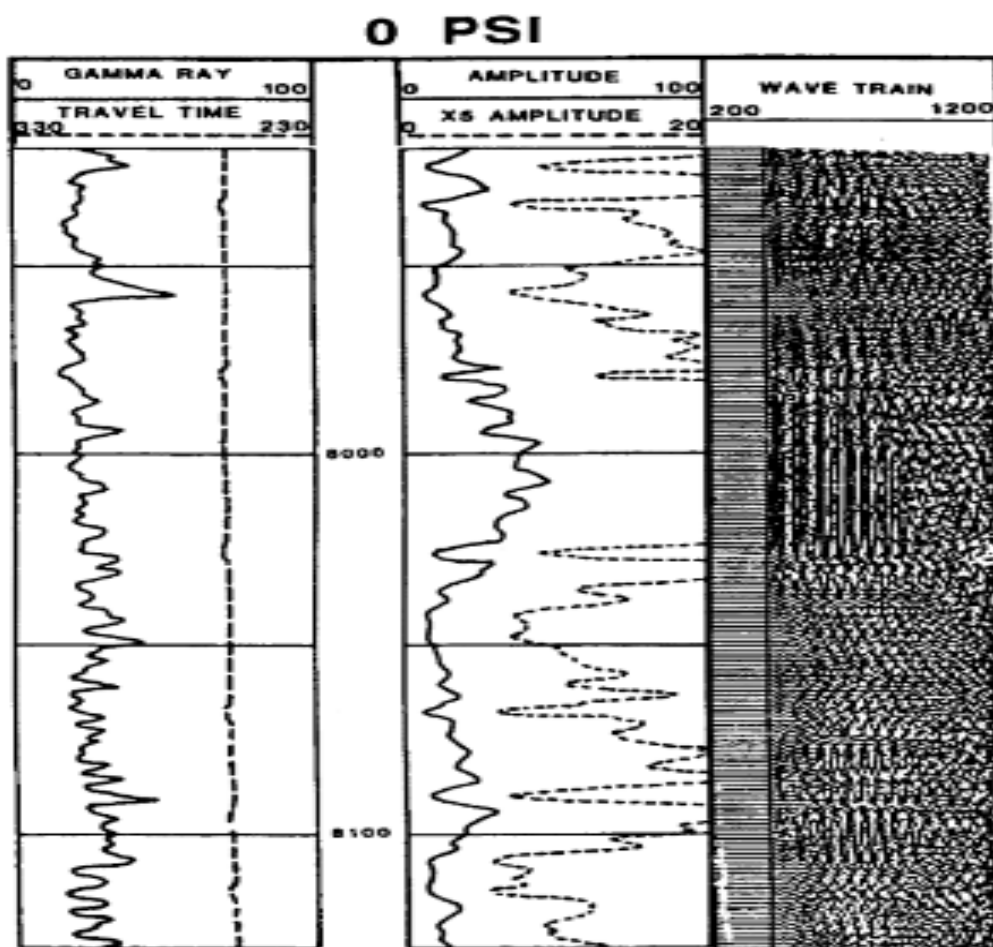


Figure 28: illustration d'un enregistrement CBL-VDL d'une zone A cimentée [32]

Interprétation de l'enregistrement

Nous remarquons sur la figure trois tracks le premier représentant l'enregistrement Gamma Ray et le temps de Passage (TT) sur le second, nous avons les résultats du CBL et sur le troisième les résultats du VDL.

Une analyse du deuxième track montre clairement que l'amplitude n'atteint pas son maximum mais reste quand même relativement grande.

Aussi si nous remarquons bien, sur le track du VDL la présence des ondes de tubage, de formations et du fluide de forage sont apparentes.

Résultats

Nous pouvons facilement tirer de cette interprétation qu'une défaillance de la cimentation (vides partiels ou absence totale du ciment) au niveau de l'interface tubage-ciment est présente dans cette zone.

Remarque

Dans le cas des résultats obtenus nous ne pouvons pas encore conclure de la présence ou non d'un Microannulus pour cela, un deuxième test CBL-VDL devra être reconduit mais cette fois il doit être effectué sous pression afin de confirmer la présence réel d'un micro annulus ou si la zone est non cimentée.

Le test sera effectué sous une pression exercé depuis l'intérieur du casing afin d'essayer de pousser le casing à se coller et être en contact avec le ciment dans le cas de présence de micro espace annulaire, dans ce cas le vide précédemment présent sera éliminé et le BOND TEST pourra être vraiment représentatif de l'espace annulaire derrière le casing

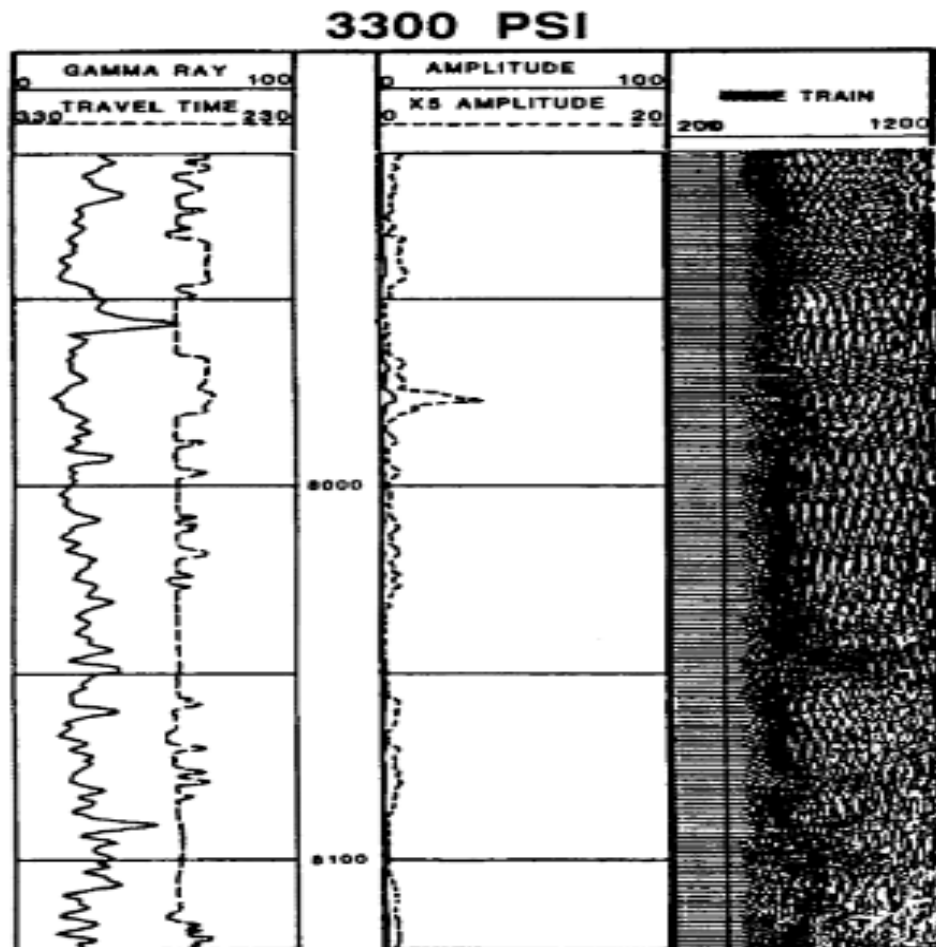


Figure 29: Enregistrement CBL-VDL sous pression de la zone A [32]

Interprétation de l'enregistrement

Nous remarquons clairement une différence entre les tracks enregistrés sans pression et ceux enregistrés sous pressions.

Il est clair que l'amplitude du CBL est à des niveaux très bas lors de cet enregistrement spécialement si elles sont comparées à celle de la figure précédente

Pour l'enregistrement VDL, nous remarquons toujours la présence des différentes ondes de tubage, formation et fluide mais cette fois si elles sont plus claires et faciles à déterminer

Résultats

Après avoir réalisé les tests sous pression nous pouvons maintenant confirmer la présence d'un micro annulus au niveau de l'interface casing-ciment dans la zone A

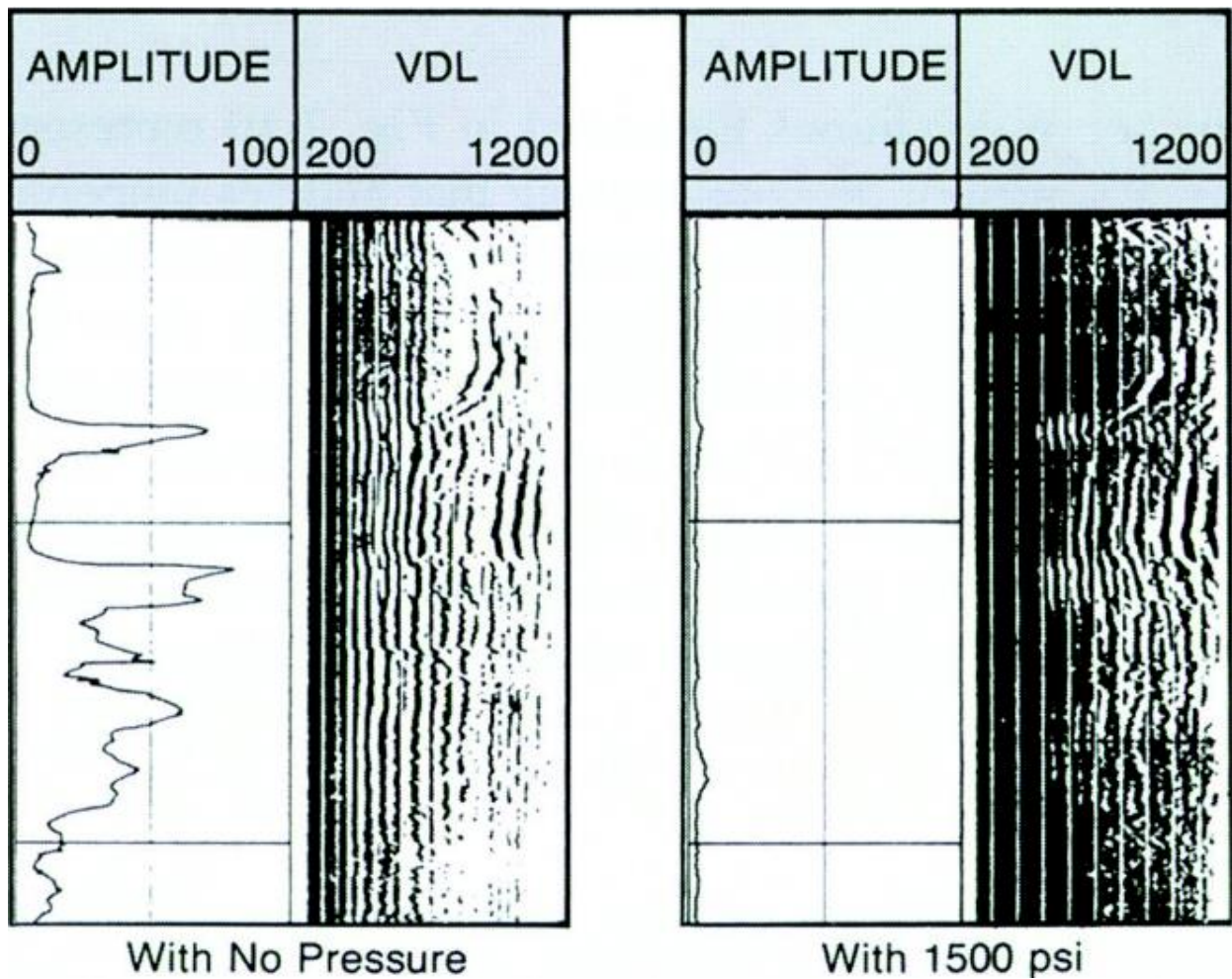


Figure 30: Autres exemple de CBL-VDL dans une même zone avec et sans pression [32]

Détermination de la pression de test nécessaire

La pression de test varie d'un puits à un autre en fonction des contraintes physiques auxquelles à été soumis le tubage depuis le temps de sa cimentation à la date du Logging. La pression nécessaire ne peut pas être prévue. En conséquent elle devra être mesurée et déterminée au début du job de Logging, en suivant la procédure suivante :

- Une fois la sonde descendue dans le trou, sans pression de surface, surveille le CBL/VDL sur l'écran de l'unité arrêter l'outil une fois l'amplitude du CBL arrive au même niveau que celle du VDL
- Enregistrer m'amplitude sur un bonde en temps réel pendant que l'outil est arrêter. Augmenter la pression de surface par des paliers de 150 Psi jusqu'à ce que l'amplitude n'augmente plus, refaire l'étape deux fois consécutive.
- La pression de test sera celle obtenue lors de la dernière augmentation de pression et qui correspond à la plus basse amplitude.

f. La taille du Microannulus [29]

i. Influence des contraintes sur la création du Microannulus

Lors de l'application des contraintes de formation et de tubage sur le ciment il est certain que nous allons avoir un déplacement du système tubage – ciment – formation, ce déplacement dépend essentiellement de l'intensité de la charge et les paramètres du système.

Pour éviter le phénomène du Microannulus, il faut que le déplacement inter -système soit compensable. D'une autre façon le déplacement de la paroi extérieur du tubage est égale au déplacement de la paroi intérieur du ciment et le déplacement de la paroi extérieur de ciment est égale au déplacement de la paroi intérieur de la formation.

Donc mathématiquement on peut définir ce système par la manière suivante :

$$\begin{cases} u_{son} = u_{cin} \\ u_{con} = u_{fin} \end{cases}$$

Pour cela il faut identifier chaque déplacement et le développer pour avoir la condition nécessaire et suffisante :

$$u_{son} = \frac{1+v_1}{E_1} \frac{2(1-v_1)r_i^2 r_1}{r_1^2 - r_i^2} p_{in} - \frac{1+v_1}{E_1} \frac{r_i^2 r_1 + (1-2v_1)r_1^3}{r_1^2 - r_i^2} p_{1n}$$

Donc

$$u_{son} = f_1 p_{in} - f_2 p_{1n}$$

On a aussi :

$$u_{fin} = \frac{1+v_3}{E_3} \frac{r_0^2 r_2 + (1-2v_3)r_2^3}{r_0^2 - r_2^2} p_{2n} - \frac{1+v_3}{E_3} \frac{2(1-v_3)r_0^2 r_2}{r_0^2 - r_2^2} p_0$$

Donc

$$u_{fin} = f_7 p_{2n} - f_8 p_0$$

D'un autre côté nous avons :

$$u_{cin} = u_{cpim} + u_{cir}$$

Avec :

$$u_{cir} = \frac{1+v_2}{E_2} \frac{r_2^2 r_1 + (1-2v_2)r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} (p_{1n} - p_{1m}) - \frac{1+v_2}{E_2} \frac{2(1-v_2)r_2^2 r_1}{r_2^2 - r_1^2} (p_{2n} - p_{2m})$$

$$u_{cin} = u_{cpim} + \frac{1+v_2}{E_2} \frac{r_2^2 r_1 + (1-2v_2)r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} (p_{1n} - p_{1m}) - \frac{1+v_2}{E_2} \frac{2(1-v_2)r_2^2 r_1}{r_2^2 - r_1^2} (p_{2n} - p_{2m})$$

$$u_{cin} = u_{cpim} + f_3(p_{1n} - p_{1m}) - f_4(p_{2n} - p_{2m})$$

Aussi nous avons :

$$u_{con} = u_{ceom} + \frac{1 + \nu_2}{E_2} \frac{2(1 - \nu_2)r_1^2 r_2}{r_2^2 - r_1^2} (p_{1n} - p_{1m}) - \frac{1 + \nu_2}{E_2} \frac{r_1^2 r_2 + (1 - 2\nu_2)r_2^3}{r_2^2 - r_1^2} (p_{2n} - p_{2m})$$

$$u_{con} = u_{ceom} + f_5 - f_6(p_{2n} - p_{2m})$$

Donc on peut écrire :

$$p_{1n} = \frac{f_1(f_6 + f_7)p_{in} + f_4 f_8 p_0 - (f_6 + f_7)u'_{cpi} + f_4 u'_{ceo}}{(f_2 + f_3)(f_6 + f_7) - f_4 f_5}$$

$$p_{2n} = \frac{f_1 f_5 p_{in} + f_4 (f_2 + f_3) p_0 - f_5 u'_{cpi} + (f_2 + f_3) u'_{ceo}}{(f_2 + f_3)(f_6 + f_7) - f_4 f_5}$$

Avec :

$$u'_{cpi} = u_{cpim} - f_3 p_{1m} + f_4 p_{2m}$$

$$u'_{ceo} = u_{ceom} - f_5 p_{1m} + f_6 p_{2m}$$

Donc d'après l'analyse précédente nous pouvons déduire que :

Les contraintes à l'interface du système se transforment en contraintes de traction même si les valeurs de p_{1n} et p_{2n} sont négatives, cela implique que le ciment applique des contraintes à l'interface pour sauvegarder l'intégrité du système.

Le Microannulus est un phénomène qui apparaît quand les contraintes aux limites des interfaces sont inférieures à p_{1n} et p_{2n} , dans ce cas il y aura une séparation à l'interface parce que le ciment ne maintient pas sa capacité désirée.

ii. Calcul de la taille de Microannulus [29]

Dans cette partie on va démontrer comment calculer la taille du Microannulus à l'interface de tubage, la paroi extérieure du tubage et la paroi intérieure de ciment n'ont pas le même déplacement, ce déplacement engendre la création de Microannulus, et à cause de ce dernier, nous n'aurons pas de continuité de matière, qui implique que l'effort appliqué sur la paroi extérieure de tubage est nul et l'effort appliqué sur la paroi intérieure de tubage est égal à P_{in}

Donc le déplacement de la paroi extérieure de tubage est égal à :

$$u_{son} = \frac{1 + v_1}{E_1} \frac{2(1 - v_1)r_i^2 r_1}{r_1^2 - r_i^2} P_{in}$$

Et le déplacement du ciment égal à :

$$u_{cin} = u_{cpim} + \frac{1+v_2}{E_2} \frac{r_2^2 r_1 + (1-2v_2)r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} (-p_{1m}) - \frac{1+v_2}{E_2} \frac{2(1-v_2)r_2^2 r_1}{r_2^2 - r_1^2} (p_{2n} - p_{2m})$$

Avec

P_{2n} est une valeur que nous pouvons obtenir par les condition limites à l'interface du système :

$$u_{con} = u_{fin}$$

La taille du Microannulus (d_n) à l'interface est égale à la différence entre le déplacement de la paroi intérieur de ciment et le déplacement de la paroi extérieure de tubage donc on peut écrire :

$$d_n = u_{cin} - u_{son}$$

Ou

$$d_n = u_{cpim} + \frac{1 + v_2}{E_2} \frac{r_2^2 r_1 + (1 - 2v_2)r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} (-p_{1m}) - \frac{1 + v_2}{E_2} \frac{2(1 - v_2)r_2^2 r_1}{r_2^2 - r_1^2} (p_{2n} - p_{2m}) - \frac{1 + v_1}{E_1} \frac{2(1 - v_1)r_i^2 r_1}{r_1^2 - r_i^2} P_{in}$$

g. Conséquences et risques du phénomène

Plusieurs phénomènes et conséquences peuvent subvenir suite à la création d'un Microannulus nous citerons dans cette partie quelques cas, néanmoins ce que nous considérons être les plus importants mais surtout les plus dangereux :

- **Altération du casing :**
L'altération du casing peut être due à une mauvaise qualité de cimentation, une mauvaise isolation zonale ou à un mauvais déplacement de la boue.
Donc une création d'un Microannulus est synonyme d'un potentiel intrusion de fluide de formation dans le puits, ces fluides qu'ils soient gaz ou liquides pourront détériorer notre tubage sous l'effet de l'abrasion et/ou de la corrosion.
- **Connections inter couches :**
Si le micro capillaire formé est conséquent la migration de fluides d'une couche à une autre est possible, et cela risque de poser de grandes problématiques surtout dans le cas de présence de couches incompatible et rapprochées comme la présence d'aquifères sous-jacents aux sels
- **Contamination des aquifères :**
La présence du Microannulus à de petites profondeurs peut mener à la contamination des aquifères par les gaz ou huiles des zones productrices ou même par d'autres aquifères inexploitable
- **Déclenchement d'incendie :**
Si le micro espace annulaire est connecté jusqu'en surface, un gaz provenant des formations profondes ou peu profondes peut apparaître au jour et conduire à des explosions ou incendies s'il n'est pas détecté.
- **Interruption de la production :**
La détection du Microannulus sur des puits producteurs conduits généralement à l'interruption de la production afin de procéder à des opérations de réparations.
- **Coût de réparations :**
Les opérations de réparations comme le Workover sont très coûteuses en temps et en argent
- **Durée de vie :**
Les puits présentant des micro espaces annulaire et des pressions en tête indésirables ont généralement une durée de vie limitée en raison des différents phénomènes pouvant détériorer les tubages et cimentations en place

Conclusion

Comme nous l'avons vu et expliquer la cimentation des puits pétroliers et d'autant plus délicate que nécessaire.

Les risques de survenance des problèmes lors de l'opération et même après, sont constamment présents

Le phénomène du Microannulus est certes minime de par sa taille mais peut avoir des conséquences désastreuses que ce soit sur le plan matériel, environnemental ou bien humain, mais ce qui le rend encore plus dangereux c'est la difficulté que nous rencontrons pour sa détection.

Bien que difficile mais des actions peuvent être faites afin d'en limiter la probabilité, c'est ce que nous appellerons les règles de l'art, nous pouvons en citer quelques-unes telle que :

- le nettoyage du casing avant sa descente
- la surveillance des débits de chasse pour un bon déplacement
- exercer une petite rotation de temps à autre sur le casing afin d'homogénéiser la répartition du ciment.
- Le bon choix des caractéristiques du ciment utilisé
- Choix des caractéristiques du casing
- Vérifier le matériel avant le début de la cimentation

CHAPITRE III : Présentation du puits HMZA-1

Introduction

Le puits HAMZAOUI-1 nommé (HMZA-1) situé dans le bloc 427a de la région de Rhourd El Baguel est un puits vertical destiné à l'exploration, le programme de forage prévu est un programme lourd à cinq phases afin d'atteindre les objectifs fixés qui sont le Trias argileux gréseux inférieur, les Quartzites de Hamra et le cambrien (Ri+Ra) à +/-3360m, +/-3427m et +/-3641m respectivement, avec une profondeur finale prévu de +/- 3819m.

La région de Rhourd El Baguel située dans le périmètre de HASSI TOUMIET, au Sud-ouest de Hassi Messaoud au nord de GASSI TOUIL, à l'ouest nord-ouest de Hassi BIR REKAIZ Sud et BERKINE Nord-ouest et à l'Est de Hassi el AGREB qui se trouve dans le bassin d'AMGUID-Messaoud

Par rapport aux Offset Wells ; HMZA-1 est situé à 14km au sud-est et 13km à l'est de MDRS-1 et MDRS-2 respectivement et à 16km au nord-ouest du puits RSH-5

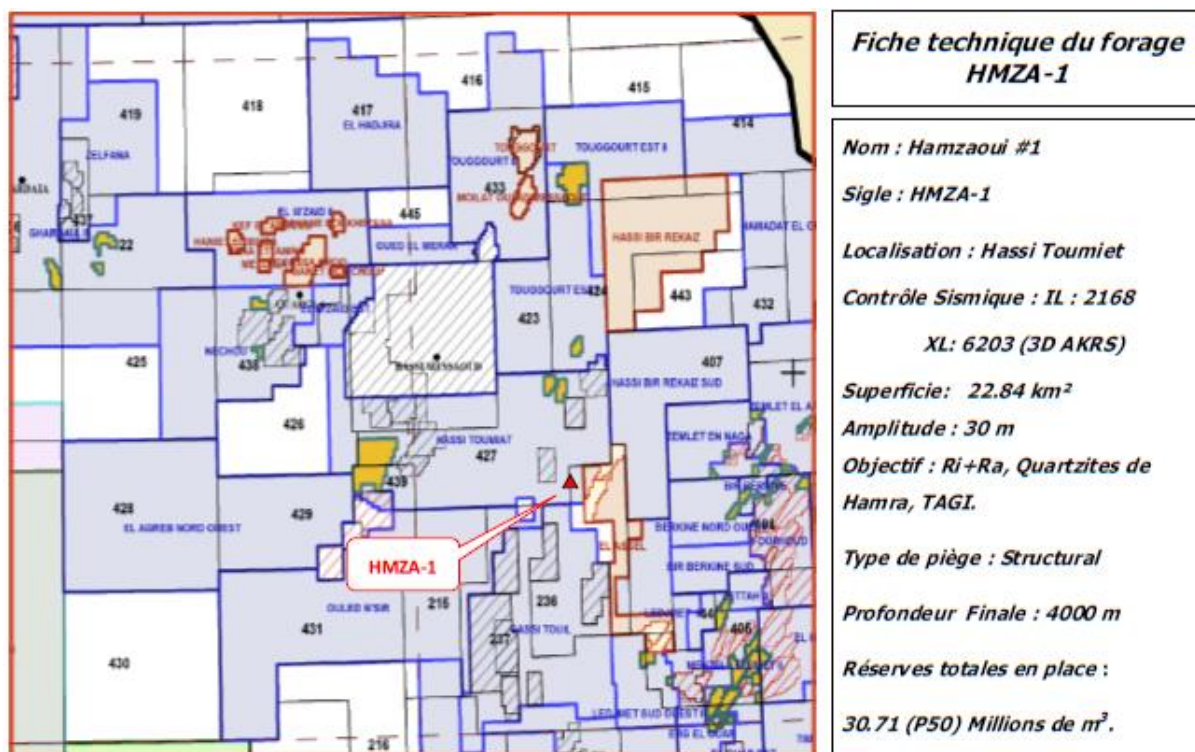


Figure 31: Localisation et fiche technique du puits HMZA-1

A. Information du puits [2]

Nom du puits	HMZA-1
catégorie	Exploration
Type de puits	Vertical
Zone	RHOUD EL BAGUEL
Bloc	427/439
Basin	AMGUID MESSAOUD
Temps de forage jusqu'à TD + complétion	77 days
opérateur	SONATRACH
contracteur	GWDC
Nom de l'appareil	GW133
Profondeur finale (TD)	+/- 4000 m
Objectifs	TAGI a 3545 m Q.H à 3612 Cambrien Ri a 3826m
Coordonnées (UTM)	X= 300 089,85 m Y= 3 442 568.64 m
Coordonnées géographiques	X= 06° 54' 14.4 " E Y= 31° 06' 08.40" N
Alimentation en eaux	Puits d'eau au niveau du chantier

Table 7:: Récapitulatif des informations du puits HMZA-1

B. Accès au puits [2]

Pour accéder au puits HMZA-1 depuis la base 24 février - Hassi Messaoud- par route, il faut :

- Prendre la route de RHOUD EL BAGUEL jusqu'à l'embranchement de MESDAR soit 90 Km.
- Tourner à droite en suivant la route de MESDAR sur 29 Km, tourner à gauche et suivre la piste qui mène au forage RSH-4
- Sur une distance de 14 Km, tourner à droite et prendre la direction du Sud.
- Suivre le tracé jalonné sur une distance de 2 Km pour trouver le forage HMZA-1.

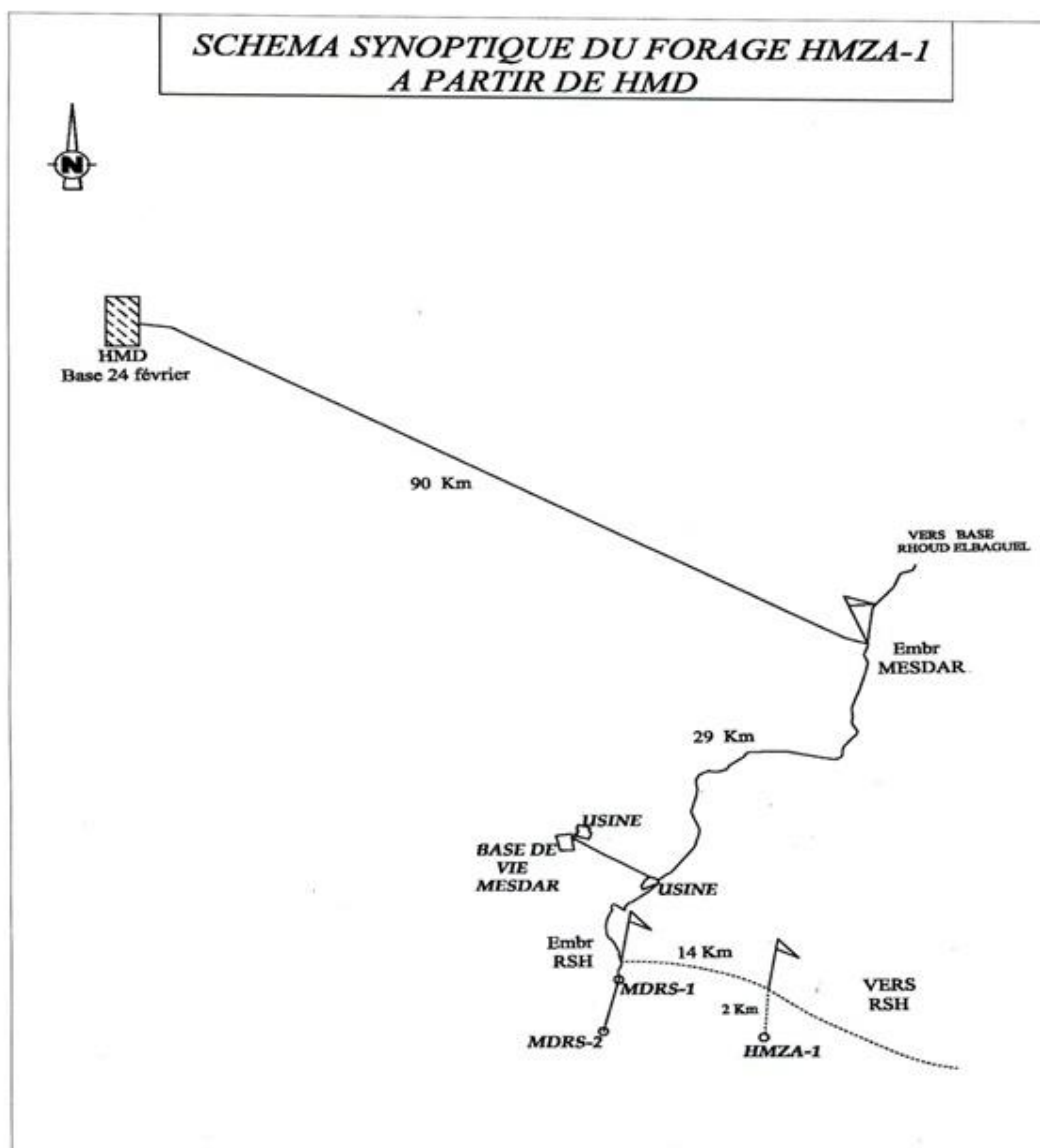


Figure 32: plan d'accès au puits HMZA-1 depuis Hassi Messaoud [1]

C. Prévisions du puits

 Sonatrach Exploration & Production (E & P) Division Exploration Direction Assets Centre Département Amguid - Messaoud		FICHE TECHNIQUE PREVISIONNELLE HAMZAOUI-1 (HMZA-1)					
Objectifs : Ordovicien (Quartzites de Hamra), Cambrien (Ri+Ra).				Programme diagraphies			
COORDONNEES UTM 32: X = 300 089,85 m Y = 3 442 568,64 m ALTITUDE (m) ref. 3D AKRS Zt = 181 m Zs = 170 m		COORDONNEES Geographique X = 06° 54' 14,4" E Y = 31° 06' 08,40" N CONTROLE SISMIQUE (3D AKRS) IL = 2168 XL = 6203		Runs conventionnelles VSP, Sonic Shear wave (12"1/4 et 8"1/2, 6"). Imageries (Optionnelle) Analyses de Pression : MDT (Optionnelle)			
AGE	STRATIGRAPHIE	PROF	LITHOLOGIE	DESCRIPTION	CORES	DIAMETRE ET TUBAGES	Boues
MIO-PLIOCENE		0		sable , calcaire et mame sableux			
EOCENE		Abs.					WBM:1,05sg
CRETACE	SENONIEN	CARBONATE	195	calcaire + dolomie et anhydritique			
		ANHYSRITIQUE	373	anhydrite + mame et dolomie			
		SALIFERE	558	sel massif et traces d'anhydrites			
	TURONIEN		669	calcaire tendre crayeux			
	CENOMANIEN		777	anhydrite mame et dolomie			
	ALBIEN		1004	Grès et Argile Silteuse			
	APTIEN		1128	Dolomie cristalline et calcaire			
	BARREMIEN		1153	Argile et sable + Grès			
	NEOCOMIEN		1398	Dolomie , mame et Grès + Argile			OBM:1,30sg
JURASSIQUE	MALM		1653	Argile , Mame et Dolomie + Grès			
	DOGGER	ARGILEUX	1853	Argile, Mame et Dolomie			
		LAGUNAIRE	2063	Anhydrite , Dolomie et Mame			
	LIAS	Lias Anh. (LD1)	2253	Dolomie , Anhydrite et Argile			
		Lias Anh. (LS1)	2287	Alternance Sel , Anhydrite et Argile			
		Lias Salif. (LD2)	2414	Anhydrite et Dolomie cristalline			
		Lias Salif. (LS2)	2489	Alternance de Sel et d'Argille			
		H.B (LD3)	2569	Alternance de Mame et de Dolomie			
		S1+S2	2599	Alternance Sel , Anhydrite et Argile et dolomie			
		S3	2940	Sel massif et traces d'Argile			
		Lias Argileux	3250	Argile rouges Dolomitiques ou silteuses injectée de sel et d'argile .			obM:2,15g
TRIAS	Trias Argileux		3323	Argiles brun rouge, parfois grisfoncé légèrement silteuse alternant avec des anhydrites, dolomies et sel à la base,			
	TAGS		3408	Argiles , silteuse, localement dolomitique, roches éruptives altérées, compact, avec de rares passages de grès, vénéues de calcites.			
	Trias Carbonaté		3487	Argile indurées avec intercalations de grès, par endroits présence de roches éruptive			
	TAGI		3545	Siltstone & Argiles interstratifiés avec abondance de Kaolinite.			
ORDOVICIEN	GRES DE OURGLA		3602	Grès à grains moyen à fins, silico-argileux avec des passées d'argiles noir, silteuses, indurées & micacées; avec de rares tigliilites et de la pyrite.	C1		
	QUARTZITES DE HAMRA		3612	Quartzites gris beiges fins à Tigillites	C2		
	GRES D'EL ATCHANE		3677	Grès Glauconieux fins à Tigillites avec passées d'argile noire			
	ARGILES D'EL GASSI		3714	Argile noire micacée et niveaux de grès blancs.			
CAMBRIEN	ZONE DES ALTERNANCES		3788	intercalation de grès et d'argiles silteuse avec passées d'argile noire			
	CAMBRIEN Ri		3826	Grès gris clair à ciment siliceux, isométrique à Tigillites,	C3		
	CAMBRIEN Ra		3880	Grès quartzitique hétérogène à ciment siliceux argileux.			
TD (+/-)		4000				4000m	obM:1,40g

Figure 33: Programme de forage [2]

D. Plan de forage (Profondeurs-jours)

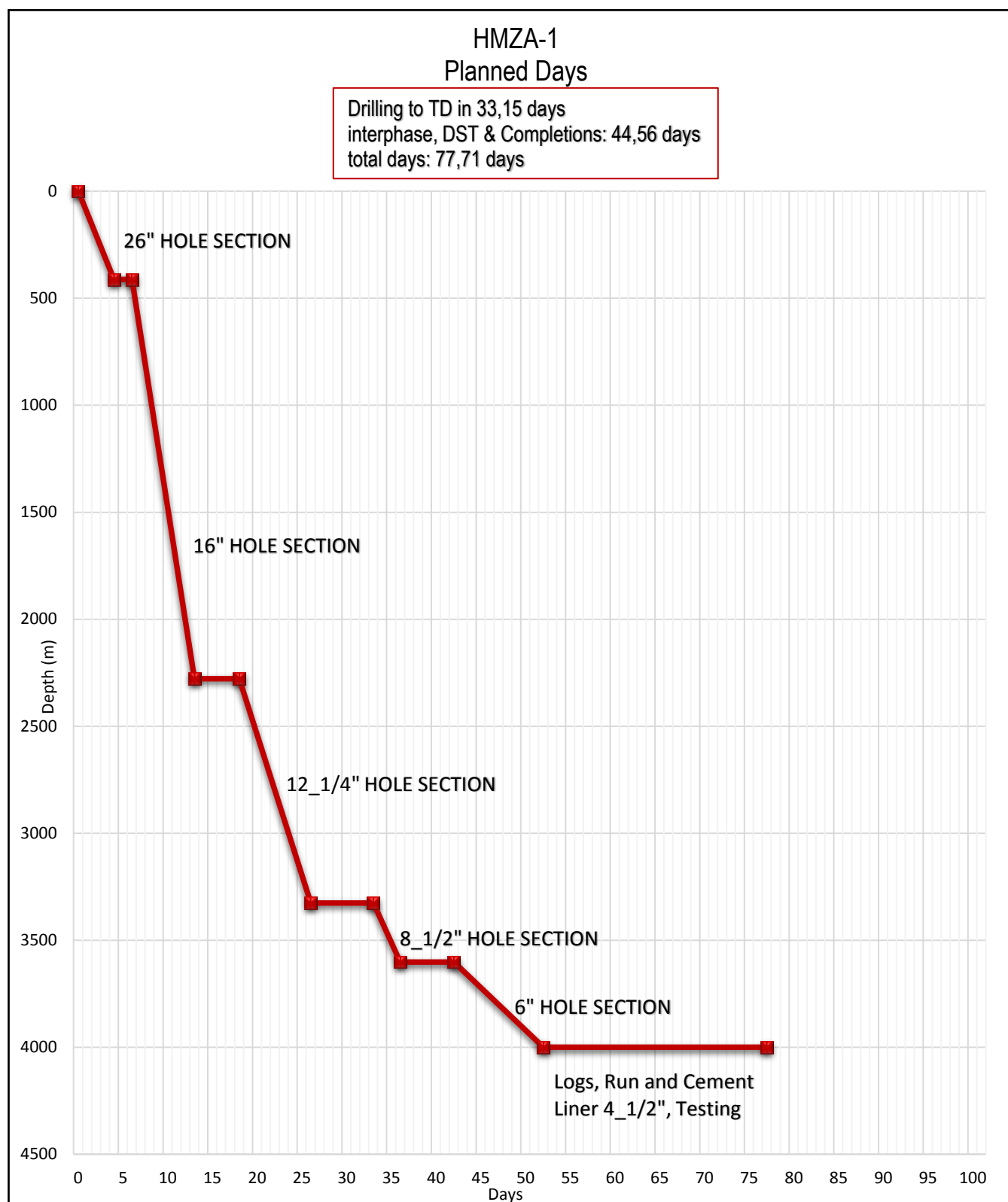


Figure 34: prévision de l'avancement du forage (Days vs Depth)

E. Détails du temps de forage [2]

HMZA-1 _RHOUD EL BAGUEL				
Activity	Dephts (m)	Time (days)	Cum Time (days)	Thickness (m)
Surface	00	00	00	
Drill surface 26" Hole	413	4.30	4.30	413
Inter – phase (18" 5/8 × 16")	413	2.16	6.46	
Drill 16" Hole	2278	6.99	13.45	1865
Inter – phase (13" 3/8 × 12" 1/4)	2278	5.02	18.47	
Drill 12" 1/4 Hole	3326	7.80	26.28	1048
Inter – phase (9" 5/8 × 8" 1/2)	3326	6.84	33.12	
Drill 8" 1/2 Hole	3602	3.65	36.76	246
Inter – phase (7" × 6")	3602	5.54	42.30	
Drill 6" Hole to TD	4000	10.41	52.71	398
Logs, run & cement 4" ½ liner, testing and completion	4000	25.00	77.71	
Total days	77.71			

Table 8: Détails du temps de forage du puits HMZA-1

F. Programme des outils de forage [2]

Hole size	Type	Manufactured	Model	State	IADC	Nozzeles (/32)
26"	SB435C	SMITH	TCI	NEW	435	1×16 + 3×18
16"	TFF913S	NOV	PDC	NEW	M 432	9×12
12" ¼	DSF816M	NOV	PDC	NEW	M 422	8×18
8" ½	MSI713BPX	SMITH	PDC	GOOD RR	M 432	4×12 + 3×12
6"	MM94	DBS	PDC	NEW	M 432	3×15
	K505BPX	SMITH	IMP	NEW	-	-

Table 9: Programme des outils de forage proposés pour les puits HMZA-1

G. Programme de tubage [2]

Hole size	csg	OD (inch)	ID (inch)	Specifications			Top setting depth (m)	Length (m)	Capacity (l/m)
				Weight (lb/ft)	Grade	Connection			
26"	Surface	18"5/8	17.755	87.8	J55/K55	BTC	0 – 413	413	159.74
16"	Interm	13"3/8	12.415	68.0	N80	BTC	0 - 2278	2278	78.1
12" ¼	Interm	9"5/8	8.535	53.5	P110	BTC	2000 - 3326	1326	36.91
			8.681	47.0	P110	BTC	0 – 2000	2000	38.19
8" ½	Prod csg	7"	6.184	29	P110	NVAM	0 - 3602	3602	19.38
6"	Prod liner	4"1/2	3.92	13.5	P110	NVAM	3452-4000	548	7.79

Table 10: Programme de tubage du puits HMZA-1

H. Programme de cimentation [2]

Hole size	Casing	Shoe depth (m)	Cement type	Volume
26"	18"5/8	413	Lead - 1.58sg light to surface	35% OH excess
			Tail - 1.90sg to 100m above shoe	
16"	13"3/8	2278	Lead - 1.35sg light F/ top Barremian to 200m	Caliper + 10%
			Tail - 1.90sg F/ shoe to top Barremian	
12" 1/4	9"5/8	3326	Tail – 2.18sg F/bottom to 200m inside previous casing.	Caliper + 10%
8" 1/2	7	3602	Single stage – 1.90sg to 200m above 9 5/8 shoe	Caliper + 15%
6"	4" 1/2	4000	Single stage – 1.90sg to 50m above TOL	Caliper + 15%

Table 11: Programme de cimentation du puits HMZA-1

I. Programme de boue [2]

Interval Properties	26"	16"	12" 1/4	8" 1/2	6"
Type of Fluids	Spud Mud	Relaxed Versadril OBM			OBM Conv
Density, SG	1.05	1.30	2.15	1.50	1.40
Yield Value, lb/100 ft ²	40-60	18-24	10-14	10-12	10-12
Gels, (10 sec / 10 minutes)	20/40	12/18	12/16	8/12	8/12
API fluid loss, cc/30 min	NC to +/- 20	-	-	-	-
HTHP fluid loss, 200°F/500 psi	-	< 10	< 10	< 10	
HTHP fluid loss, 250°F/500 psi	-	-	-	-	< 4
NaCl % by water	-	26	26	26	26
POM 0.1 H ₂ SO ₄	-	2-2.5	2-2.5	2-2.5	2-2.5
Oil/Water Ratio		70/30-90/10	90/10	90/10	95/05
LGS %	< 4	< 5	< 5	< 5	< 4
PH	12	-	-	-	-
Electrical Stability (Volts)	-	> 600	> 1000	> 1000	> 1000
MBT, Kg/m ³	80-110	-	-	-	-

Table 12: Programme de boue pour le puits Hmza-1

Chapitre IV : Etudes de cas sur le puits HMZA-1

Introduction

Après avoir abordé la théorie du Microannulus et présenter notre puits, nous allons maintenant nous consacrer à l'étude appliquée du problème, pour cela nous avons choisis son application sur la section 12^{1/4} du puits HMZA-1 qui comme cité dans les paragraphes précédents est un puits d'exploration.

La section 12^{1/4} est forée à travers les formations du LIAS et Du TRIAS depuis la pose du sabot 13^{3/8"} au niveau du DOGGER LAUNAIRE (2345m) jusqu'au TRIAS ARGILEUX où le sabot du 9^{5/8} a été posé à la cote 3337m.

La création de cette phase, donc la pose du casing et cimentation ont pour principal objectif de couvrir les formations salifères sur pressurisées, les zones d'argiles réactives et surtout d'isoler la zone à problèmes qui est le LD3 (le LD2 dans l'ancienne nomenclature) ou plus communément connue sous le nom de l'HORIZON B.

A. Description géologique [4]

Dans notre étude de cas on va concentrer notre travail sur la partie qui est illustrée par le master log, l'Age géologique qui fait notre domaine d'étude est le Jurassique exactement une grande partie de Lias qui commence à partir de LD1 et se termine à le S3, le master log montre avec précision les formations traversées, leurs types, leurs caractéristiques et les paramètres de forage pendant la traversée de ces formations, ainsi que quelques indices sur le gaz et les compositions minéralogiques et la déviation dans le puits.

Tout d'abord, le master log montre que :

Lias Anhydritique (LD1) : (2322m-2367m)

Il se compose d'une alternance d'Argile grise, gris vert rarement brun rouge, indurée légèrement silteuse, carbonatée et d'Anhydrite blanche, pulvérulente, translucide, microcristalline dure. Ces argiles sont instables à cause de leur comportement microscopique et les grandes contraintes dues à la compaction des couches, il existe aussi des bancs d'anhydrite blanche, pulvérulente, parfois gris blanc, cristalline avec passées d'Argile grise à gris vert, localement brune, Anhydritique, indurée.

Lias Anhydritique (LS1) : (2367m-2504m)

Il se compose des sels blancs à jaunâtre, translucide massif avec passées d'Argile grise à gris vert, brune à brun rouge, localement, salifère et Anhydritique par endroits, tendre à indurée, et d'Anhydrite blanche pulvérulente. Présence de rares niveaux de dolomie gris beige, argileux,

dure, ces sels sont des sels plastique qui ont la tendance à se détendre ou se rétracte à cause des contraintes de la formation, il contient aussi quelques bancs d'Anhydrite blanche, pulvérulente, parfois gris blanc, cristalline avec passées d'Argile grise à gris vert, localement brune, indurée et de Sel blanc à jaunâtre, translucide. Présence de niveau de Calcaire gris beige, microcristallin, dure.

Lias Anhydritique (LD2) : (2504m-2556m)

D'après le master log il se compose d'anhydrite blanche, pulvérulente, parfois gris blanc, cristalline avec passées d'Argile grise à gris vert, localement brune, salifère et Anhydritique par endroits, indurée et de Sel blanc à jaunâtre, translucide et niveaux de Calcaire gris beige, microcristallin, dure, parfois gris blanc argileux vers la base.

Lias Salifère (LS2) : (2556m-2645m)

Il se compose de sel blanc à rosâtre, translucide massif avec passées à intercalation d'Argile, brun rouge rarement gris vert, localement, parfois salifère, tendre à indurée, avec Traces de Lignites, ces sels ont le même comportement des sels de LS1

Lias Horizon "B" (LD3) : (2645m-2666m)

Il se compose de calcaire à calcaire dolomitique, gris blanc à blanc, argileux, tendre, et microcristalline, moyennement dur, avec rares passées d'Argile brun rouge, tendre à indurée, et d'Anhydrite, blanche, pulvérulente, se distinct par la présence d'eau sous des grandes pression qui fais des grands problèmes durant exploitation.

Lias (S1+S2) : (2666m-2999m)

Sel blanc à jaunâtre, translucide, avec intercalation d'Anhydrite blanche, grise, dure et passées d'Argile grise, brun rouge, localement salifère, tendre, avec des bancs d'anhydrite blanche, grise, massive, compacte, dure, avec intercalation d'Argile grise, brun rouge, tendre à indurée, localement salifère et passées de Sel blanc à jaunâtre, translucide.

Il contient aussi des dolomie calcaire, gris beige, microcristalline, dure.

Lias (S3) : (2999m-3269m)

Argile brune rouge à rouge brique, tendre à indurée, salifère par endroits anhydritique devient silteuse a la base, avec passées de Sel blanc jaunâtre, translucide. Ces argiles sont instable a cause des grandes pressions des couches.

B. Matériel utilisé [2]

1. La boue :

Dans cette partie on va détailler le type de boue utilisée les additifs ajoutées et les caractéristiques de la boue, d'abord la boue utilisé est une boue à base d'huile de densité 2.15 et d'un ratio huile /eau de 90/10, à cause des pression des pores élevées dans cette la phase, la densité de la boue est très grande et proche à celle de pression de fracturation, comme il existe des formation qui ils sont forer avec une vitesse de pénétration grande, il y'a un risque de l'augmentation d'ECD à cause d'augmentation des perte de charges dans l'annulaire qui peut causer la fracturation des formation fragiles, donc il faut assurer un bon nettoyage de fond et c'est pour ça on a utilisées des additifs pour augmenter la viscosité, d'autres part une boue de densité de 2.15 est une boue très lourde donc il aura une difficulté lors de son déplacement et aussi un risque de pitonnage vers le bas c'est pour ça il est nécessaire d'ajouté des dispersons pour faire disperser le particules solide et avoir un bon écoulements, l'existence d'un volume d'eau dans la boue exige l'utilisation des émulsifiants pour avoir une bonne liaison entre l'huile et l'eau, et comme les formations forer sont des formation qui contient des argiles instable et des sels donc il est nécessaire d'utiliser le lime pour éviter le gonflement des argiles et le NaCl pour éviter la dissolution de sel.

Pour la préparation d'un mètre cube de boue avec ces caractérisé et avec une densité de 2.05 il faut :

NB : les additifs utilisés sont notés dans le tableau suivant :

DIESEL	0.520	M ³
EAU	0.093	M ³
VERSACOAT-ALG	10	Kg/M ³
VERSAWET	4.98	Kg/M ³
VG-69	7	Kg/M ³
LIME	28	Kg/M ³
VERSATROL M	2.85	Kg/M ³
NaCl	32	Kg/M ³
BARYTE	1433.7	Kg/M ³

Table 13: composition de la boue utilisée pour le puits HMZA-1

Pour avoir un mètre cube de boue de densité 2.15 il faut ajouter un volume **Val** de baryte de densité 4.2 a un volume **Vb** calculer de boue de densité 2.05, le calcul des volumes se fait par la méthode suivante :

Nous avons :

$$Vf = Val + Vb$$

Et :

$$df.Vf = db.Vb + dal.Val$$

Avec :

Vf : volume de boue après l'alourdissement

Vb : volume de boue avant l'alourdissement

Val : volume d'alourdissant

df : densité finale

db : densité initiale

d_{al} : densité d'alourdissant

Calcule numérique :

$$Val + Vb = 1$$

$$2.05.Vb + 4.2.Val = 2.15$$

Donc pour avoir 1 mètre cube de boue de densité 2.15 il faut ajouter un volume Val = 0.0465 m³ à un volume Vb = 0.9534 m³

Donc il faut utilisée une masse Mal de baryte qui égale a :

$$dal = \frac{Mal}{Val}$$

Donc Mal = 4.2 * 0.04878

Donc la masse de baryte utilisée est : **2048 kg/m³**.

Après la préparation de la boue avec ses additifs, nous avons fait des tests et constaté que la boue possède les caractéristiques suivantes :

Densité	2.15
Yield point	10 – 14 lb/100 ft ²
Filtrat	2-6 cc /30min
Stabilité électrique	1730
% NaCl dans l'eau	26
% de solide par volume totale	3%
Alcalinité	2.5 cc
Ratio huile /eau	90/10
Epaisseur de cake	2-4 mm

Table 14: Caractéristiques de la boue utilisée

Lors du forage il faut suivre les paramètres de la boue pour éviter les problèmes indésirables :

La densité : durant le forage de l'horizon B et le LD2 il y a un risque de changement de densité de boue due ou eau salée sous pression et la nature des sales dans cette formation qui peuvent contaminer la boue et perdre ces caractéristiques, il est préférable de minimiser le temps que la boue reste dans l'état statique pour assurer qu'il y'a toujours l'ECD et éviter l'invasion des fluides de l'horizon B.

L'alcalinité : c'est un indice sur les performances des émulsifiants, dans les températures élevées il faut suivre la quantité des POM dans la boue pour vérifier la stabilité de l'émulsion, aussi l'alcalinité c'est un indice de la contamination de la boue avec le gaz ou les acides lorsqu'elle diminue.

LGS : il faut toujours suivre la concentration des solides dans la boue et qu'elle reste toujours inférieure à 5% pour garder les paramètres de la boue.

2. Le tubage

Le tubage descendue dans la phase 12 ¼ est un tubage de diamètre nominale de 9 5/8, nous avons utilisé un tubage qui se compose de deux tronçons de caractéristiques différentes que nous allons détaillés dans le tableau suivant :

Cote (m)	Top (m)	Diamètre extérieur (m)	Poids nominale (lb/ft)	Grade	Connexion	Diamètre intérieur (m)	Resistance aux collapses (Mpa)	Resistance aux bursts (Mpa)	Resistance à traction (10 daN)
3336	2000	9 ⁵ / ₈	53,5*	P110	BTC	8,535	54.8	75.2	761
2000	0	9 ⁵ / ₈	47,0*	P110	BTC	8,681	36.5	65.1	664

Table 15: Détails des deux tronçons de tubage utilisés

Les facteurs de sécurité choisis pour les résistances due à les contraintes appliquées sur le tubage sont :

Coefficients pour les collapses : 1.39

Coefficients pour les bursts : 1.46

Coefficients pour la traction : 2.35

Vérification si le tubage résiste aux contraintes extérieures appliquées dans les 2 points critiques :

a. La résistance aux collapses (Ecrasement)

On la vérifie lorsque le laitier est totalement dans l'espace annulaire et la boue de chasse dans l'intérieur de tubage, les forces d'écrasement se manifeste lorsque les forces appliquées à l'extérieur de tubage sont supérieur à celle qui sont appliquées sur l'intérieur

$$P_{ext} = \frac{Hb \cdot db}{10.2} + \frac{(H - Hb) \cdot dc}{10.2}$$

$P_{ext} = 706.77 \text{ bar}$

$$P_{int} = \frac{H \cdot db}{10.2}$$

$P_{int} = 697.09 \text{ bar}$

Nous avons : $(P_{ext} - P_{int}) \cdot C_c = 12.31 \text{ bar}$

Et on a la résistance de tubage aux collapses = **548 bar**

Donc le tubage résiste aux collapses.

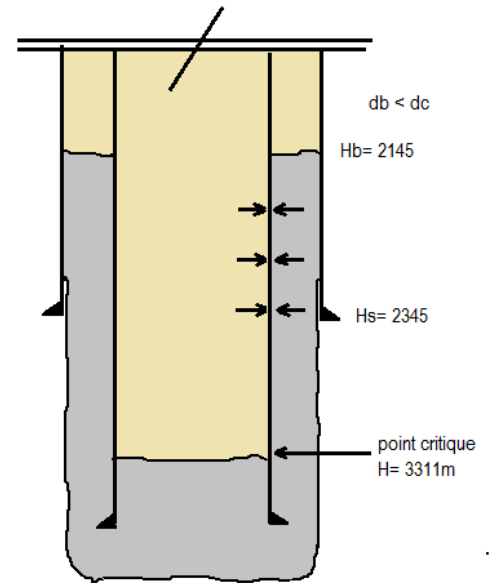


Figure 35: illustration de possibilité de collapse

b. La résistance aux bursts (Eclatement)

Lors du déplacement du laitier de ciment dans l'intérieur de tubage il existe un point critique où on a les forces intérieures appliquées sur le tubage sont supérieures à celles qui sont appliquées de l'extérieur, dans ce point-là, il faut calculer la résistance de tubage aux bursts.

Nous avons : $V_c = 42 \text{ m}^3$

Donc $H_{cm} = 1099.76$

Nous avons

$$P_{ext} = \frac{H_c \cdot db}{10.2}$$

Et

$$P_{int} = \frac{H_{cm} \cdot dc}{10.2} + \frac{(H_c - H_{cm}) \cdot db}{10.2}$$

Donc

$P_{ext} = 421.56$

$P_{int} = 425.71$

Nous avons : $(P_{int} - P_{ext}) \cdot C_b = 6.07 \text{ bar}$

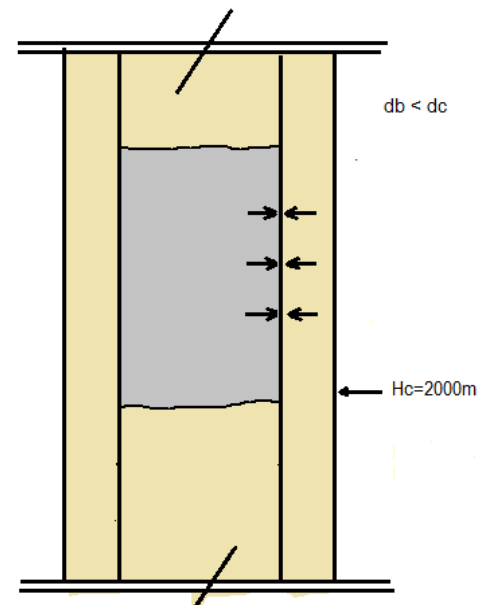


Figure 36: Illustration de possibilité d'éclatement

Et nous avons la résistance de tubage aux collapses = **651 bar**

Donc le tubage résiste aux bursts.

NB : les valeurs critique dans la vérification sont les valeurs minimales ou on a un risque d'éclatement ou écrasement de tubage.

c. La résistance à la traction

Il faut vérifier que le premier tube résiste au poids de toute les colonnes de tubage descendue, pour ça il faut calculer le poids de tous les tubes descendus dans le trou.

$$P_t = P_{n1} \cdot L_1 + P_{n2} \cdot L_2$$

Avec : P_{n1} : poids de tubage de 1er tronçon

P_{n2} : poids de tubage de 2eme tronçon

L : longueur de tubage

$$P_t = 246255.05 \text{ kg} = 241.493 \cdot 10^3 \text{ daN}$$

$$\text{Donc } P_t \cdot C_t = 567.51 \cdot 10^3 \text{ daN}$$

Et on a la résistance du 1^{er} tube a la traction = **$664 \cdot 10^3 \text{ daN}$**

Donc le tubage résiste aux forces de traction.

3. Les centreurs

Le nombre des centreurs descendus avec le tubage 9 5/8 joue un rôle important dans la centralisation du tubage et dans l'opération de cimentation dans le puits la distance entre les centreurs c'est elle qui décide le stand off, s'il y'a un grand nombre de centreurs donc la distance entre les centreurs est petite qui engendre un stand off grand, par définition le stand off c'est le rapport entre l'espacement minimale entre tubage troue sur l'espacement tubage troue

Un stand off inferieur a 70% indique que le tubage est mal-centrer qui engendre un mauvais déplacement de ciment

Dans notre cas, le nombre de centreurs utilisées est très important avec une moyenne de 2 centreur par tube avec une intercalation de 4 tubes entre chaque colonne comportant les centreurs dans les premier 500 mètres descendue, et une moyenne de 1 centreur par tube chaque 7 tubes, les centreurs descendus à l'intérieur de tubage précédent sont de type hard parce que on est sure que le diamètre intérieur de tube précédent est fixe par contre il y'a des centreurs soft dans le open well pour raison de changement du diamètre de troue

D'après le Logging on a constaté que le stand off dans notre cas est supérieur de 95% donc on a une bonne centralisation de tubage.

C. Probabilité de formation de Microannulus

1. Analyse des données

- Le master log montre l'apparition d'indice de gaz au niveau de la cote 2706 m, le taux de gaz augmente jusqu'à atteindre 40 % au niveau de S1 + S2, ces résultats indiquent qu'il y'a une probabilité d'invasion de gaz dans le laitier de ciment avant sa prise, c'est pour ça la présence du gaz favorise la formation du Microannulus
- Le gradient géothermique de cette zone est égal à 3.3 °C/100mla température de la formation du top de ciment égale à 70.785 °C et au Bottom de ciment égale a 110.088°C, donc on constate une variation de température de 40° le changement brusque de température peut influencer sur la déformation de ciment a son état solide qui engendre la création du Microannulus.
- La densité importante de la boue utilisée dans cette phase est due aux grandes pressions de pores surtout au niveau de l'horizon B, l'eau sous pression dans les formations et les formations silteuse de comportement plastique pourra engendrer une réduction dans le volume du ciment solide qui implique la formation des Microannulus.
- L'analyse des caractéristiques de boue montre que la boue forme un cake de 4 mm, a cette échelle un cake avec un cette épaisseur considérée comme un cake épais, comme la boue est très lourdes de densité de 2.15 le débit ne peut pas casser le cake, la formation de cake favorise l'invasion du gaz bers la surface, donc il y'a une possibilité d'avoir le Microannulus.
- Durant le déplacement du ciment jusqu'à sa prise on utilise une boue de densité de 2.15 qui explique l'existence des contraintes importantes appliquées sur l'intérieur de tubage, en stade là, on a une bonne étanchéité ciment-tubage, lors de forage de la phase 8 ½ l'utilisation de boue de densité 1.50 engendre la diminution des contrainte, à cause de la flexibilité de tubage, on a une grande possibilité de formation de Microannulus.
- Le nombre des centreurs utilisée est grand est suffisant pour éviter le mauvais déplacement de ciment qui peut causer le Microannulus.
- Les manutentions sur le tubage durant le placement de casing spool peuvent implique la création d'un micro-espace entre tubage et le ciment qui engendre la formation de Microannulus, l'erreur relative à la manutention peut causer le Microannulus.

2. Conclusion

Après l'analyse des données de notre cas au puits HMZA-1, on constate qu'il y'a un grand risque de formation de Microannulus.

D. Résultats du caliper

Les résultats de log du caliper effectué par l'unité Logging montre que le trou de puits est n'est pas à 100% parfait qui nous oblige à majoré le volume de ciment utilisé pour cimenter le

Tubage pour cela il faut étudier le log et extraire le volume de majoration :

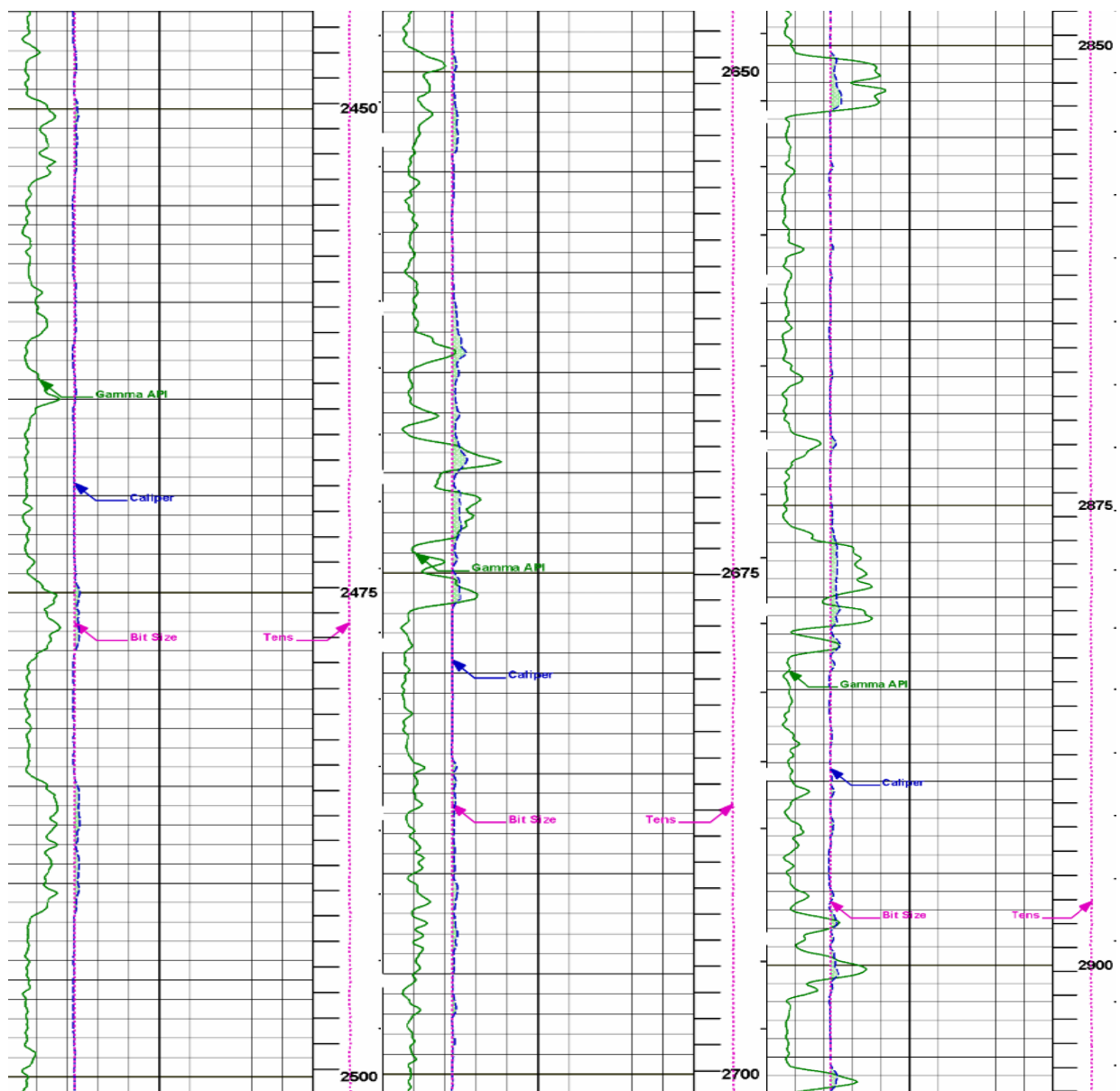


Figure 37: exemple d'une partie du caliper ou il y'a divergence Source : (résultats du caliper réalisé sur chantier)

L'analyse de log montre qu'il y'a quelque déviation de log de caliper par rapport à le log de taille de l'outil ces déviations sont de petites grandeurs entre 1 et 2 pouces et là plus est à la cote 2670 de 2 pouce. Le log montre qu'il existe 30 déviations pour cela les experts ont pris Un volume de majoration de 15%.

E. Test FIT

Le FIT est un test qui nous permet de connaître et déterminer la limite supérieure du choix de débit et de la pression d'injection de ciment, il est strictement interdit de dépasser cette limite par ce que le risque de causer la fracturation de la formation devient très grand.

La réussite de ce test est relativement liée aux informations et DATA initiales en notre possession telle que, le gradient de fracturation et la densité de la boue utilisée.

Dans notre cas ; les données utilisées sont représentée dans le tableau suivant :

Test	Profondeur (m)	Phase	Densité de boue	Pression de surface(Psi)
FIT 12 1/4	3326	12 1/4	2.15	730

Après avoir flasher les lignes de surface pour détecter les fuites, il faut fermer le pipe rams et le chock line avant de commencer le test.

Principe du test

Le test consiste à injecter des volumes calculés d'eau dans le puits pour augmenter la pression de 100 psi et observer l'évaluation de l'augmentation de la pression.

Une fois la pression de test atteinte, nous procédons à un le bleed off et mesurons le volume absorbé par la formation, si le volume est supérieur de 5 % le test est négatif.

Résultat

Après la réalisation du test FIT ; le volume récupéré après le bleed off est de 98% du volume injecté, qui veut dire que notre test est positif donc la limite supérieur de la pression d'injection est de 730 bar

F. Choix et composition du ciment

1. Facteurs influents le choix du ciment

La réussite d'une opération de cimentation est grandement liée au bon choix du ciment et des additifs qui serviront à l'élaboration d'un bon laitier de ciment capable d'assurer l'isolation des zones dites à risques.

a. La pression de fracturation

La pression due à la densité du ciment utilisé ne devra en aucun cas dépasser la pression de fracturation de la zone considérée, dans le cas contraire l'opération de cimentation ne pourrait avoir lieu suite à la fracturation des formations et donc une perte totale pourrait avoir lieu, aspirant ainsi tout le volume du puits.

Le gradient de fracturation minimal à ne pas dépasser dans cette zone est 2,28sg, sans quoi des conséquences désastreuses pourraient survenir.

b. La pression de pore

Comme pour le cas de la pression de fracturation la pression exercée par le ciment une fois au fond du puits ne devra jamais être en dessous de la pression de pore de la zone. Si cette condition n'est pas vérifiée, non seulement nous aurons à coup sûr des intrusions de fluide dans le ciment mais la possibilité d'avoir un kick jusqu'en surface est très grande.

Le gradient de pore maximal enregistré dans la zone a une valeur de 1,30sg, donc toute densité du ciment en dessous de cette sera synonyme de problèmes.

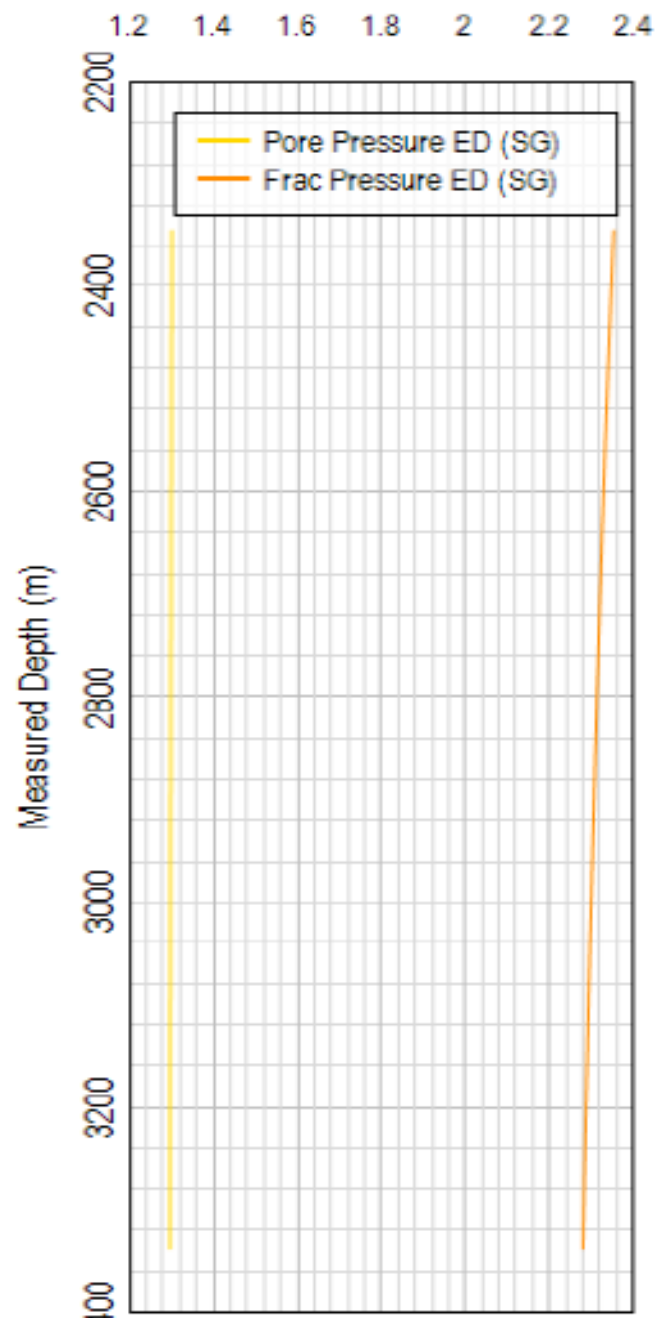


Figure 38: Evolution du gradient de fracturation et de pore en fonction de la profondeur [3]

c. Présence de zones à pressions anormales

En plus de la prise en considération des pressions de fracturations et pressions de pores qui dans le cas normal et habituel sont largement suffisantes, la considération de zones à problèmes, qui ont des gradients de pression anormal, élevés ou bas (élevés dans notre cas) est primordiale.

La zone problématique lors de cette phase reste incontestablement le LD3 plus communément connu sous le nom de l'HORIZON B ou le LD2 dans l'ancienne nomenclature, comme nous l'avons cité dans l'un des paragraphes précédents, cette formation a un gradient de pression avoisinant les 2.12sg ou 2.13 sg, donc il paraît évident que ce gradient la est largement supérieur au gradient de pore normalement situé à cette zone (entre 2645m et 2666m) qui est d'environ 1.29 sg, c'est d'ailleurs la principale raison qui a forcé auparavant l'utilisation d'une boue de grande densité (2.15sg) lors du forage de la phase 12^{1/4"}

d. Température au fond du puits

L'évolution de la température en fonction de la profondeur est aussi très importante lors du choix du ciment, pour la simple et unique raison que toute structure microscopique et toute réaction chimique (sachant que la prise du ciment est une réaction chimique) est influencée par le changement des conditions de température.

La température au fond du puits (BHT) a été mesurée lors de l'opération de descente du caliper et elle est égale à 120°C, avec une température de surface de 30°C et à une température de 3326m

Température au fond (C°)	Température en surface (C°)	Temps au fond corrigé (C°)	Profondeur de mesure (m)	Gradient de temps (C°/100m)
120	30	90	3326	3.3

e. Caractéristiques et propriétés chimiques des formations traversées

la présence d'eau ou d'effluent dans les pores des formations traversées peut influencer le choix des ciments. La composition chimique de ces effluents et leurs possibles interactions avec les constituants chimiques du ciment peuvent nuire à l'intégrité de la cimentation.

Comme notre cas où l'HORIZON B contient d'importantes quantités de CaCl_2 et de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, ce qui lui donne un caractère corrosif, ainsi que la présence d'acide carbonique et de CO_2 en quantités non négligeables ce qui donne à l'effluent un caractère nettement acide et qui peut engendrer une déshydratation prématurée du ciment

Résultats

Après l'étude des différents paramètres cités précédemment, en plus des quelques Offset Wells forés dans la zone avant, les ingénieurs de la société responsable de l'opération de cimentation se sont arrêtés sur un choix de laitier de ciment conventionnel avec une densité de **2.19sg**, une fraction en solide de **56.7%**, un fluide de mixage avec **418L/Tonne** et une porosité après prise de **43.3%**.

Densité du laitier (sg)	Fraction en solide(%)	Fluide de mixage (L/TONNE)	Porosité de la matrice(%)
2.19	56.7	418.06	43.3

2. Propriétés du laitier de ciment utilisé [3]

Afin de vérifier les propriétés et comportement du laitier choisis dans les conditions de fond, des tests en laboratoire doivent être faits

a. Composition du laitier de ciment choisis [3]

Composant	Concentration
Ciment sec	
Eau de gâchage	383.83 L/ tonne
Sel	18%BWOW
Anti mousse	1%BWOC
Réducteur de filtrat	0.2% BWOC
Saltbond	0.8% BWOC
Retardateur	0.45% BWOC
Barite	25%
Silica	35%

NB : Le ciment choisis est un ciment de classe G avec une densité à l'état sec de 3.15sg

Rôles des additifs ajoutés

- **Sel :** une quantité de 18% (du poids de l'eau) de sel est nécessaire afin de garder le laitier de ciment dans l'état le plus stable possible

-
- **Anti-mousses** : l'ajout d'une quantité de 1% d'agent anti moussant par rapport à la quantité du ciment est jugé nécessaire et suffisante afin d'éviter la formation de mousse et de bulles d'air pouvant provoquer une contamination de ciment
 - **Réducteur de filtrat** : c'est additifs la sont très important pour la réussite d'une bonne cimentation, afin de réduire la filtration de l'eau composant le laitier donc d'éviter une déshydratation prématurée du ciment (0.2% de la quantité de ciment)
 - **Saltbond** : ils sont ajoutés à 0.8% de la quantité du ciment utilisé, ils permettent une meilleur adhésion du ciment spécialement en face des formations salifère qui sont présentent en force dans notre phase (presque 60% des formations sont composée de sels)
 - **Les retardateurs** : ajouté à 0.45% du poids du ciment, ils permettent de retarder la prise de ce dernier et d'allonger le Thinckning time (TT) afin d'offrir une meilleure marge de manœuvre durant toute l'opération de cimentation

b. Caractéristiques rhéologiques [3]

Les principales caractéristiques de tout fluide sont ses propriétés rhéologiques, pour notre cas, elles sont représentées dans les tableaux suivants :

Température	30°C	90°C
(rpm)	moyenne	Moyenne
300	232	181
200	158	134
100	88	81
60	59	59
30	35	40
6	13	19
3	12	15
Gel 0	12	15
Gel 10	16	45
Viscosité	215 cpo	156.3 cpo
Yield point	19.31 lbf/100ft ²	27.26 lbf/100ft ²

Table 16: Résultats du viscosimètre FANN

c. Evolution des contraintes de cisaillement

Les tests rhéologiques sont principalement faits préalablement au niveau des laboratoires afin de déterminer le comportement et les propriétés du fluide durant sa phase liquide.

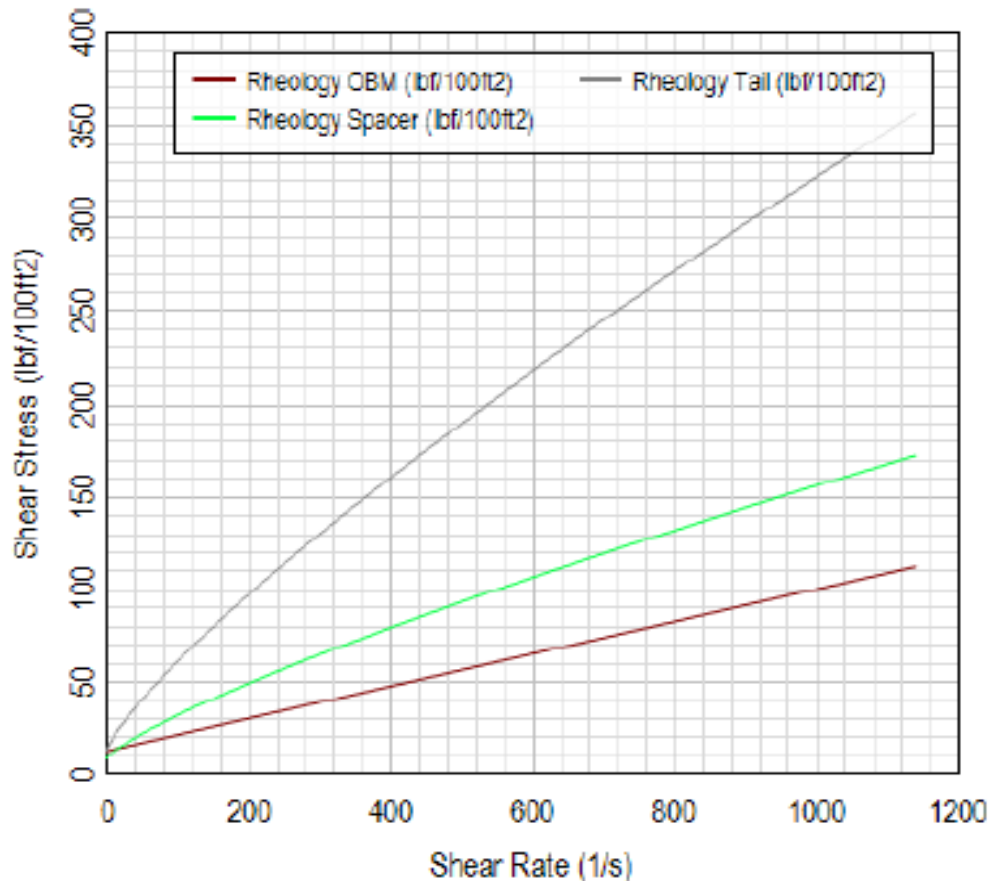


Figure 39 :Evolution des contraintes de cisaillement pour le fluide forage, le spacer et le laitier de ciment [3]

Interprétation :

Le graphe ci-dessus représente la variation des contraintes de cisaillement pour différents taux de cisaillement. Nous remarquons qu'au contraire du fluide de forage qui a clairement une allure et un comportement de fluide de Bingham, le laitier de ciment choisis penche plutôt pour un comportement de fluide d'Herschel-Bulkley avec de grande contraintes de cisaillement relativement au fluide de forage pour les même taux de cisaillements, par contre que le spacer est dans un état intermédiaire entre les deux précédant

Les paramètres identifiant le comportement du laitier de ciment en tant que fluide d'Herschel-Bulkley sont les suivant :

$$n = 3,32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \quad ; n = 0,806$$

$$K = \frac{\theta_{300}}{((510)^n)} \quad ; K=1, 16.10^{-2} \text{ lbf.s}^n/\text{ft}^2$$

$$\tau_0 = 2(\theta_{300}) - \theta_{600} \quad ; \tau_0 = 12,55 \text{ lbf}/100\text{ft}^2$$

Résultats :

La structure et composants du laitier de ciment choisis penche pour un comportement de fluide en puissance, or Comme expliqué dans la partie (comportement du ciment dans le chapitre 2), ces fluides la ont une mauvaise dispersion comparativement au fluides BINGHAMIENS.

Cette mauvaise dispersion qui peut être provoqué par l'absence d'agent surfactants lors de la préparation du laitier peut mener à la formation d'interstices ou de volumes de ciment contaminés par le spacer ou par le fluide de forage.

d. Disposition des fluides à l'intérieur du puits

Interprétation :

Nous remarquons depuis les graphes présents devant nous qu'à partir de 2350m la quantité et concentration du ciment varie d'une manière importante dans une zone qui ne doit comporter que du ciment, la diminution atteint parfois 20, 30 ou 50% du volume de ciment qui normalement doit être en place.

Ce volume de ciment absent ne reste toutefois pas vide, et est remplacé par le fluide de forage ou une combinaison de ce dernier avec de petites proportions de spacer

Nous retrouvons le volume du ciment perdu à l'intérieur du casing précédant mélangé avec la boue de forage et à des hauteurs ou il n'est pas prévu de le trouvé (1600m-1800m)

Résultats ;

Cette analyse vient conforter les résultats obtenus lors du paragraphe précédent, en confirmant la présence d'une mauvaise dispersion du ciment dans l'espace annulaire et par la même occasion la contamination du ciment par des volumes de boue même au niveau du sabot, ce qui va certainement fragilisé l'isolation de la zone, et diminuer sa capacité à résister aux pressions et aux conditions extérieurs

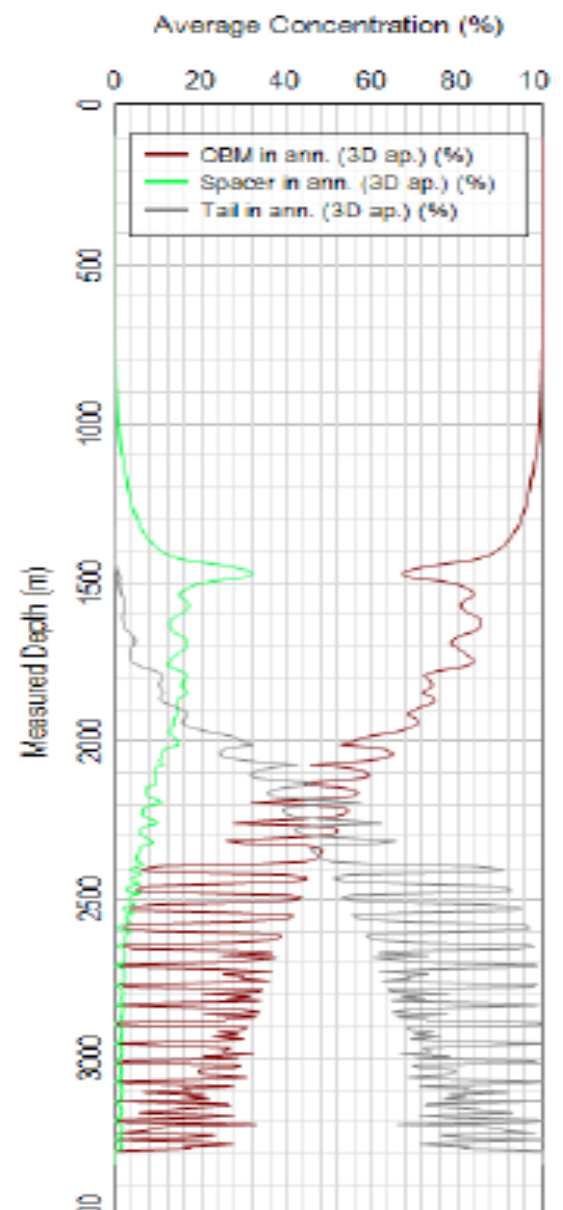


Figure 40: Concentration moyenne des différents fluides dans le puits [3]

G. Calculs de cimentation [30]

1. Le ciment classe G

Le ciment standard de classe G, est généralement utilisé pour la cimentation de puits n'excédants pas 2440m (800ft) et cela lorsqu'il est pur et utilisé sans ajout de quelconques additifs, il peut aussi être utilisé avec des accélérateurs ou retardateurs de prise afin de couvrir de plus larges gammes de profondeurs et de températures.

Il est strictement recommandé de n'y ajouté que des additifs à base de sulfate de calcium ou/et de l'eau bien sûr.

Ce ciment est aussi disponible en deux modèles, l'un avec une grande résistance au sulfate et l'autre avec une résistance modérée.

Sa densité est de 3.15sg (source : formulaire du foreur)

a. Calcul des volumes de cimentation

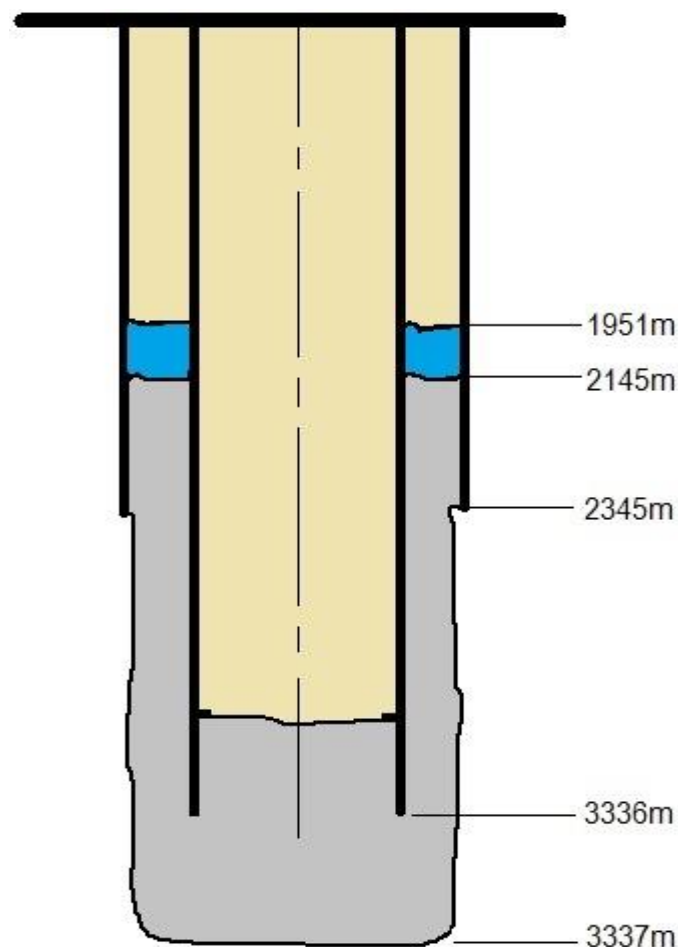


Figure 41: Schéma représentant la position du ciment dans le puits pour la phase 12"1/4

Avant de commencer nos calculs, nous devons préciser toutes les dimensions et grandeurs prévus :

h : hauteur du spacer (m)

H : hauteur du ciment (m)

$Lc1$: longueur du casing 95/8 47# (m)

$Lc2$: longueur du casing 95/8 53# (m)

Ecc : capacité de l'espace annulaire entre casing 13^{3/8}" et casing 9^{5/8}" (l/m)

Eoc : capacité de l'espace annulaire entre casing 9^{5/8}" et open Hole (l/m)

$Ec1$: capacité du casing 95/8 47# (l/m)

$Ec2$: capacité du casing 95/8 53# (l/m)

Vcc : volume de l'espace annulaire entre casing 13^{3/8}" et casing 9^{5/8}" (l)

Voc : volume de l'espace annulaire entre casing 9^{5/8}" et open hole (l)

Vst : volume de l'espace en open hole sous le sabot (l)

Vc : volume à l'intérieur du casing 9^{5/8}" entre float collar et sabot (l)

V_T : volume total du laitier nécessaire pour cette phase (l)

Vsp : volume du spacer (l)

Vd : volume de déplacement nécessaire pour mettre en place tout le volume de ciment (l)

$Va1$: volume de boue à injecter pour le premier à-coup (l)

$Zs1$: profondeur d'encrage du sabot du casing 13^{3/8}" (m)

$Zs2$: profondeur d'encrage du sabot du casing 9^{5/8}" (m)

Zf : profondeur du float collar (m)

i. Volume du spacer

Le volume du spacer étant injecté pour séparer des fluides de densités différentes, à savoir la boue de forage (2.15sg) et le laitier de ciment (2.19sg), son volume est généralement estimé de 15% à 20% du volume du laitier de ciment (15% pour notre cas)

$$V_{sp} = 0,15 . V_t$$

Donc :

$$V_{sp} = 6.05 \text{ m}^3$$

La hauteur du spacer dans l'espace entre les tubages 13^{3/8} et 9^{5/8}

$$h = \frac{V_{sp}}{E_{cc}}$$

$$h = 194 \text{ m}$$

ii. Volume du laitier de ciment

Volume du ciment entre casing 13^{3/8}" et casing 9^{5/8}"

Selon le programme de forage, le top du laitier de ciment de la phase 12^{1/4}" doit être à environ 200m à l'intérieur du casing précédant.

La capacité de l'espace annulaire entre casing 13^{3/8}" et casing 9^{5/8}" notée "Ecc" est de 31.16 l/m

Donc : $V_{cc} = 200 \times Ecc$

$$V_{cc} = 6232\text{l ou } 6.232 \text{ m}^3$$

D²

Volume du laitier de ciment entre casing 9^{5/8}" et open hole

La capacité de l'espace annulaire entre casing 9^{5/8}" et open hole "Eoc" est de 29.1 l/m

Nous avons : $V_{oc} = E_{oc} \times (Zs2 - Zs1)$

$$V_{oc} = 29.1 \times (3336 - 2345)$$

Donc : $V_{oc} = 28,838 \text{ m}^3$

En introduisant le facteur de majoration qui est comme cité auparavant de 15%, nous obtenant :

$$V_{oc} = 33.164 \text{ m}^3$$

Volume du laitier de ciment sous le sabot

Ce volume est calculé à l'aide de la formule du volume d'un cylindre :

$$V_{st} = \frac{\pi D^2 L}{4}$$

Avec :

L : La longueur de la section qui est égale à 1m

Ou bien en suivant la formule empirique suivante (diamètre en inches)

$$V_{st} = 0,5067 D^2$$

Donc nous aurons comme résultat :

$$V_{st} = 76l$$

Vu que nous sommes en open hole, l'introduction du facteur de majoration s'impose donc V_{st} devient :

$$V_{st} = 0,087 \text{ m}^3$$

Volume du laitier à l'intérieur du casing 9^{5/8}" entre float collar et sabot

La capacité de l'intérieur du casing est de 36,91 l/m

Nous avons : $V_c = Ec \times (Zs - Zf)$

Donc :

$$V_c = 0.885 \text{ m}^3$$

Le volume total du laitier de ciment nécessaire V_T

$$V_t = V_{cc} + V_{oc} + V_{st} + V_c$$

Donc :

$$V_T = 40,37 \text{ m}^3$$

iii. Calcul du volume de chasse

Pour le calcul du volume de chasse, il est indispensable de prendre en considération les différents poids nominaux des tubages utilisé en raison de leurs influence sur le diamètre intérieur des tubages et donc sur leurs capacités.

Nous avons : $Vd = Ec1 \times Lc1 + Ec2 \times Lc2$

Avec : $Ec1 = 38.18 \text{ l/m}$; $Lc1 = 2000 \text{ m}$

$Ec2 = 36.91 \text{ l/m}$; $Lc2 = 1312 \text{ m}$

Donc :

$$V_d = 124.7 \text{ m}^3$$

2. Calcul des volumes aux à-coups de pression

Lors de l'opération de cimentation il est nécessaire de surveiller l'évolution de la pression afin d'éviter d'atteindre la pression de fracturation d'un coté mais aussi de vérifier le bon déroulement de l'opération avec la nécessité de détecter les à-coups de pressions respectifs de l'arrivée du premier et second bouchon au niveau du float collar après injection des volumes calculés

Volume nécessaire pour avoir le premier à-coup de pression

$$Va1 = Vd - (Vt + Vsp)$$

Donc :

$$Va1 = 78.42 \text{ m}^3$$

Durant l'opération de cimentation, nous parlons en termes de baril ou de strokes, donc :

$$Va1 = 5125 \text{ str} = 493 \text{ bbl}$$

Volume nécessaire pour avoir le premier à-coup de pression

Le deuxième à-coup de pression est synonyme de fin de chasse (déplacement), donc fin de l'opération de cimentation, c'est-à-dire que tout le volume de déplacement a été pompé.

Donc

$$Va2 = Vd$$

$$Va2 = 8104 \text{ str} = 780 \text{ bbl}$$

3. Calcul du débit

Afin de réussir une opération de cimentation, il est indispensable de veiller à avoir certains paramètres essentiels, comme par exemple avoir une certaine vitesse d'écoulement du fluide afin d'obtenir un régime d'écoulement turbulent, qui permettra non seulement d'éviter le thickening time (vitesse assez importante) mais aussi de balayer toutes les zones même difficilement accessible de l'espace annulaire.

En vue de déterminer ces paramètres nous allons calculer leurs limites critiques à partir desquelles nous aurons changement de régime.

d. La vitesse d'écoulement critique dans l'espace annulaire

Rappelons que notre ciment est un fluide d'Herschel-Bulkley avec les caractéristiques suivantes :

$$n = 0,806$$

$$K = 1,16 \cdot 10^{-2} \text{ lbf.s}^n/\text{ft}^2$$

$$\tau_0 = 12,55 \text{ lbf}/100\text{ft}^2$$

$$d = 2.19 \text{ sg}$$

La vitesse critique que nous nommerons v_c est régit par la formule suivante dans le cas d'un fluide suivant le comportement d'un fluide en puissance :

$$v_c = 0,6 \left(\frac{(3470 - 1370n)K}{2,05d} \right)^{\frac{1}{2-n}} \left(\frac{2n + 1}{0,64(D_0 - D_i)n} \right)^{\frac{n}{2-n}}$$

Avec :

D_0 : diamètre de l'open hole

D_1 : diamètre extérieur du casing

$$v_c = 4.26 \text{ m/s}$$

e. Nombre de Reynolds Critique

Toujours pour notre laitier de ciment avec les mêmes caractéristiques, le nombre de Reynolds critique est déterminé à partir de la formule suivante :

$$Rec = 3470 - 1370n$$

$$Re_c = 2366$$

f. Calcule du débit critique

Le débit critique représente le débit minimal en dessous duquel, notre écoulement n'a plus toute son efficacité en termes de balayage et de remplissage de vides, il est calculé comme suit :

$$Q_c = v_c \times \frac{\pi(ea)^2}{4}$$

Avec :

v_c : vitesse critique dans l'espace annulaire entre casing et open hole (m/s)

ea : épaisseur de l'espace annulaire entre le casing et l'open hole (m)

Donc le débit nécessaire pour avoir un régime turbulent est de :

$$Q_c = 892 \text{ l/mn}$$

g. Débit utilisé l'or de l'opération

La société responsable de l'opération de cimentation a jugé utile d'utiliser un débit ne dépassant pas les 700 l/mn.

Ce débit est insuffisant pour donner un régime turbulent, donc le déplacement de la boue présente dans l'espace annulaire par le ciment et sa mise en place ne s'effectuera certainement pas de la meilleure des manières possibles.

Vitesse réelles du ciment dans l'espace annulaire

$$v = \frac{4 \times Q_r}{\pi(ea)^2}$$

Avec :

Q_r : débit réel utilisé = 700 l/mn

ea : épaisseur de l'espace annulaire casing- open hole en (m)

$$v = 3.34 \text{ m/s}$$

Cette valeur est clairement en dessous de la vitesse critique requise pour un bon déplacement

Remarque : bien que le débit ne soit pas suffisant pour obtenir un régime turbulent, mais aller au-delà de cette valeur la augmentera considérablement la pression et risquera de former un risque considérable sur la formation

4. Calcul des pressions

a. Evolution des pressions au fond du puits

Prévisions

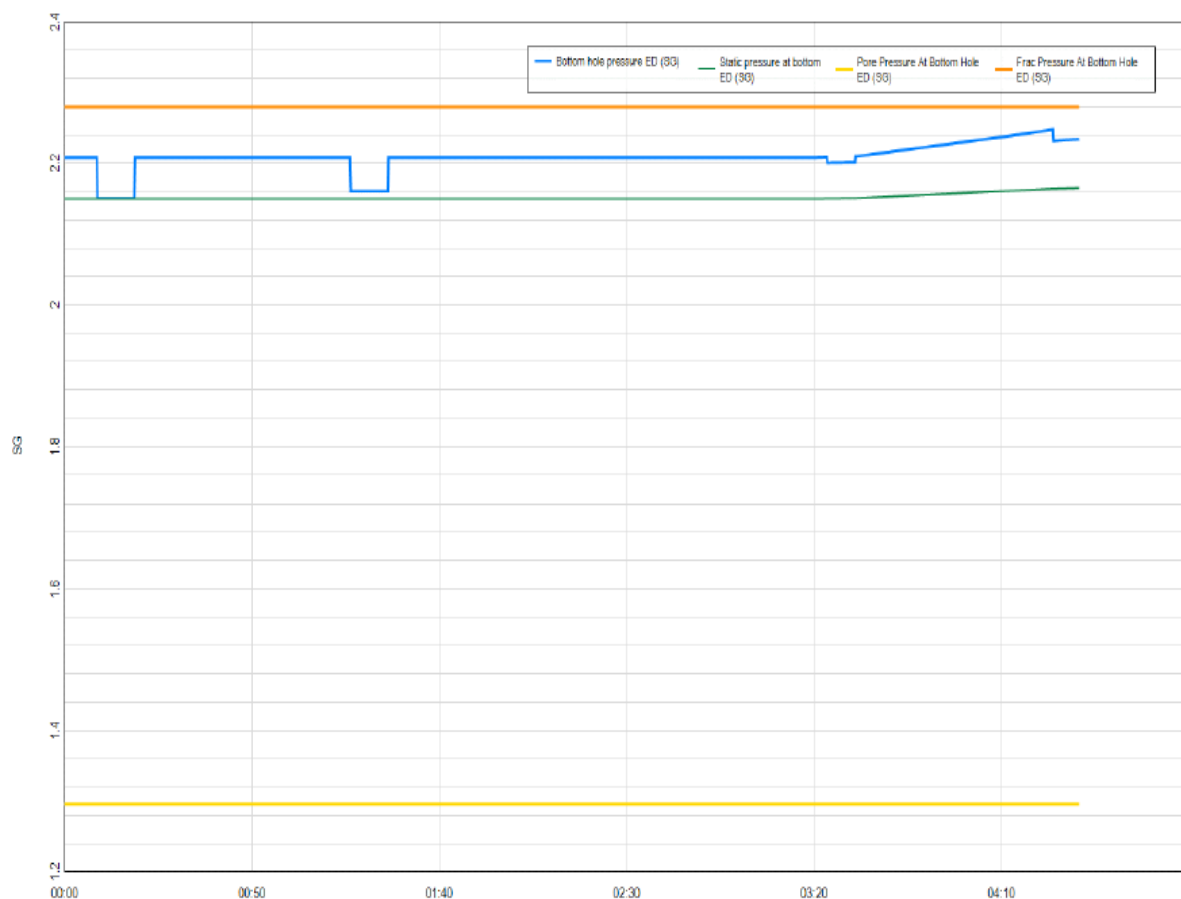


Figure 42: Evolution des pressions au niveau du sabot [3]

Interprétation :

Les graphes si dessus représentent l'évolution des différentes pressions au niveau du sabot pendant toute la période de l'opération de cimentation.

Nous remarquons clairement que malgré la pseudo-stabilité de la pression hydrostatique au fond du puits, la pression hydrodynamique quant à elle connaît une nette augmentation et dépasse même la pression du test de formation (FIT) qui est de 2.23sg en atteignant des niveaux potentiellement dangereux pour la formation à moins de 2 points du gradient de la pression de fracturation

Résultat :

Les simulations de pression ont été faites pour des débits de 700l/m, donc toute augmentation de débit pourrait engendrer de grave conséquences

b. Calcul théorique de l'évolution des pressions dans le puits

Pour notre calcul nous allons considérer le moment où nous avons le plus grand risque de causer des problèmes sur les formations et d'atteindre la plus haute valeur de pression possible en posons quelques conditions :

- La hauteur du ciment est équivalente à la hauteur de fin de chasse
- Le laitier de ciment s'écoule toujours
- Pertes de charges singulières négligeables

La pression au fond du puits (BHP) sera égale à la somme de la pression hydrostatique(Ph) exercé par les différents fluides présents dans l'espace annulaire et les pertes de charges engendrées suite au déplacement de ces mêmes fluides.

$$BHP = Ph + Pc1 + Pc2 + Pc3$$

Pc1 : pertes de charges dus au déplacement du laitier de ciment

Pc2 : pertes de charges dus au déplacement du spacer

Pc3 : pertes de charges dus au déplacement de la boue au-dessus du spacer

i. Pression hydrostatique

$$Ph = Ph1 + Ph2 + Ph3$$

$$Ph = \frac{(1192 \times 2.19) + (194 \times 2.17) + (1951 \times 2.15)}{10.2}$$

$$Ph = 708 \text{ bar}$$

ii. Pertes de charges

La formule de base pour le calcul des pertes de charges linéaire dans l'espace annulaire et pour un fluide ayant un comportement de fluide en puissance et en régime laminaire est la suivante :

$$P_c = \frac{KL}{13.26(D_0 - Di)} \left[\frac{2.18Q}{(D_0 + Di)(D_0 - Di)^2} \left(\frac{2n+1}{n} \right) \right]^n$$

Pour :

Le laitier de ciment : $P_{c1} = 1302 \text{ kPa} = 188 \text{ psi}$

Le spacer : $P_{c2} = 39 \text{ kPa} = 5.66 \text{ psi}$

Le calcul des pertes de charges est différent dans le cas de la boue de forage car cette dernière étant un fluide Binghamien avec les propriétés suivantes :

$$\mu_p = 42 \text{ cP}$$

$$\tau_0 = 12 \text{ lbf/100ft}^2$$

Détermination du régime d'écoulement :

Sachant que le débit utilisé lors de la chasse (Q_d) est de 700l/mn et que :

$$Q_d = \frac{v' \Pi(e)^2}{4}$$

Avec :

e : l'espace annulaire entre $13^{3/8}$ et $9^{5/8}$

v' : la vitesse de la boue de forage dans (e)

Donc nous obtenons :

$$v' = \frac{4Q_d}{\Pi(e)^2}$$

$$v' = 1.64 \text{ m/s}$$

Calcule du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho v' e}{\mu}$$

Donc :

$$Re = 8 < 2300$$

Nous pouvons conclure alors que nous avons un régime laminaire

Les pertes de charges dans l'espace annulaire pour un tel fluide en écoulement laminaire sont calculées comme suit :

Donc :

$$P_c = Fa \frac{L \rho v'^2}{2e}$$

Fa : étant le facteur de frottement qui est égale à (Re/64)

C'est-à-dire : Fa = 0.125

Cela donne : $P_c = 7402 \text{ Pa} = 1.073 \text{ psi}$

Ce qui nous donne des pertes de charges totales d'une valeur de :

$$P_{ct} = 195 \text{ psi} = 13.43 \text{ bar}$$

Tout ça nous mène à une pression au fond du puits de :

$$\text{BHP} = 721 \text{ bar}$$

Résultat :

En respectant le débit choisis qui est de 700l/mn la pression au fond du puits (BHP = 721 bar) calculée depuis l'espace annulaire pour son cas le plus critique c'est-à-dire lorsque tout le volume de ciment a été déplacé ne va pas dépasser la pression de fracturation ($P_{fra} = 745$ bar), ni même atteindre la pression de test de formation réalisé au préalable (FIT = 730 bar)

H. Logging et vérification du Microannulus [5]

Dans le but de déterminer l'influence de tous les paramètres cités au-dessus, du choix du casing, passant par la nature du ciment utilisé et ses caractéristiques rhéologiques, et arrivant aux paramètres hydrauliques appliqués.

Nous allons maintenant faire une analyse et essayer d'établir un diagnostic sur l'état du puits, plus précisément de la phase 12^{1/4"}, et cela en se basant sur les résultats de l'enregistrement CBL et VDL obtenus

1. Présentation du Logging :

Le job de Logging a été réalisé en puits ouvert (sans pression exercée) à travers le tubage 9^{5/8"} depuis la profondeur 1841m jusqu'à 3331m à travers une boue de densité 1.5 sg

Objectifs du Logging :

- Evaluer l'état du puits et des formations à travers l'open hole de la phase 8^{1/2"}
- Evaluer l'état du ciment derrière le casing 9^{5/8"}

2. Analyse généralisée

Si nous nous basons sur l'allure générale de l'enregistrement nous remarquons que sur la majeure partie de ce dernier l'amplitude du CBL est plutôt faible, et même nulle à certains endroits, en y ajoutant le temps de transit des ondes émises qui a une allure quasi constante et l'aspect assez claire des ondes de tubage, de formation et de boue sur l'enregistrement VDL, nous pourrions conclure que notre cimentation est pratiquement parfaite, surtout si nous nous concentrons sur les zones qui sont souvent délicates comme la zone de pose du sabot par exemple comme le montre l'enregistrement que nous avons en notre possession.

3. Analyses et interprétations détaillée

Maintenant nous allons nous intéresser à des zones plus petites, des zones qui rassemblent des facteurs pouvant favoriser une mauvaise cimentation et surtout la formation de Microannulus.

a. HORIZON B

Analyse

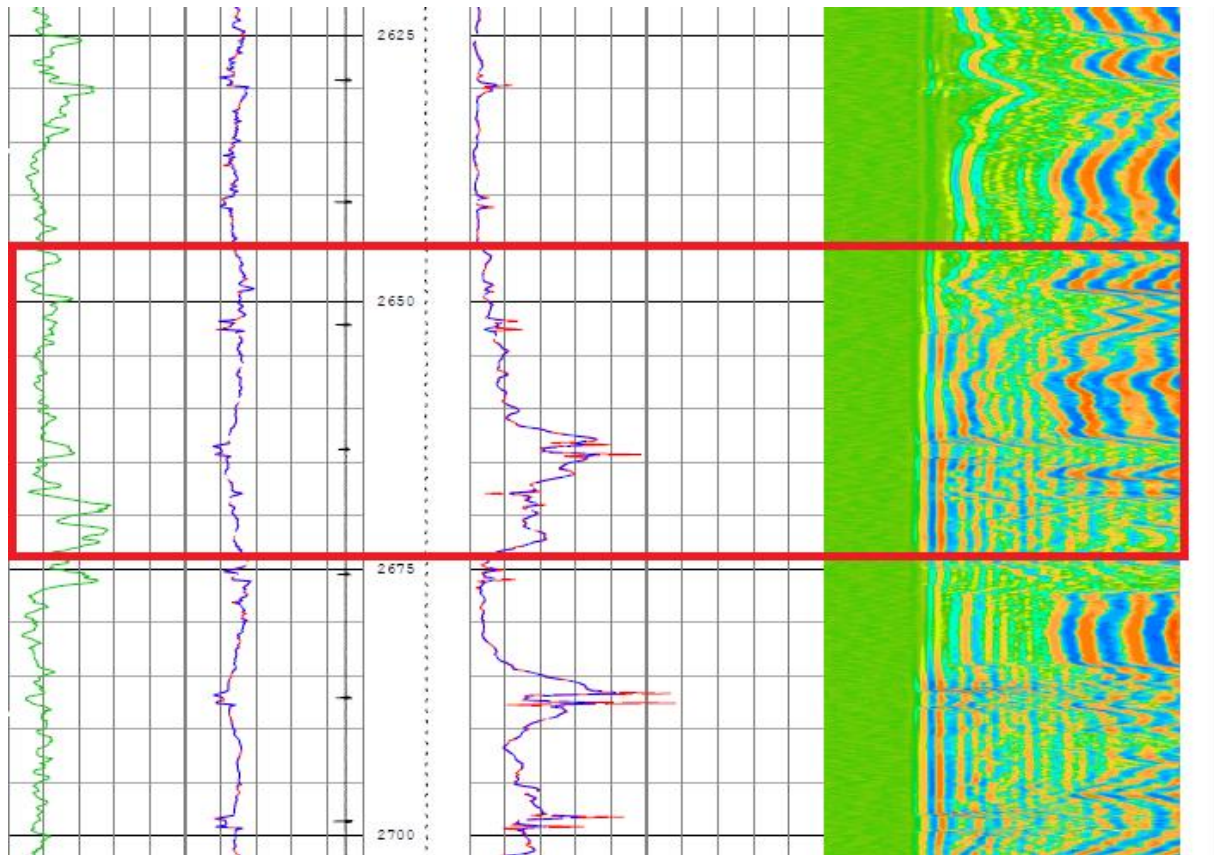


Figure 43: Enregistrement CBL-VDL de la zone LD3 [5]

Remarquons que sur tout l'intervalle de cette zone et même quelques mètres en dessous, l'amplitude du CBL varie en atteignant même une valeur de 40mv au niveau de l'extrémité inférieure de la formation LD3 mais reste assez loin de son maximum.

Aussi nous constatons une légère déviation sur l'allure de l'enregistrement du temps de transit ou de passage.

Concernant l'enregistrement VDL, il est évident que nous avons sur la majeure partie de cette zone l'apparition des ondes de tubage suivies des ondes de formations à leurs tours suivies des ondes de boue.

Interprétation

La combinaison de ces analyses peut être synonyme d'une mauvaise cohésion entre le ciment et le tubage, c'est à dire la formation d'un Inner Microannulus.

Car comme cité dans le chapitre II, lors de la formation d'un Inner Microannulus le couplage acoustique se fait tout de même mais pas d'une manière adéquate

b. Le Lias Salifère S1+S2

Analyse

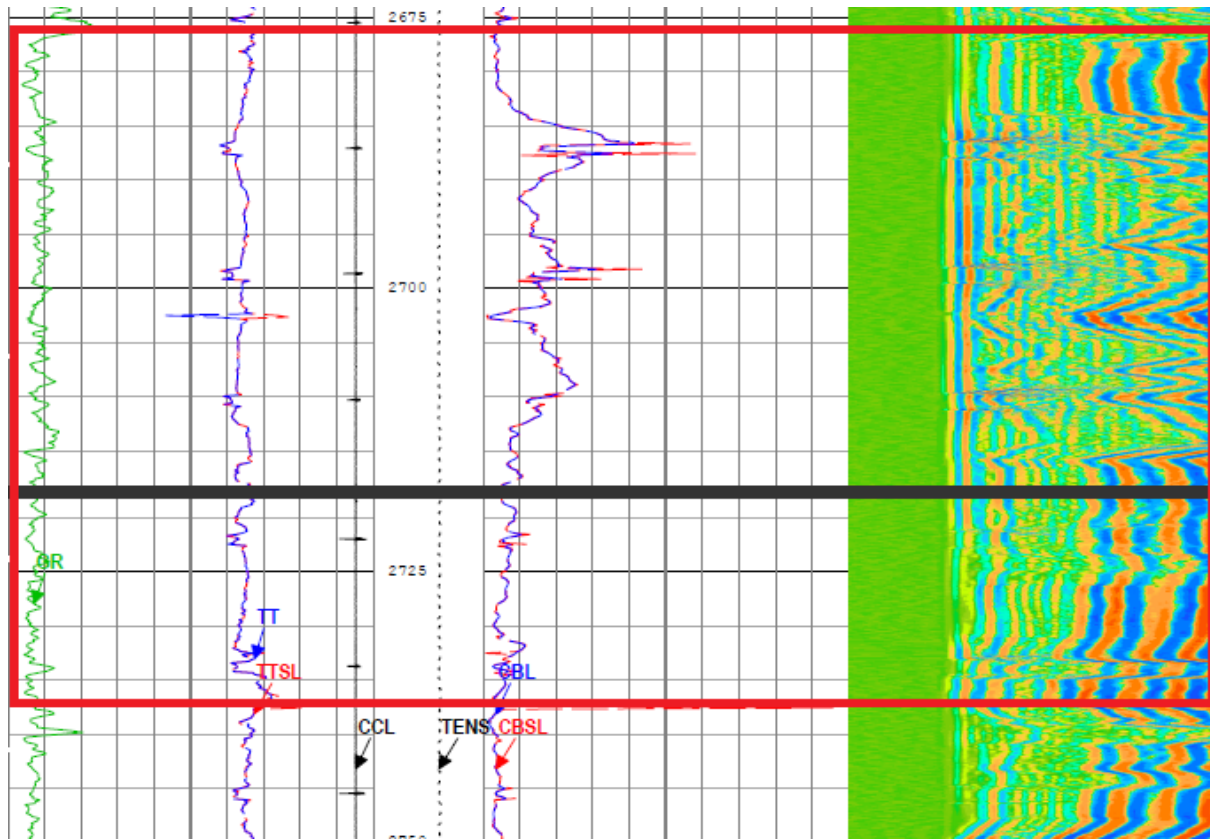


Figure 44 : Enregistrement CBL- VDL du Lias Salifère S1+S2 [5]

Comme pour le cas de l'HORIZON B nous remarquons une augmentation de l'amplitude du CBL atteignant aussi les 40mv

Pour le temps de transit, son allure continue avec le même aspect que celui de l'horizon B

La différence est constatée au niveau de l'enregistrement VDL, sur ce dernier nous constatons une atténuation importante des ondes de tubage, ou il est vraiment difficile de les distinguer par moment. Ces dernières sont directement suivies par les ondes de boue

Interprétation

Tous ces éléments cités lors de l'analyse nous mènent à penser qu'une potentielle mauvaise adhésion entre le ciment et la formation a pu avoir lieu. Dans ce cas de figure nous aurons une formation d'un Microannulus, spécialement en raison de l'absence des ondes de formations.

L'une des raisons principales de ce phénomène est la présence de cake d'une grande épaisseur (environ 2mm)

4. Résultat

Bien que l'allure générale des enregistrements soit plutôt satisfaisante, l'analyse détaillée a démontré que de possible failles lors de la cimentation ont pu avoir lieu, et que la formation d'un Microannulus est forte probable

Remarque:

Même pendant les enregistrements obtenus pour la partie inférieure restante de la formation S1+S2, l'aspect des enregistrements n'a pas beaucoup changé et donc la même analyse peut y être appliquée, et cela jusqu'au top du LIAS S3 (3000m) où nous remarquons une cimentation que nous pouvons qualifier de parfaite avec la présence d'onde de casing, de formation et de boue toutes bien distinctes

5. Calcul de la taille du Microannulus [31], [29]

Il est très important de calculer la taille de Microannulus pour déduire le débit et la vitesse de migration de gaz vers la surface pour savoir la gravité de l'incident due au problème.

La taille du Microannulus est liée directement à la déformation de ciment à cause de la réduction de volume et à la déformation de tubage à cause de changement de la densité de la boue qui influe sur la pression hydrostatique à l'intérieur du tubage.

Donc on peut écrire :

$$dn = uso + dc$$

Avec : dn : la taille du microannulus

uso : le déplacement de la paroi extérieure du tubage

dc : Déformation du ciment

Le déplacement de la paroi extérieure de tubage est égal à le déplacement due à la pression hydrostatique appliqué par la boue de densité 2.15 moins le déplacement due à la pression hydrostatique appliqué par la boue de densité 1.50 en tenant compte de paramètres mécaniques de tubage comme le module de Young et le coefficient de poisson.

$$uso = \frac{1 + \nu_1}{E_1} \frac{2(1 - \nu_1)r_i^2 r_1}{r_1^2 - r_i^2} \frac{H}{10.2} (db_1 - db_2)$$

Avec :

v_1	$E_1(\text{Bar})$	$r_1 (\text{M})$	$r_i (\text{M})$	db_1	db_2	H (m)
0.3	2068427	0.244475	0.216789	2.15	1.50	2300-3300

$$uso = 5.0447 * 10^{-8} * H$$

Au niveau de HB (a la cote H= 2660) :

$$uso = 134.47 \mu\text{m}$$

La déformation du ciment est due essentiellement à la réduction de son volume à cause des contraintes extérieures appliquées sur le ciment, pour calculer la déformation radiale du ciment il est nécessaire de connaître la contrainte radiale, tangentielle, et axiales.

D'après l'équation de Lamé nous avons :

La contrainte radiale égale à :

$$Sr = P_i \left(\frac{A_i}{A} \right) \left(1 - \left(\frac{D}{b} \right)^2 \right) - P_o \left(\frac{A_o}{A} \right) \left(1 - \left(\frac{d}{b} \right)^2 \right)$$

La contrainte tangentielle égale à :

$$St = P_i \left(\frac{A_i}{A} \right) \left(1 + \left(\frac{D}{b} \right)^2 \right) - P_o \left(\frac{A_o}{A} \right) \left(1 + \left(\frac{d}{b} \right)^2 \right)$$

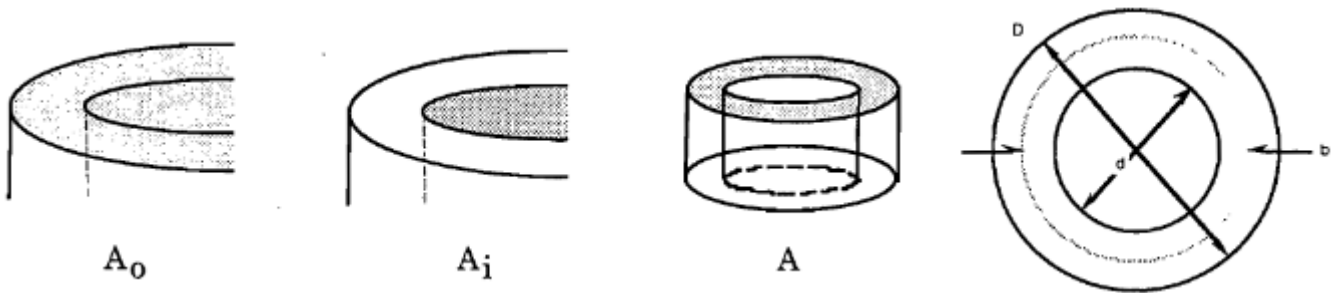
La contrainte axiale égale à :

$$Sz = \frac{T}{A}$$

La déformation radiale égale à :

$$e_r = \frac{Sr - v(St + Sz)}{E} + \beta(\Delta t)$$

Avec :



A_0 : la section horizontale du puits

A_i : la section horizontale de l'intérieur du tubage

A : la section horizontale de l'espace annulaire entre formation et tubage

D : le diamètre du puits

Calcul numérique :

v_2	$E_2(\text{Bar})$	$D \text{ (M)}$	$d \text{ (M)}$	db_1	Gf	$H \text{ (m)}$
0.17	1100000	0.31115	0.244475	2.15	2.13	2300-3300

Au niveau de HB (a la cote $H=2660$) :

$$A_0 = 0.076037 \text{ m}^2$$

$$A_i = 0.046941 \text{ m}^2$$

$$A = 0.029095 \text{ m}^2$$

$$b = 0.066675 \text{ m}$$

$$S_r = -731.84913 \text{ bar}$$

$$S_t = -39770.26303$$

$$S_z = 15552.93$$

Nous aurons :

$$er = 0.0044079 \text{ m} ; \text{ Donc } dn = 4542.37 \mu\text{m} \text{ au niveau de HB}$$

Conclusion

En se basant sur ce qui a été dit et cité durant ce chapitre nous pouvons nous arrêter sur les points suivants :

- Les caractéristiques du tubage choisis sont cohérentes avec les formations et les besoins du forage
- Les caractéristiques du ciment qu'elles soient rhéologiques ou hydrauliques ont bien étaient adaptées pour éviter les dégâts rencontrés habituellement, comme la fracturation ou la prise prématurée du ciment.
- Bien que l'aspect général de la cimentation est bon, mais cette dernière comporte quelques failles surtout au niveau des formations sensibles
- La présence de gaz dans certaines formations comme le cas du S1+S2 et d'un cake épais favorise la formation du Microannulus
- La taille réduite du Microannulus rend peut être ce phénomène inoffensif à court terme, mais ces effet peuvent être catastrophique à long terme

La détermination des différentes causes du problème du Microannulus nous aidera à trouver et mettre en place des solutions de prévention afin de faire face à ce problème, et c'est ce que nous allons aborder dans le prochain chapitre

Chapitre V : Suggestions et solutions du problème

Introduction

La cimentation est un aspect essentiel pour assurer l'intégrité d'un puits, cette intégrité est assurée par la bonne adhérence du ciment avec le système matrice, une mauvaise adhérence du ciment avec le système matrice causée par plusieurs facteurs provoque l'apparition du phénomène du Microannulus qui engendre la migration du gaz vers la surface.

Plusieurs incidents catastrophiques ont été remarqués à cause de la négligence du phénomène du Microannulus dans les puits à gaz ou même dans les puits à huile qui contiennent un pourcentage de gaz (dans ce cas la probabilité de provoquer l'incident augmente avec le temps).

Le traitement de ce problème est très cher d'un côté et très difficile d'un autre côté, à cause de la difficulté de restauration et squeeze dans des micro-espaces, l'opération work over coûte aussi très chère, plus d'1 million de dollars pour un puits de production, ce traitement peut être évité par la prévention et la mise en place d'un système qui prend en compte le phénomène du Microannulus.

A. La technologie NHPS [7]

1. Présentation de la technologie NHPS

Le facteur majeur qui provoque l'apparition du Microannulus est la réduction du volume de ciment due aux contraintes extérieures appliquées, le comportement du ciment favorise ce phénomène, c'est pour ça que la prévention nécessite l'utilisation d'un nouveau système qui a un comportement stable et qui réagit face à ces contraintes.

Le NHPS ou Novel High Performance Sealant est un design du ciment qui a une composition différente de celle du ciment class G (le ciment le plus utilisé dans le sud algérien), et un comportement flexible qui assure une bonne étanchéité du système tubage – ciment – formation.

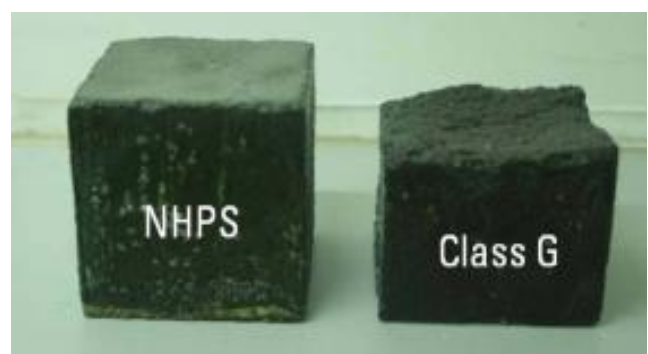
La technologie de NHPS est basée sur la distribution engineered particule-size (EPS), le concept est basé sur l'utilisation des particules flexibles avec des agents qui contrôlent la densité et des agents extensibles qui donnent au ciment des propriétés mécaniques comme la flexibilité et la capacité d'être extensible et reste non affecté par les contraintes extérieures et s'adapte à la déformation de casing ou des formations instables sans causer le Microannulus.

Grace au module de Young réalisable de ce système, il peut réaliser une expansion sans causer des fissures à l'intérieur de la matrice ciment, cette expansion est la moyenne pour éviter le Microannulus et augmente l'étanchéité des limites ciment-tubage et ciment-formation.

Le système NHPS assure une faible perméabilité dans la matrice par rapport au ciment de classe G, grâce à la taille des particules utilisées, il n'est pas nécessaire d'utiliser un grand volume d'eau pour avoir une densité bien déterminé qui nous assure une faible porosité.

Les additifs expansifs dont il est fait le plus souvent mention dans la littérature contiennent sulfates, chaux et aluminates, les différentes formules et les dosages conduisant vraisemblablement à la formation du sulfo-aluminate tricalcique ou sel de CANDLOT.

D'autres sels peuvent être utilisés comme agents expansifs ; certaines bases, chaux et magnésie en particulier, ont été proposées mais leur emploi est dangereux car, utilisées en excès, chaux et magnésie foisonnent et peuvent disloquer le ciment.



Test destructif [7]

Ce test nous aide à déterminer les points critiques des forces appliquées sur le ciment pour le détruire en fonction du temps (en jours), il nous donne une image sur les paramètres mécaniques du ciment telle que la durabilité. Il est utilisé surtout pour la comparaison entre 2 types de ciment différents, mais de même densité et sous les mêmes conditions de température et de pression.

Pour notre cas le test a pour but de comparer entre le ciment classe G et le NHPS, les résultats de test sont illustrés de la manière suivante :

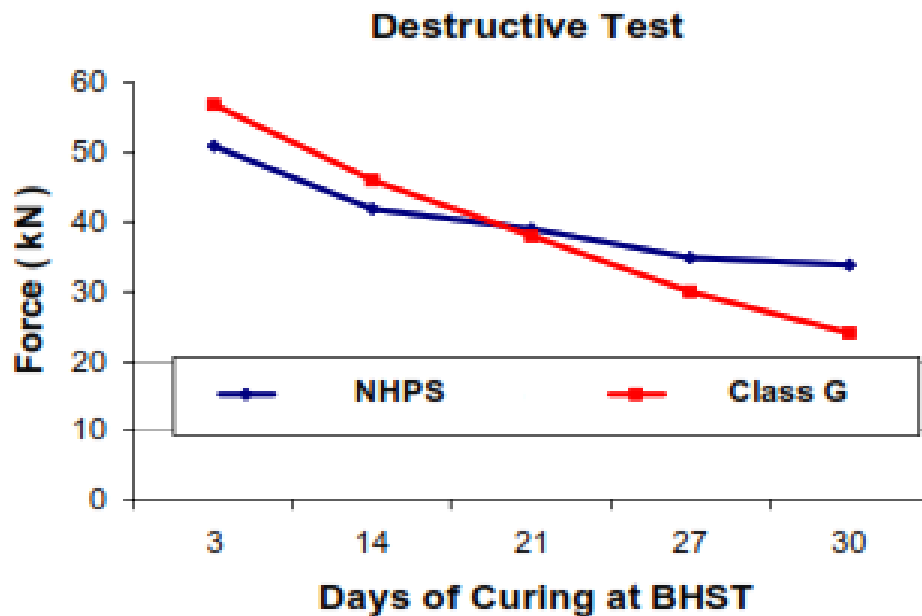


Figure 45 : Représentation des différentes réponses du NHPS et du classe G au teste de destruction [7]

Le test montre que le ciment de classe G perd ses paramètres mécaniques avec le temps contrairement au ciment NHPS qui est très stable et qui les conserve.

2. Application du NHPS en Algérie

L'historique de l'application du ciment NHPS en Algérie montre que l'utilisation de cette technologie est très efficace pour éviter les surpressions dans l'annulaire durant la production qui est due essentiellement au phénomène Microannulus.

Le tableau suivant montre les résultats de l'utilisation du ciment de classe G et le ciment NHPS dans des différents puits dans la même région Hassi Guetter (Algérie) en 2004.

Puits	Année	Système	13 3/8 – 9 5/8 Bar	9 5/8 – 7 Bar
HGA-3	1996	Conv		70
HGA-4	1998	Conv		50
HGA-6	2002	Conv	25	
HGA-7	2002	Conv	40	70
HGA-8	2002	Conv	80	120
HGA-9	2003	Conv	Fermé	Fermé
HGA-10	2003	Conv	Fermé	Fermé
HGA-11	2003	NHPS	0	0
HGA-12	2003	NHPS	No data	No data
HGA-13	2003	Conv	No data	No data
HGA-14	2004	NHPS	0	0
HGA-15	2004	NHPS	0	0
HGA-16	2004	NHPS	0	0

Table 16:: Statistique de quelques puits à Hassi Guettar [7]

Le tableau montre que lors nous utilisons du ciment NHPS, on note qu'il n'existe pas de pressions a l'annulaire c'est-à-dire que le ciment assure une bonne étanchéité tubage-ciment et qu'il a éliminé le phénomène de Microannulus.

Pour bien comprendre le comportement du système NHPS après sa prise des logs de CBL sont enregistrés a des périodes différentes pour montrer l'extension du ciment NHPS avec le temps.

Les logs sont faits généralement après 6 à 7 jours à partir de la prise du ciment, la qualité de la cimentation est variée entre moyenne et bonne dans le cas de l'utilisation du ciment de classe G et de bonne jusqu'à très bonne dans le cas où on utilise un ciment NHPS comme il est illustré dans la figure suivante

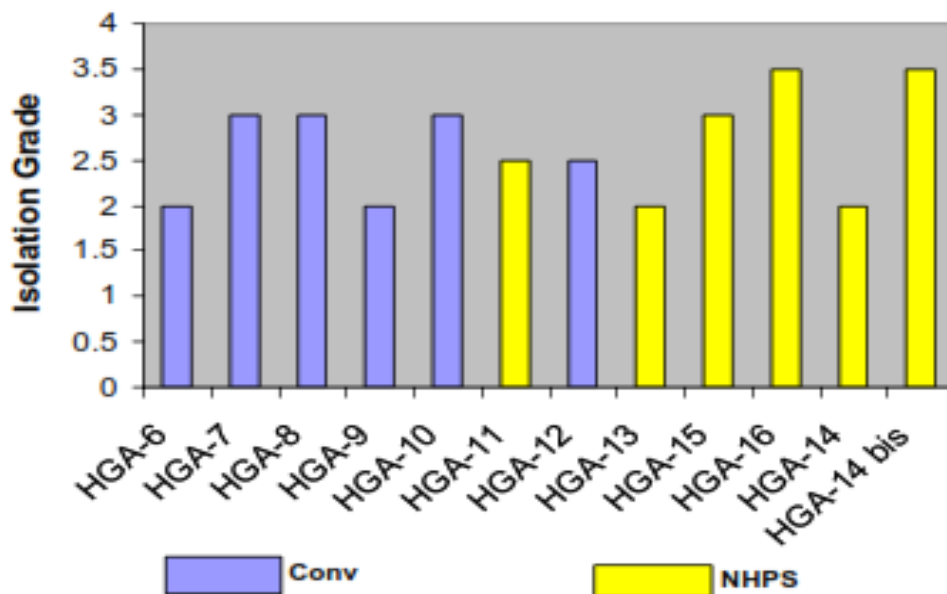


Figure 46: Différentes valeurs du gradient d'isolation pour des puits cimenté avec le classe G et le NHPS [7]

Dans le puits HGA-14 le CBL et VDL sont utilisés afin d'évaluer le comportement du ciment après son prise, le premier log est fait après 6 jour de la prise et le 2eme 19 jours après la cimentation, les enregistrements sont représentés dans les logs suivant :

Dans le log la ligne continue représente l'amplitude de l'enregistrement après 19 jours par

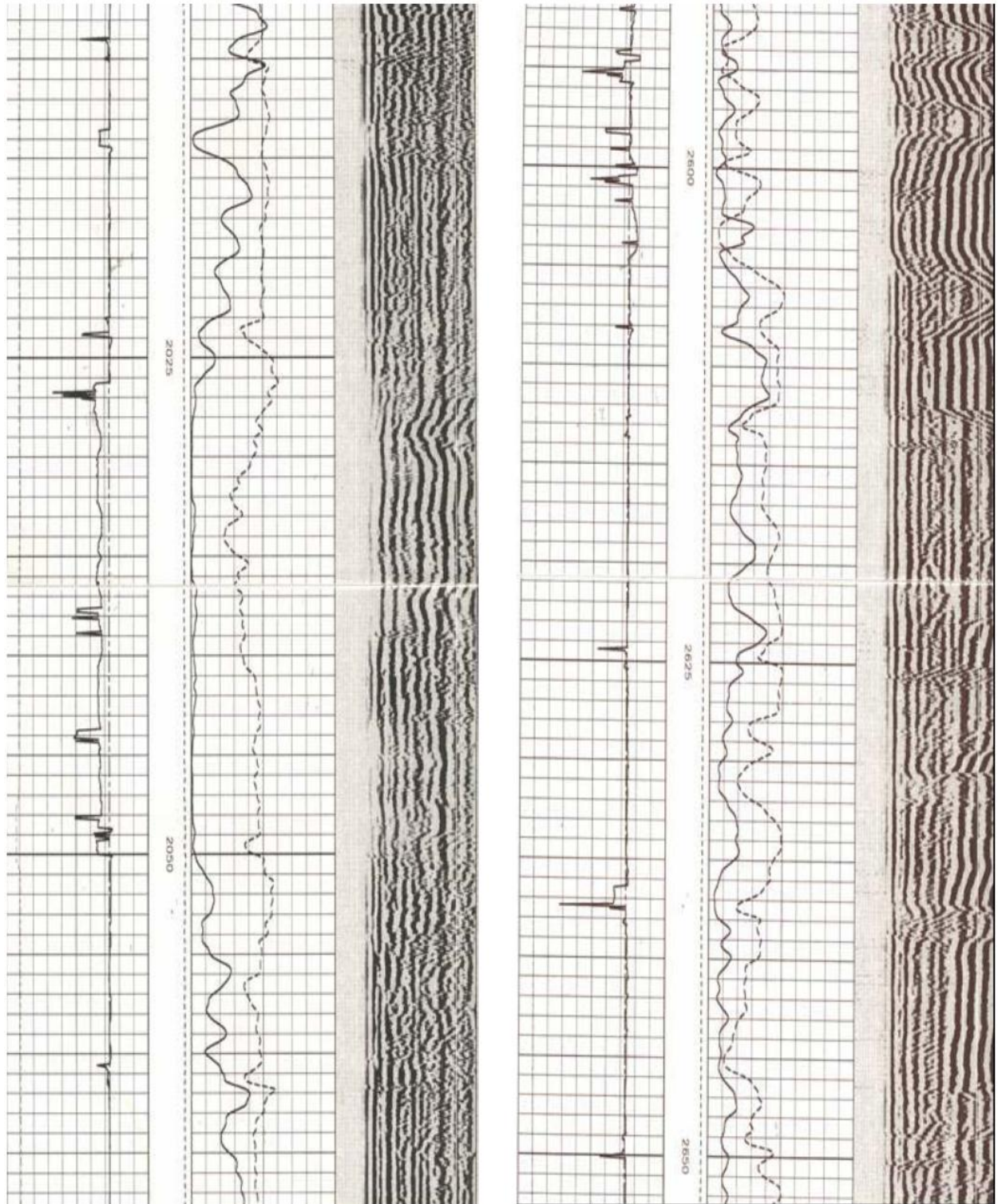


Figure 47: comparaison entre un enregistrement CBL-VDL dans un même puits à 13 jours d'Interval [7]

contre la ligne en pointue représente l'enregistrement après 6 jours, on remarque bien que l'amplitude de l'enregistrement après 19 jours est inférieure de celle de 6 jours le long de toute la profondeur, une amplitude faible indique qu'il y'a une bonne cohésion entre le ciment et le tubage qui prouve l'expansion du ciment. Dans les mêmes conditions, L'expansion du ciment NHPS avec le temps est illustrer avec la figure suivante :

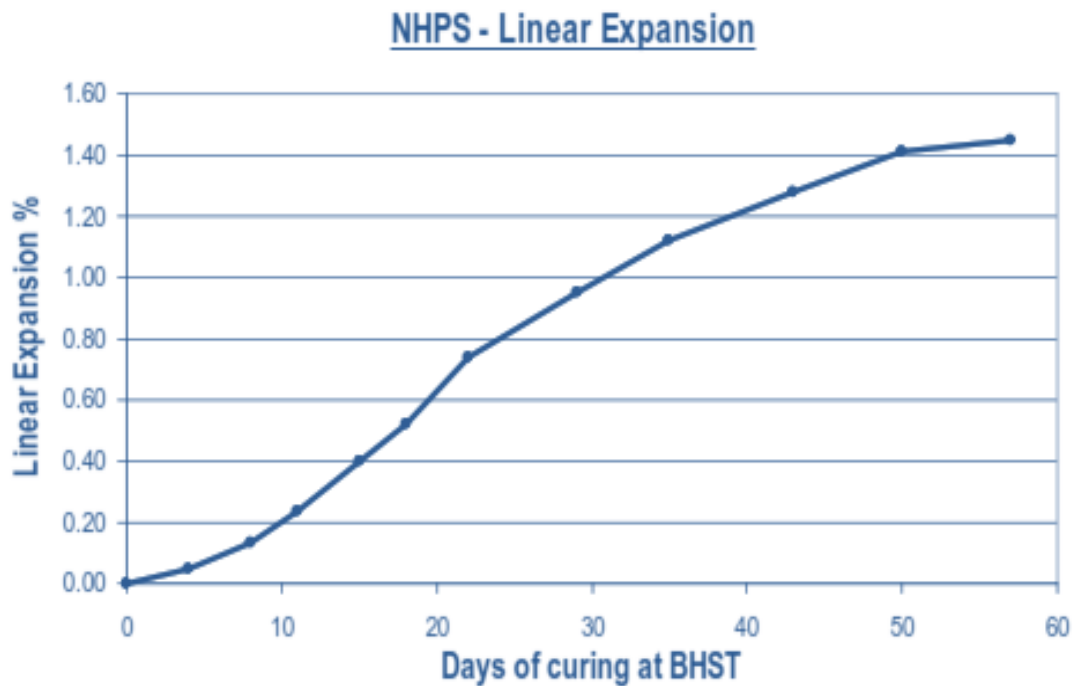


Figure 48: Représentation de l'expansion du ciment NHPS avec le temps [7]

D'après la figure on peut remarquer que après 60 jours de la prise, le ciment se détend a plus de 1.4% de son épaisseur initiale qui assure l'élimination du Microannulus.

3. Limites de la technologie NHPS

a. Une expansion du ciment très lente

L'analyse des résultats précédents, nous montre que l'expansion du ciment NHPS est très lente, on a marqué une expansion de 1.4% après 2 mois, donc le problème se fait durant cette période où nous avons une possibilité de migration de gaz surtout dans les puits à gaz où le fort débit de gaz peut causer la création des pressions annulaires ou la remonté du gaz vers la surface qui engendre aussi des incidents catastrophiques.

b. La corrosion du ciment par les éléments chimiques dans les fluides des formations

Au niveau du HB, le LD3 contient des fluides corrosifs à cause de leur composition chimique, ces fluides peuvent créer des canaux de passage du gaz ou de la boue ou démunie l'épaisseur de la matrice ciment, avec le temps et cause de la grande température et pression le ciment perd ces propriétés mécaniques qui influent sur l'étanchéité tubage - ciment ou ciment - formation qui permet la migration du gaz vers la surface.

c. L'influence du thickening time

Comme le ciment NHPS est constitué d'un grand pourcentage de solide (additifs solides) le temps de prise est très faible, il influe sur la déshydratation du ciment c'est-à-dire, le temps nécessaire pour que le volume total de l'eau puisse s'évader de la matrice est très faible, nous aurons alors la formation de pores contenant de l'eau dans le ciment. Ces pores l'influent négativement sur les propriétés mécaniques du ciment.

B. Expandable and Flexible Cement (EFC)**1. Etude et proposition du système correctif**

Afin de surmonter les limites de NHPS et la mise en place d'un système plus efficace, nous avons pensé à proposer une étude qui explique la structure d'un nouveau modèle d'un ciment que nous allons appeler « Expandable and Flexible Cement (EFC) ».

La structure de ce model nous permettra de corriger les limites du ciment NHPS grâce à son comportement qui aura aussi pour but d'éviter complètement le phénomène de Microannulus, nous allons dans ce qui suit déterminer les caractéristiques mécaniques, rhéologiques et chimiques de notre ciment.

Le modèle proposé devra satisfaire les conditions suivantes :

a. Elasticité

Le ciment EFC devra être un ciment flexible pour que lors de son extension il évite la formation de fissures à l'intérieur de la matrice, cette propriété assurera une certaine souplesse face aux contraintes extérieurs, l'élasticité du ciment est un critère essentiel pour minimiser l'effet du Microannulus.

b. Contrôle de la corrosion

Le contacte directe du ciment avec les formations avoisinantes rends ses composant vulnérables aux agents chimiques pouvant être contenus dans les fluides de formation.

Ce contact peut engendrer l'érosion du ciment et donc la formation du Microannulus, pour cette raison, la composition de notre modèle doit tenir compte de ce problème et contrôler la corrosion.

Le ciment EFC devra être capable d'inhiber ou du moins d'éviter les réactions chimiques avec les composants des formations.

c. Expansion dans son état solide

Par expansion nous voulons dire une augmentation du volume et de la masse de la gaine de ciment au-delà du volume et masse de sa prise initiale.

C'est la propriété la plus importante, la déformation du tubage à cause du changement des pressions à l'intérieur du tubage cause la perte de l'étanchéité du système tubage-ciment, cette propriété assure que le ciment reste toujours en contact avec le tubage même dans le cas de sa déformation.

Cette expansion peut être obtenue par l'ajout d'agent d'expansion dans le laitier de ciment, une fois que le ciment ait pris et durcis, l'expansion du ciment couvrira donc tout éventuel espace qui se formera et donc éliminera les risques suivant la formation d'un Microannulus.

d. Résistant à la compression

Le model doit résister au collapses appliqué par les contraintes extérieures pour garder sa forme initiale et éviter les surpressions sur le tubage et ne risque pas de perdre sa résistance a causes des paramètres thermodynamiques.

e. Réactif aux additifs

Le thickning time étant définis comme le temps nécessaire pour que la consistance du laitier atteigne 100 Bc, ou bien comme étant le temps ou le laitier de ciment reste pompable dans les conditions de température de fond.

Le temps de prise ne doit pas être ni important ni faible le ciment EFC doit prendre en considération une marge bien précise du thickening time.

2. Les caractéristiques du ciment solution

Après avoir déterminé et ciblé les paramètres à améliorer, nous allons dans ce qui va suivre nous intéresser en détails aux caractéristiques spécifiques de notre ciment solution

Une fois les caractéristiques déterminés ; nous proposerons des solutions ou remèdes afin de réaliser et d'obtenir les propriétés nécessaire à ce ciment.

Comme les ciments conventionnels, le EFC contiendra principalement les mêmes additifs tels que les dispersants, anti-mousse, retardateurs, des inhibiteurs de gaz ; auxquels nous ajouterons des agents d'expansion et des matériaux flexibles.

a. Les propriétés mécaniques du EFC

L'étude et l'analyse détaillée des chapitres et parties précédentes nous amène à conclure, que la performance d'une telle solution est en étroite relation avec les propriétés mécaniques du ciment après sa prise et les conditions géo-mécaniques de la région.

i. Le module de Young

Le module de Young reste un critère très important quant à l'illustration de l'élasticité de tout solide, spécialement pour la gaine de ciment.

Afin d'éviter la formation du Microannulus, notre ciment une fois durcis devra avoir un module de Young considérablement plus faible que celui des formations avoisinante afin de pouvoir palier à tout espace ou micro espace se créant suite à la formation du micro annulus, et cela donnera la majeure partie du caractère flexible de notre ciment.

L'augmentation de l'élasticité de la gaine de ciment pourra se faire par ajout d'éléments flexible dans la composition du laitier ou par la diminution de la quantité de solide par exemple

ii. La résistance à la compression

Bien que la flexibilité soit un critère très important et que le module d'élasticité (module de Young) doit être le plus faible possible de préférence, cela ne doit en aucun cas se faire au détriment de la capacité qu'a la gaine de ciment à résister à la compression.

Une assez grande résistance de la gaine de ciment à la compression est nécessaire spécialement pour résister aux charges de compressions exercées sur l'interface casing-ciment, et aussi afin de résister aux charges de Mohr-Coloumb qui s'exercent à travers la gaine de ciment.

Il est à noter qu'une plus grande quantité de solide sera forcément synonyme d'une plus grande résistance à la compression.

b. Propriétés rhéologiques**i. Thinckning time**

Ce temps et cette durée est en partie régit par le caractère gélifiant du laitier de ciment qui peut être contrôlé par l'ajout de polymères imperméables appelés initiateurs (Peroxydes) qui vont faire en sorte de réduire le temps nécessaire pour atteindre un gel critique, ce dernier jouera un rôle de barrière (tant que la prise de ciment n'est pas finis et que la pression hydrostatique du laitier est insuffisante) en face des formations contenant des fluides afin d'empêcher l'intrusion de gaz dans la matrice

NB : Bien qu'une prise rapide sera d'une très grande utilité du point de vue de l'acquisition d'une résistance à la compression prématurée, mais cela risque de poser des problèmes pour les tests du casing spécialement si la résistance à la compression et l'élasticité ne sont pas optimum

c. Les propriétés chimiques

En effet, la présence de H_2SO_4 , HCL , $NaCl$ de CO_2 ou même d'huile brute dans les formations et son contact avec le ciment peut détériorer la qualité de la gaine de ciment mise en place par des effets corrosifs, et donc détériorer la qualité de l'isolation.

De ce fait l'utilisation d'éléments inertes qui ne vont pas être affecté par la présence de CO_2 , d'acide ou de tout autre élément chimique sera non seulement bénéfique pour avoir une bonne cimentation mais surtout pour assurer une isolation efficace et durable.

d. La concentration en solide

Toutes les propriétés citées au-dessus ont en commun une seule caractéristique qui est la plus importante du point de vue composition et du point de vue microscopique, c'est d'ailleurs la caractéristique par laquelle nous pouvons proposer des suggestions pour pallier à tous les compromis que nous avons vu auparavant.

La concentration en solide ou plus précisément la fraction de solide en volume, est donc la première caractéristiques à prendre en considération lors de l'élaboration du design de notre ciment, en y ajoutant bien sûr la taille des particule utilisé.

La concentration en solide du laitier de ciment devra être donc assez faible pour lui donner son caractère élastique mais assez grande pour que le ciment une fois endurcis puisse avoir une résistance à la compression assez importante

De plus la fraction de solide ne doit pas être trop grande pour que le laitier de ciment dans sa phase liquide puisse contenir assez d'espace ou viendra se loger l'eau de gâchage afin de pouvoir transmettre une certaine pression hydrostatique permettant au puits de rester sous contrôle, mais cette fraction doit être assez importante pour qu'une fois l'hydratation du laitier ait commencé l'atteinte de l'état de gel critique se fasse rapidement.

3. Solutions proposées

Afin de pallier à la problématique de la fraction de solide, qui dans le cas standard nous avons tendance à réduire le volume de particules solides dans le but d'obtenir plus d'élasticité de notre matrice, résultat que nous obtenions mais au détriment d'une diminution de résistance à la compression, nous allons proposer quelques solution que nous considérons du point de vue théorique très efficace.

Il est à noter que ces suggestion sont purement théoriques et que nous n'avons eu ni la chance ni les moyens de pouvoir réaliser des tests sur laboratoire.

a. Un modèle de solide multi dimensionnel

Nous avons imaginé comme première solution de proposer une composition de ciment avec comme particularité une disposition tridimensionnelle des particules solides dans le laitier et la gaine de ciment après la prise de ce dernier.

La particularité de cette composition à la différence du ciment conventionnellement utilisé est qu'elle est structuré non pas à base de particules unidimensionnelles avec une distribution homogène qui engendre un volume poreux inter granulaire plus ou moins important, et donc selon son importance ce dernier va soit diminuer de la résistance à la compression de la matrice si il est grand ou réduire l'aspect élastique de la gaine de ciment dans le cas contraire ; mais plutôt à base de particules de forme sphérique et de différentes dimensions (fines, moyenne et grossières), avec une disposition plus ou moins hétérogène

Cette disposition nous permettra par exemple :

- D'ajuster la densité de ciment requise, en manipulant la quantité de particule fines ou grossières utilisées, et cela en introduisant plus de particules grossière qui va créer plus de volume poreux si une faible densité est nécessaire ou de mettre en place plus grand nombre de particules fines qui s'intercalerons dans les vides si une grande densité est indispensable.
- De contrôler le volume de pores et donc le volume d'eau dans la gaine de ciment ; Les petites et moyennes particules nous permettrons aussi de remplacer l'excès d'eau indésirable tout en laissant une porosité qui reste nécessaire pour avoir une pression hydrostatique et garder l'intégrité du puits pendant la phase liquide du laitier (la pression hydrostatique n'étant pas fonction du volume d'eau mais de la longueur de la colonne d'eau).
- D'augmenter le caractère élastique du ciment ; L'élasticité du ciment quant à elle proviendra quant à elle du mouvement et du glissement des particules de différentes tailles les unes par rapport aux autres, nous auront ainsi une sorte de milieu solide à l'état macroscopique mais amovible à l'échelle microscopique

- D'augmenter la résistance à la compression ; la clef de cette propriété réside dans les particules fines et à un moindre degré les moyennes, car en plus du mouvement relatif des particules les unes par rapport aux autres, et surtout celui des particules fines l'intercalation de ces dernières dans les pores entre les autres particules donnera à la gaine de ciment une grande résistance à la compression

Donc cette disposition tridimensionnelle procurera à notre gaine de ciment une élasticité relativement améliorée ajoutée à une assez bonne et grande résistance à la compression, en plus d'une certaine maniabilité et possibilité de contrôler la densité et des proportions d'eau fera de notre ciment une excellente alternative aux ciments conventionnellement utilisés, et pourra être une excellente solution pour un grand nombre des problèmes de mauvaise cimentation et spécialement le Microannulus.

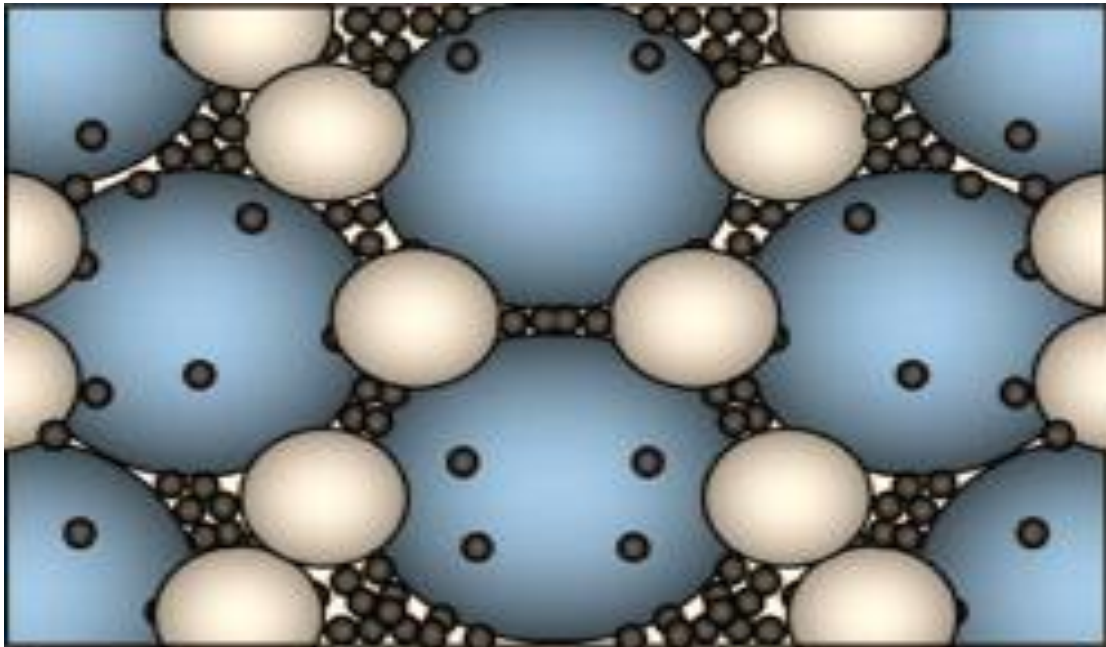


Figure 49: représentation du solide tridimensionnel

b. Ajout de Polymères synthétiques à base de fibre de verre

Pour cette deuxième proposition nous nous sommes inspirés du domaine du bâtiment et des infrastructures où l'utilisation de la fibre de verre est de plus en plus répandue en raison de sa très grande efficacité, de sa disponibilité et de son prix abordable comparée à d'autres matériaux synthétiques.

La fibre de verre est utilisée pour le renforcement du béton mais aussi celui des polymères. Elle est réputée pour alléger les structures, pour avoir un comportement thermo durcissant, pour avoir une très grande inertie vis-à-vis des produits et réactions chimiques, une grande résistance aux chocs, une grande résistance à la traction donc un aspect élastique et pour l'isolation thermique.

Donc l'introduction de la fibre de verre dans la fabrication des polymères que nous mettrons par la suite en place dans le mélange du laitier ou par introduction de filament de fibre de verre directement lors du malaxage du ciment sera certainement très bénéfique.

L'utilisation du mélange ciment et fibre de verre peut être qualifiée de mélange assez complet, car les deux matériaux se complètent et compensent les faiblesses de l'autre. Les fibres apportent plus de souplesse, de flexibilité et de résistance à la traction alors que la matrice de ciment permet de supporter les charges de compression

Les propriétés principales de la fibre de verre sont :

- Ignifuge ou incombustible ; ce qui rend leurs stockage et manipulation sur les chantiers de forage sans grands risques majeure du point de vue sécuritaire et HSE.
- La fibre de verre étant inerte chimiquement, ne rouillera pas ; donc la gaine de ciment contenant des filaments ou des polymères à base de fibre de verre sera moins sujette à la dégradation chimique et aux différentes conséquences qui peuvent en découler.
- La longévité ; la fibre de verre a une durée de vie assez importante, atteignant parfois 25 à 35 ans, donc selon les proportions utilisées lors du mixage et la préparation du laitier de ciment, nous pouvons obtenir une durée de vie d'environ 20 à 25 ans en moyenne qui est estimée comme largement suffisante pour un puits d'exploitation.
- La fibre de verre procure au ciment un caractère pseudo-ductile qui va lui conférer à l'échelle microscopique une certaine mobilité ce qui nous donnera plus de flexibilité et une meilleure capacité d'expansion.
- L'isolation thermique; cette caractéristique est aussi très importante car la fibre de verre jouera le rôle de barrière empêchant ainsi le transfert d'une très grande quantité de chaleur à travers le ciment provenant soit de la réaction exothermique du durcissement du ciment soit d'une température de formation anormalement élevée. Cette chaleur si elle atteint le tubage pourrait conduire à des mouvements de ce dernier qui pourrait par la suite mener à la formation de Microannulus.

PS : le point de fusion de la fibre de verre est de 800°C

Donc nous pouvons dire qu'avec de telles propriétés notamment la structure met l'inertie chimiques de la fibre de verre combinée avec la grande résistance que procure la gaine de ciment peut être une très bonne solution et alternative au ciment conventionnel pour augmenter et la résistance à la compression et la flexibilité du ciment

c. Injection de gaz

Cette troisième et dernière proposition fut aussi le résultat d'une inspiration issu d'une observation dans le domaine du bâtiment.

Nous avons constaté que dans pas mal de cas lors ce qu'il y'a de petites fissure d'une taille relativement réduite, les gens du domaine procédaient à l'injection d'une mousse dans cet espace afin de le colmater. Cette mousse étant principalement constituer de gaz et d'agent expansibles.

Donc l'injection de gaz lors du mixage et de la préparation du laitier de ciment peut être envisagée.

Différents gaz peuvent être injectés, mais pour notre étude nous proposons l'injection de l'azote (Nitrogène) pour différentes raisons notamment son caractère inerte aux réactions chimiques, son accessibilité et sa facilité d'utilisation.

Cette méthode nécessite un bon mixage avant injection, afin d'obtenir une dispersion homogène et une répartition quasi parfaite des bulles de gaz dans le laitier et la gaine de ciment après prise.

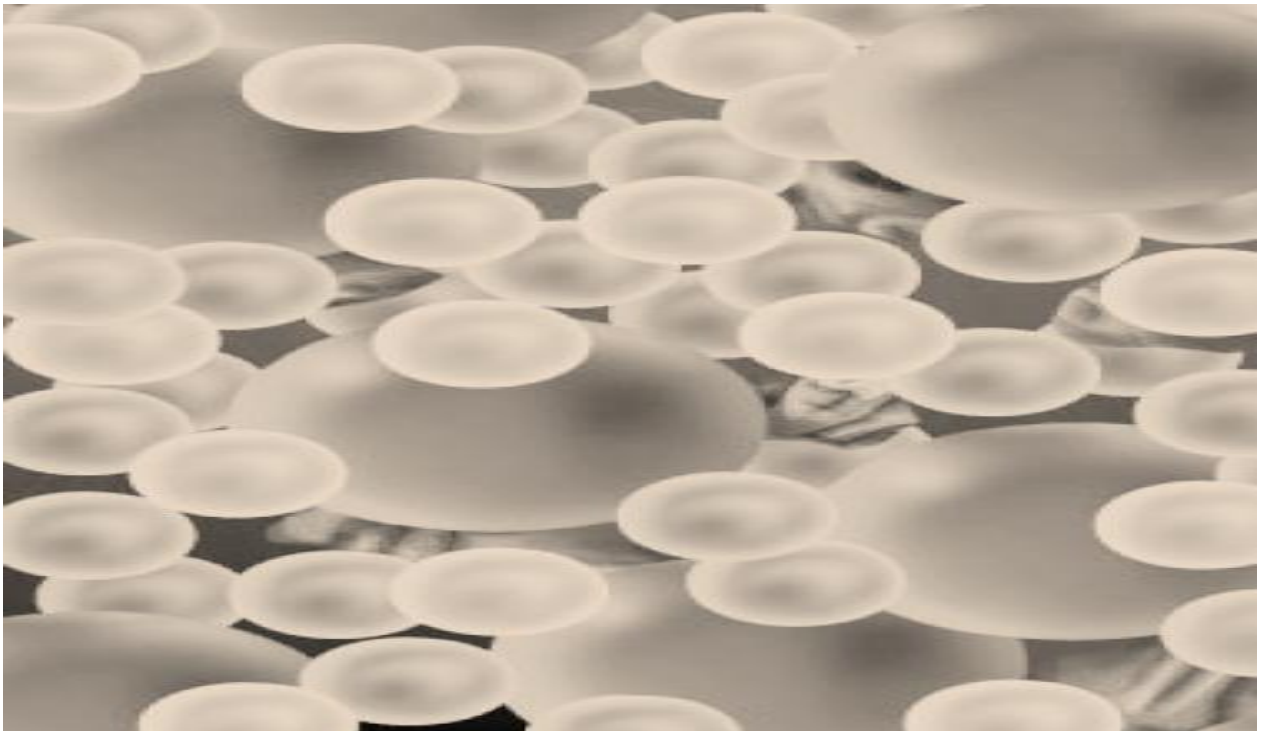


Figure 50: Illustration de la disposition des particules solides et des bulles de gaz [18]

La répartition homogène des molécules d'Azote peut avoir plusieurs rôles :

- Une dispersion uniforme et homogène des bulles de gaz est synonyme de réduction de volume de pores qui peuvent être occupés par l'eau qui peut causer des défaillances

lors de la cimentation si elle est emprisonnée suite à un thinckning time trop faible comme dans le cas du NHPS. (le problème de mauvaise cimentation ne se pose pas avec les bulles d'Azote en raison de leurs petites tailles et de leurs dispersions).

- Une bonne flexibilité ; l'homogénéité de la dispersion des bulles de gaz créera un espacement entre les particules solides qui auront une certaine liberté de mouvement les unes par rapport aux autres ce qui procurera à la gaine de ciment une flexibilité microscopique.
- Une grande résistance à la compression ; le caractère compressible de tout gaz et de l'Azote dans notre cas, la taille réduite des bulles, ajouté à une dispersion homogène augmentera la limite de rupture lors ce que la gaine de ciment est soumise à des charges de compression.

En plus de ces caractéristiques mécaniques, d'autres avantages peuvent être cités, nous en citerons les suivants :

- La disponibilité de l'azote ; depuis un certain nombre d'année l'azote ou Nitrogène est utilisé dans le domaine pétrolier, notamment dans le forage avec le forage en underbalance, qui a conduit à des avancées technologiques résultants à la mise en place de différents systèmes pour purifier l'air et en extraire l'Azote qui le compose en grande partie.
- L'inertie chimique ; l'azote est connu pour être parmi les rares éléments chimiques qui est inerte chimiquement, donc la composition du ciment ne sera pas affecté par les potentiels éléments chimiques se trouvant dans les formations après injection.
- L'azote est aussi connu pour être non inflammable, donc comme pour le cas de la fibre de verre son utilisation ne posera pas de problèmes de sécurité.

Nous constatons qu'avec cette proposition, nous aurons une très grande résistance à la compression procurée par la quantité de particules solides ainsi que par le caractère compressible du gaz, nous ajouterons à cela la flexibilité que donne la dispersion homogène du gaz à la gaine de ciment.

Conclusion

Voici donc en substance, ce que nous avons pu relever quant aux effets du Microannulus auxquels fait face un puits pétrolier, de sa construction à son exploitation dans la région de Rhourd el Baguel dans le sud Algérien, de la gravité des conséquences de ce phénomène en fonction des calculs réalisés et des solutions et remèdes proposés pour sa prévention.

La gravité de l'effet du Microannulus est principalement déterminée par trois facteurs :

- Les types des réservoirs traversés pendant le forage
- La quantité de gaz en place
- La taille effective du Microannulus

Le cas extrême qui cause des conséquences sérieuses, est bien évidemment où le puits est à gaz et la taille du Microannulus est conséquente.

En nous aidant de notre apprentissage théorique et des données recueillis sur site, la partie étude de cas présente une analyse des symptômes du problème, la confirmation de la potentielle présence du phénomène, le suivi de l'opération de la cimentation avec les calculs nécessaires et pour finir le calcul de la taille du Microannulus

L'importance et la gravité des effets du Microannulus sur un puits pétrolier pendant le forage ou la production, exige du technicien une sérieuse prise en considération du problème et de tenir compte de toutes les mesures préventives pour l'éviter.

Les conséquences du phénomène du Microannulus sont désastreuses aussi bien sur le plan HSE que sur le plan économique, ce qui souligne l'importance de l'étude préventive du problème et l'élaboration d'un programme adapté de cimentation.

Enfin, nous avons été amenés à suggérer quelques améliorations, du point de vue théorique, basées sur la théorie de la distribution des particules et l'ajout de polymères pour optimiser le comportement microscopique du ciment. Ces solutions, non encore confirmées du point de vue pratique (faute de temps et de matériel), peuvent du point de vue purement théorique constituer des solutions effectives pour notre problématique.

Bibliographie

1. Rapport d'implantation du forage HAMZAOU1-1 (HMZA-1) – Février 2017-
2. Drilling program HAMZAOU1-1 (HMZA-1) GWDC133 RIG –Mars 2017-
3. Programme de cimentation du puits HMZA-1(phase 13^{3/8} ; casing 9^{5/8}) ; Schlumberger – Mai 2017-
4. Masterlog du puits HMZA1-ST1 ; SONATRACH & CNLC - Mai 2017-
5. Enregistrement du Logging de la phase 9^{5/8}” du puits HMZA-1(Schlumberger) – Mai 2017-
6. Pr.A.Mellak ; cours magistral sur la technologie du forage et les caracteristiques des roches.-2014-
7. H.Boouras (Sonatrach), E.Toukam, F.V.Martin and J-P Bedel (Schlumberger) : “ Successful Application of Novel Cementing Technology in Hassi-Messaoud” papier SPE publier en 2007 présenté à l’occasion de la présentation lors de la SPE/IADC Middle East Drilling Technology conference& exhibition –Octobre 2007-.
8. Prevention of shallow gas migration tthrough cement – aout 1999-
9. Gas migration causes and cures; Module 213M102a –aout 2000- Schlumberger
10. Roeland Verbakel (Schlumberger) : “Long term cement integrity for tight gas wells in hungary”
11. Publication de la (Acoustical Society of America) :”Understanding acoustic methods for cement bond logging”; publiée dans The journal of the acoustical society of America - 2016-
12. M.Oyarhossein & M.B.Dusseault : “Wellbore Stress Changes and Microannulus development because of cement shrinkage”; papier ARMA publié en 2015 et préparé à l’occasion du 49th Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium –du 28 juin au 1 juillet 2015-
13. C.Baumgarte, C.Thiercelin & D. Klaus : “Case studies of expanding cement to prevent Microannular formation” ; papier SPE (SPE56535), prepare à l’occasion du Annual technical conference and exhibition-du 3 au 6 octobre 1999-

14. E. George & E. Daniel: " Environmental risk arising from well construction failure: différence between barrier and well failure, and estimates of failure frequency across common well type, locations and well age"; papier SPE(SPE166142) prepare pour the SPE annual technical conference and exhibition –du 30 septembre au 2 octobre 2013-
15. K.Krusche & C.R.Johanson and H.B.Ghazi : "Application of engineered cementing solution to solve long-term cement integrity issues in Tunisia"; papier SPE publié en 2006 à l'occasion du the annual technical conference and exhibition –du 24 au 27 septembre 2006-
16. M.A.Shahri, J.J.Schubert and M.Amani : "Detecting and modeling cement failure in high-pressure high temperature wells, using finite element method" Papier IPTC publié en 2005 à l'occasion de la presentation at the international petroleum technology conference -21 au 23 novembre 2005-
17. R.E.Sweatman, R.F.Mitchel and A.Bottiglieri : "Why do not disturb is a safety message"; papier SPE(SPE 174891MS) prepare en 2015 pour une presentation au the SPE Annual technical conference and exhibition –du 28 au 30 septembre 2015-
18. Art.Bonett & Demos Pafitis : "Getting to the root of gas migration"
19. W.David, Fred Sabins and John Aslakson : "Microannulus leaks repaired with pressure-activated sealant"; papier SPE(SPE91399) prepare en 2004 pour la presentation intitulée the 2004 SPE eastern regional meeting –du 15 au 17 septembre 2004-
20. S.Taoutaou, T.M.Osman, M.Mithab and N.Succar : " Well integrity in heavy oil wells : challenges and solutions"; Papier SPE(CSUG/SPE137079) prepare pour la presentation intitulée, the Canadian unconventional ressources & international petroleum conference- du 19 au 21 octobre 2010-
21. S.Taoutaou and J.Bedel : "Qualification of an innovative sealant to ensure hydraulic isolation in TTRD application in the presence of a downhole pressure and temperature gauge cable"; papier IPTC publié en 2004 et prepare pour l' international petroleum technology conference –du 20 au 22 janvier 2014-

22. Daryl Kellingray : " Planning for success to ensure isolation for the life of the well"; presentation SPE
23. A.Bois, A.Gamler, F.Rodot, J.saint-marc, N.Almard : " How to prevent loss of zonal isolation through a comprehensive analysis of microannulus formation"; papier SPE (SPE124719) publié et présenté dans l'Annual technical conference and exhibition –du 4 au 7 octobre 2009-
24. Gunnar DeBruijn, Andre Garnier, Ronan Brignoli, David Bexte and Don Reinheimer : "Flexible cement improves wellbore integrity in SAGD wells"; papier SPE (SPE/IADC119960) publié en 2008 et prepare pour la presentation au SPE/IADC drilling conference and exhibition –du 17 au 19 mars 2008-
25. S.Taoutaou, B.Ahmed, J.A-IThuwaini, J.Ekpe, M.jaffery, D.Ong, R.Bermudez : "Cementing in HPHT gas environment using a novel flexible and expandable cement technology to withstand pressure and temperature cycles"; publication SPE(SPE131568) publié en 2010et préparé pour être présenté au CPS/SPE international oil and gas conference and exhibition-du 8 au 10 juin 2010-
26. H.Williams,D.Khatri, R.Keese, S.Le Roy-Delage, J.Roye, D.Leach, P.Rottler, O.Porcherie,J.Rodriguez : "Flexible, expanding cement system successfully provides zonal isolation across Macellus Shale gas trends"; Papier SPE (CSUG/SPE149440)publié en 2011 et préparé pour une presentation dans le Canadian unconventional resources conference –du 15 au 17 novembre 2011-
27. M.D.Hudson, P.Sheperd and J.Ricci : "Flexible cement slurry survives multistage hydraulic fracturing tratment"; papier SPE(SPE 185068 MS) publié en 2017, préparé pour une presentationau SPE unconventional resources conference – du 15 au 16 fevrier 2017-
28. E.Tanoto, R.Kusumawatie, F.Inayah, I.Widyarsa and M.F.Jaffery : "Enhancing zonal isolation with expandable cement system for gas field"; papier SPE(IADC/SPE 180527 MS), publié en 2016 à l'occasion du the IADC/SPE Asia Pacific drilling technology conference –du 22 au 24 aout 2016-

29. Chu Wei, Shen Jiyun, Yang Yunfei, Li Young, Gao Deli : "Calculation of Microannulus size in casing-cement sheath-formation system under continuous internal casing pressure change"; document publié dans la Online English edition of the Chinese language journal le 3 juin 2015.
30. Formulaire du foreur, 7ème Edition 1999, Paris
31. Mitchell : "Advanced oilwell drilling engineering" ; -juillet 1995-
32. Manuel de logging (Halliburton)
33. Cours IFP : "Endommagement de la liaison couche trou" -1999-