

ETUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSICO - MÉCANIQUE ET CHIMIQUE DES CIMENTS PÉTROLIERS BENTONITIQUES AVEC AJOUT DE 20% DE SCORIE

Reçu le 28/05/2006– Accepté le 18/12/2008

Résumé

La cimentation permet de créer un joint hydraulique entre le tubage et une formation géologique considérée, pour prévenir les cheminements de fluide. La cimentation des puits pétroliers pose jusqu'à nos jours d'énormes problèmes. L'introduction de la scorie, déchet de l'acier, comme ajout dans le ciment nous a permis de résoudre certains problèmes à savoir l'augmentation de la résistance à la compression, le temps de pompabilité, les paramètres rhéologiques, le filtrat, la porosité, la perméabilité du ciment bentonitique. C'est la structure désordonnée de la scorie observée aux rayons X qui lui permet de devenir active en présence de la température du puits. Les minéraux de la scorie vont pouvoir se combiner avec ceux du ciment et contribuer ainsi à l'amélioration de tous les paramètres sus-cités. Notons que l'aspect économique est aussi un facteur déterminant puisque la scorie, déchet de l'acier, remplace une partie du ciment pétrolier importé à prix forts.

Mots clés : scorie, ciments pétroliers, ajout, cimentation, résistance à la compression, rhéologie, filtrat, porosité, perméabilité

Abstract

Cementing allows the creation of a hydraulic joint between pipes and a considered geologic area, to prevent fluid progress through adjacent layers. Cementing of petrol and gas wells arise until today fairly large problems. The introduction of slag which is a steel waste, as an addition to cement has allowed us to resolve some of these problems particularly increase in resistance to compression, time of pumpability, rheological parameters, fluid loss, porosity, permeability of bentonitic cement.

It is the disorderly structure of slag observed under X-rays that allows it to be active in presence of temperature in the well. Minerals of the slag will combine with those of the cement and contribute to the improvement of all the parameters named above.

We can note that economic aspect is also a determinant factor as the slag, steel waste, replaces part of petrol cement which is imported at high prices.

Key words: slag, petroleum cement, addition, cementing, mechanical properties, free water, setting properties.

**S.SALEM ZINAI
F. JABER MUKHEILLAF
N. TOUAA**

Faculté d'Architecture de Génie Civil et de chimie U.S.T.O.,
Centre de recherche et de développement
Sonatrach Hassi-Messaoud
Algérie.

ملخص

إن التمليط [التسمنت] يسمح في خلق فاصل مائي بين أنبوبية و التكوين الجيولوجي لتفادي مسالك السوائل. إن التمليط أبار البترول يطرح مشاكل كبيرة ليومنا هذا، إن استخدام السكوري نفايات الحديد كعامل مساعد في السمنت لذا سمح لنا بحل عدة مشاكل من بينها ارتفاع المقاومة للضغط، زمن الضخ، و عوامل أولي، التصفية، النفاذية غير نفوذ للسمنت بوتونيك و لهذا فإن التركيب غير المنظم لسكوري و الملاحظ عبر أشعة اكس التي تسمح له بتنشيطه في أثناء درجة حرارة البئر. معادن السكوري يمكنها التآلف و التفاعل مع المعادن الموجودة في السمنت و ذلك تشارك في رفع نوعية و تحسين كل العوامل المذكورة سابقا. للملاحظ أن العامل الاقتصادي مهم جدا لأن [السكوري] نفايات الحديد تعوض بالنسبة من السمنت البترولي المستورد بأسعار مرتفعة جدا.

الكلمات المفتاحية: السكوري، سمنت بترولي، إضافات تمليط [تسمنت]، المقاومة للضغط، أولي، تصفية، النفاذية، النفوذية.

Introduction

La cimentation des puits de pétrole et de gaz est l'étape la plus importante pour la réalisation des puits. Sa réussite est donc nécessaire. Une cimentation défectueuse peut entraîner la fermeture du puits. A 'Berkaoui' (Algérie) une cimentation défectueuse a engendré une faille qui se propage encore à l'heure actuelle car une couche salifère a été mise en contact avec la nappe d'eau.

La fabrication du ciment pétrolier classe «G» car c'est ce ciment qui est utilisé en Algérie dans tous les puits de forages aussi bien à Hassi R'mel que Hassi Messaoud----. Mais surtout l'amélioration des propriétés des ciments pétroliers bentonitiques réglerait les différents problèmes rencontrés lors de la cimentation des puits pétroliers.

Il existe très peu de cimentation réussie du premier coup. Les ciments ne constituent pas le matériau idéal pour obtenir une bonne étanchéité dans les sondages. Il n'existe à l'heure actuelle aucun autre matériau pouvant le concurrencer, aussi l'objectif des chercheurs actuels et d'en améliorer les caractéristiques.

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif de cette étude est de contribuer à une amélioration des propriétés du ciment pétrolier bentonitique classe «G» Asland selon les normes de l'American Petroleum Institute (API) [1]. Le laitier bentonitique (coulis de ciment) est utilisé dans la phase 12 ¼ casing 9 5/8.

Le ciment joue un rôle très important dans la cimentation des puits de pétrole. Notre but principal est d'améliorer la résistance à la compression aux premiers âges, car elle est très importante pour la reprise des opérations de complétions des puits de forages. Lors de la reprise des travaux, il est important que la résistance à la compression soit telle que la cohésion entre les particules de ciment soit suffisamment forte pour ne pas être détruite.

Les caractéristiques, du temps de pompabilité qui ne conditionne qu'en partie la mise en place du ciment et de la résistance à la compression, qui ne traduit qu'un seul aspect du ciment durci, ne peuvent suffire pour le choix du ciment. Aussi l'amélioration des paramètres rhéologiques, du filtrat, de la perméabilité, de la porosité est nécessaire.

La pâte de ciment bentonitique utilisée n'est pas tellement compatible avec les couches géologiques de la région d'exploitation du sud Algérien. Nous voulons alléger cette pâte tout en améliorant la résistance à la compression du ciment durci. Pour éviter les pertes de charge et améliorer la fluidité de la suspension de ce ciment, un mélange allégé est nécessaire dans les zones à faible gradient de pression (figure1). Ce ciment pourrait se fracturer sous une pression hydrostatique élevée [2].

A cet effet nous avons utilisé la scorie, déchet de l'acier d'une part parce que la poussée écologique des dernières années imposa également de tenir le plus grand compte de l'environnement, soit en évitant des emprunts de matériaux naturels soit en éliminant des sous produits et

déchets dont les dépôts souvent disgracieux peuvent conduire à certaines pollutions du milieu naturel. D'autre part les caractéristiques de la scorie nous ont permis d'améliorer les propriétés du ciment bentonitique classe «G».

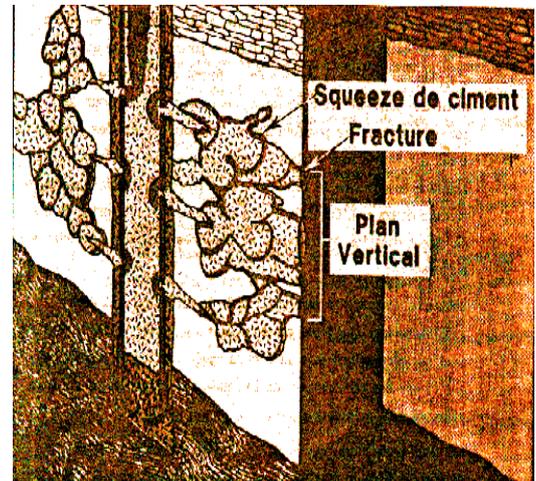


Figure 1 Injection d'un squeeze de ciment pour réaliser un joint étanche

Tableau 1-analyse chimique du ciment classe 'G' Asland	
Composants	Teneurs %
SiO ₂	21,7
Al ₂ O ₃	3,7
Fe ₂ O ₃	4,45
CaO	64,95
MgO	0,75
SO ₃	2,65
Mn ₂ O ₃	0,09
TiO ₂	0,14
Na ₂ O	0,26
K ₂ O	0,08
CaO ₂	0,36

3. ETUDE DE LA CIMENTATION DES PUIES DE FORAGE.

La cimentation des puits de forages est effectuée afin de prévenir la migration des fluides dans des zones pièges et d'éviter ainsi des pertes ayant pour effet une baisse de production ou encore pour isoler des zones productrices à exploiter ultérieurement. L'objectif principal d'une telle cimentation est de créer un joint hydraulique entre le tubage et une formation géologique considérée, pour prévenir les cheminements de fluide dans les couches adjacentes (figure 2).

Ce type de cimentation consiste en la mise en place d'un laitier de ciment approprié, en un point donné d'un espace annulaire du trou, à travers la colonne mise en place.

La cimentation du tubage de surface permettra d'isoler,

par exemple une nappe d'eau douce. A l'extérieur d'une colonne de production, le ciment isolera les zones

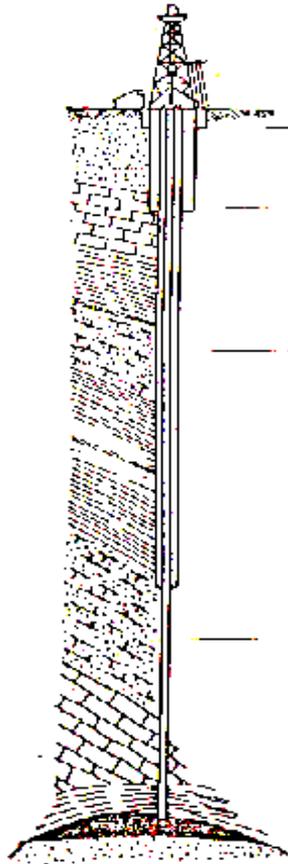


Figure 2- Programme d'un puits de forage

productrices des eaux salées ou des formations de gaz. Le ciment fixe mécaniquement le tubage dans le trou et fournit ainsi, un point d'ancrage[4]. La cimentation d'un tubage et plus particulièrement d'une colonne de production (figure 2) est une opération d'une extrême importance car elle conditionne en grande partie l'exploitation future du puits. La cimentation consiste après le forage d'un puits à fixer le tubage au terrain, en introduisant dans l'espace annulaire une certaine quantité de laitier de ciment [3-4]. Cimenter un 'casing', c'est fabriquer une gaine de ciment qui soit aussi étanche que la formation, qu'elle remplace, en tenant compte des conditions inhérentes au sondage à savoir, la température, la pression, les fluides de formation, la boue.. [4].

4. ANALYSE DES COMPOSANTS DU CIMENT PETROLIER BENTONITIQUE.

Les principaux constituants du ciment pétrolier bentonitique utilisés dans notre étude sont : Le ciment pétrolier Asland classe 'G', la bentonite, la scorie déchet de l'acier.

4-1- Etude Du Ciment Classe «G» Asland HSR (Haute Résistance Aux Sulfates).

4- 1-1 Analyses chimiques et minéralogiques

du ciment classe « G » Asland.

Un ciment pétrolier est un ciment retardé donc sa teneur en C3A doit être très faible et sa teneur en C4AF doit être élevée. Le ferro-aluminate tétracalcique à la différence de C3A, C3S et C2S ne contribue pas à la résistance du laitier. Cependant la contribution du ferro-aluminate C4AF varie en fonction de la température et des additifs présents. Dans certaines conditions cette contribution est analogue à celle de l'aluminate tricalcique. Le laitier de ciment va donc donner un développement rapide de la résistance [3].

Les analyses chimiques, par fluorescence X, et minéralogiques, déterminées par la méthode de section polie en utilisant le microscope optique, du ciment pétrolier classe « G », sont présentées dans les Tableaux 1 et 2

4-1-2 Analyses par les rayons X du ciment classe « G » Asland.

L'analyse aux rayons X du ciment Asland (figure 3), nous montre des pics intenses bien aigus dont la largeur est très faible. Les minéraux contenus dans ce ciment sont bien cristallisés. Les cristaux sont donc bien formés. Le ciment contient de la chaux éteinte, Ca (OH)2, de l'alite, C3S, du β C2S et de l'alumino-ferrite tétracalcique, C4AF, quelques pics de C3A, du MgO...La bonne cristallisation observée notamment pour le C3S à savoir l'alite provient du fait que le C3S a commencé à se former vers 1300°C jusqu'à 1450°C donc une bonne cuisson et un refroidissement rapide ont favorisé la bonne cristallisation obtenue.

4- 2- Etude De La Bentonite.

La bentonite est une argile colloïdale constituée essentiellement de montmorillonite (environ 85%), qui est un hydrosilicate d'alumine $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$, dont les grains ont la faculté d'accroître de 10 à 20 fois le volume, en absorbant 5 à 6 fois leurs poids en eau, ce qui provoque le gonflement. Elle est ajoutée dans le ciment bentonitique pour absorber l'excédent d'eau. Le pourcentage de l'eau de gâchage est très important 87%. L'eau joue le rôle d'allégeant pour le ciment bentonitique utilisé dans les formations fragiles. Le laitier de ciment allégé est utilisé pour diminuer les pressions hydrostatiques au droit des couches fragiles et éviter les fracturations. La bentonite est pré hydratée pendant une demi heure avant son utilisation.

1) Les avantages de la bentonite :

Les bentonites peuvent être ajoutées aux ciments pour, abaisser la densité du laitier de ciment, réaliser des cimentations sur de grandes hauteurs sans risque de provoquer des fracturations, réduire le coût de l'opération de cimentation, augmenter la valeur de rendement de la cimentation du laitier, diminuer l'eau libre et le filtrat.

2) Les inconvénients de la bentonite.

La bentonite présente une certaine limite dans son utilisation car, elle diminue la résistance à la compression, elle augmente la perméabilité, elle ne résiste pas aux attaques des sulfates et des fluides corrosifs, elle provoque la formation de gels et elle augmente la porosité.

CaO	36,5%
SiO ₂	15,5%
Al ₂ O ₃	5%
MgO	2,3 %
MnO	8,4 %

CaO

= 2,35 (basique)

SiO₂

Acier < 2% de carbone

Fer total 21,2 % FeO

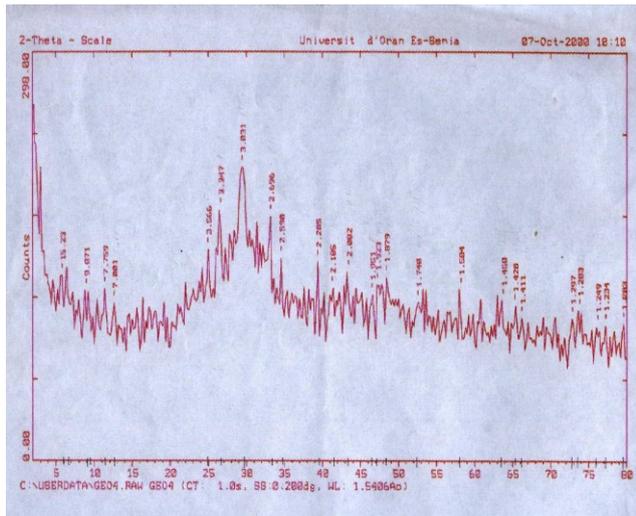


Figure 4- Analyse aux rayons X de la Scorie

Le mélange de la scorie à l'eau ne provoque aucune réaction chimique et ne fait pas prise. Pour réaliser une prise, il est nécessaire d'activer la réaction, soit par la température soit avec des activateurs chimiques, en l'occurrence CaCl₂, Na₂SiO₃, Na₂CO₃ et K₂O. Une fois la réaction démarrée, la prise s'effectue alors très rapidement. D'une manière similaire, un nombre important de produits classiques [Ca (NO₃), Ca (CH₃COO) ₂, PbO et Na₂PO₄] peut servir de retardateurs de prise à ces laitiers. La prise peut, en théorie, être assez facilement contrôlée par la combinaison de retardateurs pour avoir un temps de pompabilité suffisant, et d'activateurs qui déclencheront la prise [8].

5. INFLUENCE DE 20% DE SCORIE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES LAITIERS OBTENUS.

Pour mettre en évidence l'influence de la scorie, nous avons ajouté, à la formulation du laitier bentonitique (100% de ciment classe G Asland, 2% de bentonite, 1% de PFLE (réducteur de filtrat)), 20% de scorie, pour déterminer, l'eau libre, la résistance à la compression, la perméabilité, la porosité, le temps de pompabilité, le filtrat, les paramètres rhéologiques à savoir, la viscosité plastique, la viscosité apparente la Yield Value ou contrainte de cisaillement et le gel 10mns. Les différentes analyses ont été faites dans le département

analyses, des laboratoires « boue et ciment », « fluides de forage » et « roches » du CRD (centre de recherche et développement) Sonatrach, ainsi que dans le laboratoire « Ciments » de l'E.N.S.P (l'entreprise nationale des services aux puits) à Hassi Messaoud.

Nous avons travaillé selon les normes API et nous avons donc utilisé l'appareillage suivant :

Un mixeur pour constituer le laitier de ciment (coulis de ciment).

Un consistomètre atmosphérique pour conditionner le laitier de ciment (coulis de ciment) afin de déterminer : l'eau libre, le filtrat et les paramètres rhéologiques

Les densimètres « baroid » et « pressurisé ».

Un bain-Marie : pour la conservation des éprouvettes à la température désirée.

Un curing chamber : pour la conservation des éprouvettes dans un simulateur de puits (pression et température).

Une presse hydraulique pour l'écrasement des éprouvettes.

Un rhéomètre pour déterminer les propriétés rhéologiques.

Une cellule HT-HP (hautes températures – Hautes pressions) pour déterminer le filtrat.

Un consistomètre pressurisé HP-HT pour déterminer le temps de pompabilité.

Un perméamètre à charge constante de type CORELAB. La perméabilité a été déterminée dans le département Analyse « laboratoire Roches Réservoirs ».

Un porosimètre à l'hélium basé sur la loi de Boyle Mariotte. la porosité a été déterminée dans le département Analyse « laboratoire fluides »

La diffraction des « RX » pour déterminer l'état de cristallisation des matériaux et leur état d'amorphisation après traitement thermique. La diffraction a été déterminée dans le laboratoire du département de chimie de la Sénia.

Le perméabilimètre de « Blaine pour déterminer la surface spécifique « Blaine » du ciment et de la scorie. Il détermine le temps que met le volume d'air constant pour traverser une masse de produit tassée dans des conditions normales de températures et de pression.

Le multipycnomètre, pour déterminer les densités réelles de la bentonite, de la scorie, et du ciment.

Le perméabilimètre de « Blaine pour déterminer la surface spécifique « Blaine » du ciment et de la scorie. Il détermine le temps que met le volume d'air constant pour traverser une masse de produit tassée dans des conditions normales de températures et de pression.

Le multipycnomètre, pour déterminer les densités réelles de la bentonite, de la scorie, et du ciment.

Le multipycnomètre, pour déterminer les densités réelles de la bentonite, de la scorie, et du ciment.

5-1 Influence de la scorie sur la résistance à la compression.

La résistance à la compression du ciment bentonitique avec scorie, augmente, surtout aux premiers âges, (tableau 4). En effet, nous remarquons que les résistances à 24 et 72 heures pour l'échantillon avec 20% de scorie sont deux fois plus grandes que pour le modèle témoin. Les résistances à 8 et 24 jours sont aussi nettement supérieures pour l'échantillon avec 20% de scorie. Nous pouvons expliquer ce résultat par le fait que :

Lors de l'hydratation l'énergie thermique et la température du puits permettent de combiner certaines substances (Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, MnO) se présentant en teneur importante dans la scorie (tableau3).

Par contre l'analyse aux rayons X ne les met pas en évidence ce qui signifie, qu'elles existent avec une très mauvaise cristallisation. La structure métastable de la scorie leur a permis justement d'inter réagir pour former

**ETUDE DES PROPRIÉTÉS PHYSICO - MÉCANIQUE ET CHIMIQUE DES CIMENTS PÉTROLIERS BENTONITIQUES
AVEC AJOUT DE 20% DE SCORIE**

Tableau 4- résultats des tests obtenus		
Eau 85%	témoin	Ech3
Ciment %	100	100
Scorie %	0	20
PFLE %	1	1
Anti mousse t / l	2	2
Eau libre cc	0	0
Densité	1,61	1,60
Filtrat cc	150	126
Rc 24h PSI	< 1000	1997
Rc 24h Kg/cm2	<4,9	9,9
Rc 72h PSI	1166	2650
Rc 72h Kg/cm2	5,8	13,11
Rc 8j PSI	2275	2700
Rc 8j Kg/cm2	11,25	13,4
Rc 28 jours PSI	3300	4100
Rc 28 jours Kg/cm2	16,4	20,39
Porosité %	33,47	24,70
Perméabilité %	0,16	0,089
Densité des grains	1,66	1,57
Temps de pompabilité 40UC		
100UC	315 mn	260 mn
100UC -40UC	353 mn	275mn
	38 mn	15mn
Rhéologies		
Vp (Cp)	75	70
Yv (lbf / 100 ft2)	14	8
Gel 0mn	6	7
Gel 10 mn	11	12
Gel 10 – Gel 0	5	5

des hydrogromates de composition complexe (Aluminate et ferro aluminate calcique hydraté) et des silicates de calcium hydraté.

5-2 Influence De La Scorie Sur La Porosité

La porosité a été réduite avec l'introduction de la scorie, (tableau 4). L'analyse au MEB (microscope électronique à balayage) (figures 5 et 6), nous confirme les résultats obtenus avec le porosimètre à l'hélium, elle nous montre que le ciment bentonitique avec scorie présente une nette diminution de la porosité par rapport au ciment bentonitique sans scorie.

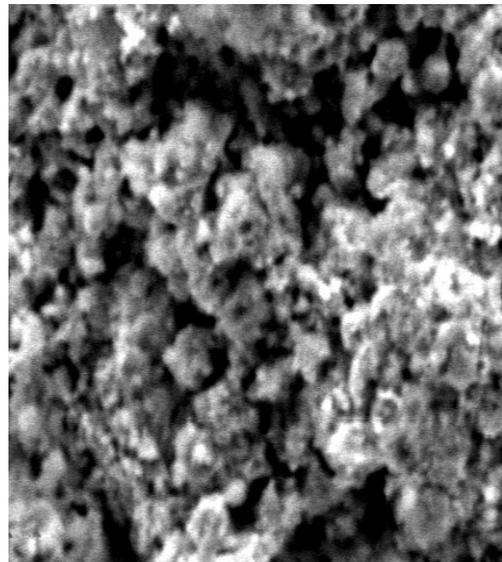


Figure 5-Analyse au MEB du témoin bentonitique
ACCV 12,7 KV
Agrandissement 2500 WD 28.2 10µm

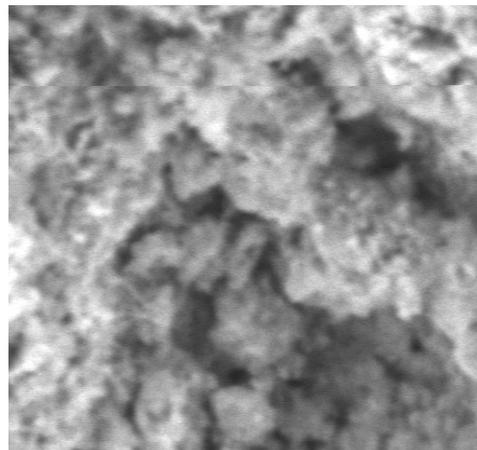


Figure 6- Analyse au MEB du laitier bentonitique
avec scorie ACCV 12,7 KV
Agrandissement 2500 WD 28.2 10µm

5-3 Influence De La Scorie Sur La Perméabilité

La perméabilité avec ajout de 20 % de scorie est plus faible par rapport au ciment bentonitique sans scorie (tableau 4). Cette faible perméabilité provient de la faible porosité et d'une mauvaise communication entre les pores.

La scorie comme ajout est cimentée par excès de ciment Portland. Ce qui va bloquer les communications entre les pores et par conséquent, réduire la perméabilité.

5-4 Influence De La Scorie Sur La Densité Des Grains

La densité des grains, du laitier de ciment avec scorie, est inférieure à celle du témoin, (tableau 4). Ce qui montre que la scorie joue aussi un rôle d'allégeant. La densité des grains est significative. L'ajout de 20% de scorie rentre dans le volume et non dans la masse.

5-5 Influence De La Scorie Sur Le Temps De Pompabilité

Le temps de pompabilité du laitier de ciment est mesuré à l'aide du consistomètre pressurisé HP-HT. C'est un appareil normalisé par l'API (american petroleum institute), reproduisant les variations simultanées de température et de pression rencontrées dans le puits. Le temps de pompabilité se termine quand la consistance du laitier atteint 100 Uc. Le temps entre 40UC et 100UC doit être le plus réduit possible car le ciment n'exerce plus de pression hydrostatique au droit des formations ce qui laisse au gaz ou au pétrole la possibilité de se créer un chemin et de sortir ce qui mettra en cause l'étanchéité de la formation car un vide sera créé [3].

Nous remarquons que :

Les temps de pompabilité, à 40UC, à 100UC diminuent avec l'introduction de la scorie et que le temps entre 40UC et 100UC est réduit à plus de la moitié en effet nous avons obtenue 38mn pour le laitier bentonitique sans scorie et seulement 15mn pour le laitier avec 20% de scorie (tableau 4).

5-6 Influence De La Scorie Sur Le Filtrat

La filtration se rencontre, en zone perméable et en zone productrice.

Le réducteur de filtrat a pour effet d'augmenter la viscosité du laitier et donc de réduire la filtration d'eau de gâchage vers les parois de la couche.

Le filtrat diminue avec l'introduction de la scorie (tableau 4). La scorie joue donc le rôle de réducteur de filtrat.

5-7 Influence De La Scorie Sur Les Paramètres Rhéologiques

Comme pour le temps de pompabilité, les paramètres rhéologiques dépendent dans une certaine mesure de la composition minéralogique du ciment, de sa granulométrie des additifs et de la température.

Il est donc possible [3], de préparer soigneusement une cimentation, grâce à la connaissance du comportement

rhéologique du laitier et, en particulier, de multiplier les chances de réussites en améliorant les paramètres rhéologiques.

La scorie améliore les propriétés rhéologiques du laitier de ciment. Nous observons que, la viscosité plastique et la Yield Value diminuent (tableau 4).

CONCLUSION

Nous avons, avec 20% de scorie, amélioré la résistance à la compression du ciment bentonitique avec l'introduction de la scorie, augmente surtout aux premiers âges ce qui est très important pour la reprise des opérations de complétion du puit de forage. Le MEB nous a permis de voir que, le ciment bentonitique avec scorie est moins poreux que le ciment bentonitique sans scorie, que les cristaux du témoin bentonitique sont mieux formés par rapport à ceux du ciment contenant de la scorie. Car ce dernier présente une cristallisation perturbée, ce qui a amélioré l'hydratation de ce ciment et explique donc sa meilleure résistance à court terme.

La porosité du laitier de ciment, a été réduite grâce à la silice contenue dans la scorie déchet de l'acier. La silice a formé une structure rigide dans laquelle le ciment s'est logé réduisant ainsi les pores.

Le filtrat a été réduit avec l'introduction de la scorie. C'est un facteur très important, car il permet à la gaine de ciment de jouer son rôle. Il serait désastreux qu'une filtration importante se produise et que le ciment forme un « cake » qui fasse obstacle à la mise en place du ciment et donc à l'obtention d'une bonne cimentation. La scorie joue donc le rôle de réducteur de filtrat.

La perméabilité du laitier de ciment a été réduite. La perméabilité, lors d'une cimentation, doit avoir la plus petite valeur possible afin que le ciment remplisse sa fonction d'étanchéité.

Le temps de pompabilité du laitier de ciment a été diminué. Et donc la résistance à la compression aux premiers âges a augmenté.

Les paramètres rhéologiques, se sont améliorés avec l'introduction de la scorie.

La densité des grains du laitier de ciment est plus faible pour les échantillons étudiés par rapport au témoin. Ce qui nous a donné des laitiers plus allégés mais ayant une résistance à la compression plus importante. Ceci est important pour les formations fragiles.

REFERENCES

- 1- American Petroleum Institute., 'Specification for materials and testing for well cements', Section 2 in A.P.I. Specification (10) DC, (Washington, 1988).
- 2- DS. Institut Algérien du pétrole, « Cimentation » 1967.
- 3- Peinado, M. « Etude du comportement des ciments dans les sondages » Revue de l'Institut Français du pétrole N° Hors Série Communication présentée par l'auteur le 11 Juin 1963. pp 474-500
- 4- Alcim., 'Cimentation 2, tubages et cimentations', Société algérienne de Cimentation ALCIM. 6 (fév.1982) 2-56.
- 5- Dussart, J., 'Valorisation maximale des laitiers et scories', (laitiornor), journée d'études sur les sous produits et déchets, CIT 9 (France, sep. 1979), 1031-1039
- 6- P.B. Needham et AL. Spes, « Chemical analyses of brines from four imperial valley, CA, geothermal wells » p. 105-112 avril 1980.
- 7- J. Skalny, M. Marietta and J.F. Young, « mécanismes d'hydratation du ciment portland » sous thème ii-1.laboratories Baltimore u.s.a. University of Illinois Urbana, U.S.A
- 8- Piot, B. et Schlumberger, D., ' Le procédé de slag-mix : des scories de haut fourneau mélangées à la boue pour cimenter les puits', Pétrole et technique. 389 (8) (1994).
- 9- Ludwig .U. and Wolter .A « la formation et la stabilité du C3S et des alites » Institut für Gesteinshüttenkunde, RWTH Aachen, R.F.A . 7ème congrès international de la chimie des ciments Paris, 1980
- 10- S.Salem, « Utilisation des scories des hauts fourneaux pour l'amélioration des propriétés physico mécaniques et chimiques du ciment pétrolier Asland, classe « G » et des ciments bentonitiques ». Thèse de doctorat soutenue le 10 Novembre 2001