

---

**EVALUATION DE LA THIXOTROPIE DES CIMENTS DESTINES A LA  
CIMENTATION DES Puits DE PETROLE DANS LES ZONES A PERTES:  
EFFET DE PLATRE ET DU LAITIER DE HAUTS FOURNEAUX**

T. Bouziani\*, Z. Makhloufi, A. Benmounah et M. Bédérina

\* *Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites, Université M'hamed Bougara de  
Boumerdes, 35000 Algérie.*

*E-mail: [t.bouziani@mail.lagh-univ.dz](mailto:t.bouziani@mail.lagh-univ.dz)*

Reçue le 04 septembre 2010, reçue sous forme révisé le 30 octobre 2010 accepté le 06 décembre 2010

Accessible en ligne le 31 décembre 2010

---

**Abstract**

Cementing of oil and gas wells can be a very delicate operation. Among the concerns of service companies, during this operation are the nature and conditions of the formations in well. This is the case of cementing operations in southern Algeria, specifically on the fields of In-Amen, where the formations in lost zones are naturally weak and highly permeable. In these areas, drilling fluids (muds and cements) pumped will be, completely or partially lost, what we call "lost circulation". Thixotropic cements are useful to overcome lost circulation problems. They are characterized by a special rheological behavior, allowing it to plug lost zones when they are pumped.

Our work aims to assess the thixotropy of cements prepared with two types of cement (class G Asland cement and CEM I 42.5 portland cement) with the plaster, using a viscometer with coaxial cylinder (couette type). Moreover, the effect of blast furnace slag (LHF) on the properties and thixotropic mixtures prepared was also studied. The results show that portland cement (available locally) can produce mixes with higher and more stable thixotropy than the class G cement (from importation), which is a practical and economical for cementing job operations in wells with loss zones. The results also show that the effect of LHF is positive, since in addition to his contribution to long term

performances, especially the durability of hardened concrete, it improves the thixotropy of cement made of plaster.

**Key words:** cementing; lost circulation; thixotropy; plaster; blast furnace slag

### **Résumé**

La cimentation des puits de pétrole et de gaz peut être une opération très délicate. Parmi les soucis des sociétés de services, lors de déroulement de cette opération, sont la nature et l'état des formations traversées. C'est le cas des opérations de cimentation dans le sud d'Algérie, précisément sur les champs d'In-aménas, où les formations sont fragiles et hautement fissurées. Dans ces zones, les fluides de forage (boues et ciments) pompés seront perdus dans les fissures, ce qu'on appelle "*perte de circulation*". Les ciments thixotropes sont souvent utilisés pour remédier à ces pertes. Ils se caractérisent par un comportement rhéologique spécial, lui permettant de colmater les fissures rencontrées, lorsqu'ils sont pompés.

Notre travail consiste à évaluer la thixotropie des ciments réalisés à base de deux types de ciment (asland de classe G et portland CEM I 42.5) avec le plâtre, par l'utilisation d'un viscosimètre aux cylindres coaxiaux type couette. En plus, nous avons étudié l'effet du laitier de hauts fourneaux (LHF) sur les propriétés thixotropiques des mélanges ainsi élaborés. Les résultats montrent que le ciment portland (disponible localement) permet de réaliser des ciments avec une thixotropie plus importante et plus stable que le ciment asland de classe G (de l'importation), ce qui présente un intérêt pratique et économique pour les opérations de cimentation dans les zones à pertes. Les résultats montrent aussi que de l'ajout du LHF est positif, puisque en plus de son apport aux performances à long terme notamment sur la durabilité du ciment durci, il permet d'améliorer la thixotropie des ciments réalisés à base de plâtre.

**Mots clés :** cimentation ; perte de circulation ; thixotropie ; plâtre ; laitier des hauts fourneaux

### **Introduction**

Durant le processus de forage, l'opération de cimentation des puits représente une étape essentielle. Elle est effectuée afin de protéger les tubages contre la corrosion, bloquer la migration des fluides et éviter les pertes de production. Pendant cette opération, on peut rencontrer plusieurs problèmes tels que les pertes de circulation. Ce problème a été constaté sur les chantiers de la région pétrolière In-aménas (sud algérien) et précisément dans le découvert de Zarzaitine, puits ZR-219 à une profondeur d'environ

700 mètres. A ce niveau, on rencontre des formations très fissurées causants des pertes de circulations dépassants parfois les 50% du volume total de fluides injectés. Les ciments thixotropes sont souvent utilisés pour remédier à ces problèmes.

La thixotropie est un terme utilisé pour décrire la propriété d'un mélange d'être fluide sous cisaillement, mais qui développe une structure de gel et est devenu "auto-portant" lorsqu'il est au repos [1]. En termes pratiques, les ciments thixotropes sont fluides pendant le malaxage et l'écoulement, mais rapidement formes une structure gélatineuse lorsque l'écoulement cesse. Puis, sous une nouvelle agitation, ils redeviennent fluides de nouveau.

En règle général, les matériaux cimentaire se comporte selon le modèle rhéologique de Bingham. Dans ce modèle, le comportement à l'état frais des matériaux cimentaires peut être caractérisé par la viscosité plastique  $\mu$  et le seuil de cisaillement  $\tau_0$  qui sont représenté par la relation suivante [2] :

$$\tau = \tau_0 + \mu \gamma \quad (1)$$

Où,  $\tau$  est la contrainte de cisaillement mesurée à une vitesse de cisaillement donnée  $\gamma$ .

La relation (1) permet de tracer un rhéogramme donnant la contrainte au cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement. Dans le cas d'un fluide non-thixotrope, les rhéogrammes obtenus par cisaillement croissant et décroissant étaient superposables. Ce n'est pas toujours le cas pour les fluides thixotropes, le graphe qui décrit un cycle de cisaillement montée-palier-descente (constitué par une phase de cisaillement croissant, une phase de cisaillement constant et une phase de cisaillement décroissant) présente une boucle d'hystérésis, ce qui traduit un comportement dépendant de l'histoire passée de l'échantillon. Les fluides thixotropes ont les propriétés spécifiques suivantes [3] :

- Il possède un caractère rhéofluidifiant qui se manifeste par une diminution de la viscosité lors de la montée.
- Les effets de cette fluidification ne se produisent pas en totalité dès l'application du cisaillement. Ils se produisent aussi de façon retardée dans le temps : le cisaillement induit une déstructuration de la structure du gel formée, qui se manifeste de façon différée si on fait augmenter ou diminuer la vitesse de cisaillement.

Ils existent actuellement plusieurs types de ciments thixotropes. Basant sur leurs réactions chimiques en présence de ciment et sur quelques considérations spéciales,

plusieurs ajouts sont utilisés pour la préparation des ciments thixotropes [4]. Parmi les types les plus utilisés on site :

- Systèmes à base d'argiles tel que la bentonite, qui montrent une structure de gel lors de gonflements et jouent le rôle d'allégeant aussi (dosage peut aller de 0.05 % à 2 % par poids de ciment).
- Systèmes à base de sulfates de calcium tel que le plâtre ( $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ ), qui réagit avec les aluminates tricalciques ( $C_3A$ ) pour former des hydro-aluminates de calcium (*étrringite*). C'est ce dernier qui confère au mélange sa thixotropie, par sa structure de gel avant qu'il se transforme en structure d'aiguille.
- Systèmes à base de sulfates d'aluminium/sulfates de fer ( $Al_2(SO_4)_3 / FeSO_4$ ), qui est utilisé généralement avec des ciments contenant moins de 5 % de  $C_3A$ . Les sulfates d'aluminium jouent le rôle d'accélérateur de prise et conduisent à la formation d'une forte et irréversible structure de gel. Tandis que les sulfates de fer jouent le rôle de retardateur de prise et permettent au mélange d'avoir les propriétés thixotropiques recherchées.
- Systèmes à base de polymères (tel que l'hydroxyéthylcellulose (HEC), carboxyméthylhydroxyéthylcellulose (CMHEC), alcool polyvinyle. Etc.), soluble dans l'eau et d'agent de liaison comme les chélates de titane ou de zirconium. L'optimum rapport entre les polymères et l'agent de liaison doit être recherché en fonction de la température du puit.

La thixotropie des fluides de forage (ciments et boues) peut être estimée par l'évolution du gel en fonction du temps. Selon les normes API (*American Petroleum Institute*) [5], elle peut être déterminée par l'évaluation de la contrainte au cisaillement nécessaire pour faire détruire la structure de gel (*gel strength*) en fonction du temps de repos du fluide, en utilisant un viscosimètre type couette équipé d'une géométrie de cylindres coaxiaux, à deux ou six vitesses.

Etant donné l'absence totale des granulats dans les ciments destinés à la cimentation des puits de pétrole et de gaz, la consommation du ciment dans ce cas est importante. Or, certaines matières premières dites de substitution peuvent remplacer avantageusement le ciment pour diminuer substantiellement le coût des opérations de cimentation. Ces matériaux de substitution sont composés chimiquement et minéralogiquement de la même manière que le ciment portland : c'est le cas par exemple des cendres volantes, des fumées de silice ou encore des laitiers de hauts fourneaux. Ces derniers, appelés

aussi scories, constituent en effet des déchets sidérurgiques qui occupent des grandes surfaces et polluent l'environnement [6,7]. Le laitier des hauts fourneaux (LHF) est un sous produits issu de l'industrie sidérurgique résultant de la transformation de la fonte hématite en acier par le procédé d'affinage L.D. (Linz donawitz), mis au point vers les années 1950 en Autriche. Elles se présentent sous la forme d'une roche basique, constituée principalement de chaux, d'oxyde de fer et de silice [8].

L'hydratation du LHF nécessite toujours une activation (calcique ou sulfatique). Dans l'activation calcique, les produits d'hydratation sont généralement, des hydro-silicates de calcium (CSH), des aluminates et des Silico-aluminates. Les réaction d'hydratation du LHF ne produit pas de portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), il semble même qu'une partie de la portlandite provenant de l'hydratation du ciment portland soit consommée dans un processus réactif de type pouzzolanique [9]. L'activation sulfatique du laitier conduit à la formation des hydro-aluminates de calcium (étringite) qui garde sa structure de gel en présence des sulfates. Dans des études sur l'utilisation du LHF pour l'amélioration des ciments pétroliers [10,11], il a été montré que le LHF, améliore la résistance à la compression et permet d'éliminer totalement l'eau libre. Le LHF devient liant à haute température et une fois la réaction démarrée, la prise s'effectue alors très rapidement. Cette particularité est très importante car lors de la reprise du forage du puits le ciment doit avoir une résistance suffisante afin d'éviter les problèmes de fracturation du puits. Notre travail consiste, d'une part, à utiliser cette technique pour évaluer la thixotropie des mélanges préparés à base de deux types de ciments (asland de classe G de l'exportation et portland CEM I 42.5 local) et du plâtre. D'autre part, l'effet du LHF sur les mélanges thixotropes ainsi préparés a été investigué.

## **Programme expérimental**

### **Matériaux**

Dans ce travail, deux types de ciment ont été utilisés : un ciment type asland de classe G de l'importation, fabriqué spécialement pour la cimentation des puits de pétrole et de gaz et un ciment portland CPM I 42.5 commercialisé en Algérie. Pour la réalisation des ciments thixotropes, nous avons utilisé le plâtre de Ghardaia (Algérie). Le LHF utilisé est un sous produits issu de l'industrie du complexe sidérurgique d'El-hadjar (Annaba - Algérie). Les caractéristiques physico-chimiques des ciments, de plâtre et du LHF utilisés sont regroupées dans le Tableau 1. A poly-propylène glycol anti-mousse type (PDAL), commercialisé par Petrochem à été introduit (à un dosage de

0.2 % par rapport au poids de ciment), pour éviter l'emprisonnement d'air dans les mélanges lors de pompage dans le puit.

**Tableau 1:** Propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés

Ciment de classe G									
Analyse chimique									
Oxydes	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO <sub>1</sub>	PAF
Teneur (%)	21.69	3.38	5.22	64.18	1.00	2.40	0.16	0.84	0.38
Analyse minéralogique									
Minéral	C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>4</sub> AF		C <sub>3</sub> A		
Teneur (%)	62.50		18.51		15.97		2.30		
Propriétés physiques									
Densité					3.15				
Surface spécifique Blaine (SSB) (cm <sup>2</sup> /g)					3860				
Ciment portland CPM I 42.5									
Oxydes	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO <sub>1</sub>	PAF
Teneur (%)	20.61	63.90	6.30	3.60	1.48	0.53	0.30	0.60	0.21
Analyse minéralogique									
Minéral	C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>4</sub> AF		C <sub>3</sub> A		
Teneur (%)	55.97		18.82		10.95		10.60		
Propriétés physiques									
Densité					3.23				
Surface spécifique Blaine (SSB) (cm <sup>2</sup> /g)					4200				
Plâtre									
Oxydes	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	PAF
Teneur (%)	3.34	36.02	0.42	0.30	0.16	0.06	51.55	0.12	7.21
Propriétés physiques									
Densité					2.65				
Finesse mesurée par le refus au tamis 0.2 mm (%)					20				
Laitier de hauts fourneaux (LHF)									
Oxydes	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	PAF
Teneur (%)	38.04	43.74	7.63	2.57	5.35	0.39	0.48	0.38	0.98
Propriétés physiques									
Densité					3.00				
Surface spécifique Blaine (SSB) (cm <sup>2</sup> /g)					4100				

## Méthodes et essais

### Principe de formulation

La formulation des ciments destinés à la cimentation des puits de pétrole et de gaz est basée essentiellement sur les conditions géothermales des puits (pression et

température). Pour ce, les mélanges préparés doivent présenter une densité bien déterminée (afin d'équilibrer la pression exercée par les parois du puits) et conditionner à la température du niveau qui devra être cimenté. La norme API Spec 10 [12] permet de calculer la quantité d'eau nécessaire afin que le mélange préparé aura une densité bien déterminée à l'état frais. Dans le cas du puits ZR-219 (champs de Zarzaitine, Inaménas), les pertes de circulation se trouvent à une profondeur de 700 mètres et une température de 46 °C (cette température est calculée en fonction de la température de surface (27 °C), du gradient de température (2.7 °C par 100 mètres) et de la profondeur). La densité ( $d$ ) demandée à ce niveau est de 1.85; en fonction de cette valeur, la quantité d'eau ( $E$ ) est recherchée dans le mélange préparé à partir du ciment ( $C$ ), du plâtre ( $P$ ) et de LHF ( $L$ ). La quantité d'eau est calculée à l'aide la relation suivante :

$$E = \left( C \left( 1 - \frac{d}{\rho_C} \right) + P \left( 1 - \frac{d}{\rho_P} \right) + L \left( 1 - \frac{d}{\rho_L} \right) \right) / (d - 1) \quad (2)$$

Où :  $\rho_C$ ,  $\rho_P$  et  $\rho_L$  sont les densités du ciment et du plâtre respectivement.

Les quantités des constituants sont exprimées en % (par rapport au poids de ciment). La composition des différents mélanges est donnée par le Tableau 2.

**Tableau 2:** Composition de différents ciments thixotropes préparés

N° Mélange	Ciment de classe G (g)	Ciment portland (g)	Plâtre		LHF		Eau (ml)
			(%)	(g)	(%)	(g)	
1	1000	0	0	0	0	0	486
2	1000	0	4	40	0	0	500
3	1000	0	6	60	0	0	507
4	1000	0	8	80	0	0	514
5	1000	0	10	100	0	0	521
6	1000	0	12	120	0	0	528
7	0	1000	0	0	0	0	486
8	0	1000	5	50	0	0	503
9	0	1000	10	100	0	0	521
10	0	1000	15	150	0	0	539
11	0	1000	20	200	0	0	557
12	0	1000	25	250	0	0	574
13	1000	0	10	100	10	100	566
14	1000	0	10	100	20	200	611
15	1000	0	10	100	30	300	656
16	1000	0	10	100	40	400	701
18	0	1000	15	150	10	100	584
19	0	1000	15	150	20	200	629
20	0	1000	15	150	30	300	674
21	0	1000	15	150	40	400	719

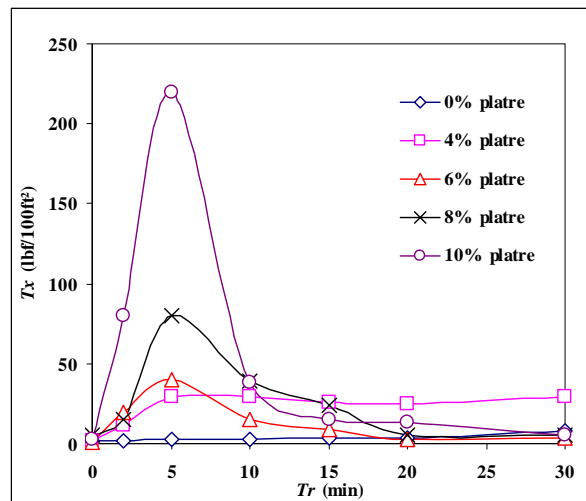
### Procédures et essais

Les ciments préparés conformément aux spécifications données par la norme API Spec 10, devront être immédiatement introduits dans un consistomètre atmosphérique pour un conditionnement pendant 20 minutes avant d'être soumis aux différents essais. Le processus opératoire pour évaluer la thixotropie des ciments ainsi préparés consiste à appliquer la vitesse de rotation maximale disponible sur le viscosimètre (600 tr/min) pendant 30 secondes, puis stopper le moteur. Après un temps de repos  $Tr$  (0, 2, 5, 10, 15, 20 et 30 minutes), on lit la lecture maximale (juste après la mise en marche du moteur) et la lecture minimale (après stabilisation) de la contrainte exprimée en lbf/100ft<sup>2</sup> (1 lbf/100ft<sup>2</sup> = 0.479 Pa) à une vitesse de 3 tr/min [13]. La thixotropie ( $T_x$ ) d'un mélange sera évaluée par l'écart entre la lecture maximale et minimale. Plus l'écart est important et stable en fonction du temps de repos, plus la thixotropie du mélange est bonne.

### Résultats et discussions

#### Effet du plâtre

Les mesures de la thixotropie ( $T_x$ ) des ciments préparés à base de ciment de classe G et du plâtre, en fonction du temps de repos ( $Tr$ ), sont traduites en courbes dans la figure 1.

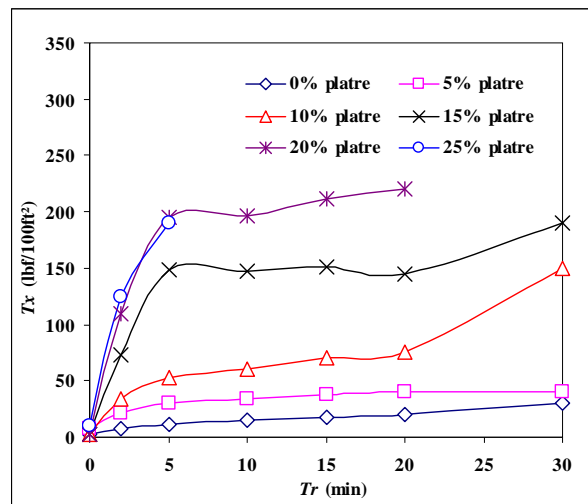


**Figure 1:** Evolution de la thixotropie en fonction des dosages en plâtre (cas du ciment classe G).



On constate d'après cette figure que la thixotropie du mélange augmente en fonction du dosage en plâtre, où elle atteint son maximum à 10% de plâtre. Pour le cas de 12 %, les lectures par le viscosimètre sont hors échelles. On remarque aussi, une perte de la thixotropie au bout de 10 minutes de repos. La thixotropie dans les mélanges à base de plâtre est issue de la réaction de ce dernier avec les aluminates tricalciques ( $C_3A$ ), donnant lieu à des hydro-aluminates de calcium sous forme de gel, mais la faible teneur en  $C_3A$  dans le ciment de classe G (ne dépassant pas 3%) conduit à son épuisement rapide dans le mélange et par conséquent la structure en gel, issue de ces produits d'hydratation, ne durera pas longtemps.

Dans le cas des ciments préparés à base de ciment portland, l'évolution de la thixotropie ( $T_x$ ) est illustrée dans la figure 2.



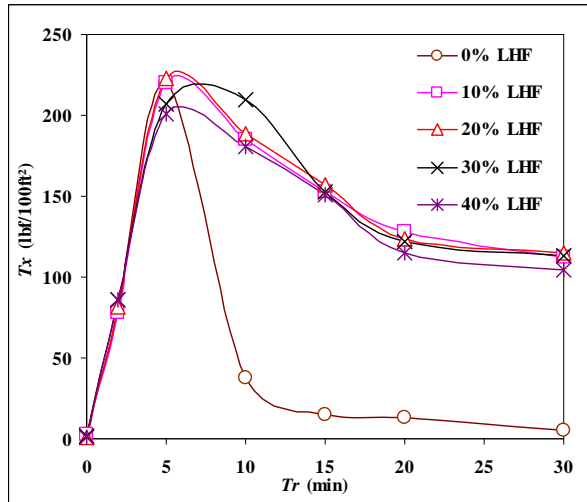
**Figure 2:** Evolution de la thixotropie en fonction des dosages en plâtre (cas du ciment portland)

On remarque que la thixotropie dans ce cas est plus importante et plus stable en fonction du temps de repos par rapport aux mélanges préparés à base de ciment de classe G. Il est à noter aussi que les dosages en plâtre sont plus importants. Les ciments portlands sont caractérisés par un dosage plus élevé en  $C_3A$  (environ 10%) par rapport aux ciments classe G, ce qui a nécessité plus de plâtre dans la réaction d'hydratation. Donc les sulfo-aluminates tricalciques, produits d'hydratation responsables de la thixotropie, seront en quantité suffisante pour maintenir la structure en gel jusqu'à 30 minutes dans le cas des ciments portland CEM I 42.5.

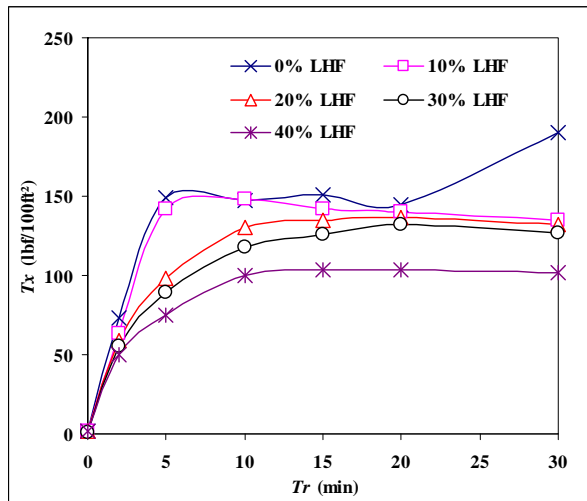
**Effet du laitier de hauts fourneaux (LHF)**

D’après les compositions récapitulées dans le tableau 2, on remarque que l’augmentation du pourcentage du LHF fait augmenter sensiblement le besoin en eau nécessaire pour avoir la densité ciblée (1.85).

L’effet de l’ajout du LHF sur la thixotropie des ciments à base de ciment classe G et du ciment portland est illustré sur les figures 3 et 4 respectivement.



**Figure 3:** Evolution de la thixotropie en fonction de LHF (cas du ciment classe G avec 10% de plâtre).



**Figure 4:** Evolution de la thixotropie en fonction de LHF (cas du ciment portland avec 15% de plâtre)

L'ajout du LHF est effectuée aux mélanges qui montrent une bonne thixotropie (mélange N°5, cas du ciment de classe G et mélange N°10, cas du ciment portland). Les résultats trouvés montrent l'effet positif du LHF sur la thixotropie des mélanges testés. Il est à noter que l'ajout du LHF non seulement contribue au maintien de la thixotropie  $T_x$ , mais en plus il contribue à sa stabilisation en fonction du temps de repos  $T_r$ . Cet impact positif est évident dans le cas du ciment portland, par rapport au ciment de classe G. Ceci est dû à la présence des silico-aluminates dans le LHF, en conduisant à la formation des sulfo-aluminates de calcium en présence de plâtre et de la portlandite, libérée lors de la réaction d'hydratation du ciment. Le LHF, de nature vitreuse, se caractérise par une hydraulicité latente (lente vitesse de durcissement aux jeunes âges) [14], ce qui favorise la formation des sulfo-aluminates de calcium (sous forme de gel) au détriment des hydro-silicates de calcium (CSH) produits responsable des propriétés mécaniques du ciment à court terme. En plus, l'effet du LHF à long terme aura un effet positif, car il permet de neutraliser une grande partie de la portlandite et des sulfates, issues de plâtre, en améliorant les propriétés physico-mécaniques à long terme [15] et la durabilité des ciments dans les milieux agressifs [16].

## Conclusions

D'après les résultats trouvés dans cette étude, nous tirons les conclusions suivantes :

- 1- La simplicité de la méthode d'évaluation de la thixotropie des ciments pétroliers par les viscosimètres aux cylindres coaxiaux de type couette. Ce qui rend cette méthode très utile notamment sur les chantiers de forage.
- 2- Par l'utilisation de plâtre, pour la réalisation des ciments thixotropes, le ciment portland (local) a montré une meilleure thixotropie par rapport au ciment asland de classe G (de l'importation). Ceci est dû à la teneur en aluminates tricalciques ( $C_3A$ ), qui est plus importante dans le ciment portland comparativement au ciment asland de classe G.
- 3- Des dosages optimaux en plâtre ont été trouvés (10% par rapport au poids du ciment, dans le cas du ciment de classe G et 15% dans le cas du ciment portland), qui permettent de réaliser des mélanges avec de bonnes thixotropies en utilisant un viscosimètre aux cylindres coaxiaux de type couette.
- 4- L'introduction du laitier des hauts fourneaux (LHF) est avantageuse pour les ciments thixotropes réalisés à base de plâtre. Due à son hydraulicité latente et sa structure vitreuse, le LHF permet d'améliorer la thixotropie en augmentant sa stabilité en fonction

de temps de repos. En plus, le LHF peut améliorer la durabilité des ciments thixotropes à base de plâtre, en neutralisant une grande partie des sulfates issus de ce dernier et diminuant la portlandite libérée au cours de l'hydratation des ciments.

### **Remerciements**

Nous remercions le Directeur de l'Ex-Entreprise de Services aux Puits, Direction Opérations Spéciales (ENSP-DOS) et toute l'équipe du Laboratoire Ciments sise à Hassi Messaoud, (notamment le conseiller technique Mr. DISMOND Nash) pour leurs soutiens et aides lors de la réalisation de ce travail.

### **Références**

- [1] Shaw D. J. 1970, Introduction to colloid and surface chemistry, Butterworth-Heinemann, Ltd, London, 352 p.
- [2] Clement C. C. Journal of Petroleum Technology. 1979, 344-346.
- [3] Coussout P. et Grossiord J. Groupe Français de Rhéologie GFR et EDP Sciences publications. 2001, 223p.
- [4] Nelson E. B. 1990, Well Cementing, Shlumberger Educational Services, Sugar Land, Texas, 341p.
- [5] American Petroleum Institute. API RP 13B, Section 2. Recommended Practice for Field Testing Oil-Based Drilling Fluids. Fifth edition. 2005
- [6] Mezghiche B., Chbili R., Atach S. et Maekouf Z. Etude des propriétés-physico – mécaniques du béton et du ciment à base de laitier. Séminaire national de Génie Civil. M'sila, Algérie, Novembre 1997.
- [7] Nasri A., Belagrae A. et Issaed A. Influence du laitier des hauts fourneaux sur la résistance des mortiers et des bétons. Séminaire Magrébin de Génie Civil. Biskra, Algérie, Novembre 1998, 313 – 322.
- [8] Dussart J. Valorisation maximale des laitiers et scories. Journée d'études sur les sous-produits et déchets, Laitiornor, CIT 9, France, septembre 1979, 1031-1039.
- [9] Maltais Y. (1996). Étude de l'évolution du degré d'hydratation de ciments et du développement des résistances mécaniques de mortiers et de bétons soumis à différentes

températures de mûrissement. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 188 p.

[10] Salem S., Khellafi H., Kerdal D. et Ait-moussa S. *Materials and Structures*, 2001, 34, 253-256.

[11] Bouziani T. (1998). *Elaboration d'un laitier de ciment thixotrope destiné à la cimentation des puits dans les zones à pertes*. Thèse d'Ingénieur, Institut National des Matériaux de Construction INMC, Boumerdes, 123p.

[12] American Petroleum Institute. *API Spec 10. Specifications for materials and testing for well cements*. Fourth Edition. 1988.

[13] Chambre syndical de la recherche et de la production du pétrole et de gaz, Comité des Techniciens, 1982. *Drilling mud and cement slurry rheology manual*. Editions TECHNIP. Paris, France, 107p.

[14] Derabla R et Benmalek M L. *Propriétés physico – mécaniques des ciments et des mortiers élaborés à base de laitier granulé d'HI-hadjar*. Séminaire National de Génie Civil, ENSET, Oran, Algérie, Octobre 2002.

[15] Salhi K et Mezghiche B. *Etude de durabilité de mortier et béton contenant de ciment avec ajouts de laitier granulé et sable de dune*. First International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries (SBEIDCO), ENSET Oran, Algeria, October 2009.

[16] Chabi S et Mezghiche B. *Etude de l'influence des additions minérales actives sur les caractéristiques physico-mécaniques des ciments pour les fondations immergées (cas du Sud Algérien)*. Premier Congrès International sur la Technologie et Durabilité du Béton CETIDUB1, USTHB, Bab-Ezzouar, Algérie, Mai 2004.