

---

# Influence du ciment sur le gonflement et la microstructure d'une argile naturelle d'Algérie

**Bourokba Mrabent Souad Amel** <sup>1\*</sup> — **Hachichi Abdelkader**<sup>1</sup> — **Bengraa Lahouaria**<sup>1</sup> — **Fleureau Jean Marie**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Département de Génie Civil Université des Sciences et Technologie Mohamed Boudiaf Oran, Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire MSS-Mat, Ecole Centrale Paris & CNRS UMR 8579, Châtenay-Malabry, France.

\*sa\_bourok@yahoo.fr

---

*RÉSUMÉ. La sécheresse qui a sévi en Algérie durant les trois dernières décennies et plus particulièrement dans les régions de l'Ouest du pays a fait subir aux bâtiments construits sur des sols gonflants des dommages considérables tels que les fissurations et le soulèvement de fond de fouilles. Nous nous sommes intéressés au comportement d'un sol gonflant de la région d'Oran situé au Nord Ouest de l'Algérie. On a d'une part, apprécié l'influence de l'ajout du ciment à différents pourcentages sur le potentiel de gonflement, la pression de gonflement et les limites de consistance de ce sol, et d'autre part nous avons étudié l'influence de ces ajouts sur sa microstructure par des observations au microscope électronique à balayage (MEB).*

*ABSTRACT. During the last three decades the drought in Algeria and particularly in the Northwest region has sustained a lot of damage to constructions built in swelling soils. We were interested in the behaviour of an expansive soil from the city of Oran in Northwest part of Algeria. In the first hand we studied the effect of cement in the swelling potential, the swelling pressure and the limits of consistence of this soil, in the other hand we studied the effect of cement in the microstructure of the soil using electronic microscope.*

*MOTS-CLÉS: argile- gonflement – pression de gonflement – ciment -Algérie*

*KEYWORDS: clay –swelling-swelling pressure – cement-Algeria*

---

## 1. Introduction

Le traitement des sols est souvent utilisé pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs. La stabilisation du gonflement par ajout de ciment a fait l'objet de plusieurs études (Cabane 2004 ; Al-Rawas et al. 2005) et toutes ces études confirment le rôle positif qu'a cet ajout sur la réduction du gonflement des sols expansifs.

Dans cette article, on va d'une part, apprécier l'influence de l'ajout du ciment à différents pourcentages sur le potentiel de gonflement, la pression de gonflement et les limites de consistance de l'argile étudiée, et d'autre part, étudier l'influence de ces ajouts sur la microstructure de cette argile par des observations au microscope électronique à balayage (MEB). Ces observations nous permettront d'avoir une meilleure compréhension des traitements et connaître la disposition des grains dans les différents mélanges.

## 2. Localisation du site et identification géotechnique

Les essais ont été réalisés sur l'argile de Mers El Kébir (Nord Ouest de l'Algérie). Le matériau de Mers El Kébir a fait l'objet de recherches antérieures (Hachichi & Fleureau, 1999 ; Hachichi et al. 2007 ; Bourokba et al. 2010 ; Bourokba, 2011). Les argiles du Miocène proviennent d'un site localisé dans la dépression de Mers el Kébir. Il s'agit en fait d'un fossé d'effondrement entre le Djebel Aïdour au Sud-Est et le Djebel Santon vers le Nord Ouest.

Les sédiments d'origine marine se sont déposés en une couche assez épaisse (300 m) durant le Tortonien. La formation est principalement constituée d'illite et de monmorillonite, avec un taux appréciable de carbonate de calcium.

Les résultats des essais d'identification sont rassemblés dans le Tableau 1. D'après les classifications LCPC1 /USCS2, la marne de Mers El Kébir est peu plastique ( $A_p$  (LCPC) = CL (USCS)). Son activité  $A_c$  est élevée avec un pourcentage d'éléments inférieurs à 2  $\mu\text{m}$  de 26 %. La surface spécifique totale déduite de l'essai au bleu de méthylène par la formule de Tran Ngoc Lan, 1977 est de 189  $\text{m}^2/\text{g}$ . A l'optimum Proctor normal (OPN), la densité sèche est de 1,63 et la teneur en eau est de 20%.

---

1 Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées

2 Unified Soil Classification System

**Tableau 1.** Paramètres d'identification de l'argile étudiée.

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur du matériau utilisé
Masse volumique des grains solides (NF P94-054)	$\rho_s$	Mg/m <sup>3</sup>	2,67
Limite de liquidité (NF P94-051)	$w_L$	%	49
Limite de plasticité (NF P94-051)	$w_P$	%	21-21,5
Indice de plasticité (= $w_L - w_P$ )	IP	%	27,5-28
Limite de retrait (NF P94-051)	$W_R$	%	12
Pourcentage d'éléments inférieurs à 2 $\mu\text{m}$ (NF P94-057)	F2	%	26
Activité (= IP / F2)	Ac		1,10
Valeur de bleu de méthylène (NF P94-068)	VBS	%	9,0
Surface spécifique totale =21 VBS (Tran Ngoc Lan 1977)	SST	m <sup>2</sup> /g	189
Teneur en carbonate de calcium (NF X31-106)	CaCO <sub>3</sub>	%	18
Masse volumique sèche à l'OPN (NF P94-093)	$\rho_{d \text{ max}}$	Mg/m <sup>3</sup>	1,63
Teneur en eau optimale (NF P94-093)	$w_{\text{opt}}$	%	20

### 3. Préparation des échantillons

Les essais ont été effectués sur des échantillons remaniés. Après avoir broyé finement le sol, la poudre est mélangée à l'eau de façon homogène puis compactée sous presse à vitesse lente (1,27 mm/min) dans un moule de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur. La teneur en eau des échantillons est fixée à 20% et leur densité sèche à 1,63 (teneur en eau et densité sèche de l'optimum Proctor).

#### 4 .Influence du ciment sur les limites de consistance

Les limites d'Atterberg sont des paramètres essentiels dans l'estimation du potentiel de gonflement des sols expansifs. Afin d'étudier l'influence de la stabilisation sur les limites de consistance de l'argile de Mers El Kébir, des mesures des limites de liquidité et de plasticité ont été effectuées avec le ciment à différents pourcentages. Les résultats de ces essais sont consignés dans le tableau 2.

**Tableau 2.** Limites de consistance mesurées en présence de ciment

Matériaux	Limites d'Atterberg	H <sub>2</sub> O	CIMENT		
			2%	4%	6 %
Mers El Kébir	w <sub>L</sub>	49	47	44	42
	w <sub>P</sub>	21	23	25	27
	I <sub>P</sub>	28	24	19	15

A partir de ces résultats on constate que :

Dans la plupart des cas il se produit une diminution sensible de l'indice de plasticité. D'après ces résultats, nous remarquons que l'influence du ciment est très appréciable, la diminution de la limite de liquidité est proportionnelle au pourcentage de ciment ajouté, de 49% pour l'argile non traité à 42% pour un ajout de 6% ciment.

Par contre la limite de plasticité croît en fonction du pourcentage d'ajout, elle varie de 21% pour l'argile non traitée, à 27% pour un ajout 6% de ciment. Ceci influe directement sur l'indice de plasticité qui diminue de moitié.

La diminution de w<sub>L</sub> est en accord avec les résultats publiés (Handy, 1961 ; Bell, 1994). Ceci peut être expliqué par la réaction de floculation des grains d'argiles à cause de la présence de Ca<sup>++</sup> et OH<sup>-</sup> qui jouent un rôle important en diminuant l'épaisseur de la double couche. La diminution de la limite de liquidité peut être aussi expliquée par la diminution de la surface spécifique (Bourokba, 2011).

## 5. Influence de l'ajout de ciment sur le potentiel de gonflement et sa pression

Les essais utilisés pour mesurer le potentiel et la pression de gonflement ont été réalisés pour différents pourcentages de ciment et pour des temps de mûrissements de (1 heure, 7 j, 14 j, 28 j, 90j et 180 j).

Les essais sont effectués sur des échantillons de 20 mm de diamètre et 50 mm de hauteur, compactés à l'OPN ( $\rho_d = 1.64 \text{ Mg/m}^3$  ;  $w_{opt} = 20\%$ ).

### 5.1. Procédure expérimentale

Afin d'étudier l'effet du ciment sur le gonflement de l'argile de Mers El Kébir, nous avons mélangé les échantillons avec les ajouts à différents pourcentages.

Nous avons ensuite mesuré le gonflement  $G$  en fonction du temps jusqu'à stabilisation. Le gonflement final est comparé au gonflement final de l'argile saturée à l'eau. La réduction du gonflement final  $\Delta G/G$  exprimée en pourcents est la différence entre le gonflement à l'eau et avec les solutions salines, rapportée au gonflement final en présence d'eau.

La réduction du gonflement en pourcents est donnée par la relation :

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{G_0(\%) - G_{\text{ajout}}(\%)}{G_0(\%)} \quad [1]$$

Avec :  $G_0$  : gonflement de l'argile sans ajout.

$G_{\text{ajout}}$  : gonflement de l'argile + l'ajout à un certain pourcentage

Pour étudier l'effet de l'ajout sur la pression de gonflement des argiles étudiées, nous avons procédé à la saturation des échantillons. Ensuite, nous avons mesuré la pression de gonflement des échantillons stabilisés en utilisant la méthode de gonflement à volume constant. La pression de gonflement est comparée à la pression de gonflement du sol non traité.

La réduction de la pression de gonflement, en pourcents, est donnée par la relation :

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{P_0(\%) - P_{\text{ajout}}(\%)}{P_0(\%)} \quad [2]$$

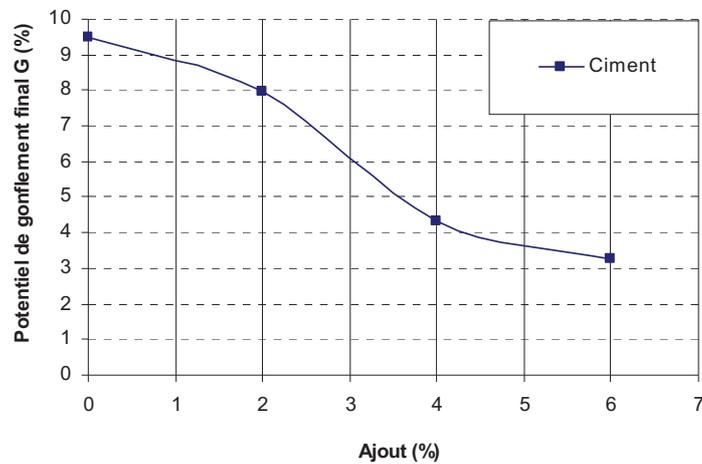
Avec :  $P_0$  : pression de gonflement de l'argile sans ajout.

$P_{\text{ajout}}$  : pression de gonflement de l'argile + l'ajout à un certain pourcentage

### 5.2. Réduction du potentiel de gonflement

Les mesures des potentiels de gonflement de l'argile stabilisée sont représentées sur la figure 1. Cette figure représente les différents pourcentages de réduction du potentiel de gonflement final (temps de mûrissement égal à 180 jours), en fonction du pourcentage de ciment.

A partir de ce graphe, nous remarquons que l'effet du ciment est significatif, et que le taux de gonflement le plus faible est obtenu pour l'argile stabilisée à 6% de ciment.

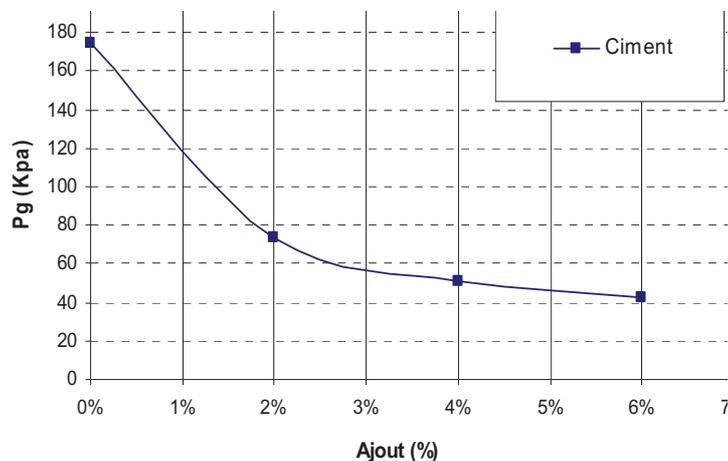


**Figure 1.** Influence des ajouts sur le potentiel de gonflement pour un temps de mûrissement de 180 jours.

### 5.3 Réduction de la pression de gonflement

Comme indiqué ci-dessus la mesure de la pression de gonflement des argiles traitées par le ciment est faite sur des échantillons compactés à l'OPN. Nous avons utilisé la méthode à volume constant (gonflement empêché par chargement).

Les valeurs des pressions finales des argiles stabilisées pour un temps de mûrissement de 180 jours sont présentées sur la figure 2.



**Figure 2.** Influence des ajouts sur la pression de gonflement.

D'après ce graphe, l'influence du ciment est très appréciable. Nous remarquons que la diminution de la pression de gonflement à 2% d'ajout est brutale. Au-delà de cette valeur la diminution se stabilise légèrement jusqu'à une valeur de 42 kPa qui correspond à un ajout de 6% de ciment.

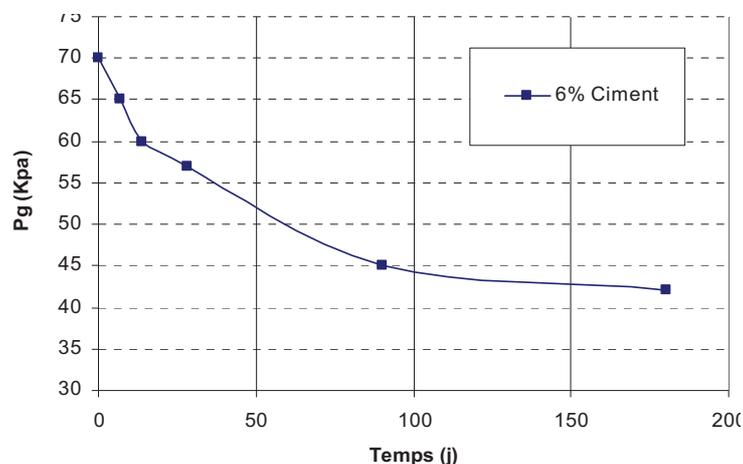
#### 5.4. Effet du temps de mûrissement sur la pression de gonflement

Les mesures de la pression de gonflement ont été effectuées après des temps de mûrissement d'1 heure, 7 j, 14 j, 28 j, 90 j, et 180 jours suivis par une saturation tout en empêchant la variation volumique de l'échantillon.

L'influence du temps de mûrissement sur la pression de gonflement a été étudiée pour un pourcentage de 6% de ciment et est représentée par la figure 3.

Le mûrissement a été réalisé en laissant les échantillons réagir avec le ciment à l'air libre et le mélange des deux.

On observe une diminution continue de la pression de gonflement avec le temps de mûrissement des échantillons traités. Ceci confirme la continuité de la réaction ciment/argile dans le temps. Cette diminution est maximale pour les échantillons traités à 6% de ciment.



**Figure 3.** Effet du temps de mûrissement sur la pression de gonflement.

Une hypothèse pouvant expliquer cette diminution est que le ciment hydraté réagit avec la silice et l'alumine dans le sol pour former un gel de CSAH, ce qui évolue ou/et se cristallise dans le temps, remplissant les vides en réduisant la possibilité de passage d'eau entre les particules. Cette baisse de la pression pourrait être aussi due à la précipitation de carbonate de calcium dans les vides à cause de la réaction entre le calcium ionisé et le  $\text{CO}_2$  dissous dans l'eau.

Finalement, on peut constater que la vitesse de diminution de la pression de gonflement, décroît avec le temps de mûrissement, ce qui traduit un ralentissement du taux de réaction ciment/argile.

## 6. Influence des ajouts sur la microstructure.

Pour mieux apprécier le changement que les ajouts apportent aux argiles, nous avons essayé d'analyser les changements de la microstructure, à partir d'observations au Microscope Electronique à Balayage (M.E.B). L'examen a été fait sur tous les échantillons traités ayant subi un gonflement.

### 6.1 Préparation des échantillons

Les échantillons traités au ciment sont compactés à l'OPN, et subissent ensuite des essais de gonflement. Afin que leur microstructure ne varie pas, on doit procéder à l'élimination de l'eau à l'intérieur des échantillons à analyser tout en conservant au mieux la texture du matériau. Pour cela, la technique qui semble la mieux adaptée pour notre matériau consiste à réaliser une dessiccation par lyophilisation (lyophilisateur de type Compact Flexi-dry). Ceux-ci, d'un volume de  $1 \text{ cm}^3$  environ, sont extraits de l'intérieur de l'éprouvette par simple coupe (figure 4).

Les échantillons sont introduits dans de l'azote liquide (Delage et Pellerin 1984), on réalise ensuite une sublimation de la glace dans le lyophilisateur pour le passage de l'état solide à l'état gazeux.

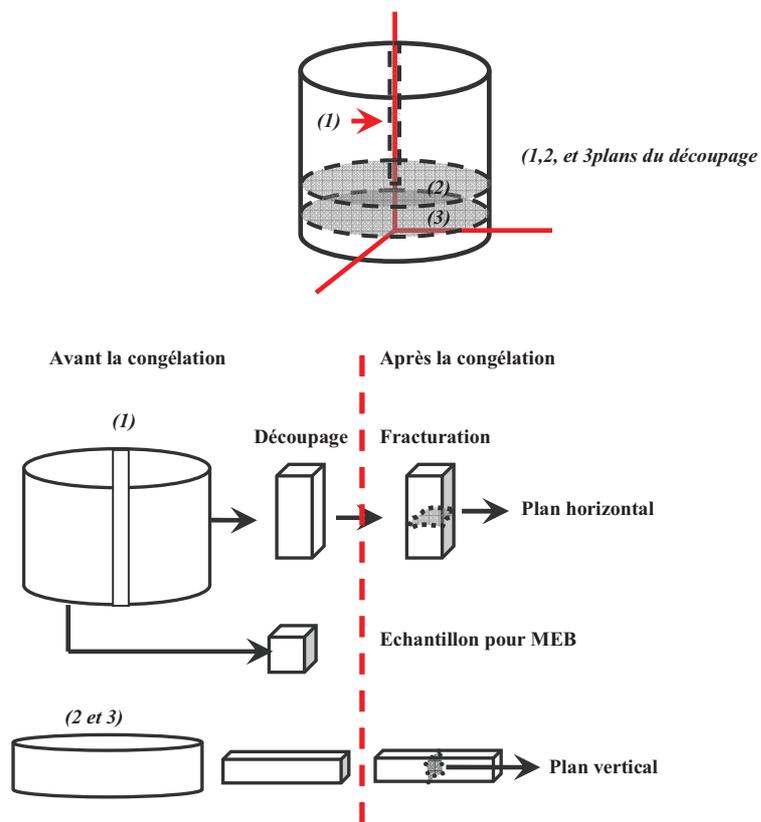


Figure 4. Plan de découpage et d'observation.

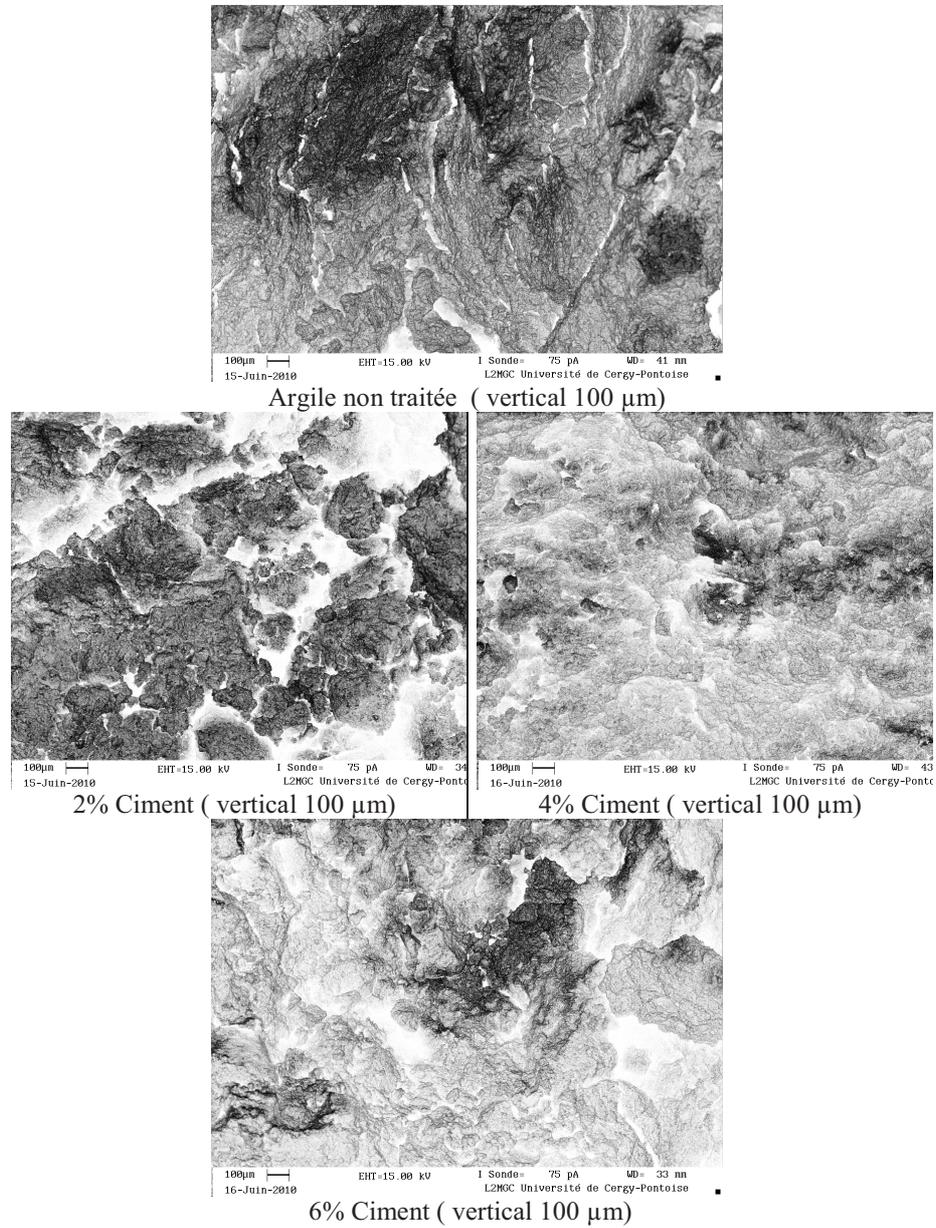
## **6.2. Examen au microscope électronique à balayage (MEB)**

Le principe du MEB consiste à balayer la surface de l'échantillon avec un pinceau d'électron, en analysant les électrons secondaires réémis par le matériau. Cette technique donne des images topographiques de la surface de l'échantillon avec une grande profondeur de champ.

A la fin des essais de gonflement, la méthode consiste à analyser, à partir d'observations au MEB, l'orientation des particules argileuses dans deux plans de l'éprouvette, (1) un plan horizontal et (2) un plan vertical. Deux échantillons parallélépipédiques sont prélevés au centre de l'éprouvette (figure 4) et les plans sont repérés par (1) ou (2). Les plans d'observation (1) et (2) sont obtenus par fracturation d'un coup sec porté au moyen d'une lame, dans le sens longitudinal des échantillons congelés.

Les observations du plan vertical sont représentées sur la figure 5. A travers cette figure, nous remarquons que le ciment influe sur la microstructure de l'argile. Cette influence varie en fonction du pourcentage d'ajout utilisé.

Le plan horizontal nous renseigne sur la forme des particules c'est pour cela qu'on s'est intéressé surtout au plan vertical car il nous renseigne sur l'empilement et les vides. A l'état naturel sur le plan vertical, la structure représente un bloc avec des pores. Pour les différents pourcentages d'ajout nous pouvons remarquer que les blocs sont conservés, le ciment agit sur chaque bloc pour tout en empêchant le gonflement. Pour un pourcentage de 4% nous remarquons la création de calcite, avec une cimentation. Le ciment forme une coque enrobant chaque grain d'argile. La coque sert à l'augmentation de volume de chaque grain et assure leur liaison.



**Figure 5.** *Microscopie Electronique à Balayage sur l'argile de Mers El Kébir traitée au ciment (plan vertical)*

## 7. CONCLUSION

A travers les essais effectués sur l'influence des ajouts sur plusieurs paramètres de cette argile; l'état de consistance, le potentiel et la pression de gonflement et la microstructure, plusieurs conclusions peuvent être tirées :

La limite de liquidité diminue et la limite de plasticité augmente avec le pourcentage du ciment ajouté. En conséquence, l'indice de plasticité (IP) subit une diminution très importante avec le traitement. L'addition d'un pourcentage supplémentaire jusqu'à 6% de ciment, à un faible effet sur ces limites, car la plasticité est principalement affectée par les réactions instantanées de la réaction ciment- argile.

Le ciment est un réducteur efficace du potentiel et de la pression de gonflement, et plus le pourcentage d'ajout augmente plus le gonflement et sa pression diminuent, cette évolution est valable pour tous les états initiaux.

A partir de l'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) des argiles traitées au ciment et pour les différents pourcentages d'ajouts nous pouvons remarquer que les blocs sont conservés, le ciment agit sur chaque bloc tout en empêchant le gonflement . Pour un pourcentage de 4% nous remarquons la création de calcite avec une cimentation.

## Remerciements

Les auteurs remercient Mme Salima Aggoun de l'Université de Cergy Pontoise de nous avoir aidé à réaliser les observations au microscope électronique à balayage (MEB) du matériau.

## 10. Références bibliographiques

- Al-Rawas A.A., Hugo A.W, Al-Sarmi H., « Effect of lime,cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman». *Building and Environment*, vol 40, Elsevier, pp. 267- 281, 2005.
- Bell F.G., «An assessment of cement PFA and lime-PFA used to stabilized clay-size materials». *Bulletin of the Association of Engineering Geology*, No.49, pp 25-32, Paris, 1994.
- Bourokba S A. , Hachichi A., Taïbi S., Fleureau J.-M., « Conductivité hydraulique non saturée de l'argile de Mers El Kébir ( Algérie) », *EJECE* ,Volume 14, n° 10, 2010.
- Bourokba S A., « Etude de la conductivité hydraulique et de la stabilisation par ajouts de liants hydrauliques de l'argile de Mers El Kébir ». Thèse de doctorat En Sciences , Université des Sciences et de la Technologie Med Boudiaf, Oran, Algérie, Janvier 2011.

XXIX<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

Cabane N., « Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne , 189 pages, 2004.

Delage P., Pellerin M., « Influence de la lyophilisation sur la structure d'une argile sensible du Québec ». *Clay Minerals*, Vol. 19, pp. 151-160, 1984.

Hachichi A., Fleureau J.-M., « Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie », *Revue Française de Géotechnique*, n° 86, 1999.

Hachichi A., Bourokba S. A., Fleureau J.-M., « Stabilisation chimique des sols gonflants de la région d'Oran », *Revue Française de Géotechnique*, n° 118, 2007.

Handy R.L., « Lime stabilization with cement and lime », Iowa Highway Research Board project HR-82, USA, 26pp, 1961.

Tran Ngoc Lan., «Nouvel essai d'identification des sols : l'essai au bleu de méthylène», *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, vol 88, pp. 136-137, Mars - Avril 1977.